



Organisation des Nations Unies
pour l'alimentation
et l'agriculture

2022



LA SITUATION
**MONDIALE DE
L'ALIMENTATION ET
DE L'AGRICULTURE**

**L'AUTOMATISATION DE L'AGRICULTURE AU
SERVICE DE LA TRANSFORMATION DES
SYSTÈMES AGROALIMENTAIRES**

Cette publication phare fait partie de la série **l'État du monde** de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture.

Référence bibliographique à citer:

FAO. 2022. *La Situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture 2022. L'automatisation de l'agriculture au service de la transformation des systèmes agroalimentaires*. Rome, FAO.
<https://doi.org/10.4060/cb9479fr>

Les appellations employées dans ce produit d'information et la présentation des données qui y figurent n'impliquent de la part de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) aucune prise de position quant au statut juridique ou au stade de développement des pays, territoires, villes ou zones ou de leurs autorités, ni quant au tracé de leurs frontières ou limites. La mention de sociétés déterminées ou de produits de fabricants, qu'ils soient ou non brevetés, n'entraîne, de la part de la FAO, aucune approbation ou recommandation desdites sociétés ou desdits produits de préférence à d'autres de nature analogue qui ne sont pas cités.

Les appellations employées et la présentation des données sur les cartes n'impliquent de la part de la FAO aucune prise de position quant au statut juridique ou constitutionnel des pays, territoires ou zones maritimes, ni quant au tracé de leurs frontières ou limites. Les lignes pointillées sur les cartes représentent des frontières approximatives dont le tracé peut ne pas avoir fait l'objet d'un accord définitif.

ISSN 0251-1460 (imprimé)

ISSN 1564-3360 (en ligne)

ISBN 978-92-5-137017-9

©FAO 2022



Certains droits réservés. Ce travail est mis à la disposition du public sous la licence Creative Commons - Attribution - Pas d'utilisation commerciale - Partage dans les mêmes conditions 3.0 Organisations internationales (CC BY-NC-SA 3.0 IGO; <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/igo/deed.fr>).

Selon les termes de cette licence, ce travail peut être copié, diffusé et adapté à des fins non commerciales, sous réserve de mention appropriée de la source. Lors de l'utilisation de ce travail, aucune indication relative à l'approbation de la part de la FAO d'une organisation, de produits ou de services spécifiques ne doit apparaître. L'utilisation du logo de la FAO n'est pas autorisée. Si le travail est adapté, il doit donc être sous la même licence Creative Commons ou sous une licence équivalente. Si ce document fait l'objet d'une traduction, il est obligatoire d'intégrer la clause de non responsabilité suivante accompagnée de la citation requise: «Cette traduction n'a pas été réalisée par l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). La FAO n'est pas responsable du contenu ou de l'exactitude de cette traduction. L'édition originale anglaise doit être l'édition qui fait autorité.»

Toute médiation relative aux différends en rapport avec la licence doit être menée conformément au Règlement d'arbitrage de la Commission des Nations Unies pour le droit commercial international (CNUDCI) actuellement en vigueur.

Documents de tierce partie. Les utilisateurs qui souhaitent réutiliser des matériels provenant de ce travail et qui sont attribués à un tiers, tels que des tableaux, des figures ou des images, ont la responsabilité de déterminer si l'autorisation est requise pour la réutilisation et d'obtenir la permission du détenteur des droits d'auteur. Le risque de demandes résultant de la violation d'un composant du travail détenu par une tierce partie incombe exclusivement à l'utilisateur.

Ventes, droits et licences. Les produits d'information de la FAO sont disponibles sur le site web de la FAO (www.fao.org/publications/fr/) et peuvent être acquis par le biais du courriel suivant: publications-sales@fao.org.

Les demandes pour usage commercial doivent être soumises à: www.fao.org/contact-us/licence-request.

Les demandes relatives aux droits et aux licences doivent être adressées à: copyright@fao.org.

PHOTOGRAPHIE DE COUVERTURE ©Sorapong Chaipanya/Shutterstock.com

THAÏLANDE. Vue aérienne d'un agriculteur utilisant une tablette dans une rizière verte.

2022

LA SITUATION
**MONDIALE DE
L'ALIMENTATION ET
DE L'AGRICULTURE**

**L'AUTOMATISATION DE L'AGRICULTURE AU
SERVICE DE LA TRANSFORMATION DES
SYSTÈMES AGROALIMENTAIRES**

Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
Rome, 2022

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS	v	
MÉTHODE	ix	
REMERCIEMENTS	x	
SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xi	
GLOSSAIRE	xii	
MESSAGES PRINCIPAUX	xvi	
RÉSUMÉ	xviii	
CHAPITRE 1		
QU'EST-CE QUE L'AUTOMATISATION DE L'AGRICULTURE ET EN QUOI EST-ELLE IMPORTANTE?	1	
Messages clés	1	
Quelle a été l'évolution jusqu'ici?	3	
Qu'est-ce que l'automatisation de l'agriculture?	4	
Pourquoi tirer parti de l'automatisation de l'agriculture? Comprendre les principaux moteurs de l'automatisation de l'agriculture	8	
Difficultés liées aux progrès de l'automatisation de l'agriculture	12	
Transformer les difficultés en possibilités	14	
Sur quoi porte le présent rapport?	15	
CHAPITRE 2		
COMPRENDRE LE PASSÉ ET ENVISAGER L'AVENIR DE L'AUTOMATISATION DANS LE SECTEUR AGRICOLE	19	
Messages clés	19	
Évolutions et facteurs de la mécanisation motorisée dans le monde entier	20	
La révolution numérique et sa capacité de transformer l'usage de la mécanisation motorisée et des pratiques agricoles	26	
L'état des technologies d'automatisation numérique et de la robotique dans l'agriculture	31	
Conclusion	40	
CHAPITRE 3		
INTÉRÊT ÉCONOMIQUE DES INVESTISSEMENTS DANS L'AUTOMATISATION DE L'AGRICULTURE	43	
Messages clés	43	
La mécanisation motorisée peut effectivement présenter un intérêt économique dans de nombreux contextes	45	
Examen de l'intérêt économique de l'automatisation numérique: enseignements tirés des études de cas	51	
Au-delà de l'intérêt économique: le rôle des investissements, des politiques et de la législation	56	
Trajectoires futures de l'automatisation de l'agriculture: quelques considérations sur l'adoption inclusive et la durabilité environnementale	58	
Conclusion	66	
CHAPITRE 4		
INCIDENCES SOCIOÉCONOMIQUES ET POSSIBILITÉS ASSOCIÉES À L'AUTOMATISATION DE L'AGRICULTURE	69	
Messages clés	69	
Analyse des incidences sociales de l'automatisation selon l'approche des systèmes agroalimentaires	70	
Effets de l'automatisation de l'agriculture sur la main-d'œuvre	73	
L'automatisation de l'agriculture ouvre de nouvelles possibilités entrepreneuriales et des débouchés porteurs de transformation qui auront des incidences sur la nutrition et les consommateurs	79	
Un processus inclusif d'automatisation de l'agriculture	80	
L'avenir de la main-d'œuvre agroalimentaire	85	
Conclusion	86	

CHAPITRE 5		
MESURES POSSIBLES EN FAVEUR D'UNE AUTOMATISATION EFFICACE, DURABLE ET INCLUSIVE DE L'AGRICULTURE		
Messages clés	89	
Vers une automatisation responsable de l'agriculture	89	
Politiques générales visant à mettre en place un environnement porteur	90	
Politiques, législation et investissements ciblant l'agriculture	93	
Politiques mises en place pour que l'automatisation de l'agriculture contribue à des systèmes agroalimentaires durables et résilients	96	
Politiques visant à favoriser une automatisation inclusive de l'agriculture, au service de tous	102	
Conclusion	104	
	108	
ANNEXES	111	
ANNEXE 1		
Description des études de cas	112	
ANNEXE 2		
Tableaux statistiques	140	
BIBLIOGRAPHIE	146	
TABLEAUX		
1 Nombre d'études de cas par échelle de production, niveau d'automatisation et secteur	17	
2 Dates importantes de l'automatisation numérique dans l'agriculture	32	
A2.1 Nombre de tracteurs utilisés par millier d'hectares de terres arables (dernière année disponible)	140	
FIGURES		
1 Cycle en trois phases des systèmes d'automatisation	5	
2 Évolution de l'automatisation agricole	6	
3 Part de l'emploi agricole par rapport à l'emploi total, par niveau de revenu des pays (en haut) et par région (en bas), 1991-2019	9	
4 Nombre de tracteurs utilisés pour 1 000 hectares de terres arables	22	
5 Exemples de technologies numériques et robotiques associées à l'intelligence artificielle, classées par système de production agricole	33	
6 Niveaux de préparation au changement d'échelle des technologies d'automatisation numérique	53	
7 Analyse des effets de l'automatisation sur l'emploi selon l'approche fondée sur les systèmes agroalimentaires	71	
8 Ensemble des mesures possibles en faveur d'une automatisation responsable de l'agriculture	91	
ENCADRÉS		
1 Remédier aux problèmes en matière de données sur l'utilisation des machines agricoles	21	
2 La mécanisation en Afrique subsaharienne	25	
3 Des outils numériques pour améliorer l'accès aux services de mécanisation	28	
4 Outils numériques sans lien avec la mécanisation: les solutions non incorporées	30	
5 Automatisation numérique de la production animale: exemples recueillis en Amérique latine, en Afrique et en Europe	34	
6 Nouvelles technologies aquacoles: exemples recueillis en Inde et au Mexique	37	
7 Évolution du secteur des forêts: mécanisation et automatisation numérique	38	

TABLE DES MATIÈRES

8 Analyse comparative coûts-avantages de la mécanisation et de la traction manuelle et/ou animale dans la production de blé: éléments recueillis en Éthiopie et au Népal	46	
9 Tirer parti de l'automatisation de l'agriculture pour améliorer la sécurité sanitaire des aliments	48	
10 Renforcer la résilience des petits producteurs par la petite mécanisation motorisée	49	
11 En Égypte, la plantation mécanisée sur plates-bandes surélevées contribue à l'amélioration de la productivité et à l'utilisation durable de l'eau	50	
12 En République démocratique populaire lao, les semoirs à tambour font économiser du temps, des efforts et de l'argent	51	
13 Evolution de l'intérêt économique des systèmes de traite robotisée	52	
14 Impact du projet de pulvérisateur numérique pour vergers de l'Union européenne: éléments recueillis en Pologne et en Hongrie	55	
15 La pandémie de covid-19 a aiguisé l'intérêt pour les technologies numériques: éléments recueillis dans le cadre de deux études de cas	56	
16 Des robots cueilleurs pour remédier aux pénuries de main-d'œuvre dans la culture des fraises	60	
17 Intérêt économique de l'adoption de la mécanisation motorisée par les femmes: éléments recueillis au Népal	61	
18 Robots de culture autonomes à bas coût: un tableau à grands traits	64	
19 Analyse de l'automatisation de l'agriculture sous l'angle de l'emploi décent	74	
20 Effets de la récolte mécanisée de la canne à sucre sur la main-d'œuvre au Brésil	77	
21 Automatisation et communautés rurales d'origine des migrants: le cas de la Californie	79	
22 Inclusion des personnes handicapées	82	
23 Inclusion des femmes et des jeunes: éléments recueillis au moyen des études de cas	83	
24 «Des femmes sur le siège conducteur»: faire progresser l'autonomisation des femmes grâce au tracteur	84	
25 Différents types de soutien des pouvoirs publics pouvant favoriser l'automatisation de l'agriculture	92	
26 Réseau à haut débit ouvert à Komen (Slovénie)	95	
27 Stratégies nationales en faveur d'une adoption plus large des outils numériques dans le secteur agricole africain	97	
28 Adaptation de l'automatisation numérique à différents contextes: éléments factuels issus de 27 études de cas	100	

AVANT-PROPOS

Le présent rapport plonge au cœur d'une réalité: l'agriculture fait actuellement l'objet d'une transformation technologique profonde, et cette évolution ne fait que s'accélérer. De nouvelles technologies que l'on n'aurait pu imaginer quelques années plus tôt apparaissent sans cesse. Dans le domaine de l'élevage, par exemple, certains pays adoptent de plus en plus souvent des technologies fondées sur le marquage électronique des bêtes – notamment des robots de traite et des dispositifs d'alimentation de la volaille. Le guidage à l'aide d'un système mondial de navigation par satellite permet une automatisation de la production végétale grâce à l'autoguidage des tracteurs, des épandeurs d'engrais et des pulvérisateurs de pesticides. Des technologies encore plus avancées arrivent sur le marché dans tous les secteurs. Dans le domaine de la production végétale, des machines autonomes telles que des robots de désherbage commencent à être commercialisées, tandis que des aéronefs sans équipage à bord (couramment appelés «drones») recueillent des informations qui servent à la gestion des cultures et à l'application des intrants. En aquaculture, les technologies d'automatisation de l'alimentation et du suivi sont de plus en plus souvent utilisées. En matière forestière, l'automatisation repose principalement sur des machines permettant de débiter des grumes et de les transporter. Un grand nombre des technologies les plus récentes facilitent l'agriculture de précision, stratégie de gestion des cultures qui se sert de l'information pour optimiser l'utilisation des intrants et des ressources.

Cette évolution technologique récente peut stupéfier et fasciner, suscitant le désir d'en apprendre davantage. Il est toutefois essentiel de se rappeler que le changement technologique n'est pas un phénomène nouveau et, surtout, que les acteurs des systèmes agroalimentaires n'y ont pas tous accès. La FAO étudie le sujet depuis des décennies. Ce que nous connaissons aujourd'hui n'est rien d'autre qu'une phase de consolidation – au stade actuel – d'un long processus d'évolution technologique de l'agriculture qui s'est accéléré au cours des deux derniers siècles.

Ce processus a permis d'accroître la productivité, de réduire la pénibilité des travaux agricoles, de libérer de la main-d'œuvre pour d'autres activités et, au bout du compte, d'améliorer les moyens de subsistance et le bien-être humain. Les machines et le matériel ont apporté des améliorations aux trois étapes clés des travaux agricoles, à savoir l'analyse, la prise de décision et l'exécution, jusqu'à les prendre totalement en charge dans certains cas. L'évolution historique fait apparaître cinq niveaux technologiques: introduction d'outils manuels; utilisation de la traction animale; mécanisation motorisée à partir des années 1910; utilisation d'équipements numériques à partir des années 1980; et, plus récemment, recours à la robotique. L'automatisation dont il est question dans le présent rapport commence réellement avec la mécanisation motorisée, qui a permis d'automatiser considérablement la phase d'exécution des travaux agricoles. Les technologies numériques récentes et la robotique, quant à elles, permettent une automatisation progressive des phases d'analyse et de prise de décision. Comme le présent rapport le souligne, cette évolution est en cours, mais les producteurs agricoles du monde entier n'en sont pas tous au même stade.

On ne peut nier que les inquiétudes suscitées par les effets socioéconomiques préjudiciables – notamment les pertes d'emploi et le chômage qui s'ensuit – qui peuvent découler d'un changement technologique visant à réduire la charge de travail sont largement partagées. Ces craintes remontent au moins au début du XIX^e siècle. Pourtant, rétrospectivement, la peur que l'automatisation, qui augmente la productivité du travail, ne conduise nécessairement à un chômage à grande échelle ne se confirme pas dans les faits. Cela s'explique par le fait que l'automatisation de l'agriculture s'inscrit dans un processus de transformation structurelle des sociétés dans le cadre duquel l'accroissement de la productivité de la main-d'œuvre agricole libère progressivement des travailleurs de ce secteur, qui peuvent alors exercer une activité lucrative dans d'autres branches, comme l'industrie et les

AVANT-PROPOS

services. Au fil de cette transformation, la part de la population employée dans l'agriculture diminue naturellement, tandis que des emplois se créent dans d'autres secteurs. Ce mouvement s'accompagne généralement de changements dans les systèmes agroalimentaires, les secteurs amont et aval évoluant et créant de nouveaux emplois et de nouvelles possibilités entrepreneuriales. C'est pourquoi il est essentiel de considérer l'agriculture comme étant un élément important de systèmes agroalimentaires plus vastes.

Le présent rapport met en lumière les avantages potentiels d'une automatisation de l'agriculture, qui sont multiples et peuvent contribuer à transformer les systèmes agroalimentaires de sorte qu'ils deviennent plus efficaces, plus productifs, plus résilients, plus durables et plus inclusifs. L'automatisation offre de nombreuses possibilités: accroître la productivité de la main-d'œuvre et la rentabilité de l'agriculture; améliorer les conditions de travail des travailleurs agricoles; créer de nouvelles possibilités entrepreneuriales en milieu rural, ce qui présente un intérêt particulier pour la jeunesse rurale; contribuer à réduire les pertes de produits alimentaires et améliorer la qualité et la sécurité sanitaire des aliments. Elle peut aussi comporter des avantages en matière de durabilité environnementale et d'adaptation aux effets du changement climatique. Des solutions récentes faisant intervenir l'agriculture de précision et l'utilisation de petit matériel – souvent mieux adapté aux conditions locales que les engins lourds auxquels fait appel la mécanisation motorisée – peuvent améliorer la durabilité environnementale et la résilience face aux aléas climatiques et à d'autres chocs. Ces nombreux avantages permettent aussi à l'automatisation de l'agriculture de contribuer à concrétiser plusieurs des objectifs de développement durable (ODD).

Cela étant, les risques et les problèmes associés à l'automatisation ne sont pas ignorés dans le présent rapport. Comme tout changement technologique, l'automatisation de l'agriculture ne va pas sans perturber les systèmes agroalimentaires. Si elle s'opère

rapidement et sans tenir compte des conditions socioéconomiques ni de la situation du marché du travail au niveau local, elle peut effectivement entraîner des pertes d'emplois – conséquence courante qu'il est nécessaire de prévenir. En outre, l'automatisation peut accroître la demande de main-d'œuvre hautement qualifiée tout en réduisant celle des travailleurs non qualifiés. Si les grands exploitants agricoles prospères ont un accès plus facile à l'automatisation que les producteurs travaillant à moindre échelle et moins fortunés, celle-ci présente alors le risque de creuser les inégalités, et ce phénomène doit être évité à tout prix. Si elle n'est pas gérée correctement ni adaptée aux conditions locales, l'automatisation, et en particulier la mécanisation faisant appel à des engins lourds, peut mettre la durabilité agricole en péril. Ces risques, bien réels, sont pris en considération et analysés dans le présent rapport.

Pourtant, comme ce même rapport l'indique, fermer la porte à l'automatisation n'est pas une solution d'avenir. La FAO est intimement convaincue que, sans progrès technologique et sans gains de productivité, il est impossible de libérer des centaines de millions de personnes de la pauvreté, de la faim, de l'insécurité alimentaire et de la malnutrition. Refuser l'automatisation pourrait signifier condamner à jamais les travailleurs agricoles à un travail peu productif et à de maigres revenus en retour. La question essentielle n'est pas de savoir s'il faut ou non se tourner vers l'automatisation, mais comment celle-ci doit être mise en œuvre dans la pratique. Nous devons nous assurer que cette évolution s'opère de façon inclusive et favorise la durabilité.

Dans l'ensemble de ce rapport, la FAO expose l'idée d'un changement technologique responsable, pour faire de l'automatisation de l'agriculture une réussite. Que cela implique-t-il?

Premièrement, l'automatisation de l'agriculture doit s'inscrire dans un processus de transformation agricole qui se déroule en parallèle avec des évolutions plus générales de la société et des systèmes agroalimentaires

et qui facilite ces évolutions et s'en trouve facilité en retour. Pour ce faire, il est essentiel que le recours à l'automatisation réponde à des motivations concrètes. Ainsi, les technologies qui permettent de réduire la charge de travail peuvent servir le processus de transformation de l'agriculture si elles répondent à une raréfaction croissante de la main-d'œuvre et à une hausse des salaires ruraux. À l'inverse, si les facteurs qui incitent à adopter l'automatisation ou des technologies d'automatisation particulières sont créés artificiellement au moyen de subventions publiques, par exemple – en particulier dans des situations où la main-d'œuvre est abondante –, le recours à l'automatisation peut se révéler extrêmement pernicieux et avoir des effets préjudiciables sur le marché du travail et dans le domaine socioéconomique. Cela étant, il est tout aussi important que les politiques publiques ne fassent pas obstacle à l'automatisation, car cela pourrait revenir à condamner durablement les producteurs et les travailleurs agricoles à une faible productivité et à un défaut de compétitivité. Le présent rapport indique que le rôle des pouvoirs publics est de créer un environnement propice à l'utilisation des solutions d'automatisation qui conviennent, plutôt que de prôner directement l'adoption de solutions spécifiques dans des contextes où celles-ci pourraient ne pas être adaptées, ou de bloquer l'adoption de l'automatisation de quelque manière que ce soit.

Pour aller dans le sens des ODD, l'automatisation doit être inclusive. Elle doit ouvrir des perspectives à tous, des petits producteurs aux grandes exploitations commerciales, sans oublier les groupes marginalisés, tels que les femmes, les jeunes et les personnes handicapées. Les obstacles à son adoption doivent être levés, surtout pour les femmes. Pour que toutes les catégories de producteurs puissent bénéficier de solutions techniques adaptées, il faut que l'accès à ces technologies ne dépende pas de la taille de l'exploitation, c'est-à-dire que celles-ci puissent fonctionner quelle que soit l'échelle de production et qu'elles soient accessibles à tous grâce à des mécanismes institutionnels comme

les services partagés. Il est essentiel également de renforcer les compétences numériques par l'éducation et la formation, de façon à faciliter le recours aux technologies et à éviter qu'un fossé numérique se creuse sous l'effet d'inégalités en matière de connaissances ou de compétences.

Pour améliorer la durabilité et avoir des effets véritablement inclusifs et porteurs de transformation, les solutions d'automatisation doivent être adaptées au contexte local, c'est-à-dire non seulement aux caractéristiques des producteurs, mais aussi aux conditions biophysiques, topographiques, climatiques et socioéconomiques. Le présent rapport se veut réaliste et ne propose donc aucune solution universelle. Les technologies les plus évoluées ne sont pas nécessairement les plus appropriées partout et pour tous. Comme le montrent les éléments factuels présentés, des technologies simples (petites machines, voire outils à main) peuvent présenter dans certains cas des avantages considérables pour les petits producteurs et permettre de produire sur des terres accidentées. Il peut même arriver que des producteurs soient en mesure de sauter des étapes et d'adopter directement les solutions technologiques les plus avancées. L'essentiel est que ce soit les producteurs agricoles eux-mêmes qui choisissent les technologies les mieux adaptées à leurs besoins, les pouvoirs publics se contentant de créer un environnement propice à ce choix.

Enfin, le présent rapport expose aussi l'idée selon laquelle l'automatisation doit contribuer à rendre l'agriculture plus durable et plus résiliente. Jusqu'à présent, l'utilisation d'engins lourds opérant à grande échelle a souvent eu des effets défavorables sur la durabilité environnementale. Pour remédier à cela, il faut adapter la mécanisation à des machines plus petites et plus légères. D'autre part, l'agriculture numérique et la robotique, qui facilitent l'agriculture de précision, offrent des solutions qui permettent d'utiliser les ressources de manière plus efficiente et plus durable sur le plan environnemental. La recherche technique et

AVANT-PROPOS

agronomique appliquée peut aider à trouver des solutions propres à favoriser la progression vers la durabilité environnementale.

Ces questions sont examinées en détail dans le présent rapport: l'automatisation de l'agriculture est analysée de façon objective et approfondie, les mythes infondés qui l'entourent sont déconstruits et des voies à suivre sont proposées aux fins de son adoption dans différents contextes nationaux et locaux. Ce document définit des domaines clés d'action publique et d'investissement permettant de faire en sorte que l'automatisation contribue à un développement inclusif et durable.

La FAO est résolument et stratégiquement convaincue de l'importance des technologies, de l'innovation et des données, soutenues par une gouvernance, des institutions et un capital humain adéquats, et les considère comme des accélérateurs transversaux essentiels de toutes ses interventions programmatiques, utilisés pour en stimuler les effets et limiter au minimum les arbitrages à opérer. Il ne fait aucun doute que ces accélérateurs auront un rôle de catalyseurs de la transformation agricole dans tous les contextes. J'espère que le présent rapport de la FAO contribuera de façon constructive au débat public dans ce domaine, qui revêt une importance majeure pour la concrétisation des ODD.



Qu Dongyu
Directeur général de la FAO

MÉTHODE

L'élaboration de *La Situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture 2022* a commencé par la création d'un groupe consultatif, composé de toutes les unités techniques pertinentes de la FAO et d'un groupe d'experts extérieurs, et épaulé par une équipe chargée des recherches et de la rédaction. Le rapport a été établi à partir de six documents de référence et d'une analyse empirique originale réalisée par la FAO et des experts extérieurs. Le groupe consultatif s'est réuni à distance le 24 janvier 2022 pour définir le plan du rapport. En mars 2022, il a formulé des observations sur l'avant-projet des chapitres 1 et 2. Les avant-projets de tous les chapitres ont été présentés au groupe consultatif et au groupe d'experts extérieurs avant un atelier qui s'est tenu en ligne du 31 mars au 6 avril 2022, sous la présidence du Directeur adjoint de la Division de l'économie agroalimentaire de la FAO. Le rapport a été révisé sur la base des indications données lors de l'atelier et par le groupe consultatif, qui s'est réuni à la suite de celui-ci, puis il a été présenté à l'équipe de direction de l'axe Développement économique et social de la FAO. La version révisée a été soumise aux équipes des autres axes de l'Organisation et aux bureaux régionaux de la FAO pour l'Afrique, l'Amérique latine et les Caraïbes, l'Asie et le Pacifique, l'Europe et l'Asie centrale, et le Proche-Orient et l'Afrique du Nord afin de recueillir leurs observations. Ces observations ont été incorporées dans le projet final, qui a été examiné par le Directeur adjoint de la Division de l'économie agroalimentaire, l'Économiste en chef de la FAO et le Bureau du Directeur général.

REMERCIEMENTS

La Situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture 2022 a été élaborée par une équipe multidisciplinaire de la FAO, sous la direction de Marco V. Sánchez Cantillo, Directeur adjoint de la Division de l'économie agroalimentaire, et d'Andrea Cattaneo, Économiste principal et coordonnateur de la publication. Máximo Torero Cullen, Économiste en chef, et l'équipe de direction de l'axe Développement économique et social, ont donné des orientations générales.

ÉQUIPE CHARGÉE DES RECHERCHES ET DE LA RÉDACTION

Theresa McMenomy, Fergus Mulligan (réacteur consultant), Ahmad Sadiddin, Jakob Skøt et Sara Vaz.

DOCUMENTS DE RÉFÉRENCE

Christina Cappello (Université et Institut de recherche de Wageningue [WUR]), Tomaso Ceccarelli (WUR), Aneesh Chauhan (WUR), Diane Charlton (Université de l'État du Montana), Thoman Daum (Université de Hohenheim), Alexandra Hill (Université de l'État du Colorado), Sander Janssen (WUR), Inder Kumar (WUR), James Lowenberg-DeBoer (Université Harper Adams), Mariette McCampbell (WUR), Giacomo Rambaldi (WUR), David Rose (Université de Reading) et Edward Taylor (Université de Californie).

CONTRIBUTIONS EXTÉRIEURES SUPPLÉMENTAIRES

Rabe Yahaya (Centre international pour l'amélioration du maïs et du blé [CIMMYT]).

CONTRIBUTIONS SUPPLÉMENTAIRES DE LA FAO

Veronica Boero, Alban Lika, Madhusudan Singh Basnyat, Atef Swelam et Michele Vollaro.

GROUPE CONSULTATIF DE LA FAO

Maysoon Alzoubi, Huda Alsahi, Marwan Benali, Henry Burgsteden, Aziz Elbehri, Mayling Flores Rojas, Ken Lohento, Magnus Grylle, Karim Houmy, Dejan Jakov Ijevic, Josef Kienzle, Lan Li, Preetmoninder Lidder, Joseph Mpagalile, Ahmad Mukhtar, Eva Galvez Nogales, Santiago Santos Valle, Beate Scherf, Josef Schmidhuber et Xinhua Yuan.

GROUPE D'EXPERTS EXTÉRIEURS

Imran Ali (Université du Queensland central), Christina Cappello (WUR), Tomaso Ceccarelli (WUR), Aneesh Chauhan (WUR), Diane Charlton (Université de l'État du Montana), Thomas Daum (Université de Hohenheim), Kit Franklin (Université Harper Adams), Alexandra Hill (Université de l'État du Colorado), Ivo Hostens (Association européenne de l'industrie des machines agricoles), Sander Janssen (WUR), Inder Kumar (WUR), James Lowenberg-DeBoer (Université Harper Adams), Mariette McCampbell (WUR), Giacomo Rambaldi (WUR), David Rose (Université de Reading), Salah Sukkarieh (Université de Sydney) et Edward Taylor (Université de Californie).

ANNEXES

Les annexes ont été mises au point par Ahmad Sadiddin et Sara Vaz, appuyés par l'équipe de l'Université et de l'Institut de recherche de Wageningue: Christina Cappello, Tomaso Ceccarelli, Aneesh Chauhan, Sander Janssen, Inder Kumar, Mariette McCampbell et Giacomo Rambaldi.

APPUI ADMINISTRATIF

Liliana Maldonado a assuré l'appui administratif.

La traduction a été réalisée par la Sous-Division des langues (CSGL) de la Division des services aux organes directeurs (CSG) de la FAO.

La Sous-Division des publications (OCCP) du Bureau de la communication (OCC) de la FAO a apporté un appui rédactionnel et s'est chargée de la conception et de la mise en page du document, ainsi que de la coordination de la production dans les six langues officielles.

SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AEC	agriculture en environnement contrôlé	ICRISAT	Institut international de recherche sur les cultures des zones tropicales semi-arides
AGRISurvey	Programme d'enquête agricole et rurale intégrée	Io	internet des objets
CAAS	Académie chinoise des sciences agricoles	IFC	Société financière internationale
CEPALC	Commission économique pour l'Amérique latine et les Caraïbes	IFPRI	Institut international de recherche sur les politiques alimentaires
CESAP	Commission économique et sociale pour l'Asie et le Pacifique	IICA	Institut interaméricain de coopération pour l'agriculture
CMAD	Centre pour la mécanisation agricole durable	LSMS	Étude sur la mesure des niveaux de vie de la Banque mondiale
CNUCED	Conférence des Nations Unies sur le commerce et le développement	MV	vision industrielle
covid-19	maladie à coronavirus 2019	ODD	objectif de développement durable
CSA	Comité de la sécurité alimentaire mondiale	OIT	Organisation internationale du Travail
CTA	Centre technique de coopération agricole et rurale	OMS	Organisation mondiale de la Santé
CUA	Commission de l'Union africaine	ONU	Organisation des Nations Unies
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture	PAM	Programme alimentaire mondial
FAOSTAT	Base de données statistiques fondamentales de l'Organisation	RuLIS	Système d'information sur les moyens d'existence ruraux de la FAO
FIDA	Fonds international de développement agricole	RVI	réponse vocale interactive
FMIS	Système d'information de gestion agricole	SIG	système d'information géographique
GES	gaz à effet de serre	SMS	service de messages courts
GIZ	Agence allemande de coopération internationale	TIC	technologies de l'information et de la communication
GNSS	système mondial de navigation par satellite	TTV	technologie à taux variable
GPS	système de positionnement global	UA	Union africaine
ha	hectare	UAS	système d'aéronef sans équipage à bord
IA	intelligence artificielle	UAV	aéronef sans équipage à bord
ICARDA	Centre international de recherche agricole dans les zones arides	UIT	Union internationale des télécommunications
		UNICEF	Fonds des Nations Unies pour l'enfance
		USSD	données de service supplémentaires non structurées

GLOSSAIRE

Aéronef sans équipage à bord (UAV) ou drone.

Machine volante autonome. Elle peut être guidée à l'aide d'une télécommande ou d'un dispositif commandé par un logiciel. Dans l'agriculture, ce type de machine est souvent utilisé pour recueillir des images aériennes ou pour épandre des engrains, des semences, des pesticides ou d'autres intrants destinés aux cultures^{5,9}.

Agriculture de conservation (également appelée « travail de conservation du sol »). Système cultural qui favorise une perturbation mécanique des sols minimale (peu ou pas de travail du sol), le maintien d'une couverture permanente du sol et la diversification des espèces végétales. Elle renforce la biodiversité et stimule les processus biologiques naturels qui ont lieu au-dessus et en dessous de la surface du sol, et contribue à une utilisation plus efficace de l'eau et des nutriments tout en améliorant durablement la production végétale¹⁰.

Agriculture de précision. Stratégie de gestion qui consiste à recueillir, traiter et analyser des données temporelles, spatiales et individualisées et à les associer à d'autres informations pour tenir compte de manière rigoureuse des variations observées dans les champs, faciliter la prise de décision en matière de gestion et permettre une action précise des machines pour améliorer l'efficience d'utilisation des ressources, la productivité, la qualité, la rentabilité et la durabilité de la production agricole¹¹.

Agriculture verticale. Agriculture d'intérieur pratiquée dans un environnement totalement contrôlé pour cultiver des plantes verticalement tout au long de l'année⁹.

Automatisation de l'agriculture. Utilisation, pour les travaux agricoles, de machines et de matériel qui améliorent l'analyse, la prise de décision ou l'exécution, en réduisant la pénibilité du travail et/ou en accroissant la rapidité des tâches, et éventuellement leur précision. L'automatisation de l'agriculture englobe les technologies de l'agriculture de précision. On peut citer comme exemples de machines et de matériel utilisés dans le cadre de l'automatisation de l'agriculture:

- ▶ les tracteurs qui poussent, tirent ou actionnent divers types d'instruments, de matériel ou d'outils qui permettent d'accomplir des travaux agricoles (automatisation de la fonction d'exécution);
- ▶ les capteurs, machines, drones et satellites, ainsi que les appareils tels que les téléphones portables, les tablettes ou les logiciels (applications proposant des conseils et gestion en ligne des exploitations agricoles, par exemple) et les plateformes, qui permettent de surveiller les animaux, les sols, l'eau et les plantes, et aident les humains à prendre des décisions concernant les tâches agricoles¹ (automatisation de la fonction d'analyse);
- ▶ des solutions plus sophistiquées, telles que des robots de désherbage qui pulvérissent des herbicides de manière précise, uniquement aux endroits nécessaires, ou des drones qui surveillent les conditions à distance et épandent des engrains, des pesticides et d'autres traitements par le haut^{2,3} (automatisation des trois fonctions: analyse, prise de décision et exécution).

Matériel automatisé. Systèmes dans lesquels une partie des fonctions (matériel partiellement automatisé) ou toutes les fonctions (matériel totalement automatisé), une activité définie ou le comportement d'une machine, ou d'un système de machine, ont été automatisés de manière à fonctionner sans intervention humaine⁴.

Automatisation numérique dans l'agriculture.

Renforcement des processus automatisés dans les machines et le matériel agricoles (tracteurs et leurs instruments, systèmes d'affouragement ou de nourrissage et trayeuses mécaniques, par exemple) par l'ajout d'outils numériques qui accroissent leur efficience et leur précision grâce à l'accès à des données et à des services numériques au moyen de réseaux, de plateformes et de systèmes de gestion d'exploitation agricole interopérables et intelligents.

Clôture virtuelle. Technologie consistant à équiper des animaux de transpondeurs GNSS afin de pouvoir les localiser, et à utiliser des signaux d'alerte audio, des décharges électriques ou d'autres types de stimulation pour maintenir les animaux dans les limites définies par géolocalisation. Elle est susceptible d'éliminer la nécessité d'installer de

véritables clôtures, et le GNSS aide les éleveurs à localiser les animaux dans les grands pâturages ouverts⁵.

Données de services supplémentaires non structurées (USSD). Service d'envoi de messages plus interactif que le service SMS. Il se caractérise par l'utilisation de codes commençant par * et se terminant par # (*845#, par exemple). Un message USSD se compose de 182 caractères au maximum et permet d'accéder à des informations sur l'agriculture, la santé, l'actualité, la météo, etc.¹⁴.

Élevage de précision. Stratégie de gestion de l'élevage reposant sur des données, qui permet de suivre et de contrôler la productivité, l'environnement, la santé et le bien-être d'un animal ou d'un groupe en continu, en temps réel et de manière automatisée. L'élevage de précision est axé sur l'amélioration de l'efficience d'utilisation des ressources, de la productivité, de la qualité, de la rentabilité et de la durabilité de la production animale⁵.

Exploitation. Dans les secteurs de la culture, de l'élevage, de l'agroforesterie ou de l'aquaculture, toute unité de production agricole intégrant une démarche de gestion.

Identification électronique. Identification d'un animal d'élevage à l'aide d'une micropuce ou d'un transpondeur électronique incorporé dans une marque, un bolus ou un implant⁵.

Intelligence artificielle (IA). Systèmes informatiques qui utilisent des algorithmes pour analyser leur environnement et entreprendre des actions – avec un certain degré d'autonomie – en vue d'atteindre des objectifs définis. L'IA peut reposer intégralement sur des logiciels et agir dans le monde virtuel (assistants vocaux, logiciels d'analyse d'images, moteurs de recherche, systèmes de reconnaissance vocale et faciale, par exemple) ou être intégrée dans des dispositifs matériels (robots sophistiqués, voitures autonomes, drones ou applications IdO [internet des objets])⁵.

Apprentissage automatique. Type d'IA et méthode d'analyse des données qui utilise des algorithmes informatiques pour automatiser la

création de modèles d'analyse. L'apprentissage automatique consiste à détecter les tendances qui ressortent des données afin d'améliorer la performance des machines par une prédiction plus précise des résultats, sans instructions humaines explicites.

Internet des objets (IdO). Système dans lequel les dispositifs – notamment les téléphones mobiles, les capteurs, les drones, les machines et les satellites – sont connectés à internet⁹.

Interopérabilité. Capacité des machines et du matériel à créer, échanger et consommer des données du fait d'attentes claires et communes quant au contenu, au contexte et à la signification de ces données⁹.

Mécanisation agricole. Utilisation, à tous les niveaux, de technologies – de simples outils à main de base à du matériel et des machines motorisés plus sophistiqués – pour accomplir des travaux agricoles⁶. La mécanisation agricole fait appel à trois types de technologies reposant sur des forces motrices différentes: outillage manuel (outils et instruments qui utilisent les muscles humains comme principale source de force); traction animale (machines, instruments et matériel actionnés par des animaux); et technologies motorisées (mécanisation alimentée par des moteurs thermiques ou électriques)⁷.

Mécanisation agricole motorisée. Utilisation de tous types de moteurs mécaniques (toutes sources d'énergie confondues), pour des activités associées à l'agriculture⁷.

Mégadonnées. Ensembles de données volumineux, divers et complexes produits à partir d'instruments, de capteurs, de transactions financières, de médias sociaux et d'autres moyens numériques, et dont la masse dépasse généralement la capacité de stockage et la puissance de traitement des ordinateurs personnels et des logiciels d'analyse de base.

Modèle d'entreprise à client. Relations et ventes directes de produits ou de services entre une entreprise et les clients qui sont les utilisateurs finaux de ces produits ou services⁹.

GLOSSAIRE

Modèle d'entreprise à entreprise. Relations et ventes entre des entreprises, plutôt qu'entre une entreprise et des particuliers⁹.

Prestations de services facturées. Dans le contexte des machines agricoles, arrangement commercial par lequel l'agriculteur paye à un prestataire les services d'une machine sur une base unitaire (par hectare, par heure, par animal ou par tonne récoltée), mais ne possède pas lui-même la machine⁵.

Producteurs agricoles. Ménages à la tête d'une entreprise agricole qui pratiquent la culture, l'élevage, la pêche, l'aquaculture, le pastoralisme ou l'exploitation forestière.

Petits producteurs (agricoles). Producteurs qui sont à la tête d'un des types d'entreprises agricoles définis ci-dessus, mais qui sont confrontés à de plus grandes difficultés en raison d'un accès limité aux marchés et aux ressources telles que la terre et l'eau, l'information, la technologie, le capital, les actifs et les institutions⁸.

Réglage à la volée. Dans le contexte des machines agricoles, ajustement du réglage de la machine pendant le déplacement dans le champ grâce à un algorithme alimenté par les données recueillies au moyen de capteurs, sans intervention humaine⁵.

Robot. Machine capable de fonctionner de manière autonome, sans intervention humaine directe¹². Un robot peut être fixe (robot de traite, par exemple) ou mobile (voiture autonome, par exemple). De manière générale, ce mot est principalement utilisé par les médias et le grand public, souvent pour désigner des robots anthropomorphes. Dans les exposés plus techniques, on préférera utiliser des termes tels que «machine autonome» ou «matériel autonome»¹³.

Robot sur jambes. Machine autonome mobile qui se déplace au moyen de membres articulés au lieu de roues⁵.

Robot de traite. Toute trayeuse mécanique qui automatise la traite d'animaux laitiers, en

particulier de bovins laitiers, sans intervention humaine. On parle également de «système de traite automatisée».

Robots en essaim. Machines autonomes mobiles de taille relativement peu importante qui se regroupent pour accomplir le travail réalisé par une grosse machine dans la mécanisation classique.

Robotique. Branche interdisciplinaire de la science et de l'ingénierie informatiques qui touche à la conception, la construction, l'exploitation et l'utilisation de robots. Elle englobe de nombreux domaines, notamment l'ingénierie mécanique, l'ingénierie électrique, l'ingénierie informationnelle, la mécatronique, l'électronique, la bio-ingénierie, l'ingénierie informatique, la régulation automatique, le génie logiciel et les mathématiques.

Serriculture. Production de légumes et d'autres cultures horticoles de forte valeur dans des serres et des fermes verticales. La serriculture permet aux agriculteurs de produire des cultures de rapport sur de petites parcelles dans des zones à rendement médiocre et à déficit hydrique où les cultures traditionnelles ne seraient peut-être pas viables. On parle également de culture sous abri ou de culture protégée⁹.

Solutions numériques non incorporées ou incorporées. Les solutions numériques non incorporées sont principalement des solutions logicielles qui ne reposent pas sur l'utilisation de machines agricoles; elles ne nécessitent que des ressources matérielles limitées, généralement un téléphone portable ou une tablette, ou des outils logiciels tels que des applications proposant des conseils, des logiciels de gestion d'exploitation agricole ou des plateformes en ligne. Elles peuvent comprendre un système de télédétection et/ou un système d'aéronef sans équipage à bord, mais se limitent à la fourniture de données pour l'appui à la prise de décision et la prospection/surveillance. Lorsque des outils numériques sont installés sur des machines et du matériel agricoles, ils sont qualifiés d'«incorporés»: plutôt que de fournir simplement des observations et un appui à la prise de décision, ils permettent à la machine d'interagir avec l'environnement par des actions directes (exécution)⁹.

Système d'aéronef sans équipage à bord (UAS).

Grand système comprenant des aéronefs (drones) dotés d'un ou de plusieurs capteurs embarqués, un poste de contrôle au sol géré par le pilote et des logiciels permettant d'analyser les données recueillies par le ou les capteurs⁹.

Système d'aide à l'opérateur. Système qui assiste les opérateurs humains de machines agricoles. Ce type de système utilise généralement les données provenant de différents capteurs installés sur la machine pour aider l'opérateur à prendre des décisions, et peut ajuster automatiquement les paramètres en fonction des priorités de l'opérateur (rendement du carburant, vitesse d'accomplissement du travail, qualité des produits). Il a été introduit pour la première fois sur les moissonneuses-batteuses⁵.

Système mondial de navigation par satellite (GNSS).

Tout système qui utilise des signaux reçus par satellite pour fournir des informations de localisation. On peut citer, entre autres exemples: le système de positionnement mondial (GPS) des États-Unis d'Amérique, le système européen Galileo, le système GLONASS de la Fédération de Russie et le système chinois BeiDou⁵.

Autoguidage. Technologie GNSS qui assure un guidage et un positionnement automatisés sur des machines agricoles automotrices (tracteurs, moissonneuses-batteuses, faucheuses-hacheuses-chageuses, pulvérisateurs). Avec l'autoguidage le plus évolué, l'ordinateur effectue presque la totalité du guidage dans le champ, y compris le virage en fin de rang. La technologie d'autoguidage nécessite généralement la présence sur le siège de la machine d'un opérateur humain qui puisse prendre le relais en cas de défaillance ou d'autre type de problème. Elle offre un bon exemple de technologie d'agriculture de précision⁵.

Système de positionnement mondial (GPS).

GNSS des États-Unis d'Amérique. Étant donné que le GPS a été le premier GNSS pouvant être utilisé à des fins civiles, cette dénomination est parfois employée comme terme générique au lieu de GNSS⁵.

Technologie à taux variable (TTV).

Technologie reposant sur une combinaison de matériel et de logiciels permettant de moduler l'épandage d'engrais, de pesticides, de semences et d'autres intrants destinés aux cultures afin d'optimiser le rendement en tenant compte des besoins des plantes, de façon à obtenir le rendement le plus élevé possible avec le moins d'intrants possible⁵.

TTV fondée sur une carte. TTV fondée sur une carte qui donne des informations spatiales sur les conditions locales dans les champs. Ces informations spatiales utilisées pour guider la TTV sont préparées par un analyste en amont, lors d'une phase distincte.

Système de fin de rang pour planteuse.

TTV fondée sur un GNSS qui commande différents semoirs en lignes en fonction d'une carte prescriptive ou de données provenant de capteurs. Souvent utilisé pour éviter de semer dans les zones non cultivées ou les zones déjà ensemencées en fin de rang.

TTV fondée sur un capteur. TTV fondée sur un capteur qui lit les données recueillies pendant le déplacement dans les champs (les informations de guidage de la TTV sont collectées automatiquement, ce qui n'est pas le cas pour les technologies fondées sur une carte). Généralement, le capteur est placé devant l'applicateur; un ordinateur installé sur la machine utilise un algorithme pour moduler les taux; et le matériel d'application est situé à l'arrière de la machine.

Régulateurs de section de rampe de pulvérisation.

TTV fondée sur un GNSS qui commande les pièces d'une rampe de pulvérisation en fonction d'une carte prescriptive ou de données provenant de capteurs. La largeur de section varie de plusieurs mètres à une seule buse. La technologie actuelle permet d'activer et de désactiver les buses et de moduler la fréquence du jet.

Télédétection. Processus consistant à recueillir, à distance, des informations sur des objets situés sur terre à l'aide d'aéronefs, de satellites ou d'autres plateformes dotées de capteurs⁹.

MESSAGES PRINCIPAUX

1 L'automatisation de l'agriculture peut apporter une contribution importante à la réalisation des objectifs de développement durable (ODD) – à commencer par les ODD 1 (Pas de pauvreté) et 2 (Faim «zéro»), sans oublier ceux relatifs à la durabilité environnementale et au changement climatique – en renforçant la résilience, en accroissant la productivité et l'efficience d'utilisation des ressources, et en améliorant la qualité et la sécurité sanitaire des aliments.

2 L'automatisation de l'agriculture peut aggraver les inégalités si elle reste inaccessible aux petits producteurs et aux autres groupes marginalisés, comme les jeunes et les femmes; certaines technologies – telles que les grosses machines motorisées – peuvent, en outre, avoir des répercussions négatives sur l'environnement en concourant à la monoculture et à l'érosion des sols, par exemple.

3 Avant la révolution numérique, les machines motorisées (tracteurs, par exemple) ont joué un rôle essentiel dans la transformation agricole à l'échelle mondiale; cependant, on a observé que leur utilisation était très inégale selon les pays et à l'intérieur de ceux-ci, et qu'elle était notamment particulièrement limitée dans la majeure partie de l'Afrique subsaharienne.

4 Si elle est adaptée aux besoins locaux et qu'elle s'appuie sur des outils numériques, la mécanisation motorisée conserve un potentiel d'amélioration de la production agricole et peut contribuer à réduire la pauvreté et à renforcer la sécurité alimentaire, et avoir des retombées positives sur l'ensemble de l'économie.

5 Le recours aux technologies d'automatisation numérique augmente, mais principalement dans les pays à revenu élevé. L'intérêt économique de ces technologies n'est souvent pas encore établi: certaines n'ont pas dépassé le stade du prototype, tandis que

d'autres voient leur diffusion entravée par le manque d'infrastructures rurales – connectivité et réseau d'électricité, par exemple –, en particulier dans les pays à faible revenu et les pays à revenu intermédiaire.

6 L'investissement dans des infrastructures propices et l'amélioration de l'accès aux services ruraux (services financiers, assurance et éducation, par exemple) sont essentiels pour rendre ces technologies accessibles, notamment aux groupes marginalisés tels que les petits producteurs agricoles et les femmes.

7 Les technologies d'automatisation numérique peuvent contribuer de manière importante à l'accroissement de l'efficience, de la productivité, de la durabilité et de la résilience. Cependant, des investissements inclusifs – qui fassent participer les producteurs, les fabricants et les prestataires de services, et qui accordent une attention particulière aux femmes et aux jeunes – seront nécessaires pour continuer à développer les technologies et les adapter aux besoins des utilisateurs finaux.

8 Les effets de l'automatisation de l'agriculture sur l'emploi varient selon le contexte. Lorsque les salaires augmentent et que la main-d'œuvre est rare, l'automatisation peut être bénéfique à la fois aux employeurs et aux personnes travaillant dans l'agriculture et, plus largement, dans les systèmes agroalimentaires, et offrir des possibilités aux jeunes travailleurs qualifiés.

9 À l'inverse, lorsque la main-d'œuvre rurale est abondante et que les salaires sont bas, l'automatisation de l'agriculture peut entraîner une augmentation du chômage. C'est notamment le cas lorsque des subventions réduisent artificiellement le coût de l'automatisation ou lorsque des avancées technologiques le font baisser très rapidement.

10 Dans les contextes où la main-d'œuvre est abondante, les décideurs publics doivent éviter de subventionner l'automatisation, et s'attacher plutôt à créer un environnement propice à son utilisation – en particulier par les petits producteurs agricoles, les femmes et les jeunes –, tout en apportant une protection sociale aux travailleurs les moins qualifiés, qui risquent le plus de perdre leur emploi pendant la phase de transition.

11 La création d'un environnement propice nécessite un ensemble de mesures cohérentes, notamment en matière de législation et de

réglementation, d'infrastructures, d'arrangements institutionnels, d'éducation et de formation, de recherche-développement et d'appui aux processus d'innovation du secteur privé.

12 Les investissements et les autres mesures d'action publique visant à encourager une automatisation responsable de l'agriculture doivent tenir compte des conditions propres au contexte, comme la situation en matière de connectivité, les problèmes liés aux connaissances et aux compétences, l'adéquation des infrastructures et les inégalités d'accès.

RÉSUMÉ

Au fil du temps, l'évolution technologique – dans les systèmes agroalimentaires et dans d'autres secteurs – a permis d'améliorer la productivité, les revenus et le bien-être humain. Aujourd'hui, les solutions technologiques sont indispensables pour nourrir une population qui ne cesse de croître, et ce dans un contexte où la quantité de terres agricoles est limitée, où les ressources naturelles ne sont pas utilisées de manière durable et où les crises et les tensions se multiplient, notamment sur le plan climatique. On ne peut se passer de ces solutions pour rendre l'agriculture plus productive et plus durable dans tous les secteurs – production végétale et animale, aquaculture, pêche et forêts – et pour stimuler les niveaux de productivité au sein des systèmes agroalimentaires.

Le changement technologique a réduit la part du travail manuel dans l'agriculture. Le terme «transformation agricole» est souvent employé pour désigner ce processus d'amélioration de la productivité et de réorientation de la main-d'œuvre vers des secteurs non agricoles. Cela s'accompagne d'investissements dans les systèmes agroalimentaires et d'autres infrastructures matérielles et commerciales. L'automatisation de l'agriculture peut être un facteur de transformation et créer de nouvelles possibilités. La mécanisation motorisée, par exemple, a permis d'automatiser l'exécution des travaux agricoles et, plus récemment, les technologies numériques ont ouvert de nouvelles perspectives s'agissant d'automatiser la phase de prise de décision qui précède l'exécution de ces travaux.

De façon générale, et bien qu'elle soit compréhensible, la crainte courante que l'automatisation vienne accroître le chômage est discutable et ne se confirme pas dans les faits. Globalement, l'automatisation remédie aux pénuries de main-d'œuvre et peut rendre la production agricole plus résiliente et productive, améliorer la qualité des produits, accroître l'efficacité d'utilisation des ressources, favoriser l'emploi décent et renforcer la durabilité environnementale. Les effets défavorables de l'automatisation de l'agriculture sur le plan socioéconomique – un accroissement du chômage,

par exemple – se produisent généralement lorsque cette automatisation n'est pas adaptée aux besoins locaux particuliers. Il est possible de contrer ces risques en facilitant la transition des travailleurs agricoles vers d'autres emplois, en levant les obstacles qui empêchent les petits producteurs pauvres de participer aux avantages et en évitant les politiques qui subventionnent l'automatisation alors que la main-d'œuvre est abondante et que les salaires ruraux sont bas.

AUTOMATISATION DE L'AGRICULTURE: LES POSSIBILITÉS ABONDENT, MAIS NE SONT PAS EXEMPTES DE DIFFICULTÉS

Toute tâche agricole comporte trois phases: l'analyse, la prise de décision et l'exécution. La mécanisation motorisée automatise l'exécution de tâches telles que le labour, le semis, la fertilisation, la traite, l'affouragement ou l'irrigation. À l'aide des technologies numériques, il devient possible d'automatiser également les étapes d'analyse et de prise de décision. Ces technologies permettent une précision accrue dans les tâches agricoles et une utilisation plus efficiente des ressources et des intrants, ce qui peut se traduire par une plus grande durabilité environnementale et une meilleure résilience face aux crises et aux tensions. En résumé, l'évolution technique et technologique de l'agriculture est le passage progressif des outils manuels à la traction animale, puis à la mécanisation motorisée, puis à du matériel numérique, et enfin à la robotique associée à l'intelligence artificielle (IA).

Le présent rapport donne donc de l'automatisation de l'agriculture la définition suivante:

Utilisation, pour les travaux agricoles, de machines et de matériel qui améliorent l'analyse, la prise de décision ou l'exécution, en réduisant la pénibilité du travail et/ou en accroissant la rapidité des tâches, et éventuellement leur précision.

L'automatisation de l'agriculture ouvre de nombreuses perspectives: elle peut en effet augmenter la productivité et permettre une gestion plus prudente des cultures, de l'élevage, de l'aquaculture et des forêts; améliorer les

conditions de travail et les revenus et réduire la charge de travail sur l'exploitation; et offrir de nouvelles possibilités entrepreneuriales en milieu rural. Les technologies mises en œuvre en aval de l'exploitation permettent de réduire les pertes et le gaspillage de nourriture, d'améliorer la sécurité sanitaire des aliments et d'apporter une valeur ajoutée.

Dans de nombreux pays, la diminution de la main-d'œuvre rurale disponible - dont témoigne la hausse des salaires agricoles - est l'un des principaux moteurs de l'automatisation de l'agriculture. La place croissante qu'occupent la qualité, la sécurité sanitaire, le goût et la fraîcheur des aliments dans les préoccupations des consommateurs, associée aux craintes pour l'environnement, incite également à investir dans les technologies numériques. On peut en dire autant des problèmes que posent la gestion des élevages et la question du bien-être animal, du fait de la taille croissante des troupeaux.

À l'inverse, l'automatisation de l'agriculture comporte le risque de renforcer les inégalités sociales, car les producteurs qui ont une plus large assise et ont fait davantage d'études ont de plus grandes capacités (sur le plan du financement, des infrastructures rurales ou des compétences notamment) d'investir dans les nouvelles technologies ou de suivre des formations complémentaires pour acquérir les qualifications qui leur manquent. Les femmes et les jeunes, en particulier, peuvent se heurter à des obstacles de taille s'agissant de recevoir une éducation et une formation de qualité, par exemple, ou d'accéder à la terre, au crédit et aux marchés. En outre, on s'attend à ce que l'automatisation réduise le nombre d'emplois associés à des tâches répétitives, comme la plantation et la récolte, mais aussi à ce qu'elle crée de nouveaux emplois qualifiés nécessitant d'avoir fait des études secondaires, par exemple. Dans les pays qui disposent d'une main-d'œuvre rurale importante, ce basculement risque de creuser les inégalités. Pour surmonter ces difficultés, il faut réduire les obstacles à l'utilisation de solutions automatisées – auxquels se heurtent notamment les petits producteurs, les femmes et les jeunes – pour faire en sorte

que la taille de l'exploitation n'entre pas en jeu dans cette utilisation, en d'autres termes, que ces solutions soient accessibles quelle que soit l'échelle de production, de la plus petite à la plus grande. On peut y parvenir au moyen d'innovations technologiques qui adaptent l'automatisation à la situation des petits producteurs. Par ailleurs, des arrangements institutionnels innovants, comme les services de partage d'actifs ou de location de machines, peuvent contribuer à cette neutralité de la taille d'exploitation en mettant en relation des propriétaires de matériel et des petits producteurs: ces derniers paient alors une redevance pour obtenir un service d'automatisation au lieu de supporter le coût d'achat des machines.

Faire reposer l'automatisation de l'agriculture sur un équipement lourd peut aussi compromettre la durabilité environnementale et contribuer à la déforestation, à la monoculture, à l'appauvrissement de la biodiversité, à la dégradation des terres et à l'érosion des sols. Quelques avancées récentes dans le domaine de l'automatisation, en particulier la création de petit matériel fondé sur l'intelligence artificielle, peuvent toutefois inverser la tendance dans certains cas.

COMPRENDRE LE PASSÉ ET SE TOURNER VERS L'AVENIR DE L'AUTOMATISATION DE L'AGRICULTURE

La mécanisation motorisée s'est considérablement développée dans le monde, encore que l'on ne dispose de données mondiales fiables couvrant un grand nombre de pays que pour les tracteurs, et uniquement jusqu'à 2009. L'utilisation du tracteur est l'une des innovations les plus importantes du XX^e siècle. Elle a démarré aux États-Unis d'Amérique entre 1910 et 1960, puis s'est répandue au Japon et en Europe après 1955. Plus tard, l'adoption de machines motorisées a considérablement progressé dans de nombreux pays d'Asie et d'Amérique latine, tandis que des secteurs manufacturiers spécialisés dans les machines agricoles apparaissaient dans certains pays. Le développement des marchés de la location de machines a permis à la mécanisation de se diffuser, et aux petits producteurs d'y accéder.

RÉSUMÉ

En revanche, l'utilisation de tracteurs n'a pas progressé en Afrique subsaharienne au cours des dernières décennies et les outils à main légers demeurent le principal type de matériel utilisé dans la sous-région. Les actions menées durant les années 1960 et 1970 pour promouvoir la mécanisation, en fournissant des machines subventionnées aux agriculteurs et en mettant en place des fermes d'État et des entreprises publiques de location, se sont révélées coûteuses et, pour la plupart, ont échoué, victimes de problèmes de gouvernance. La situation est en train de changer du fait de la résurgence de l'agriculture dans le programme de développement de l'Afrique, réveillant l'intérêt pour l'automatisation.

À partir des années 1970, les technologies numériques se sont frayé un chemin vers l'agriculture au moyen de diverses applications. Au début, il s'agissait principalement de technologies simples d'élevage de précision, qui facilitaient la gestion individuelle des animaux à partir de leur identification électronique – également appelée marquage électronique – et qui ont ensuite ouvert la voie aux robots de traite dans les années 1990. Parallèlement, des machines intégrant des outils numériques, comme celles équipées d'un système mondial de navigation par satellite (GNSS), ont commencé à apparaître et ont permis l'autoguidage des tracteurs, des épandeurs d'engrais et des pulvérisateurs de pesticides. Plus récemment, des appareils non incorporés tels que les téléphones portables, équipés de capteurs, de caméras haute résolution et de diverses applications, ont été adoptés pour informer les producteurs. Ces technologies peuvent réduire les coûts et accroître la productivité, mais il semble que leur adoption soit plutôt déterminée par des considérations non monétaires, telles qu'une plus grande souplesse dans les programmes de travail et une meilleure qualité de vie, comme dans le cas des robots de traite.

Plus évoluées encore, les solutions faisant appel à l'internet des objets (IdO) sont utilisées pour des tâches de surveillance et parfois – du moins en partie – pour automatiser les décisions concernant les traitements ou les soins à administrer aux cultures, au bétail ou aux poissons. Les services

numériques comprennent aussi des services de partage d'actifs, qui mettent des propriétaires de matériel (tracteurs ou drones, par exemple), et parfois aussi des exploitants, en relation avec des agriculteurs qui en ont besoin.

Les technologies numériques sont intéressantes également pour une agriculture de précision non mécanisée. Des méthodes manuelles d'application modulaire d'engrais existent depuis longtemps – la technologie à taux variable (TTV) pour la fertilisation des rizières en est un exemple – et des scanneurs à main pour sol sont disponibles dans plusieurs pays à faible revenu d'Afrique et d'Asie. Des services associés à un aéronef sans équipage à bord (UAV ou drone) sont également utilisés par les agriculteurs non mécanisés d'Asie et d'Afrique; un système mondial de navigation par satellite mesure les champs (Asie) et cartographie les limites des champs pour établir la propriété foncière (Afrique).

ÉTAT DES LIEUX DES TECHNOLOGIES D'AUTOMATISATION NUMÉRIQUE ET DE LA ROBOTIQUE DANS L'AGRICULTURE

Les applications d'automatisation numérique et de robotique sont extrêmement diverses dans l'agriculture. Les smartphones, équipés d'une série de capteurs et d'une caméra haute résolution, sont les appareils les plus accessibles aux producteurs (en particulier les petits producteurs) dans les pays à faible revenu et les pays à revenu intermédiaire. Cependant, la faiblesse des compétences numériques dans les zones rurales, le manque de technologies adaptées aux petits producteurs et le coût relativement élevé de ces technologies demeurent les principaux obstacles à leur utilisation.

Plus récemment, la commercialisation de technologies avancées, comme les robots de culture autonomes (pour récolter, semer ou désherber, par exemple), a commencé. Des drones sont utilisés pour recueillir des informations et pour automatiser l'application d'intrants, mais leur emploi fait souvent l'objet d'une réglementation stricte.

Dans le secteur aquacole, l'automatisation est en plein essor du fait de la rareté de la main-d'œuvre et du niveau élevé des salaires. En forêt, où les travaux de récolte du bois sont déjà en grande partie mécanisés, des robots mobiles, associés à des techniques nouvelles de réalité virtuelle et de télédétection, sont en train d'ouvrir la voie à des machines automatiques évoluées. La télédétection est également utilisée pour surveiller la déforestation. L'agriculture en environnement contrôlé (AEC), qui comprend l'agriculture d'intérieur et l'agriculture verticale, offre aussi des possibilités d'exploitation numérique et d'automatisation. Les serres sont la forme la plus courante d'agriculture en environnement contrôlé et se prêtent intrinsèquement à une surveillance, un contrôle et une optimisation de l'environnement.

De nombreuses solutions technologiques sont déjà disponibles et peuvent être adoptées dans les pays à revenu élevé, les pays à revenu intermédiaire et les pays à faible revenu. Leur évolution et la vitesse à laquelle elles sont adoptées sont considérablement influencées par les choix des pouvoirs publics. Les autorités doivent faciliter l'accès de tous à ces technologies – en particulier pour les petits producteurs, les femmes, les jeunes et les autres groupes vulnérables et marginalisés – et veiller à ce que celles-ci soient adaptées au contexte et aux besoins particuliers des producteurs. Idéalement, les pouvoirs publics doivent faire en sorte que l'accès aux technologies innovantes soit équitable, afin de permettre au secteur privé de répondre à la demande d'automatisation.

NE PAS BRÛLER LES ÉTAPES: LA SIMPLE MÉCANISATION MOTORISÉE A ENCORE UN RÔLE À JOUER

Les technologies numériques et la robotique sont extrêmement prometteuses, mais la mécanisation motorisée peut encore apporter de nombreux avantages sur les plans de l'amélioration des revenus, de la diminution des coûts, de l'économie de main-d'œuvre et de la réduction de la pénibilité. Elle peut libérer la main-d'œuvre familiale et

permettre aux ménages agricoles de dégager du temps pour exercer des activités hors de l'exploitation. Son utilisation peut aussi avoir des retombées économiques plus larges. En effet, la demande de biens et de services non agricoles de la part des ménages agricoles s'accroît à mesure que la productivité de leur travail augmente, et l'économie non agricole connaît un essor lorsque des travailleurs quittent le monde agricole pour des secteurs dans lesquels la productivité de la main-d'œuvre est plus forte. L'automatisation peut aussi améliorer la sécurité sanitaire des aliments, grâce à des technologies de conservation et de stockage, et accroître la résilience de la production agricole, face aux chocs climatiques notamment, en permettant aux agriculteurs d'accomplir leurs activités agricoles plus rapidement et de les adapter plus souplement aux variations météorologiques.

Il peut donc encore y avoir intérêt à développer l'utilisation de la mécanisation motorisée dans certains contextes. Dans les pays à faible revenu et les pays à revenu intermédiaire, les petits producteurs pourraient tirer un meilleur parti de petites machines, telles que des motoculteurs, qui offrent une solution moins coûteuse et sont plus respectueuses de l'environnement que les engins lourds classiques. Les innovations récentes permettant d'adapter les machines motorisées aux besoins locaux peuvent aider les pays à gagner en efficience dans l'utilisation des ressources et à économiser les ressources rares (l'eau, par exemple) en exploitant des effets de synergie innovants entre la mécanisation et d'autres pratiques de terrain. La mécanisation de l'agriculture figure donc en bonne place dans les programmes des pouvoirs publics de nombreux pays à faible revenu et pays à revenu intermédiaire, particulièrement en Afrique subsaharienne, où elle était délaissée depuis un certain temps, du fait des échecs essuyés antérieurement par les programmes de mécanisation dirigés par l'État.

Les technologies manuelles et la traction animale peuvent aussi continuer à jouer un rôle majeur dans de nombreuses situations. La traction animale peut constituer une force importante pour des exploitations très petites ou fragmentées, et les outils à main évolués permettent de réduire

RÉSUMÉ

les besoins en force humaine. Quoique moins puissants que des tracteurs, les animaux de trait comme les outils à main évolués peuvent néanmoins contribuer à pallier les pénuries de main-d'œuvre et accroître le rendement des cultures et les superficies cultivées dans de nombreuses régions. Dans bien des cas, ces solutions seront probablement les plus viables pour augmenter la force disponible.

PENSER L'AVENIR: INTÉRÊT ÉCONOMIQUE DES INVESTISSEMENTS DANS L'AUTOMATISATION NUMÉRIQUE

L'intérêt économique des investissements dans les technologies agricoles repose sur les gains potentiels des acteurs privés. On suppose que ces acteurs – producteurs, négociants et prestataires de services notamment – prennent des décisions rationnelles, qui maximisent leur bénéfice et leur bien-être. Investir dans les technologies d'automatisation entraîne des coûts et ces coûts tendent à augmenter si les technologies en question ne sont pas largement disponibles localement. Les fournisseurs et les producteurs s'engageront donc uniquement si les avantages attendus dépassent les coûts. Pour certaines technologies et dans certaines conditions, il se peut que les sommes à investir excèdent la valeur des avantages potentiels pour les acteurs privés, mais que les avantages pour la société entière soient considérables. Dans ce cas, une intervention publique est nécessaire pour faire cadrer les avantages privés avec les intérêts de la société dans son ensemble.

Du fait de la rareté des données disponibles, nous nous sommes appuyés sur 27 études de cas réalisées à partir d'entretiens avec des prestataires de services d'automatisation numérique pour mieux saisir l'intérêt économique de ces technologies dans l'agriculture. Les études de cas concernent toutes les régions du monde et tous les systèmes de production agricole (cultures, élevage, aquaculture et agroforesterie). Elles représentent des solutions d'automatisation numérique à différents stades d'évolution, un grand nombre de technologies se trouvant encore aux premiers

stades de l'élaboration et de la commercialisation. Les résultats indiquent que seuls 10 prestataires de services sur 27 sont en situation de rentabilité et de viabilité financière. Ces 10 prestataires - installés, pour la plupart, dans des pays à revenu élevé - mettent en œuvre des solutions en phase de maturité (c'est-à-dire largement utilisées) et travaillent principalement pour de grands exploitants. Plus d'un tiers des études de cas laissent à penser que les agriculteurs tirent profit de ces solutions, qui se traduisent par des gains de productivité et d'efficience ainsi que de nouveaux débouchés commerciaux. Globalement, les résultats indiquent que l'intérêt économique des technologies d'automatisation numérique n'est pas encore avéré, en partie parce qu'un grand nombre d'entre elles sont encore au stade de prototype, mais aussi parce que de sérieux obstacles à leur utilisation subsistent, surtout dans les pays à faible revenu et les pays à revenu intermédiaire.

Bien que nombre de ces technologies en soient encore aux premiers stades de leur développement, plusieurs enseignements importants peuvent être tirés des études de cas. Les principaux facteurs qui déterminent l'adoption d'une technologie sont, premièrement, le fait de savoir qu'il existe une solution permettant de mener des travaux agricoles à bien, et deuxièmement, la capacité de l'agriculteur d'appliquer cette solution. Les obstacles à l'adoption de ces technologies que l'on rencontre fréquemment sont le manque de compétences numériques ainsi qu'une connectivité limitée et une disponibilité réduite d'autres infrastructures nécessaires, y compris électriques. Ces obstacles sont souvent aggravés par une réticence au changement, généralement associée à des populations agricoles vieillissantes. Le changement de génération est noté comme un facteur déterminant d'utilisation et les jeunes agriculteurs, comme un élément essentiel de la transformation numérique et de l'évolution vers une automatisation avancée. La situation du marché est un autre moteur d'adoption ou au contraire un autre obstacle à celle-ci – lorsqu'une forte concurrence entre producteurs pousse ces derniers à prendre davantage de risques et à utiliser de nouvelles technologies qui laissent espérer des gains de productivité et

d'efficience. Les facteurs limitants peuvent être la réglementation des importations technologiques, l'absence de politiques sur le partage des données, et des politiques et mesures d'incitation publiques insuffisantes. À l'inverse, une réglementation ou un appui public bien conçus peuvent grandement favoriser l'adoption de technologies.

AU-DELÀ DE L'INTÉRÊT ÉCONOMIQUE: L'AUTOMATISATION DE L'AGRICULTURE PROMET DES AVANTAGES ENVIRONNEMENTAUX, MAIS DES TRAVAUX DE RECHERCHE SUPPLÉMENTAIRES S'IMPOSENT

Dans les pays à revenu élevé, mais aussi dans un grand nombre d'exploitations commerciales de pays à faible revenu et de pays à revenu intermédiaire, l'agriculture est déjà fortement mécanisée, au moyen d'engins lourds principalement. Or, ce type de mécanisation est à l'origine d'une érosion des sols, d'une déforestation et d'un appauvrissement de la biodiversité, autant de facteurs qui contribuent à réduire la résilience. L'innovation dans le domaine des technologies d'automatisation et la recherche agronomique appliquée peuvent aider à imaginer des solutions à ces problèmes. On peut par exemple adapter la mécanisation motorisée en utilisant des machines plus petites et plus légères. Ainsi, les petits tracteurs et les motoculteurs représentent des solutions prometteuses pour les petits producteurs. Celles-ci permettent de limiter l'appauvrissement de la biodiversité car elles ne nécessitent pas de mise à nu du terrain ni de travaux de terrassement importants. D'autres petites machines motorisées, comme les désherbeuses mécaniques et les batteuses mobiles, peuvent aussi présenter des avantages sur le plan de l'égalité des genres, car les femmes peuvent les utiliser facilement.

De grands avantages environnementaux peuvent aussi découler des technologies d'automatisation numérique à la base de l'agriculture de précision. Ces technologies sont en effet susceptibles de faciliter l'adoption de pratiques durables, comme l'agriculture de conservation. En témoignent des exemples de réussite, dans lesquels l'utilisation

d'ordinateurs et de l'internet des objets a permis d'automatiser des serres et d'économiser de l'eau et d'autres intrants. De petits robots en essaim sont un autre moyen de générer des avantages environnementaux en réduisant l'utilisation de pesticides et d'herbicides, en optimisant l'usage d'autres intrants et en diminuant la compaction du sol. Leur emploi est déjà économiquement possible sous certaines conditions, mais des travaux de recherche supplémentaires s'imposent, surtout sur leur utilité dans l'agriculture artisanale; ils devraient en effet présenter un avantage par rapport aux gros engins sur des exploitations dont les champs sont de forme irrégulière.

À ce jour, ces avantages environnementaux sont propres à chaque lieu; de plus, de nombreuses solutions en sont encore aux premiers stades de leur développement et de leur commercialisation. D'autres travaux de recherche, y compris des essais, sont donc nécessaires. Si les décideurs publics et les producteurs sont tout à fait conscients des avantages associés à ces technologies, l'investissement dans le développement de celles-ci devrait prendre de l'ampleur. Le passage à une énergie renouvelable est également essentiel et peut ouvrir de nouvelles perspectives d'automatisation motorisée, en particulier dans les zones rurales reculées, mais, là encore, des travaux de recherche sont nécessaires pour étudier quelles solutions d'énergie renouvelable hors réseau sont les plus à même d'alimenter efficacement les différents types de machines.

L'AUTOMATISATION DE L'AGRICULTURE A DES CONSÉQUENCES COMPLEXES SUR LES TRAVAILLEURS AGRICOLES ET PEUT AUSSI PROFITER AUX CONSOMMATEURS

Mesurer les conséquences globales de l'automatisation de l'agriculture sur l'emploi est extrêmement difficile car il faut de grandes quantités de données pour suivre toutes les transformations, ainsi que les réaffectations de travailleurs qui y sont associées, non seulement sur l'exploitation, mais aussi en amont et en aval de celle-ci. À mesure que la transformation de l'agriculture s'opère, certains quittent ce secteur

RÉSUMÉ

pour chercher un emploi mieux rémunéré et la part des personnes employées dans l'agriculture baisse. Ce processus remodèle l'offre et la demande de main-d'œuvre dans l'ensemble des systèmes agroalimentaires. Lorsque tous les pôles des systèmes agroalimentaires se transforment simultanément, il est presque impossible d'imputer les effets observés sur le marché du travail et les effets socioéconomiques à des cas précis d'automatisation de l'agriculture.

Les conséquences possibles de l'automatisation de l'agriculture sur l'emploi agricole ont toutes les chances d'être diverses. On peut s'attendre à ce que la demande de main-d'œuvre faiblement qualifiée diminue à mesure que le nombre de tâches automatisées augmentera. Parallèlement, l'automatisation stimule la demande de travailleurs relativement qualifiés. Si l'on considère les systèmes agroalimentaires globalement, l'automatisation pourrait réduire le nombre d'emplois saisonniers peu payés sur les exploitations, mais accroître celui des emplois mieux rémunérés et moins saisonniers en amont et en aval.

Les effets de l'automatisation peuvent également différer selon le type d'exploitation. Chez les petits exploitants et ceux qui pratiquent une agriculture de subsistance, l'automatisation est susceptible de libérer de la main-d'œuvre familiale qui peut alors occuper un emploi non agricole, mais elle peut aussi favoriser l'essor de la production. Sur les exploitations commerciales familiales, l'automatisation peut à la fois libérer de la main-d'œuvre familiale et réduire la demande de main-d'œuvre salariée, sauf si elle permet de développer les activités agricoles commerciales, auquel cas il peut être nécessaire d'embaucher de nouveaux travailleurs. Les fermes commerciales, quant à elles, sont les exploitations les plus automatisées, ce qui s'accompagne d'une chute des besoins en main-d'œuvre. Mais, même dans ce cas, si le recours à l'automatisation est dû à des salaires en hausse et à une raréfaction de la main-d'œuvre, cette évolution aura tendance à accroître la productivité du travail et les salaires sans provoquer de chômage.

Si l'automatisation, stimulée par des subventions qui en réduisent artificiellement le coût, intervient alors que la main-d'œuvre est abondante, le risque est sérieux qu'elle ne vienne se substituer au travail humain et engendrer du chômage, entraînant des conséquences socioéconomiques majeures, en particulier pour les plus pauvres et les moins qualifiés, qui pourraient avoir des difficultés à trouver un emploi dans un autre secteur.

L'automatisation de l'agriculture a des effets socioéconomiques considérables sur les consommateurs, car elle entraîne une réduction des coûts de production des aliments. L'évolution de l'automatisation numérique peut aussi créer de nouvelles possibilités entrepreneuriales qui profiteront aux consommateurs – en permettant, par exemple, le renouveau de cultures patrimoniales riches en micronutriments qui étaient difficiles à automatiser – et réduire les coûts de production des aliments biologiques, qui nécessitent actuellement une main-d'œuvre importante.

LE PROCESSUS D'AUTOMATISATION DE L'AGRICULTURE DOIT ÊTRE INCLUSIF ET NE LAISSER PERSONNE DE CÔTÉ

L'automatisation de l'agriculture doit faire participer ceux qui vivent en situation de vulnérabilité, d'exclusion et de marginalisation, notamment les petits producteurs, les éleveurs pastoraux, les petits pêcheurs, les petits exploitants forestiers et les communautés forestières, les travailleurs agricoles, les microentreprises et les travailleurs du secteur informel, les agriculteurs sans terre et les travailleurs migrants. La participation des femmes, des jeunes et des personnes handicapées est particulièrement essentielle.

Les conséquences de l'automatisation des exploitations en matière de genre sont complexes. Les femmes sont en retard sur les hommes en ce qui concerne l'adoption des technologies agricoles, du fait des obstacles auxquels elles se heurtent dans l'accès au capital, aux intrants et aux services (information, vulgarisation, crédit et engrais,

par exemple) et en raison aussi, dans certains contextes, des normes culturelles. Les responsables politiques et les partenaires d'exécution locaux doivent favoriser la prise en compte des questions de genre dans la mise au point et la diffusion des technologies et dans la prestation de services correspondants.

Les jeunes agriculteurs semblent être les premiers à adhérer avec enthousiasme au processus. L'automatisation de l'agriculture annonce de nouveaux types d'emplois, nécessitant un ensemble important de compétences. Priorité doit être donnée à un programme étoffé de mise en valeur du capital humain et de renforcement des capacités, visant notamment les jeunes.

À mesure que les exploitations adoptent une automatisation génératrice d'économies de main-d'œuvre, non seulement le personnel qu'elles emploient se réduit, mais son niveau de qualification augmente. L'un des défis essentiels est de faciliter la reconversion de la main-d'œuvre agricole, pour qu'elle passe d'activités manuelles faiblement qualifiées à des tâches faisant appel à des technologies plus complexes. Cela étant, les craintes que l'automatisation ne supplante des millions de travailleurs agricoles, les laissant sans aucune perspective d'emploi, sont sans fondement. L'automatisation des emplois agricoles, tout comme l'évolution de la main-d'œuvre agricole qu'elle provoque, est un processus graduel qui diffère selon le lieu, les cultures et les tâches. Les facteurs qui incitent le plus à recourir à une automatisation permettant d'économiser de la main-d'œuvre concernent des tâches spécifiques qui requièrent une main-d'œuvre importante et peuvent être facilement automatisées moyennant un faible coût. Certaines tâches seront progressivement automatisées, mais d'autres continueront de demander une main-d'œuvre nombreuse.

Si les technologies d'automatisation disponibles sont en corrélation avec la taille de l'exploitation, il y a un risque que de petits producteurs et transformateurs soient contraints de cesser leurs activités, impuissants à réaliser les économies d'échelle nécessaires pour rester compétitifs. Cette conséquence de l'automatisation n'est

toutefois pas inévitable dans l'agriculture; la clé réside dans la généralisation d'une automatisation à faible coût, accessible à toutes les échelles de production.

Quoi qu'il en soit, l'hypothèse selon laquelle limiter l'automatisation pourrait protéger l'emploi et les revenus agricoles n'est pas fondée. En fait, les politiques visant à restreindre l'automatisation ne serviront qu'à rendre les exploitations moins compétitives et incapables d'accroître leur production. Pour améliorer les salaires et les conditions de travail des personnes qu'elles emploient, les exploitations doivent améliorer leur productivité en faisant appel à de nouvelles technologies. Faute de technologie permettant d'augmenter la productivité, les perspectives de faire sortir les travailleurs agricoles les plus démunis de la pauvreté et de l'insécurité alimentaire sont plutôt sombres.

PRÉSENTATION D'UNE FEUILLE DE ROUTE POUR UNE AUTOMATISATION EFFICACE, DURABLE ET INCLUSIVE DE L'AGRICULTURE: POLITIQUES, INVESTISSEMENTS ET INSTITUTIONS

Le potentiel de l'automatisation de l'agriculture est indubitable quand on veut parvenir à un développement rural durable et inclusif à partir d'une agriculture intensive, mais durable. Cela étant, la réalisation de ce potentiel n'est pas automatique et dépend du contexte socioéconomique ainsi que du cadre d'action et du cadre institutionnel dans lesquels le processus d'automatisation s'inscrit. La façon dont les pays gèrent la transition décidera du résultat, favorable ou défavorable, de ce processus dans le pays considéré. Les pays qui mettent en place les infrastructures matérielles, économiques, juridiques et sociales nécessaires à l'automatisation numérique ont de bonnes chances de tirer profit de celle-ci. Ceux qui se désintéressent de ces enjeux pourraient sortir perdants.

Comme tout changement technologique, l'automatisation de l'agriculture provoque inévitablement son lot de bouleversements,

RÉSUMÉ

apportant des avantages, mais imposant aussi des compromis. Le présent rapport propose un éventail de solutions possibles en matière de politiques, d'institutions, de lois et d'investissements. Ensemble, ces solutions forment une feuille de route qui permet de faire en sorte que l'automatisation de l'agriculture contribue à des systèmes agroalimentaires efficaces, productifs, durables, résilients et inclusifs. Certaines de ces solutions tendent principalement à créer un environnement propice aux activités commerciales dans l'agriculture, en particulier en ce qui concerne les investissements dans les technologies d'automatisation, et doivent être complétées par des règlements et d'autres mesures garantissant que ces opérations économiques aboutissent à la durabilité environnementale et à la résilience face au changement climatique. Enfin, il faut mettre en place les politiques et les programmes qui s'imposent afin que le processus fonctionne pour tous, en particulier pour les groupes marginalisés tels que les femmes, les petits producteurs et les jeunes.

Les pouvoirs publics devront également trouver un équilibre entre des objectifs économiques, environnementaux et sociaux qui divergent et parfois s'opposent. Les politiques, les investissements et les autres mesures d'action publique qui sont proposés - examinés à la section suivante dans le cadre d'une feuille de route d'automatisation de l'agriculture - n'ont pas la même importance dans tous les contextes. Chaque État doit établir ses priorités d'action en fonction des défis qu'il lui faut relever et des capacités dont il dispose. L'un des principaux domaines transversaux d'intervention des États est celui de l'appui aux services d'intérêt général, qui représente les mesures prises par les pouvoirs publics pour mettre en place un environnement propice aux activités commerciales dans l'agriculture et les systèmes agroalimentaires, sans fausser les marchés ni favoriser certains acteurs (ou certains secteurs agricoles) par rapport à d'autres.

LES POLITIQUES ET LES INTERVENTIONS CIBLANT L'AGRICULTURE ONT AUSSI UNE INCIDENCE SUR LE RECOURS À L'AUTOMATISATION

Un certain nombre de mesures ciblant l'agriculture peuvent constituer un soutien plus direct à l'automatisation ou contribuer à lever les obstacles à l'automatisation, en particulier pour les petits producteurs. Ainsi, les pouvoirs publics peuvent influer sur le processus d'adoption des technologies concernées par des mesures relatives au crédit qui visent spécifiquement l'automatisation de l'agriculture. Les prêts à l'investissement sont la solution la plus couramment utilisée pour financer l'automatisation, et peuvent prendre diverses formes, comme des sûretés contractuelles, des dispositifs de garantie des emprunts, des groupes de caution solidaire, des systèmes de location avec option d'achat et des subventions de contrepartie. En outre, des subventions sélectives, qui ne faussent pas les marchés, peuvent jouer un rôle dans ce domaine. Une sécurité foncière renforcée est essentielle, car un régime foncier incertain restreint l'accès des producteurs au crédit, ceux-ci ne pouvant utiliser leurs titres fonciers en garantie. Il est aussi possible de favoriser une baisse des coûts de transaction liés aux technologies d'automatisation et de stimuler l'utilisation de celles-ci en réduisant les droits de douane sur les machines, le matériel numérique et les pièces détachées, et en allégeant les formalités douanières.

Le capital humain doit être mis en valeur de façon à remédier au manque de compétences numériques, grâce à des centres de formation professionnelle, par exemple. Les connaissances et les compétences des fabricants, des propriétaires, des exploitants, des techniciens et des agriculteurs doivent toutes être renforcées, les jeunes constituant une cible stratégique, car ils jouent souvent un rôle moteur essentiel dans le recours à l'automatisation. L'amélioration des services de vulgarisation agricole et de conseil rural peut s'avérer utile pour faciliter l'adoption des technologies concernées. Les services publics de vulgarisation ont

toujours joué un rôle important s'agissant de faire en sorte que l'automatisation agricole soit inclusive. La pénurie d'agents de vulgarisation correctement formés constitue toutefois un frein majeur dans les pays à faible revenu et les pays à revenu intermédiaire.

Si le capital humain est essentiel pour les utilisateurs (agriculteurs et prestataires de services), il l'est tout autant pour ceux qui participent à l'innovation (les chercheurs et les scientifiques, par exemple). Les pouvoirs publics peuvent financer ou mener des activités de recherche-développement appliquée aux technologies d'automatisation, en ciblant notamment les solutions adaptées aux besoins locaux et à ceux des petits producteurs. L'un des domaines de recherche essentiels est l'évaluation de l'impact des solutions d'agriculture de précision sur la rentabilité, la durabilité environnementale et l'inclusion. Il est impératif d'axer les efforts à la fois sur les petites machines et sur les solutions numériques de faible technicité, comme la réponse vocale interactive (RVI), les données de services supplémentaires non structurées (USSD) et le service de messages courts (SMS). Les petites machines sont parfois mieux adaptées aux conditions locales et aux petites exploitations, et les solutions de faible technicité ont davantage de chances de toucher tous les agriculteurs pour un faible coût.

Enfin, les pouvoirs publics doivent mettre en place une assurance qualité et établir des normes de sécurité, qui peuvent être gérées par l'État, les marchés et des organisations du secteur associatif. Les lois et règlements relatifs à la sécurité de l'automatisation doivent reposer sur une consultation inclusive de toutes les parties prenantes et doivent être transparents et appuyés par des mesures permettant de s'assurer que les utilisateurs s'y conforment.

LES POLITIQUES, LES INSTITUTIONS ET LES INVESTISSEMENTS EXTÉRIEURS AUX SYSTÈMES AGROALIMENTAIRES ONT UNE INCIDENCE SUR LE RECOURS À L'AUTOMATISATION AGRICOLE

Des politiques générales et des investissements qui ne visent pas spécifiquement les systèmes agroalimentaires sont susceptibles de contribuer à la mise en place d'un environnement propice, notamment en ce qui concerne les infrastructures. L'infrastructure routière laisse particulièrement à désirer dans les pays à faible revenu ainsi que dans la majeure partie de l'Afrique subsaharienne. En l'améliorant, on peut réduire les coûts de transaction relatifs à l'accès aux machines, aux pièces détachées, à la réparation et au carburant, et faciliter ainsi la création de marchés de services. Il est tout aussi important d'investir dans les infrastructures énergétiques, en mettant au point, par exemple, une alimentation électrique hors réseau provenant de ressources renouvelables, car aucune technologie d'automatisation ne fonctionne sans énergie. La disponibilité d'une énergie renouvelable reposant sur des investissements locaux peut amortir à la fois les crises qui touchent le secteur énergétique et les fluctuations des prix des carburants.

Des infrastructures de communication et une connexion à internet de meilleure qualité sont déterminantes pour que l'automatisation de l'agriculture fonctionne correctement. Or, les problèmes de connexion sont très répandus et n'épargnent pas non plus certaines zones rurales de pays à revenu élevé. Il est possible de prévoir des avantages fiscaux ou des prêts à faible taux d'intérêt pour les fournisseurs d'accès à internet opérant en milieu rural. La législation peut jouer un rôle essentiel, en favorisant les partenariats public-privé-communauté pour améliorer la connectivité et les infrastructures dans ce domaine dans les zones rurales et fournir des services et un appui en matière de données. Les investissements doivent aussi cibler les infrastructures d'appui connexes, comme les ensembles de données publiques sur les prévisions météorologiques et les calendriers de production agricole et animale.

RÉSUMÉ

Les infrastructures matérielles sont certes au centre des préoccupations, mais les institutions, la situation macroéconomique et les capacités institutionnelles au sens large jouent aussi un rôle crucial dans le recours à l'automatisation de l'agriculture. Il est important d'améliorer les marchés du crédit de façon générale; de fait, l'accès des petits producteurs au crédit à des taux d'intérêt abordables est habituellement limité, ce qui ne leur permet pas de financer des technologies d'automatisation. Il est vital de renforcer les capacités institutionnelles et politiques pour orienter le développement de ces technologies; si, au contraire, on laisse de puissantes sociétés technologiques privées s'emparer de la première phase, les conséquences peuvent être désastreuses et gagner la société dans son ensemble. Qui plus est, l'adoption de politiques nationales transparentes en matière de données – notamment de règlements dans le domaine de la protection et du partage des données et du respect de la vie privée – peut faciliter l'automatisation numérique. Parmi les autres facteurs favorables, on peut citer le développement d'infrastructures nationales de données et la promotion de l'interopérabilité, c'est-à-dire d'une communication précise et fiable entre machines. Enfin, les politiques de change et les politiques commerciales peuvent agir sur l'évolution de l'automatisation par l'intermédiaire des coûts d'importation des machines, du matériel numérique et des pièces détachées.

SI ELLE EST CORRECTEMENT MENÉE, L'AUTOMATISATION DE L'AGRICULTURE CONTRIBUERA À DES SYSTÈMES AGROALIMENTAIRES INCLUSIFS ET DURABLES

Même en supposant que les pays soient en mesure d'établir des règles du jeu équitables pour la fourniture de technologies innovantes par le secteur privé, les défis associés à l'automatisation demeurent. Dans l'agriculture, ces défis sont au nombre de trois: ne laisser aucun groupe marginalisé de côté; éviter d'accroître le chômage et de faire disparaître des emplois; et se garder de tout dommage environnemental. Des politiques

peuvent être utiles pour relever ces défis et veiller à ce que l'automatisation contribue à une transformation agricole inclusive et durable. C'est pourquoi il est fort probable que ce processus nécessitera une action des décideurs publics.

Premièrement, les autorités doivent s'assurer que les femmes, les jeunes et les autres groupes défavorisés bénéficient de l'automatisation. Les mesures qui visent à remédier aux désavantages que subissent les femmes (en améliorant leurs droits fonciers ou en facilitant leur accès au crédit et aux services de vulgarisation, par exemple) contribuent aussi à accroître l'accès de celles-ci à l'automatisation. L'action publique en matière de recherche-développement peut se concentrer sur des technologies de mécanisation qui répondent aux besoins des femmes. Par ailleurs, il est nécessaire d'établir un programme spécifique d'automatisation de l'agriculture, qui cible les jeunes ruraux et d'autres groupes défavorisés, afin de permettre à ces personnes d'acquérir les compétences nécessaires pour occuper les nouveaux emplois hautement qualifiés associés à l'automatisation.

Deuxièmement, les pouvoirs publics doivent établir des garde-fous contre les effets préjudiciables sur l'emploi. Lorsque l'automatisation apparaît comme une réaction aux forces du marché (des salaires ruraux en hausse, par exemple) et qu'elle remplace une main-d'œuvre familiale non rémunérée, il y a peu de risques qu'elle engendre du chômage. En revanche, si elle est stimulée artificiellement par des dépenses publiques (importations subventionnées des machines, par exemple), il est possible qu'elle entraîne du chômage, des pertes d'emplois et une baisse des salaires ruraux. Les décideurs publics ne doivent donc pas soutenir l'automatisation tant que celle-ci n'est pas réellement nécessaire. Ils ne doivent pas non plus faire obstacle à son adoption au motif qu'elle va se substituer au travail humain et créer du chômage. Les formes d'appui public qui permettent de fournir des biens publics ou collectifs au moyen de services d'intérêt général sont les plus susceptibles de susciter une transition sans heurt vers une plus grande automatisation sans produire de chômage. Entre dans cette catégorie l'aide aux activités de

recherche-développement agricole et aux services de transfert de connaissances.

Troisièmement, les mesures prises doivent faire en sorte que l'automatisation de l'agriculture contribue à des systèmes agroalimentaires durables et résilients. La mécanisation motorisée a procuré un grand nombre d'avantages, mais elle a eu aussi des effets préjudiciables sur l'environnement, notamment un appauvrissement de la biodiversité, une compaction et une érosion des sols, et une dégradation de la qualité des eaux. Les technologies plus évoluées d'automatisation numérique, comme l'agriculture de précision, peuvent réduire considérablement ou éviter ces effets. Les acteurs de la recherche technique et de la recherche agronomique appliquées doivent étudier les solutions d'automatisation qui s'adaptent le mieux à la situation agroécologique locale; quant aux pouvoirs publics, ils doivent faciliter l'utilisation de technologies d'automatisation respectueuses de l'environnement. Les agriculteurs peuvent choisir les solutions automatisées qui s'adaptent au mieux à leur situation agroécologique locale, mais les pouvoirs publics doivent créer un environnement

porteur, et notamment veiller à fournir des informations sur les technologies disponibles.

En conclusion, si l'on s'attache à relever les défis décrits ci-dessus, l'automatisation de l'agriculture peut agir comme un catalyseur en ce qui concerne la concrétisation des objectifs de développement durable (ODD), en particulier les ODD 1, 2, 3, 9 et 10. Le bon dosage entre les technologies – ainsi que les politiques, les interventions et les investissements – dépendra du niveau de développement économique, des institutions en place, des caractéristiques agronomiques locales et des objectifs des décideurs publics. Il est essentiel que ces derniers tiennent compte de la singularité du contexte d'utilisation et évaluent les problèmes spécifiques qui se posent dans une région (connectivité, inégalités, pauvreté, insécurité alimentaire ou malnutrition, par exemple) avant de décider des moyens d'action à associer. Le choix des technologies à utiliser appartient aux producteurs agricoles. La mise en place d'un environnement propice à l'innovation, mais aussi des incitations nécessaires pour rendre le processus d'adoption aussi inclusif que possible, incombe aux pouvoirs publics. ■

**CHINE**

Agriculteur utilisant une tablette pour surveiller une plantation de piment.
©iStock.com/xijian

CHAPITRE 1

QU'EST-CE QUE L'AUTOMATISATION DE L'AGRICULTURE ET EN QUOI EST-ELLE IMPORTANTE?

MESSAGES CLÉS

→ L'automatisation ouvre de nombreuses perspectives pour les producteurs agricoles et les systèmes agroalimentaires en général, mais les inégalités qui existent entre les pays et en leur sein s'agissant de l'accès aux technologies concernées et de l'adoption de celles-ci empêchent de concrétiser pleinement le potentiel de cette automatisation.

→ En particulier, l'automatisation de l'agriculture peut accroître la productivité, renforcer la résilience, améliorer la qualité des produits et l'efficience d'utilisation des ressources, réduire la pénibilité du travail et les pénuries de main-d'œuvre, augmenter la durabilité environnementale et faciliter l'atténuation du changement climatique et l'adaptation à ses effets.

→ L'automatisation de l'agriculture peut contribuer à la réalisation des objectifs de développement durable (ODD) d'ici à 2030, en particulier des ODD 1 (Pas de pauvreté) et 2 (Faim «zéro»), ainsi que des objectifs liés à la durabilité environnementale et au changement climatique, et amorcer des changements plus généraux dans les systèmes agroalimentaires en créant de nouvelles possibilités entrepreneuriales.

→ L'automatisation peut aussi créer des inégalités si elle reste inaccessible à certains, en particulier aux petits producteurs et aux agricultrices. Si elle n'est pas bien gérée, elle peut aussi avoir des conséquences néfastes sur l'environnement en contribuant, par exemple, à la monoculture.

→ Pour déployer tout le potentiel de l'automatisation de l'agriculture, les technologies concernées doivent être disponibles, inclusives, accessibles à tous et adaptées aux conditions locales (en restant indépendantes de l'échelle de production); elles doivent aussi améliorer la durabilité environnementale.

→ L'un des principaux enjeux est de faire en sorte que les technologies en question soient adaptées aux contextes locaux et que les processus d'innovation locaux soient encouragés, et de renforcer les capacités des producteurs s'agissant de la mise en place et de l'utilisation de ces nouvelles technologies.

L'évolution technologique, entraînée et facilitée par les processus d'innovation, a été tout au long de l'histoire un moteur essentiel de la transformation socioéconomique, en ce qu'elle a permis de réaliser des gains de productivité et de revenus et d'améliorer le bien-être humain. Il en a été ainsi pour les systèmes agroalimentaires comme pour les autres secteurs de l'économie. Aujourd'hui, pour nourrir une population mondiale en constante augmentation, il nous faut accroître la production d'aliments nutritifs tout en réglant les problèmes que sont la disponibilité limitée des terres agricoles, l'utilisation non durable des ressources naturelles, la multiplication des chocs et des facteurs de stress, ainsi que les conséquences de l'accélération du changement climatique. Il faut donc que les systèmes agroalimentaires relèvent le défi d'augmenter la productivité de manière durable. Il est de plus en plus urgent de mettre en place de nouvelles solutions technologiques susceptibles de renforcer la productivité et la durabilité de tous les secteurs de l'agriculture – cultures et élevage, pêche et aquaculture, et forêts – et de stimuler la productivité des systèmes agroalimentaires de façon à dépasser le niveau de la production primaire.

À mesure que l'évolution technologique continue de modifier nos économies, les dernières avancées des technologies numériques (ordinateurs et téléphones portables plus rapides, capteurs, apprentissage automatique et intelligence

artificielle [IA]) font émerger des outils révolutionnaires qui transforment l'utilisation des machines au service de l'agriculture. Comme pour les autres technologies, et les innovations en général, ces nouvelles technologies peuvent compléter ou remplacer les anciennes. Parfois, des technologies et des pratiques plus anciennes peuvent être réactivées ou réaffectées à de nouveaux usages. Elles peuvent permettre de dissocier de la production agricole non seulement une grande partie du travail physique, mais aussi le travail intellectuel nécessaire pour recueillir et analyser des informations et des données et prendre des décisions. Elles sont donc susceptibles de contribuer à la mise en œuvre d'une agriculture de précision¹ en améliorant la rapidité d'exécution des tâches et en permettant une application plus précise et plus efficiente des intrants.

Ce n'est pas la première fois dans l'histoire de l'humanité que l'on craint les conséquences négatives du progrès technologique pour les travailleurs. Dans la pratique, l'idée reçue selon laquelle l'automatisation entraîne des pertes d'emplois et une hausse du chômage ne se confirme pas dans les faits. Le présent rapport soutient, au contraire, que l'automatisation, y compris les technologies numériques, peut rendre la production agricole plus résiliente face aux chocs et aux facteurs de stress que représentent, par exemple, la sécheresse et l'accélération du changement climatique. L'automatisation de l'agriculture peut permettre d'augmenter la productivité, d'améliorer la qualité des produits, d'accroître l'efficience d'utilisation des ressources, de limiter les pénuries de main-d'œuvre et de promouvoir l'emploi décent, tout en réduisant la pénibilité au travail et en améliorant la durabilité environnementale. S'il faut reconnaître que la mise en place de technologies d'automatisation, en particulier si elles ne sont pas adaptées aux spécificités du contexte local, peut entraîner des difficultés socioéconomiques pour certains groupes (et notamment se ressentir négativement sur le marché du travail), il est possible de parer à cette éventualité en mettant en place des politiques et des mesures législatives appropriées; il en sera question dans le présent rapport. Les obstacles à la mise en œuvre pratique de l'automatisation, qui créent des inégalités d'accès, en particulier chez les petits producteurs pauvres, sont un enjeu tout aussi important.

L'automatisation de l'agriculture est d'une grande pertinence au regard de plusieurs ODD, surtout des ODD 1 (Pas de pauvreté) et 2 (Faim «zéro»). Selon le degré d'ouverture de l'agriculture mondiale à l'automatisation, cette dernière pourra aussi être un moteur en ce qui concerne la réalisation de l'ODD 9 (Industrie, innovation et infrastructure), qui appelle à renforcer et à améliorer les capacités technologiques ainsi que la recherche et l'innovation, en particulier dans les pays à faible revenu. De même, si les obstacles à l'adoption de l'automatisation sont surmontés, celle-ci peut jouer un rôle dans la réduction de la fracture technologique et favoriser la réalisation des ODD 5 (Égalité entre les sexes), 8 (Travail décent et croissance économique) et 10 (Inégalités réduites). Dans la mesure où elle est susceptible de fournir des conditions de travail plus sûres, ainsi qu'une alimentation plus saine et de meilleure qualité, l'automatisation agricole peut aussi contribuer à la réalisation de l'ODD 3 (Bonne santé et bien-être). Enfin, l'adoption de solutions d'automatisation améliorant la durabilité environnementale peut permettre d'accomplir des progrès au regard des ODD 6 (Eau propre et assainissement), 7 (Énergie propre et d'un coût abordable), 12 (Consommation et production responsables), 13 (Mesures relatives à la lutte contre les changements climatiques), 14 (Vie aquatique) et 15 (Vie terrestre).

Le présent rapport a pour objectif de montrer comment l'automatisation de l'agriculture, ainsi que des premiers maillons de la chaîne d'approvisionnement alimentaire, peut contribuer à la réalisation des ODD et avoir des retombées positives. Il fait le point sur l'état d'avancement de l'adoption de l'automatisation agricole, en s'intéressant notamment aux différentes évolutions observées en matière de mise en œuvre, aux moteurs de ces évolutions et à leurs potentielles incidences socioéconomiques. Il expose diverses solutions politiques et législatives susceptibles de porter à leur maximum tous les avantages et de réduire au minimum tous les risques qui découlent des technologies d'automatisation. Le chapitre 1 propose une définition de l'automatisation de l'agriculture, explique la pertinence de celle-ci au regard du développement durable et recense les possibilités, les difficultés et les compromis qui peuvent se faire jour du fait des nouvelles technologies d'automatisation ou être influencés par elles. L'un des principaux postulats sur

lesquels repose l'analyse livrée dans le présent rapport est que les progrès de l'automatisation de l'agriculture peuvent aider l'humanité à surmonter de nombreuses difficultés liées à la nécessité d'augmenter durablement la production d'aliments nutritifs, sachant que cette production accrue risque de s'accompagner de nouveaux défis qu'il faudra relever si l'on veut exploiter au mieux le potentiel de l'automatisation. ■

QUELLE A ÉTÉ L'ÉVOLUTION JUSQU'ICI?

Le processus d'évolution technologique, dans le cadre de la production agricole, n'est pas nouveau. L'histoire montre que l'humanité s'est constamment efforcée de réduire la pénibilité des travaux agricoles en mettant au point des outils ingénieux et en exploitant la force du feu, du vent, de l'eau et des animaux. Vers 4000 avant notre ère, les agriculteurs mésopotamiens utilisaient des charrues tirées par des bœufs², et les moulins à eau sont apparus en Chine vers 1000 avant Jésus-Christ³. L'évolution technologique s'est accélérée au cours des deux derniers siècles avec la découverte de la vapeur (et l'apparition des batteuses et charrues à vapeur, au milieu du XIX^e siècle), avant d'être encore renforcée, plus tard, avec l'avènement des tracteurs, moissonneuses et machines de transformation agricole utilisant les énergies fossiles, et avec l'essor des nouvelles techniques de conservation des aliments, entre autres^{4,5}. Ces évolutions ont permis aux sociétés, partout dans le monde, de réduire progressivement la pénibilité de la production agricole et de libérer les producteurs du lourd labeur physique associé à l'agriculture. Ainsi, la production agricole primaire nécessite désormais moins de main-d'œuvre, celle-ci pouvant être déployée dans d'autres secteurs, tels que l'industrie et les services; les enfants sont libres d'aller à l'école et les femmes peuvent se tourner vers des emplois non agricoles ou se consacrer à leur foyer. Ces évolutions se sont accompagnées de progrès considérables dans d'autres domaines de l'agriculture et en ce qui concerne les intrants, tels que les semences, les engrains et l'irrigation – progrès qui ont conduit à la révolution verte et permis à la production alimentaire de se développer, même avec une main-d'œuvre réduite et une expansion limitée des terres agricoles⁶.

Ce processus d'augmentation de la productivité agricole et de réaffectation de la main-d'œuvre en dehors du secteur agricole est souvent appelé «transformation agricole». À mesure que les économies se développent, les technologies à faible intensité de main-d'œuvre poussent les travailleurs agricoles à quitter les exploitations et à se tourner vers les activités rentables des secteurs non agricoles, à savoir les secteurs de l'industrie et des services^{7,8,9}. La part de la population travaillant dans l'agriculture diminue donc à mesure que progresse la transformation agricole. Avant la révolution industrielle, la plupart des habitants de la planète vivaient dans des zones rurales et dépendaient de la production agricole primaire pour assurer leur subsistance. Ce n'est plus le cas dans les pays ayant opéré une transformation agricole profonde. Aux États-Unis d'Amérique, par exemple, l'agriculture employait seulement 1,4 pour cent de la population active en 2020¹⁰. Il en est de même dans d'autres pays à revenu élevé, où une très petite part de la population travaille directement dans les exploitations agricoles.

Ce processus de transformation agricole ne s'opère pas de manière isolée; il suppose une mutation de l'ensemble de l'économie. En effet, la fourniture d'une alimentation saine et nutritive en quantité suffisante à des populations croissantes et de plus en plus urbanisées nécessite des investissements non seulement dans la production agricole, mais aussi dans les domaines du transport, du stockage et de la transformation des aliments, ainsi que dans d'autres infrastructures matérielles et commerciales. Un accès aux routes et aux transports est nécessaire pour permettre aux producteurs agricoles de s'approvisionner en intrants adaptés, notamment en capital physique et humain, et de pénétrer des marchés lucratifs avec leurs produits.

Aujourd'hui, le processus d'automatisation de l'agriculture s'effectue dans un contexte où les systèmes agroalimentaires sont en pleine mutation. En effet, l'automatisation de l'agriculture a des incidences sur les systèmes agroalimentaires au-delà de l'agriculture primaire, et est elle-même influencée par des évolutions qui dépassent la production primaire. L'automatisation de la production primaire peut être un moteur de la transformation des systèmes agroalimentaires, notamment en ce qu'elle crée de nouvelles

possibilités entrepreneuriales en amont comme en aval. Réciproquement, l'automatisation des segments amont et aval a des incidences sur l'automatisation de la production primaire. Ces différentes incidences dépendent de la dynamique des systèmes agroalimentaires, de leurs composantes et des liens bidirectionnels qui se forment entre eux.

L'adoption d'une technologie est, par ailleurs, un processus progressif¹¹, qui nécessite une certaine pratique, des mises à l'essai, ainsi qu'une adaptation de la technologie concernée aux diverses réalités contextuelles; ses effets mettent donc du temps à se manifester. Par exemple, si l'essor des tracteurs mécanisés a, sans conteste, apporté de nombreux avantages, il a également eu des répercussions négatives sur l'environnement – déforestation, appauvrissement de la biodiversité et utilisation excessive de combustibles fossiles – qui ne sont devenues visibles qu'après plusieurs décennies^{12, 13}. Le même raisonnement peut être appliqué aux technologies adoptées dans le cadre de la révolution verte, qui ont incontestablement permis d'améliorer fortement le rendement, mais moyennant un coût environnemental à long terme parfois très élevé¹³. ■

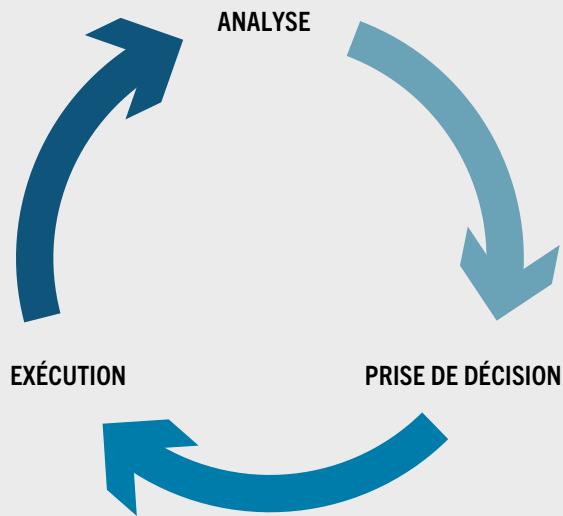
QU'EST-CE QUE L'AUTOMATISATION DE L'AGRICULTURE?

L'automatisation de l'agriculture telle qu'elle s'effectue actuellement est l'aboutissement d'une longue évolution de la mécanisation qui s'est opérée tout au long de l'histoire de l'agriculture. L'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) définit la mécanisation comme l'utilisation de tout matériel ou machine (allant des outils à main les plus élémentaires jusqu'aux machines motorisées les plus sophistiquées) pour la réalisation d'activités agricoles¹⁴. Avec la mécanisation, seule l'exécution des travaux agricoles est ainsi automatisée, et le degré d'automatisation augmente à mesure que l'on passe des outils à main aux machines motorisées.

Deux phases précèdent toujours la phase d'exécution de toute activité agricole: l'analyse et la prise de décision. La **figure 1** (page 5) montre que

les trois phases de l'activité agricole constituent un cycle où s'opère une rétroaction continue entre les différentes phases. La mise en œuvre de toute activité agricole – de la récolte à la lutte contre les maladies, en passant par l'irrigation – commence généralement par une analyse du problème à régler afin de déterminer, le cas échéant, quelle est l'action nécessaire. Par exemple, avant d'irriguer, les producteurs doivent savoir si les plantes ont besoin d'eau. De même, les éleveurs doivent connaître l'état de santé des animaux avant de leur administrer des antibiotiques. Cette analyse peut être réalisée sur la base de l'expérience des producteurs, mais elle peut aussi être automatisée, grâce à des capteurs placés sous le contrôle des producteurs. Une fois l'analyse effectuée, les producteurs décident de ce qui doit être fait (ils déterminent, par exemple, la quantité d'eau ou d'antibiotiques nécessaire) et à quel moment. Ils peuvent prendre ces décisions en fonction de leur expérience et de leurs connaissances, ou les automatiser, au moyen de contrôleur qui envoient des signaux à partir des informations reçues par les capteurs durant la phase d'analyse. Au cours de la troisième et dernière phase (exécution), les agriculteurs peuvent soit exécuter directement les activités agricoles visées, avec l'aide d'outils à main ou d'animaux, soit activer diverses machines. Les technologies les plus avancées permettent d'automatiser entièrement les trois phases. Les robots utilisés pour la récolte des fruits en sont un bon exemple. Ils exécutent ces trois phases de manière séquentielle et automatique, tandis que les producteurs n'ont plus qu'à surveiller les capteurs et à entretenir le matériel.

Toute technologie qui permet d'automatiser au moins une de ces trois phases peut être considérée comme une technologie d'automatisation. La mécanisation motorisée, qui utilise la puissance d'un moteur¹⁵, se concentre essentiellement sur la dernière des trois phases: l'exécution. Elle permet d'automatiser des activités agricoles telles que le labour, l'ensemencement, la fertilisation, la traite, le nourrissage, la récolte et l'irrigation, entre autres. Dans le présent rapport, toute technologie qui assiste les producteurs agricoles dans une ou plusieurs des trois phases présentées à la **figure 1** est considérée comme une technologie d'automatisation. Sont donc inclus les cas où les producteurs agricoles utilisent des capteurs pour assurer le suivi des plantes

FIGURE 1 CYCLE EN TROIS PHASES DES SYSTÈMES D'AUTOMATISATION

SOURCE: Figure élaborée par la FAO pour le présent rapport.

et des animaux, automatisant ainsi la phase d'analyse, mais où ils prennent des décisions en se fondant sur leur propre expérience, sans l'aide de matériel automatisé. Dans certains cas, la phase d'exécution peut également comporter des tâches de détection (pour établir des cartes des cultures en période de récolte, par exemple), qui alimentent ensuite l'analyse, d'où la représentation cyclique de la **figure 1**.

Avec l'essor des technologies numériques et du matériel automatisé (capteurs et robots, par exemple) qui s'appuient sur l'apprentissage automatique et l'IA, l'automatisation des phases d'analyse et de prise de décision devient possible. De plus en plus, l'utilisation de machines motorisées est complétée, voire supplante, par celle de nouveaux outils numériques qui automatisent l'analyse et la prise de décision. Il est possible, par exemple, de convertir un tracteur classique en un véhicule automatisé capable d'ensemencer un champ de manière autonome¹⁵. Ainsi, si la mécanisation facilite et réduit les travaux pénibles et répétitifs et remédie aux pénuries de main-d'œuvre, les technologies d'automatisation numérique améliorent encore

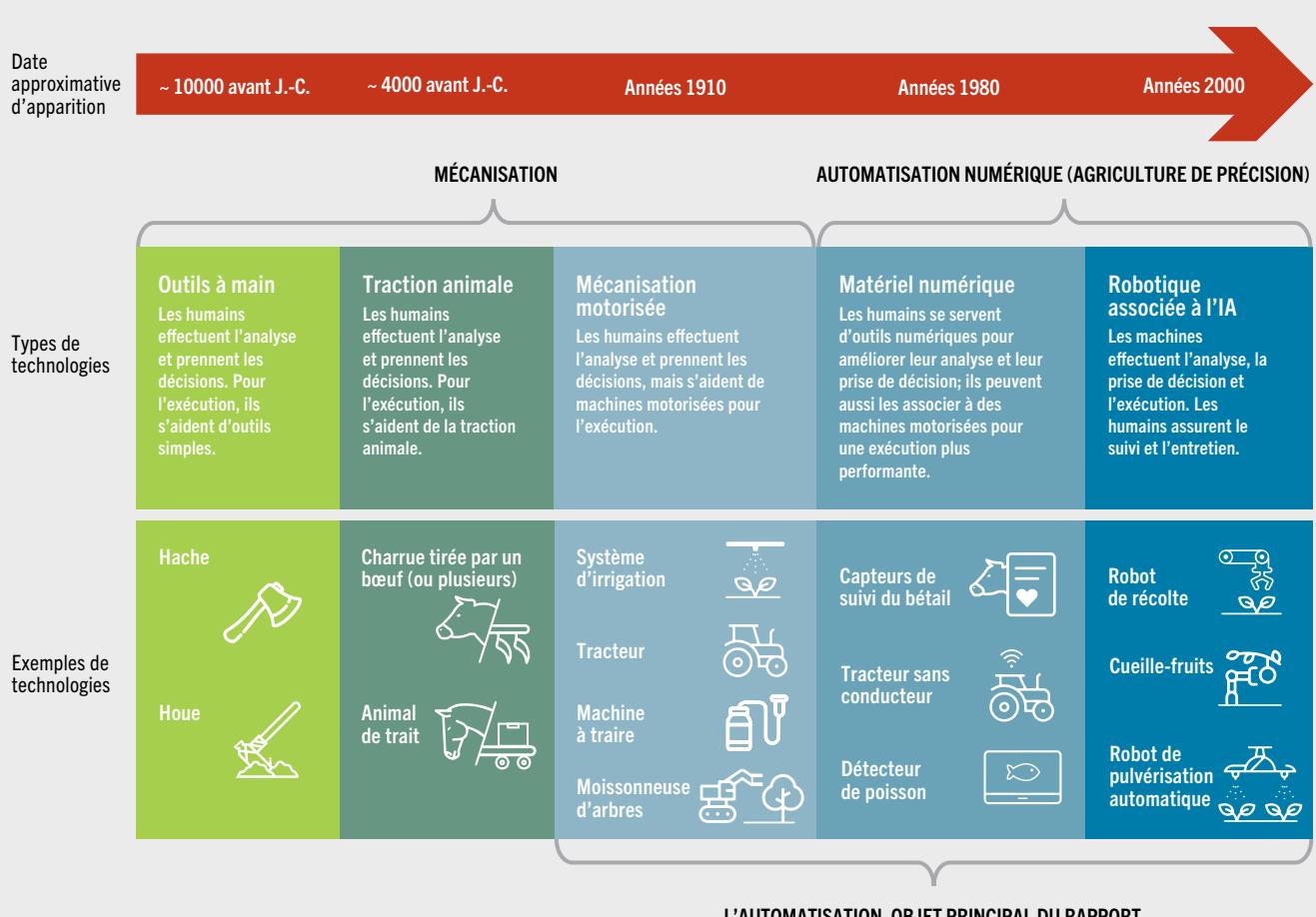
la productivité en permettant une exécution plus précise des activités agricoles et une utilisation plus efficiente des ressources et des intrants. Par conséquent, l'automatisation numérique peut apporter une valeur ajoutée en matière de durabilité environnementale et permettre de renforcer la résilience face aux chocs et aux facteurs de stress climatiques. Cependant, ses conséquences possibles sur la main-d'œuvre doivent être scrupuleusement prises en considération, comme on le verra plus loin.

La **figure 2** rend compte de l'évolution technologique en montrant l'évolution progressive des technologies agricoles (chacune étant illustrée par des exemples), depuis celles qui aident uniquement les humains à exécuter physiquement les activités, jusqu'à celles qui les assistent dans l'analyse et la prise de décision. L'évolution technologique peut être résumée en distinguant les catégories de technologies ci-après:

- ▶ **Outils à main:** les phases d'analyse et de prise de décision sont réalisées par les humains, qui s'aident ensuite d'outils simples, tels que des haches et des houes, pour la phase d'exécution.

CHAPITRE 1 QU'EST-CE QUE L'AUTOMATISATION DE L'AGRICULTURE ET EN QUOI EST-ELLE IMPORTANTE?

FIGURE 2 ÉVOLUTION DE L'AUTOMATISATION AGRICOLE



SOURCE: Figure élaborée par la FAO pour le présent rapport.

- ▶ **Traction animale:** ce sont toujours les humains qui effectuent l'analyse et prennent les décisions, mais ce sont des animaux, à l'aide d'outils agricoles tels que des charrois, qui effectuent ou facilitent les activités agricoles physiques.
- ▶ **Mécanisation motorisée:** les humains continuent de réaliser l'analyse et de prendre les décisions, mais ce sont des machines et des outils motorisés qui exécutent les activités. Cette catégorie marque un changement concernant la source d'énergie utilisée au sein des exploitations agricoles, puisque l'on passe d'une source interne (les muscles des humains et des animaux, par exemple) à une source externe (les combustibles fossiles et l'électricité, par

exemple). Cette évolution nécessite toutefois des infrastructures spécifiques pour que les sources d'énergie soient disponibles à tout moment.

- ▶ **Matériel numérique:** les humains sont assistés d'un vaste éventail d'outils numériques qui leur permettent d'améliorer l'analyse et/ou la prise de décision, soit par l'automatisation du travail intellectuel, soit au moyen de machines motorisées plus précises.
- ▶ **Robotique associée à l'IA:** pour toutes les fonctions d'analyse, de prise de décision et d'exécution, les humains s'appuient sur des robots agricoles dotés de l'IA. Ceux-ci peuvent être statiques (trayeuses robotisées, par exemple)

ou mobiles (robots de récolte de fruits, par exemple). Les humains surveillent les capteurs et entretiennent les robots. Cette catégorie regroupe les technologies d'automatisation les plus avancées, dont certaines n'ont pas encore été déployées à grande échelle ou sont encore en cours de développement.

Malheureusement, le fait qu'il existe une telle variété d'outils et de technologies a contribué à un manque de cohérence entre les différentes définitions de l'automatisation de l'agriculture que l'on trouve dans la littérature, et a entravé les efforts de recueil de données relatives à l'automatisation¹¹. Par exemple, certains définissent l'automatisation de l'agriculture comme la navigation autonome, sans intervention humaine, de robots qui fournissent des informations précises pour aider à développer les activités agricoles¹⁶. D'autres la définissent comme la réalisation de tâches de production au moyen de dispositifs mobiles, autonomes et mécatroniques capables de prendre des décisions¹⁷. Cependant, ces définitions sont très restrictives et ne rendent pas compte de l'automatisation sous tous ses aspects et toutes ses formes – les équipements statiques, tels que les machines à traire robotisées, en sont un exemple. De plus, les diverses définitions excluent non seulement une bonne partie des machines motorisées qui automatisent l'exécution des travaux agricoles, mais aussi les outils numériques (tels que les capteurs) qui automatisent uniquement la phase d'analyse.

La **figure 2** (page 6) présente une vue simplifiée de l'évolution réelle des technologies d'automatisation au cours de l'histoire; des chevauchements et des zones grises peuvent exister entre les catégories. Néanmoins, cette représentation aide à circonscrire le principal sujet d'étude du présent rapport et à définir l'automatisation de l'agriculture. Les trois cases bleues concentrent la notion d'automatisation de l'agriculture, thème central du rapport. Ainsi, nous nous proposons de définir l'automatisation de l'agriculture comme

l'utilisation, pour les travaux agricoles, de machines et de matériel qui améliorent l'analyse, la prise de décision ou l'exécution, en réduisant la pénibilité du travail et/ou en accroissant la rapidité des tâches, et éventuellement leur précision. ■

Selon cette définition, l'automatisation agricole englobe l'agriculture de précision, qui est une stratégie de gestion permettant de recueillir, de traiter et d'analyser des données en vue d'améliorer les décisions de gestion (voir le glossaire).

À la première case bleue de la **figure 2**, on trouve la mécanisation motorisée, qui regroupe les machines actionnées par des humains pour effectuer des tâches telles que le labour, l'irrigation et la traite. Cependant, l'analyse est effectuée par les humains (en fonction de leur propre observation ou de la mesure de paramètres simples), qui prennent alors des décisions basées sur l'expérience (interne ou externe), les connaissances et les ressources disponibles. Les deux dernières catégories de la **figure 2** concernent l'automatisation numérique. Elles regroupent un vaste éventail d'outils, de matériel et de logiciels qui sont, ou peuvent être, multifonctionnels et interdisciplinaires, et permettent d'assurer la gestion des ressources de l'ensemble du système de manière extrêmement optimisée, individualisée, intelligente et anticipative¹⁸. À mesure que les technologies d'automatisation numérique (robotique associée à l'IA) se développent, les trois phases – analyse, prise de décision et exécution – peuvent être automatisées, le rôle des humains étant limité essentiellement au suivi et à l'entretien du matériel. C'est par exemple le cas pour les cueille-fruits: en fonction des informations fournies par les capteurs, le contrôleur délivre un message au bras, qui procède alors à la cueillette.

L'automatisation peut porter sur une ou plusieurs de ces trois phases, qui sont liées entre elles. Par exemple, l'analyse peut être effectuée par des capteurs alors que la prise de décision et l'exécution dépendent entièrement des humains. Ou bien les phases d'analyse et de prise de décision peuvent être assurées par des technologies numériques tandis que l'exécution est réalisée par des humains. On citera le robot de pulvérisation automatique comme exemple de système entièrement automatisé (c'est-à-dire, où les trois phases sont automatisées): le dispositif obtient d'abord des données sur la fertilité du sol, qui lui permettent de déterminer ensuite la zone d'intervention et le taux d'épandage; enfin, il applique l'engrais en fonction de ce taux variable. ■

POURQUOI TIRER PARTI DE L'AUTOMATISATION DE L'AGRICULTURE? COMPRENDRE LES PRINCIPAUX MOTEURS DE L'AUTOMATISATION DE L'AGRICULTURE

L'automatisation de l'agriculture s'inscrit dans le cadre d'une transformation plus générale des systèmes agroalimentaires. Elle aide les producteurs agricoles à maintenir ou à accroître leur production lorsque la main-d'œuvre se détourne de l'agriculture pour se diriger vers des secteurs mieux rémunérés de l'économie. En plus de soulager le secteur agricole d'une partie de ses besoins en main-d'œuvre, l'automatisation peut aller dans le sens de la transformation des systèmes agroalimentaires en créant des possibilités d'emploi à d'autres niveaux de ces systèmes. Historiquement, à mesure que les pays se développent, des emplois plus attractifs détournent les travailleurs de l'agriculture, et les innovations à faible intensité de main-d'œuvre augmentent la productivité agricole tout en réduisant les besoins en main-d'œuvre par unité de production^{7, 8, 9}. L'évolution conjuguée de l'offre et de la demande de main-d'œuvre entraîne alors, au fil du temps, une baisse de la part de la population employée dans l'agriculture, y compris dans les pays à faible revenu et les pays à revenu intermédiaire de la tranche inférieure (voir la figure 3, page 9).

Cette transformation s'accompagne d'un accroissement des innovations, des mutations technologiques et des investissements, autant d'éléments essentiels au développement socioéconomique qui influent sur les systèmes agroalimentaires au-delà de la production primaire. Par exemple, fournir une alimentation saine et nutritive en quantité suffisante à une population de plus en plus urbaine et nombreuse nécessite des investissements, non seulement dans l'agriculture, mais aussi dans les domaines du transport, du stockage et de la transformation des aliments, ainsi que dans d'autres infrastructures. Les secteurs agricole et non

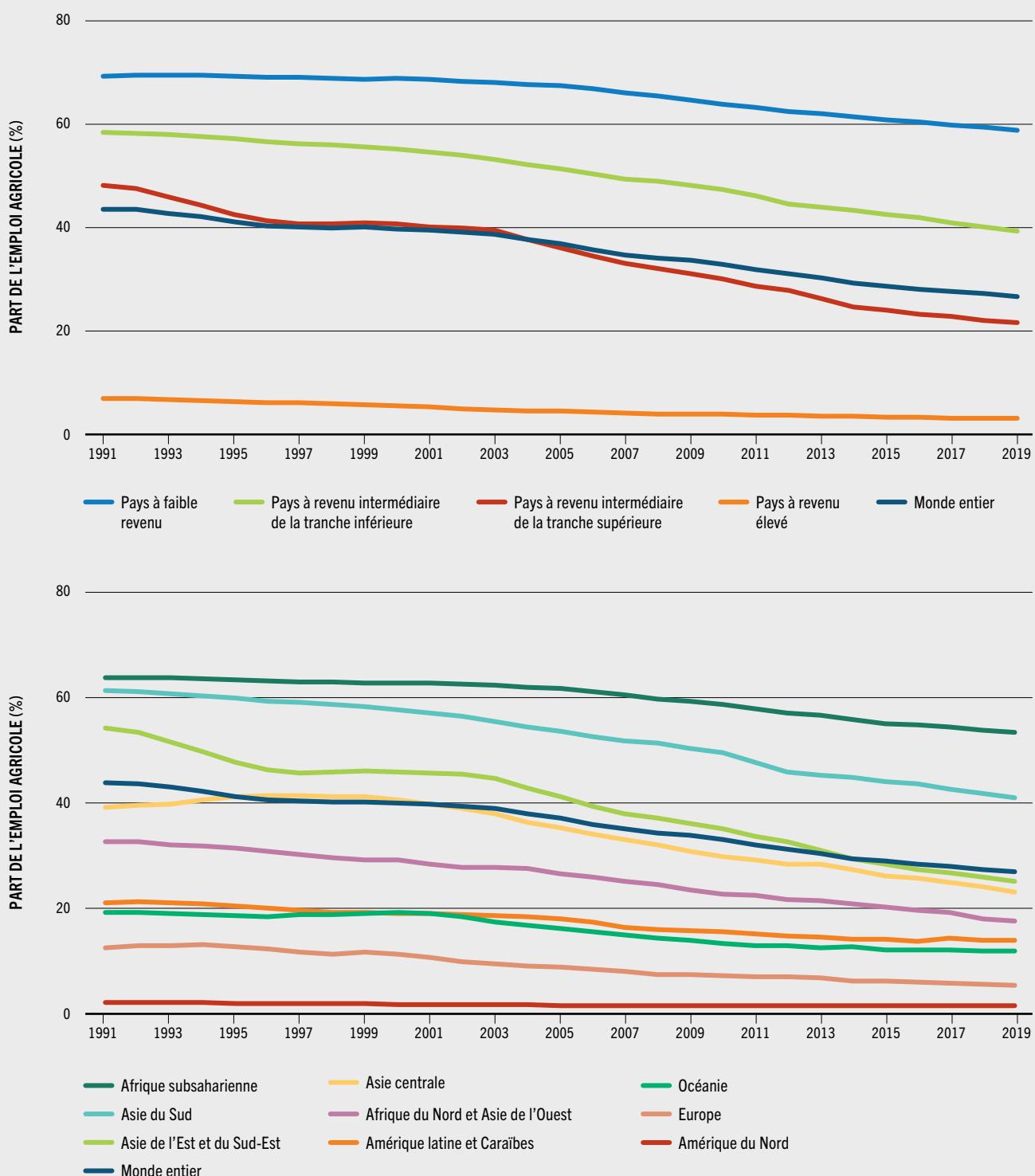
agricole sont donc reliés en amont comme en aval¹⁰. Dans le cadre de cette transformation des systèmes agroalimentaires, l'automatisation de l'agriculture peut avoir de multiples effets bénéfiques, dont il est question ci-dessous.

Possibilités offertes aux producteurs agricoles

L'automatisation de l'agriculture offre de nombreuses possibilités pour la production primaire et, plus largement, pour les systèmes agroalimentaires. Elle peut contribuer à accroître la productivité et la rentabilité des terres et de la main-d'œuvre, en permettant par exemple une gestion plus rapide et plus prudente des cultures et du bétail^{21, 22, 23}. En découlent, par ricochet, une hausse des revenus²⁴, une diminution des risques, une meilleure résilience et une plus grande durabilité environnementale. Avec l'avancée des technologies numériques, l'automatisation de l'agriculture est susceptible de devenir indépendante de l'échelle de production, c'est-à-dire que des solutions d'automatisation pourraient exister à toutes les échelles (grandes, moyennes et petites exploitations agricoles), et donc de devenir accessible aussi aux petits producteurs. Pour y parvenir, il convient soit de mettre au point des machines et du matériel de petite envergure, adaptés aux conditions qui prévalent dans les petites exploitations et unités de production, soit de négocier des accords de partage d'actifs reposant sur des plateformes numériques (voir le chapitre 3).

L'automatisation de l'agriculture peut, par ailleurs, faire progresser l'emploi décent, d'une part en offrant des conditions de travail meilleures et plus sûres, ainsi qu'un revenu de subsistance suffisant, et d'autre part en réduisant la charge de travail dans le secteur agricole, dont une grande partie est assumée par des membres de la famille non rémunérés, notamment les femmes et les enfants^{25, 26}. Le temps ainsi libéré pourrait permettre aux adultes d'effectuer d'autres activités à valeur ajoutée ou des travaux en dehors de l'exploitation agricole, d'apporter des soins ou de préparer les aliments²⁷, et aux enfants de jouer et d'aller à l'école^{26, 28, 29}. Tout porte à croire que, parmi les avantages de la trayeuse, les retombées positives sur le mode de vie sont les plus appréciées par les producteurs agricoles qui l'ont adoptée, car ils ont alors plus de temps pour effectuer d'autres tâches

FIGURE 3 PART DE L'EMPLOI AGRICOLE PAR RAPPORT À L'EMPLOI TOTAL, PAR NIVEAU DE REVENU DES PAYS (EN HAUT) ET PAR RÉGION (EN BAS), 1991-2019



SOURCE: FAO, 2022¹⁹.

- » que la traite ou profiter de leur famille et leur journée de travail est plus souple^{30,31}. Les bénéfices liés à l'allégement de la pénibilité peuvent particulièrement contribuer à l'autonomisation des femmes rurales, qui disposent de plus de temps pour entreprendre de nouvelles initiatives productives et/ou pour développer les activités existantes dans les systèmes agroalimentaires. Ils contribuent aussi à attirer les jeunes vers le secteur.

Un autre aspect important de l'automatisation de l'agriculture est qu'elle ouvre des possibilités entrepreneuriales dans le secteur rural. Par exemple, le coût et la disponibilité de la main-d'œuvre sont l'un des principaux obstacles à la production biologique. Bien qu'il existe une forte demande de produits biologiques dans de nombreux pays, les consommateurs hésitent à payer beaucoup plus cher pour en acheter. Le recours à des robots pour effectuer le désherbage, la récolte sélective et d'autres activités dans les champs pourrait réduire considérablement le coût de la production biologique, offrant ainsi des possibilités à davantage de producteurs.

Par le passé, pour que certaines opérations puissent être réalisées de manière automatisée par des engins motorisés, il fallait adapter la production agricole. Par exemple, lorsque les récolteuses de tomates ont été adoptées aux États-Unis d'Amérique, une variété de tomates spécifique, qui mûrissait uniformément sur le pied et dont la peau dure ne se cassait pas facilement lorsqu'elle était manipulée brutalement par une machine, a été mise au point³². Les nouvelles avancées des technologies d'automatisation numérique peuvent offrir des solutions pour des tâches agricoles beaucoup plus précises. Par exemple, les ingénieurs cherchent actuellement des solutions robotiques pour la récolte mécanique des fraises, l'une des espèces cultivées les plus délicates et qui nécessite une intensité de main-d'œuvre parmi les plus élevées.

Au-delà du périmètre de l'exploitation agricole elle-même, les technologies de transformation, de conservation, de stockage et de transport peuvent aider à réduire les pertes et le gaspillage de nourriture, à améliorer la sécurité sanitaire des aliments et à créer de la valeur ajoutée³³, autant d'éléments indispensables à des systèmes agroalimentaires efficaces permettant à tous

d'adopter des régimes alimentaires sains de manière durable. L'automatisation peut, de surcroît, offrir des conditions de travail plus sûres aux travailleurs, par exemple en réduisant les risques professionnels liés à l'utilisation de pesticides.

Remédier aux pénuries de main-d'œuvre

En ce qui concerne l'emploi, l'automatisation de l'agriculture a été accueillie comme une solution aux graves pénuries de main-d'œuvre rurale survenant en particulier dans les pays à revenu élevé (voir la figure 3). Les statistiques montrent que, au cours des 10 dernières années, 2,5 millions d'actifs se sont détournés de l'agriculture dans l'Union européenne, une baisse supplémentaire de 2 pour cent par an étant attendue jusqu'en 2030³⁴. La faible attractivité des métiers agricoles (conditions de travail difficiles, bas salaires, manque de perspectives, etc.) en est la raison principale. Les confinements liés à la covid-19 et les mesures de distanciation sociale ont aggravé les pénuries de main-d'œuvre, et les événements politiques ayant conduit à l'adoption de réglementations et de politiques en matière d'immigration ont restreint l'accès à la main-d'œuvre saisonnière et migrante.

Dans de nombreuses entreprises agricoles, en particulier de production de fruits et de légumes, l'intervention humaine est indispensable dans les tâches telles que la cueillette, l'emballage ou le traitement des maladies. D'autres secteurs, comme l'élevage, peuvent eux aussi nécessiter une main-d'œuvre importante. Les solutions d'automatisation pourraient pallier les graves pénuries de main-d'œuvre et permettre aux producteurs agricoles de s'adapter aux chocs soudains qui perturbent les marchés du travail, et ainsi d'être plus résilients. De plus, ces solutions peuvent contribuer à l'emploi décent en créant un grand nombre d'emplois qualifiés qui offrent un revenu de subsistance et des conditions de travail raisonnables, susceptibles d'attirer de jeunes travailleurs qualifiés³⁵. Des activités de formation et de renforcement des capacités sont nécessaires pour garantir une transition harmonieuse et inclusive (voir les chapitres 4 et 5).

Étant donné que la main-d'œuvre rurale disponible dans le monde entier est de moins en moins nombreuse à mesure que les économies

poursuivent leur transformation (voir la [figure 3](#)), le maintien et l'amélioration de la productivité agricole nécessiteront probablement une automatisation, tout au moins pour effectuer des tâches à forte intensité de main-d'œuvre. Dans de nombreuses régions du monde, la baisse de l'offre de main-d'œuvre rurale a entraîné une hausse des salaires agricoles, favorisant l'adoption de technologies à faible intensité de main-d'œuvre^{3,36}.

Évolution des habitudes de consommation

La mondialisation a contribué à modifier les habitudes et les préférences alimentaires, ainsi que la demande des consommateurs, et a également conduit à l'établissement de normes plus strictes en matière de sécurité sanitaire des aliments³⁷. Les consommateurs, en particulier dans les pays à revenu élevé, se soucient de plus en plus de ce qu'ils mangent et de la manière dont leurs aliments sont produits, transformés et transportés³⁸. On s'inquiète aussi davantage des divers risques pour la santé que présentent les maladies végétales et animales ou l'utilisation excessive de pesticides et d'autres produits chimiques. Les technologies avancées d'automatisation numérique peuvent faciliter le repérage rapide des foyers d'épidémie et permettre un traitement précoce et précis, préservant ainsi la sécurité des consommateurs et limitant les pertes financières pour les producteurs. C'est particulièrement important dans l'élevage (puisque environ 60 pour cent des maladies infectieuses émergentes sont d'origine animale), où les systèmes automatisés peuvent jouer un rôle efficace dans la prévention et la maîtrise des zoonoses³⁹. Les technologies d'automatisation numérique peuvent, par ailleurs, permettre de réduire l'application de pesticides et de produits chimiques sur les cultures: les organismes nuisibles et les maladies étant ciblés avec plus de précision, la protection des plantes peut être assurée avec efficacité et un minimum de risques pour la santé. Du fait de leurs exceptionnelles précision et aptitude à suivre de manière normalisée les procédures de sécurité sanitaire des aliments, ces technologies permettent une prévention et une maîtrise des organismes nuisibles et des maladies plus efficaces que celles effectuées par des humains, ce qui se traduit par de nettes améliorations de la sécurité sanitaire des aliments. Non seulement elles tuent les agents

pathogènes et bloquent plus efficacement les voies de transmission, mais elles limitent de surcroît l'utilisation de produits chimiques⁴⁰.

Les préoccupations croissantes des consommateurs concernant la qualité, le goût et la fraîcheur des aliments incitent à investir davantage dans les technologies d'automatisation numérique (capteurs et dispositifs de cartographie, par exemple) qui aident à surveiller les conditions de température et d'humidité. L'évolution rapide des préférences et des besoins des consommateurs joue ainsi un rôle clé dans la mise en œuvre de l'automatisation dans le secteur agricole⁴¹.

Durabilité environnementale et bien-être animal

L'automatisation de l'agriculture est essentielle à l'avenir des systèmes agroalimentaires, compte tenu des préoccupations environnementales et éthiques croissantes relatives à la production et à la consommation alimentaires. Les technologies d'automatisation numérique, en particulier, peuvent apporter de nombreux avantages. Des essaims de petits robots autonomes (voir le glossaire) pourraient réduire la compaction des sols et la pollution des cours d'eau, créant ainsi les conditions d'une agriculture de conservation, qui, quant à elle, permet de renforcer la conservation des terres et des sols ainsi que la biodiversité alimentaire et agricole, et d'améliorer les services écosystémiques au sein des systèmes agricoles⁴². Les technologies d'automatisation numérique peuvent, par ailleurs, optimiser l'utilisation des ressources naturelles telles que l'eau, grâce à l'irrigation automatisée par exemple. Les robots autonomes dans le secteur des fruits rouges pourraient réduire la consommation de fongicides et d'énergie, et faire baisser les émissions de carbone si'ils sont alimentés à l'énergie solaire. Cependant, le processus énergivore de construction de robots et d'autres dispositifs technologiques utilisés dans l'agriculture de précision doit également être pris en compte dans la mesure des empreintes carbone⁴³.

L'automatisation de l'agriculture peut aider à relever certains des défis liés au changement climatique et ainsi faciliter les efforts d'adaptation à celui-ci. C'est notamment le cas des technologies d'automatisation numérique

qui, de par leurs applications (dans l'agriculture de précision, par exemple), peuvent améliorer l'efficience d'utilisation des ressources dans un contexte de plus en plus difficile pour les producteurs agricoles. De plus, lorsqu'elles sont appliquées à la détection et à l'alerte rapide, ces technologies peuvent aider à faire face à l'incertitude et à l'imprévisibilité des conditions météorologiques découlant de l'accélération du changement climatique.

À mesure que la taille et le nombre des troupeaux augmentent, ce qui nuit au bien-être animal, la gestion du bétail se complique⁴⁴. Dans ce contexte, les nouvelles technologies d'automatisation, telles que l'élevage de précision, peuvent aider les agriculteurs à surveiller et à contrôler de manière automatisée, en continu et en temps réel, la productivité animale, les impacts environnementaux et les paramètres de santé et de bien-être des animaux⁴⁵. Différents systèmes faisant appel à diverses technologies (capteurs, caméras ou microphones) peuvent détecter les anomalies et alerter directement les agriculteurs, leur permettant d'intervenir à un stade précoce. Si ces technologies sont prometteuses, leur utilisation soulève des préoccupations éthiques, en particulier du fait de leur incidence possible sur la relation entre humains et animaux (qui joue un rôle essentiel, car elle peut influer à la fois sur le bien-être et sur la productivité des animaux) et du risque que l'animal soit chosifié et que la notion de soins, ainsi que l'identité des agriculteurs en tant que responsables des animaux, soit mise à mal^{46, 47}. Les avantages comme les enjeux éthiques doivent être pris en considération lors de l'évaluation des différentes technologies.

L'ampleur de la contribution de l'automatisation numérique à une agriculture plus efficace, plus productive, plus inclusive, plus résiliente et plus durable dépendra en grande partie des avancées réalisées pour lever les obstacles à l'adoption de cette automatisation. Un environnement favorable ainsi que des solutions adaptées aux conditions et aux besoins locaux sont nécessaires. ■

DIFFICULTÉS LIÉES AUX PROGRÈS DE L'AUTOMATISATION DE L'AGRICULTURE

Comme pour toute évolution technologique, l'automatisation de l'agriculture peut avoir des conséquences négatives sur les plans social et environnemental. Aussi, bien que les avantages susmentionnés soient à espérer, ils ne sont pas automatiques et supposent une bonne gestion. Des facteurs structurels au sein du secteur agricole et de l'économie en général peuvent entraver l'adoption inclusive et durable de l'automatisation dans l'agriculture. La fragmentation des terres, par exemple, qui représente une forte contrainte dans de nombreuses régions, peut compromettre la viabilité économique de cette automatisation. Le manque d'infrastructures adaptées (routes, connectivité, électricité, etc.) peut aussi être un facteur déterminant et exclure de l'automatisation de l'agriculture les producteurs travaillant dans des zones plus défavorisées et plus isolées. Dans certaines conditions, cette automatisation peut déplacer la main-d'œuvre rurale et avoir des répercussions négatives sur l'environnement en provoquant, par exemple, une dégradation des terres et un appauvrissement de la biodiversité. Ces écueils sont présentés dans les sections suivantes et sont examinés plus en détail aux chapitres 2 et 4.

Inégalités en matière de capacités

Les avantages espérés de l'automatisation de l'agriculture peuvent ne pas être répartis équitablement entre les producteurs et autres parties prenantes, ce qui accentue les inégalités sociales et en crée de nouvelles en favorisant des acteurs déjà puissants dans le domaine de la production alimentaire^{48, 49}. Cela peut être le cas en particulier si les entreprises technologiques – déjà de grande envergure et très puissantes sur les marchés – conservent et détiennent des données, qu'elles sont susceptibles d'utiliser de manière non conforme aux politiques de protection des données, ce qui créerait des monopoles de données⁵⁰. Les inégalités peuvent aussi se creuser si les producteurs les plus gros, les plus riches et les plus instruits disposent de plus grandes

capacités (capacités financières, infrastructures rurales et compétences, par exemple) pour investir dans de nouvelles technologies ou pour se recycler et acquérir de nouvelles compétences. En effet, de nombreux agriculteurs peuvent ne pas disposer des capacités de base nécessaires pour utiliser des technologies d'automatisation numérique ou ne pas comprendre comment elles fonctionnent. Un bon agriculteur n'est pas nécessairement un expert des technologies numériques, et il en va de même pour les spécialistes de la vulgarisation et les prestataires de services. Le renforcement des capacités et l'adaptation des exploitations sont essentiels à l'adoption et la bonne utilisation de matériel automatisé; ce n'est qu'en déployant des capacités que les agriculteurs peuvent tirer pleinement parti du potentiel de l'automatisation¹⁵.

À cet égard, les femmes sont souvent plus marginalisées que les hommes en matière de possibilités d'éducation¹⁸ et ont moins accès au financement⁵¹. Généralement, ce sont les hommes qui prennent en charge l'achat et la vente des récoltes et qui possèdent et exploitent le nouveau matériel; les femmes, qui ont donc moins de contrôle sur les revenus produits, se trouvent reléguées aux tâches à plus forte intensité de main-d'œuvre que sont le désherbage et le repiquage⁵². De même, les jeunes des milieux ruraux, en particulier les femmes, rencontrent d'importants obstacles s'agissant de recevoir une éducation et une formation de qualité, ainsi que d'accéder à la terre, au crédit ou aux marchés⁵³.

Conséquences sur la main-d'œuvre

D'après des données récentes provenant d'autres secteurs, l'automatisation pourrait entraîner une hausse de la demande d'emplois mieux rémunérés nécessitant une éducation secondaire (emplois comprenant, par exemple, des tâches de gestion et d'analyse de données), où les humains ont un avantage comparatif par rapport aux machines, mais une baisse de la demande d'emplois comportant des tâches routinières (plantation et récolte, par exemple)^{54, 55}. Plus les pays se développent, plus les chiffres de l'emploi dans le secteur agricole diminuent; toutefois, environ 300 à 500 millions d'actifs salariés vivent encore de l'agriculture⁵⁶. Dans de nombreux pays, le pourcentage de la main-d'œuvre travaillant dans l'agriculture reste élevé – c'est le cas au Burundi

(86 pour cent), en Somalie (80 pour cent), au Malawi (76 pour cent), au Tchad (75 pour cent), au Niger (73 pour cent) et en Ouganda (72 pour cent) –, ce qui va souvent de pair avec des taux élevés d'analphabétisme, de pauvreté et d'inégalités de genre.

Dans ces pays, une baisse des besoins directs en main-d'œuvre par unité de production peut créer des inégalités ou creuser celles qui existent déjà. Dans certains contextes, l'automatisation de l'agriculture peut donc être peu intéressante et irréalisable d'un point de vue politique. Au bout du compte, l'incidence sur la main-d'œuvre et les salaires sera déterminée par toute une série de facteurs, notamment par la capacité de créer des emplois nouveaux et plus attractifs, ou de faire émerger d'autres possibilités d'emploi décent en dehors du secteur agricole. Elle dépendra aussi de la question de savoir si les effets d'échelle (lorsque les agriculteurs augmentent l'échelle de leur production ainsi que leurs revenus) l'emportent sur les effets de substitution (lorsque la main-d'œuvre quitte le secteur)⁵⁷. Néanmoins, si l'automatisation de l'agriculture s'accompagne des bonnes politiques et de l'environnement législatif et réglementaire approprié, elle peut ouvrir des perspectives économiques, favoriser des emplois décents offrant un revenu de subsistance et des conditions de travail raisonnables, et attirer à nouveau les jeunes vers le secteur agricole.

Préoccupations d'ordre environnemental

Il est à craindre que, s'ils ne sont pas bien gérés, certains types d'automatisation agricole, en particulier ceux qui reposent sur des machines lourdes et de grande taille, puissent compromettre la durabilité et la résilience environnementales en contribuant à la déforestation, à la monoculture, à l'appauvrissement de la biodiversité, à la dégradation des terres, à la compaction et à l'érosion des sols, à la salinisation et au dysfonctionnement des systèmes de drainage⁵⁸. Si ces considérations doivent être prises au sérieux, bon nombre de ces problèmes peuvent néanmoins être évités ou limités au moyen de politiques et d'une législation appropriées. De plus, de nouvelles avancées dans le domaine des machines et du matériel d'automatisation – et en particulier du petit matériel reposant sur l'IA – pourraient en réalité permettre de contrer certains des effets

néfastes des anciennes machines d'automatisation sur l'environnement (voir le chapitre 3).

Les possibilités, les conséquences et les écueils potentiels de l'automatisation de l'agriculture dépendent de la technologie utilisée, de sa conception et de son degré d'adaptation aux conditions et aux réalités locales. En outre, le niveau de développement socioéconomique ainsi que les contraintes institutionnelles et politiques déterminent la palette des technologies susceptibles d'être adoptées. Par conséquent, les effets – positifs et négatifs – de l'automatisation de l'agriculture sont très spécifiques au contexte. Il importe d'évaluer si les conditions environnementales, sociales et politiques sont favorables dans chaque pays ou région avant de proposer des solutions d'automatisation spécifiques. Toutes les technologies d'automatisation ne conviennent pas à tous les contextes et des versions adaptées peuvent être à envisager. ■

TRANSFORMER LES DIFFICULTÉS EN POSSIBILITÉS

Pour réaliser leur plein potentiel, les technologies d'automatisation de l'agriculture doivent être accessibles à tous, notamment aux petits producteurs agricoles des pays à faible revenu où les outils à main et la traction animale sont encore couramment utilisés, ce qui entrave la productivité agricole et nuit aux moyens de subsistance. En d'autres termes, le processus d'automatisation doit devenir indépendant de l'échelle de production. Dans des circonstances favorables, il pourrait même être possible de sauter certaines étapes de l'évolution technologique, en passant directement d'une agriculture de basse technologie, fondée sur le travail manuel ou la traction animale, à l'automatisation. On pourrait y parvenir grâce à des technologies indépendantes de l'échelle de production de par leur conception, au moyen d'arrangements institutionnels innovants (coopératives et associations, par exemple) ou en passant par des mécanismes de marché qui permettent aux petits producteurs agricoles de surmonter les contraintes d'échelle. Par exemple, du matériel agricole coûteux et sophistiqué peut être mis à la disposition des agriculteurs locaux

par l'intermédiaire de prestataires de services de location, qui sont souvent eux-mêmes des producteurs ayant investi dans des animaux de trait et/ou des tracteurs et du matériel similaire.

Les outils numériques sont aussi très prometteurs en ce qui concerne les services de location. Ils peuvent donner naissance à de nouveaux modèles commerciaux permettant aux petits producteurs agricoles d'adopter des technologies d'automatisation. On citera l'exemple d'Uber qui, sur le même principe que l'application de transport avec chauffeur du même nom, permet aux producteurs d'accéder à des services de location de tracteurs. La robotique et l'IA reposent sur les technologies numériques; par conséquent, les pays doivent faire tout leur possible pour offrir un accès plus large aux technologies numériques en favorisant les infrastructures essentielles, les cadres juridiques appropriés et les connaissances et compétences nécessaires.

Pour y parvenir, les producteurs agricoles et les pouvoirs publics doivent d'abord reconnaître les avantages économiques, sociaux et environnementaux que comportent la diffusion et l'adoption des technologies numériques. Par la suite, il est essentiel de veiller à la disponibilité, au caractère inclusif et à l'accessibilité de ces technologies, ainsi qu'à leur adaptabilité aux conditions locales, en faisant en sorte de toucher l'ensemble des bénéficiaires potentiels afin d'éviter d'accentuer les fractures technologiques qui désavantagent les groupes vulnérables (les femmes, par exemple) et les territoires isolés. En 2018, la FAO et la Commission de l'Union africaine ont lancé le Cadre pour une mécanisation agricole durable en Afrique, qui fournit une liste d'éléments prioritaires que les pays doivent prendre en compte lors de l'élaboration de leurs stratégies de mécanisation agricole durable⁵⁹. En application de ce cadre, la mécanisation doit être intégrée à l'ensemble de la chaîne de valeur agricole, axée sur le secteur privé, compatible avec l'environnement et intelligente face au climat, en plus d'être économiquement viable et abordable – en particulier pour les petits agriculteurs, qui constituent la majeure partie des agriculteurs africains. Il est aussi essentiel qu'elle cible les femmes et les jeunes, en particulier dans le but de faire de l'agriculture un choix plus attractif dans une perspective d'emploi décent et d'entrepreneuriat.

Ainsi, lorsqu'il s'agit d'encourager l'adoption de l'automatisation, il importe de centrer l'action sur des technologies adaptées aux conditions locales et aux besoins particuliers des producteurs; lorsqu'elle est simplement extraite d'un certain contexte, une technologie peut ne pas résoudre les problèmes concrets qui se posent dans un nouveau contexte. À cet égard, des études montrent que les agriculteurs eux-mêmes peuvent être les chefs de file de l'innovation. Au Myanmar, par exemple, l'adoption des techniques d'impression 3D améliore l'efficacité agricole et donne du pouvoir aux actifs des zones rurales et aux travailleurs les plus pauvres en leur permettant de prendre part individuellement et de manière créative à la production de matériaux agricoles, de pièces de machines agricoles et d'outils⁶⁰. Alors que le rôle des producteurs agricoles est de plus en plus reconnu comme étant le premier moteur de l'innovation en matière de développement technologique, la terminologie et les approches spécifiques ont évolué et intègrent aujourd'hui la pensée propre aux systèmes d'innovation, l'accent étant mis sur la participation des parties prenantes à différents niveaux, y compris des agriculteurs et des conseillers agricoles. Il convient de faire la part belle au partage et à l'échange de connaissances, à la collaboration et à la participation, ainsi qu'à la production conjointe d'idées et de solutions par des acteurs publics et privés⁶¹.

Les solutions d'automatisation doivent envisager des systèmes d'innovation agricole spécifiques aux contextes tant nationaux que régionaux; une approche unique partout dans le monde ne fonctionnera pas. Il faut procéder avec précaution lorsque l'on cherche à mettre en œuvre une solution éprouvée dans un environnement nouveau ou une situation différente. Le contexte de mise en œuvre est d'une importance essentielle. ■

SUR QUOI PORTE LE PRÉSENT RAPPORT?

Le présent rapport traite du rôle de l'automatisation dans la production agricole primaire (cultures, élevage, forêts, pêche et aquaculture). Plus largement, au niveau des systèmes agroalimentaires, il s'intéresse aussi à l'automatisation en aval de la chaîne de valeur, à

proximité de la production primaire, par exemple à la manutention et à la transformation après récolte au sein des exploitations agricoles; l'analyse est toutefois centrée sur l'étape primaire. Le champ d'étude est limité à la production primaire et aux premiers maillons de la chaîne de valeur, sur la base de deux postulats. Premièrement, l'automatisation de la production primaire et d'autres activités agricoles est essentielle si l'on veut atteindre divers ODD liés à l'amélioration de la sécurité alimentaire et de la nutrition, à la réduction de la pauvreté (rurale) et au renforcement de la durabilité environnementale. Face à la multiplication des chocs et des facteurs de stress, l'automatisation agricole peut également contribuer à créer des moyens de subsistance ruraux résilients. En outre, elle peut permettre de garantir des conditions de travail plus sûres pour les producteurs et les travailleurs agricoles. Deuxièmement, bien qu'il soit reconnu dans le présent rapport que l'automatisation de l'agriculture n'intervient pas de manière isolée en dehors des processus de transformation similaires concernant d'autres composantes des systèmes agroalimentaires, une analyse approfondie des moteurs et des incidences de l'automatisation, au-delà de la production primaire, serait trop complexe et ardue pour faire l'objet d'une seule édition de ce rapport.

Les auteurs s'interrogent donc sur la manière dont l'adoption de l'automatisation, dans l'agriculture et aux premiers maillons de la chaîne d'approvisionnement alimentaire, peut appuyer des hausses de productivité durables et inclusives dans le secteur agricole et les systèmes agroalimentaires au sens large, et contribuer à la réalisation des ODD. Ils s'intéressent en particulier à la manière de lever les obstacles à l'adoption et de faire en sorte que les changements apportés par l'automatisation soient plus inclusifs et mieux alignés sur les objectifs de réduction de la pauvreté et d'amélioration de la sécurité alimentaire, de la nutrition et de la durabilité environnementale.

Ils s'efforcent de répondre aux questions suivantes:

- ▶ Quels sont les moteurs qui favorisent l'adoption de l'automatisation dans le secteur agricole, et les obstacles à cette adoption, en particulier dans les pays à faible revenu et les pays à revenu intermédiaire de la tranche inférieure?

- ▶ Quels sont les gains d'efficience qui justifient l'automatisation d'un point de vue économique?
- ▶ Comment l'automatisation peut-elle être adaptée aux besoins des divers petits producteurs, en particulier des femmes et des jeunes?
- ▶ Quelles sont les incidences probables de l'automatisation sur la main-d'œuvre, l'emploi décent et l'inclusion?
- ▶ Comment l'automatisation peut-elle faciliter la durabilité environnementale et la résilience face aux chocs et aux facteurs de stress?

Le rapport s'appuie sur les éléments factuels issus de 27 études de cas concernant les technologies du spectre de l'automatisation présenté à la **figure 2** (page 6), à différentes échelles de production (petite, moyenne, grande) et dans différents secteurs (cultures, élevage, aquaculture, agroforesterie). Ces études de cas portent sur différents types de prestataires de services, notamment des entreprises privées, des organisations à but non lucratif et des associations de producteurs de toutes les régions du monde. Le **tableau 1** résume le champ couvert par ces études s'agissant des technologies utilisées, des échelles d'activité des producteurs et des systèmes de production. L'annexe 1 comprend une description sommaire de chaque étude de cas; on trouvera une description plus détaillée dans les deux études techniques commandées^{62, 63}. Le rapport se fonde également sur quatre autres documents de référence qui résument les éléments factuels issus de la littérature et des données disponibles^{20, 64, 65, 66}. Pour les domaines non traités dans les documents commandés ni les études de cas, tels que les forêts ou la mécanisation à petite échelle, le rapport fait appel à des cas présentés dans la littérature, ainsi qu'à des données d'enquête issues du Système d'information sur les moyens d'existence ruraux (RuLIS) de la FAO et de l'Étude sur la mesure des niveaux de vie (LSMS) de la Banque mondiale.

Telles qu'elles sont réparties, ces études de cas offrent une vision représentative des principales difficultés, possibilités et conséquences potentielles de l'adoption de l'automatisation dans différents contextes. Elles sont liées, entre autres: i) au coût (prix d'achat ou coût d'exploitation) de la mise en œuvre, qui fait que l'adoption de l'automatisation peut ne pas être rentable pour certains; ii) aux connaissances et aux capacités,

par exemple des producteurs (qui peuvent manquer de compétences numériques ou ne pas savoir utiliser certains appareils automatisés), des jeunes ou d'autres parties prenantes; iii) à la disponibilité de l'infrastructure nécessaire en matière de gestion des données et de technologies de l'information pour acquérir, traiter et partager les données voulues; iv) à l'accessibilité de la maintenance technique et de l'entretien, lorsqu'il s'agit de réparer le matériel et de fournir une aide à la maintenance; v) à la santé et à la sécurité (car l'automatisation peut réduire considérablement la pénibilité, mais aussi accroître les menaces à la cybersécurité et augmenter le risque d'accidents du travail); vi) aux améliorations potentielles et aux enjeux de la durabilité et de l'environnement, y compris en matière d'utilisation de l'énergie; et vii) au rôle favorable ou défavorable que peuvent jouer la culture et la tradition dans l'adoption de l'automatisation.

Le reste du rapport est organisé comme suit. Le chapitre 2 donne un aperçu des technologies d'automatisation de l'agriculture et évoque les divers moteurs et évolutions de l'adoption de l'automatisation, ainsi que la manière dont ils diffèrent d'une région à l'autre. Il porte sur la manière dont les technologies d'automatisation numérique complètent ou remplacent les anciennes machines motorisées, et présente le potentiel des solutions numériques pour l'agriculture non mécanisée. Le chapitre 3 propose une analyse de la rentabilité des technologies d'automatisation agricole, mettant en lumière les défis auxquels sont confrontés les producteurs et les prestataires de services. Il montre comment les politiques, la législation et les investissements peuvent jouer un rôle d'incitation à titre privé, et s'interroge sur les moyens de lever les obstacles à l'adoption, d'adapter les solutions d'automatisation aux besoins locaux et d'exploiter le matériel numérique pour améliorer la durabilité environnementale. Le chapitre 4 est axé sur les conséquences – à la fois positives et négatives – de l'automatisation agricole sur l'emploi décent et la demande de main-d'œuvre, l'accent étant mis en particulier sur les groupes vulnérables tels que les femmes et les jeunes. Le chapitre 5 conclut le rapport en présentant une feuille de route en matière de politiques, de législation et d'investissements en vue de lever les

TABLEAU 1 NOMBRE D'ÉTUDES DE CAS PAR ÉCHELLE DE PRODUCTION, NIVEAU D'AUTOMATISATION ET SECTEUR

NIVEAU D'AUTOMATISATION	ÉCHELLE DE L'ACTIVITÉ AGRICOLE		
	Petite échelle	Moyenne échelle	Grande échelle
Mécanisation motorisée	 (3)	 (2)	 (1)
	 (1)	 (1)	 (1)
Matériel numérique	 (1)	 (2)	
	 (2)	 (9)	 (12)
	 (11)	 (3)	 (2)
	 (4)		
Robotique associée à l'IA	 (1)	 (1)	
	 (1)	 (4)	 (5)
		 (2)	 (2)
 Agroforesterie		 Aquaculture	 Cultures
 Élevage			

* NOTES: Les chiffres entre parenthèses indiquent le nombre d'études de cas concernant un secteur et une échelle de production donnés. Une étude de cas peut couvrir plus d'une dimension, c'est pourquoi la somme des chiffres entre parenthèses dépasse 27. Aucun cas de robotique associée à l'IA utilisée par de petits producteurs n'a été recensé; cependant, un document d'information spécifique présente le potentiel de cette technologie pour les petits agriculteurs⁶⁵.

SOURCE: Tableau élaboré par la FAO pour le présent rapport.

obstacles à l'adoption et de faire en sorte que l'automatisation de l'agriculture contribue à des systèmes agroalimentaires efficaces, productifs, durables, résilients et inclusifs. Il énumère, par ailleurs, les éventuels compromis qu'il faudra

trouver entre ces différents objectifs et évalue de quelle manière les pays devraient hiérarchiser leurs actions en fonction de leur niveau de développement économique, de leurs institutions et des objectifs de leurs décideurs publics. ■



**FÉDÉRATION
DE RUSSIE**
Robot de nourrissage
des vaches.
©ANDREY-SHA74/
Shutterstock.com

CHAPITRE 2

COMPRENDRE LE PASSE ET ENVISAGER L'AVENIR DE L'AUTOMATISATION DANS LE SECTEUR AGRICOLE

MESSAGES CLÉS

- ➔ La mécanisation motorisée est un vecteur important d'automatisation de la production agricole et un rouage essentiel de la transformation de l'agriculture dans le monde entier, bien que son adoption soit hétérogène et particulièrement faible en Afrique subsaharienne.
- ➔ Améliorer l'accès des petits producteurs agricoles, notamment des femmes, des jeunes et d'autres groupes marginalisés, à des solutions de mécanisation durables suppose des innovations technologiques et institutionnelles, telles que des marchés pour les services de mécanisation facilités par des plateformes numériques.
- ➔ Du fait de leur utilisation croissante et de leur diversité, les technologies numériques sont en mesure de transformer l'agriculture, même dans les pays à faible revenu et les pays à revenu intermédiaire, surtout à mesure que leur accessibilité s'accroît.
- ➔ Les facteurs qui incitent à l'adoption varient selon les technologies et les contextes. L'adoption des robots de traite, par exemple, est principalement motivée par la plus grande souplesse dans les horaires de travail et la meilleure qualité de vie qu'elle induit. Pour les technologies d'automatisation des cultures, l'augmentation de la rentabilité est le principal intérêt, alors qu'en forêt, c'est la sécurité au travail qui joue un rôle important.
- ➔ Un éventail de solutions technologiques existe déjà pour les pays à différents stades de développement – et beaucoup d'autres pistes sont à l'étude. Grâce à

des politiques et à des législations pertinentes, les autorités publiques peuvent promouvoir des solutions adaptées au contexte et aux besoins particuliers des différents producteurs.

➔ Il faut notamment donner aux petits producteurs agricoles l'accès à des technologies d'automatisation numérique abordables et adaptées, qui leur permettent de les adopter et d'en tirer les avantages.

Pendant plusieurs siècles, la force musculaire humaine et animale a été la principale source d'énergie utilisée en agriculture. Jusqu'à récemment, l'automatisation de l'agriculture consistait essentiellement à remplacer les animaux de trait et la main-d'œuvre humaine par du matériel motorisé pour de nombreux travaux agricoles, comme la préparation des terres, le désherbage, la récolte, l'irrigation, la traite et le nourrissage des animaux, ainsi que pour les activités de manutention sur l'exploitation, comme le battage et le broyage.

Depuis peu, les technologies numériques d'automatisation (voir la [figure 2](#), page 6) ont investi le secteur agricole sous des formes variées, étant soit intégrées aux machines agricoles existantes, soit utilisées isolément. Dans les deux cas, ces technologies peuvent améliorer les analyses et les décisions des producteurs agricoles. Avec l'intégration de ces technologies aux machines agricoles, le travail agricole peut gagner en précision, ce qui débouche sur des gains d'efficience et de productivité.

Ces technologies sont donc en mesure de faire évoluer les moyens de subsistance ruraux et les paysages agricoles qui y sont associés, notamment la production végétale et l'élevage, l'aquaculture et les forêts. S'agissant de la production végétale, elles peuvent améliorer la productivité des intrants tels que les semences, les engrains et l'eau. Concernant l'élevage et l'aquaculture, elles peuvent réduire la pénibilité des tâches et accélérer les travaux, tout en améliorant l'efficacité des intrants comme les aliments pour animaux. Enfin, dans tous les secteurs agricoles, et tout particulièrement en forêt, les machines peuvent améliorer les conditions de travail et offrir un environnement de travail plus sûr.

Ce chapitre présente les évolutions mondiales en matière de technologies d'automatisation, l'analyse portant sur les différences d'un pays ou d'une région à l'autre et sur les facteurs à l'origine de ces différences. Les données étant rares, le propos s'appuie en grande partie sur des études de cas tirées de publications et sur deux documents d'information établis aux fins de ce rapport^{1,2} (l'annexe 1 donne une description complète des 27 études de cas commandées). Ce chapitre s'inscrit dans une perspective historique, depuis l'introduction de la mécanisation motorisée et sa diffusion dans les pays à revenu élevé jusqu'à son transfert vers certains pays à faible revenu et pays à revenu intermédiaire. Il décrit les facteurs et les obstacles en lien avec l'adoption des technologies et leur rôle dans les disparités régionales en matière d'adoption. Il éclaire aussi certains arbitrages nécessaires du fait de l'automatisation, notamment les éventuelles conséquences écologiques des machines motorisées. Il montre comment les technologies numériques modifient l'usage des machines agricoles et met en évidence le potentiel des solutions numériques pour l'agriculture non mécanisée. Enfin, il dresse un état des lieux des technologies d'automatisation numérique à l'échelle mondiale et indique dans quelle mesure elles peuvent remplacer la mécanisation motorisée traditionnelle et contrer certains de ses effets négatifs. ■

ÉVOLUTIONS ET FACTEURS DE LA MÉCANISATION MOTORISÉE DANS LE MONDE ENTIER

Des rythmes d'adoption qui varient considérablement d'une région à l'autre

La mécanisation motorisée a pris un essor considérable dans le monde entier. Les données disponibles montrent qu'elle a d'abord été adoptée à grande échelle aux États-Unis d'Amérique, où les tracteurs sont devenus la principale source de force motrice sur les exploitations et ont remplacé quelque 24 millions d'animaux de trait entre 1910 et 1960³. Au Royaume-Uni de Grande-Bretagne et d'Irlande du Nord, qui fait figure d'exception, le premier usage des tracteurs remonte aux années 1930. En revanche, la transformation de l'agriculture au Japon et dans certains pays européens (Allemagne, Danemark, Espagne, ex-Yougoslavie et France) a attendu le milieu des années 1950, après quoi la mécanisation motorisée s'est imposée très rapidement, et s'est entièrement substituée à la traction animale⁴. L'utilisation de tracteurs comme force motrice agricole constitue l'une des modernisations les plus importantes du XX^e siècle, car elle a favorisé, et même entraîné, des innovations concernant d'autres types de machines et de matériel agricoles, par exemple les batteuses, les moissonneuses et un large éventail d'outils connexes⁵. Cela a considérablement réduit la pénibilité des travaux agricoles et accéléré le travail des agriculteurs. Par la suite, de nombreux pays d'Asie et d'Amérique latine ont avancé rapidement dans l'adoption des machines motorisées⁶. L'Afrique subsaharienne, en revanche, est la seule région du monde où les progrès accomplis vers la mécanisation motorisée ont stagné au cours des dernières décennies⁷, malgré une adoption plus rapide dans certains pays du continent.

Le manque de données est un obstacle notoire à l'analyse des évolutions en matière d'adoption de machines agricoles. La grande diversité de machines et de matériel connexe utilisés dans la mécanisation agricole représente un véritable défi du point de vue de la collecte de données (l'**encadré 1** indique comment la FAO prévoit de relever ce défi). Les machines se classent généralement

ENCADRÉ 1 REMÉDIER AUX PROBLÈMES EN MATIÈRE DE DONNÉES SUR L'UTILISATION DES MACHINES AGRICOLES

Jusqu'en 2009, la Base de données statistiques fondamentales de l'Organisation (FAOSTAT) fournissait régulièrement des informations sur l'utilisation et les échanges commerciaux (en volume et en valeur) des machines et du matériel agricoles. Des séries statistiques débutant en 1961 ont été publiées sur un nombre relativement restreint d'éléments, à savoir le nombre total de tracteurs agricoles, de moissonneuses et de batteuses, de machines à traire, de machines pour le sol et de machines agricoles.

La principale source de données était un questionnaire annuel envoyé aux interlocuteurs de la FAO dans chaque pays, lequel portait à la fois sur l'utilisation et les échanges. Certaines données recueillies dans le cadre de ces questionnaires provenaient des recensements agricoles nationaux (qui ont lieu normalement tous les 10 ans) et, dans la mesure du possible, elles étaient mises à jour entre les recensements grâce à des annuaires, d'autres sources ministérielles et des portails de données. La plupart des pays communiquaient des données sur le commerce sans préciser le nombre de machines en service: cela a fait naître des préoccupations quant aux données et à la nécessité d'améliorer à la fois la qualité et le niveau de détail de l'ensemble de données.

Au début des années 2010, la FAO a révisé le questionnaire afin de demander aux pays des informations plus détaillées, notamment au sujet des types de machines. Ces données ont été complétées par les quantités et les valeurs échangées, tirées de la base de données Comtrade de l'Organisation des Nations Unies (ONU); les données encore manquantes ont été obtenues grâce à un ensemble de sources secondaires, notamment des études de cas par pays.

La révision du questionnaire n'a toutefois pas apporté le taux de réponse escompté. Seuls quelques pays ont été en mesure de fournir des détails supplémentaires, et la fiabilité de l'ensemble des informations externes s'est avérée limitée. Le questionnaire révisé a donc cessé d'être diffusé et les données actuellement disponibles (recueillies en 2011) s'arrêtent en 2009. On sait donc très peu de choses sur la manière dont l'adoption de machines et de matériel agricoles a évolué au cours des 10 dernières années. C'est un obstacle majeur qui nous empêche de cerner pleinement l'évolution des systèmes agricoles.

La Division de la statistique de la FAO a entamé le processus de mise à jour de la base de données sur les machines en regroupant différentes sources de données. La méthode est encore en cours d'élaboration et, désormais, elle s'appuie davantage sur les données d'enquête, ainsi que sur les recensements agricoles. Ces prochaines années, des données d'enquête seront probablement relevées dans le cadre d'une série de projets auxquels la FAO participe, notamment le Programme d'enquête agricole et rurale intégrée (AGRSurvey) et l'Initiative 50x2030 destinée à combler les lacunes en matière de données agricoles. Ces projets visent à fournir une assistance technique et à promouvoir la collecte de données en agriculture sur une série de sujets relatifs aux variables socioéconomiques et environnementales, suivant une approche modulaire et parcimonieuse qui couvre les périodes entre les recensements. Parmi ceux proposés, un module porte sur les données concernant la disponibilité et l'utilisation des machines.

En outre, les microdonnées issues des recensements agricoles sont progressivement publiées de manière plus systématique. Pour les périodes entre les recensements, les données sur l'utilisation et les stocks de machines sont tirées d'un certain nombre d'enquêtes, telles que l'enquête auprès des ménages soutenue par la Banque mondiale – l'Étude sur la mesure des niveaux de vie – et d'autres enquêtes nationales similaires. Une série d'indicateurs harmonisés et de microdonnées provenant de ces enquêtes est compilée dans la base de données du Système d'information sur les moyens d'existence ruraux de la FAO (RuLIS), qui constitue ainsi une autre source de données sur l'utilisation des machines.

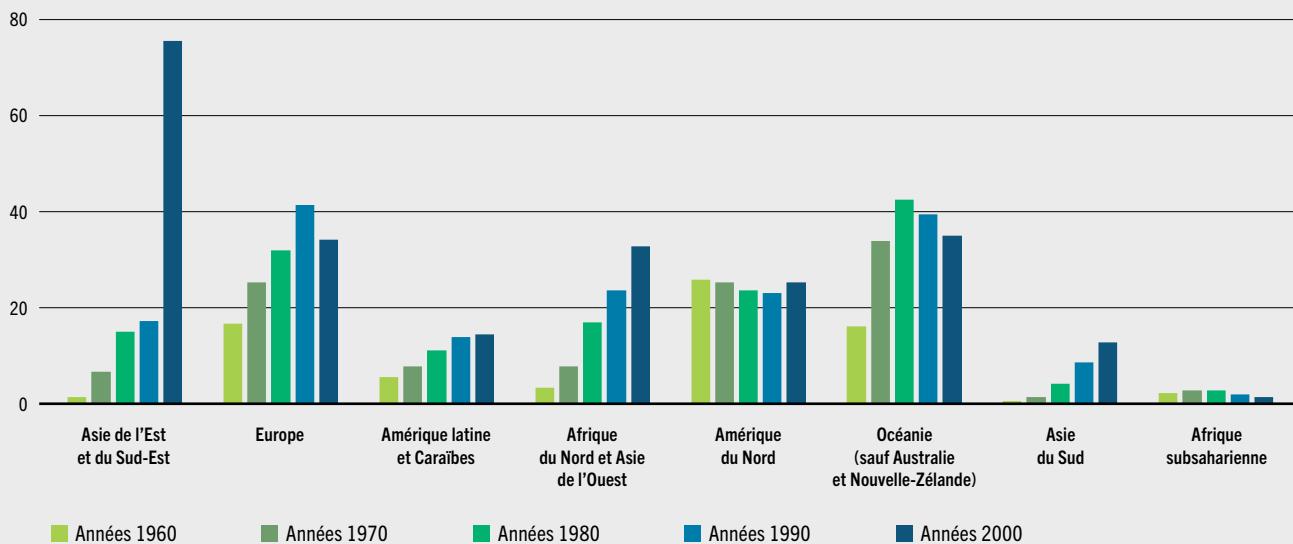
L'ensemble de données actualisé précisera la quantité de machines et d'outils utilisés et produits, et le volume de machines importées et exportées (ainsi que les valeurs commerciales y relatives).

La FAO prévoit d'évaluer toutes les sources fiables possibles par la collecte, le traitement et la mise au point d'un ensemble de données normalisées d'ici à 2023. À plus long terme, le domaine de données sur les machines sera mis à jour à partir des éléments recueillis grâce au questionnaire révisé qui aura été distribué aux pays.

en deux catégories: i) les machines à moteur, telles que les tracteurs, les pompes à eau et les moissonneuses; et ii) les accessoires sans moteur, mais qui fonctionnent en association avec une

machine à moteur (par exemple, les accessoires pour tracteurs comme les charrues et les semoirs, et les systèmes d'irrigation). Les données recueillies concernent généralement les machines

FIGURE 4 NOMBRE DE TRACTEURS UTILISÉS POUR 1 000 HECTARES DE TERRES ARABLES



NOTES: L'expression «tracteurs agricoles» désigne l'ensemble des tracteurs à roues, des tracteurs à chenilles et des chenillards utilisés dans l'agriculture. Un quatrième type de tracteur (motoculteurs) a été pris en compte pour un sous-ensemble de pays à partir de 2000. Seuls les pays ayant régulièrement fourni des données entre 1961 et 2009 ont été pris en compte (soit 108 pays au total). Faute de données, l'Asie centrale a été omise. Voir l'annexe 2 pour connaître la liste complète des pays, y compris les 33 pays pour lesquels le quatrième type (motoculteurs) a été pris en compte à partir de 2000.

SOURCE: FAO, 2021⁹.

à moteur. Toutefois, même pour cette catégorie, elles sont rares car les conditions agroécologiques et agraires varient fortement d'un pays à l'autre. Les différences de zones agroclimatiques, d'état des sols, de topographie et d'orientation de la production exigent que l'on utilise différents types de machines et de matériel. Ainsi, les tracteurs peuvent avoir des tailles et des caractéristiques diverses (quatre ou deux roues, par exemple). De même, différents systèmes de production animale et aquacole peuvent nécessiter des types de machines très variés, qu'il s'agisse, par exemple, des systèmes de nourrissage ou des machines à traire dans le cas de la production animale.

S'appuyant sur les données disponibles les plus récentes, tout en tenant compte de leur caractère lacunaire et obsolète, la figure 4 illustre la progression mondiale de la mécanisation région par région entre 1961 et 2009. Il convient de noter que l'indicateur utilisé (nombre de tracteurs en service par millier d'hectares de terres arables)

ne tient compte ni de la taille des tracteurs ni des autres types de matériel. Toutefois, on peut justifier le recours à cet indicateur pour mesurer approximativement la mécanisation mondiale en partie par l'absence d'autres données, et aussi par le fait que les tracteurs sont actuellement la principale source de force motrice utilisée pour de nombreux travaux agricoles, notamment la préparation des terres, les semis, l'application d'engrais et la pulvérisation de produits chimiques. Outre leur utilité pour le transport, les tracteurs fournissent aussi une force motrice pour pomper de l'eau à des fins d'irrigation ainsi que pour alimenter les machines à traire.

Les statistiques disponibles sur le nombre de tracteurs en service par millier d'hectares de terres arables (voir la figure 4) mettent en évidence les disparités régionales en matière de mécanisation. Les pays à revenu élevé (Amérique du Nord, Europe et Océanie) étaient déjà fortement mécanisés dans les années 1960, à l'inverse des

régions qui concentrent les pays à faible revenu et les pays à revenu intermédiaire. En Europe, l'utilisation des tracteurs a reculé entre les années 1990 et les années 2000, en premier lieu en Fédération de Russie, qui a enregistré la plus forte baisse (plus de 50 pour cent), probablement en raison de la transition politique et économique du pays à cette période. Cela dit, d'autres pays (l'Albanie, l'Allemagne, le Danemark, l'Irlande et les Pays-Bas, par exemple) ont aussi connu une forte baisse, sans que l'on en comprenne précisément les raisons profondes. Il est possible que l'évolution des tracteurs et la concentration des exploitations et des terres agricoles se traduisent par une augmentation du nombre d'hectares exploités par machine.

L'Asie et l'Afrique du Nord ont connu une mécanisation fulgurante après les années 1960. En Asie de l'Est et du Sud-Est, par exemple, le nombre de tracteurs par millier d'hectares a été multiplié par 56 et en Asie du Sud, par 36. D'un nombre total cumulé de 2,7 millions de tracteurs dans les années 1960, on a atteint 20,3 millions d'unités dans les années 2000. Cependant, l'augmentation exponentielle observée en Asie de l'Est et du Sud-Est dans les années 2000 s'explique en partie par la prise en compte d'un quatrième type de tracteurs (motoculteurs) dans les mesures. Pour des pays comme la Chine, le Myanmar ou encore les Philippines, cet ajout a entraîné une hausse considérable du nombre total de tracteurs. Sur la même période, en Afrique du Nord et en Asie occidentale, le nombre de tracteurs a décuplé (passant de 3 à 33 engins pour 1 000 hectares). L'Amérique latine et les Caraïbes ont également connu une croissance importante, puisque le nombre de tracteurs par millier d'hectares de terres arables y a presque triplé: il est passé de 5 à 14 entre les années 1960 et les années 2000. L'Afrique subsaharienne est la seule région qui n'a pas fait de progrès notables en matière de mécanisation agricole. Dans cette région, le nombre de tracteurs utilisés a augmenté très lentement, avec seulement 2,1 millions d'unités dans les années 1980 (soit 2,8 tracteurs pour 1 000 hectares de terres arables), avant de redescendre à 700 000 (soit 1,3 tracteur pour 1 000 hectares) dans les années 2000. Le faible niveau de mécanisation de cette région a été confirmé par une étude récente sur la mécanisation agricole dans 11 pays, qui a mis en évidence le fait que les outils à main légers

sont le premier type de matériel utilisé. Cette étude montre que seuls 18 pour cent des ménages sondés ont accès à des tracteurs, tandis que les autres ménages utilisent soit des outils à main simples (48 pour cent), soit des machines à traction animale (33 pour cent)⁸.

Concernant l'Asie et l'Afrique du Nord, les données indiquent que l'utilisation déjà généralisée de la traction animale dans les années 1960 a facilité le passage à la mécanisation motorisée. Cette évolution a été confortée par l'intensification de l'agriculture découlant de la révolution verte, puis par la hausse des salaires en milieu rural due à l'industrialisation et à la transformation structurelle⁶. Des schémas similaires ont été observés en Amérique latine et dans les Caraïbes, où ce sont essentiellement des acteurs privés qui ont impulsé la mécanisation agricole. Cela dit, les pouvoirs publics ont eux aussi joué un rôle essentiel, en créant un environnement propice à la mécanisation, notamment par l'intermédiaire de programmes publics en Argentine, au Costa Rica, en Équateur et au Pérou, qui ont donné accès à des crédits à taux d'intérêt faibles et ont permis des exonérations fiscales^{10, 11}. En outre, plusieurs pays ont exempté les machines agricoles de droits d'importation (le Pérou, par exemple)¹⁰.

L'émergence de puissants secteurs de fabrication de machines agricoles dans certains pays d'Asie (la Chine et l'Inde) et d'Amérique latine et des Caraïbes (le Brésil, le Mexique et, dans une certaine mesure, l'Argentine) a conduit à la diversification des machines exportées dans le monde entier¹¹. Cela a fait baisser les coûts d'achat de petit matériel, comme les motoculteurs (surtout en Asie) et les tracteurs à quatre roues, et d'autres machines telles que les pompes de puits tubulaires peu profonds, les batteuses ou les moulins à grains^{12, 13, 14}. Des éléments montrent aussi que l'essor des marchés de la location de machines a contribué à la diffusion de la mécanisation agricole en permettant aux petits producteurs agricoles d'utiliser des machines à un coût abordable⁶.

En Afrique subsaharienne, dans les années 1960 et 1970, de nombreuses actions ont eu pour objectif de promouvoir la mécanisation: fourniture de machines subventionnées aux agriculteurs, gestion de fermes publiques et de lotissements agricoles, et création de centres

de location publics, souvent avec l'appui de donateurs^{15, 16}. Ces efforts se sont avérés coûteux et se sont généralement soldés par un échec à cause de la précarité des infrastructures, de l'insuffisance des investissements dans le développement des connaissances et des compétences, de la faiblesse des capacités d'entretien, du manque d'accès à l'énergie et aux pièces de rechange, de l'absence de véritable demande en matière de mécanisation et de problèmes de gouvernance, comme la recherche de rentes et la corruption^{6, 16}. En Afrique subsaharienne, et dans d'autres régions où la mécanisation reste limitée, il semble que le secteur public n'encourage pas suffisamment la création d'un environnement favorable par la promotion, entre autres, du développement des connaissances et des compétences, de l'accès au financement et des infrastructures rurales¹¹. La mise en place de services de location commercialement viables devrait être une priorité majeure de toute stratégie de mécanisation agricole durable dans cette région (voir l'[encadré 2](#), page 25).

Les données sur la mécanisation sans tracteur sont encore plus limitées, mais il semble que, même en Afrique subsaharienne, certaines activités statiques sont mécanisées depuis longtemps, comme le broyage par moulin mécanique, qui nécessite une force motrice importante¹⁶. Dans le monde entier, la mécanisation reste limitée pour ce qui est de certains travaux, notamment la récolte et le désherbage. Par ailleurs, les moissonneuses-batteuses et les batteuses fixes se multiplient dans différents pays, mais elles ne peuvent être utilisées que pour la récolte de céréales. À de rares exceptions près, la production de fruits et de légumes est très peu mécanisée à l'échelle mondiale⁶.

Les moyennes régionales masquent des disparités importantes à l'échelle intrarégionale, et même au niveau national

En moyenne, le niveau d'adoption des tracteurs diffère d'une région à l'autre, mais il existe aussi des variations importantes à l'échelle intrarégionale en raison des disparités en matière de transformation agricole et structurelle et en raison de changements technologiques. Ainsi, le Japon a adopté rapidement les tracteurs dans les années 1960, mais d'autres pays de la région

(la Thaïlande, par exemple) n'ont pas fait de même avant les années 1990-2000⁹. En Chine, les tracteurs ont commencé à être utilisés dans les années 1970 et 1980. Au Bangladesh, en Inde, au Myanmar et à Sri Lanka, jusqu'à 90 pour cent des terres agricoles (principalement affectées à la riziculture) seraient aujourd'hui travaillées à l'aide de machines motorisées, selon une étude récente^{18, 19, 20, 21}. Les conditions topographiques sont un autre facteur qui a limité la mécanisation ou rendu son adoption inégale dans certains pays asiatiques^{6, 14}. Au Népal, par exemple, seuls 23 pour cent des producteurs agricoles utilisent des tracteurs et des motoculteurs dans les zones montagneuses du pays, alors que cette proportion atteint 46 pour cent dans la région plus plate du Teraï. En Amérique latine et dans les Caraïbes, il existe de fortes variations entre les grandes et les petites exploitations; les premières sont beaucoup plus mécanisées que les dernières car celles-ci sont situées, au moins en partie, dans des zones éloignées et vallonnées^{10, 11, 22, 23}.

Même dans les sous-régions les moins mécanisées d'Afrique subsaharienne, les taux d'adoption sont inégaux d'un pays à l'autre et au sein même des pays. En 2000, par exemple, on comptait 8 et 5 tracteurs pour 1 000 hectares de terres arables au Botswana et en Afrique du Sud, respectivement, alors que dans des pays comme Madagascar, le Mali et le Sénégal, ce chiffre ne dépassait pas 0,4. Au Ghana, on estime qu'en moyenne un tiers des ménages agricoles utilisent des tracteurs (principalement pour la préparation du sol), mais cette proportion est très variable, de 2 pour cent seulement dans les régions forestières à 88 pour cent dans la savane⁶. En République-Unie de Tanzanie, la mécanisation est plus présente dans les régions qui pratiquent l'agriculture commerciale²⁴. Au Nigéria, 7 pour cent des producteurs utilisent des tracteurs, et un autre quart d'entre eux utilisent la traction animale, grâce aux bêtes qu'ils possèdent ou qu'ils louent, pour la préparation des terres²⁵. En Éthiopie, seulement 1 pour cent environ des parcelles agricoles sont mécanisées au moyen de tracteurs, principalement dans les systèmes blé-orge faciles à mécaniser, que dominent par ailleurs de grands producteurs et qui ont vu naître des marchés de services pour la moisson et le battage du blé.

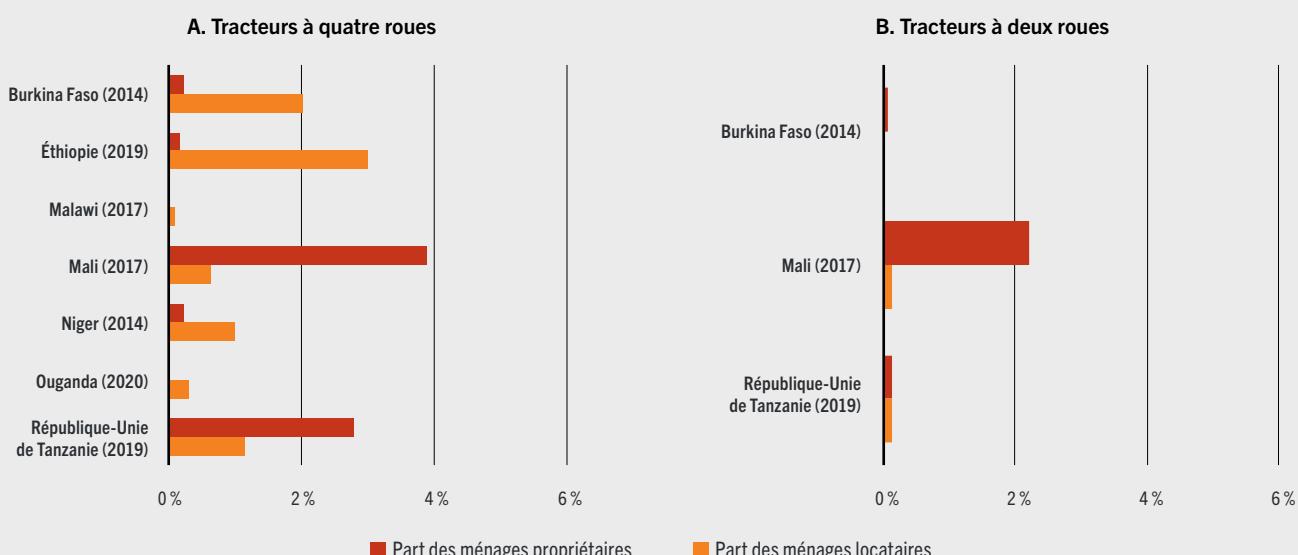
ENCADRÉ 2 LA MÉCANISATION EN AFRIQUE SUBSAHARIENNE

En Afrique subsaharienne, l'agriculture continue de mobiliser majoritairement la force motrice humaine et animale, ce qui est un frein à la productivité. Les tracteurs font partie des types de machines agricoles qui se sont le plus répandus (avec plus ou moins de succès) au cours des sept dernières décennies¹⁵. Cependant, ils restent chers et donc inabordables pour la plupart des agriculteurs. Voilà pourquoi des mécanismes de location à long terme sont essentiels pour que les agriculteurs, en particulier les petits producteurs, puissent avoir accès à la mécanisation. Des services de location de tracteurs existent en Afrique subsaharienne: ils concernent à la fois les tracteurs traditionnels (à quatre roues) et, depuis plus récemment et dans une moindre mesure, les motoculteurs (c'est-à-dire les tracteurs à deux roues). Alors que les services publics de location de tracteurs ont une image négative, des milliers de particuliers de la région possèdent des tracteurs et peuvent les mettre en location auprès d'agriculteurs. TROTRO Tractor, au Ghana, en est un parfait exemple (voir l'encadré 3, page 28).

La figure illustre l'usage actuel (par la propriété ou la location) de tracteurs à quatre roues (à gauche) et à deux roues (à droite) dans différents pays d'Afrique subsaharienne pour lesquels des données sont disponibles grâce au projet Étude sur la mesure des niveaux de vie - Enquêtes agricoles intégrées.

Très rares sont les ménages qui possèdent un tracteur, même un tracteur à deux roues, généralement moins cher. La possibilité de louer un tracteur n'augmente que légèrement l'accès aux tracteurs à quatre roues. La faible adoption des tracteurs à deux roues, conjuguée à un marché de la location presque inexistant, montre que les fournisseurs ne sont pas encore parvenus à établir des franchises locales pleinement opérationnelles et viables pour les chaînes d'approvisionnement relatives à ces machines et aux pièces détachées¹⁵. La mise en place de services de location viables sur le plan commercial (sous forme de propriété privée ou de coopérative) est une priorité absolue pour toute stratégie de mécanisation agricole durable dans la région.

FIGURE POURCENTAGE DES MÉNAGES AGRICOLES AYANT ACCÈS À UN TRACTEUR, DANS QUELQUES PAYS



SOURCE: Banque mondiale, 2022¹⁷.

Informations à retenir des données (limitées) concernant la mécanisation de l'élevage et de l'aquaculture

Les données concernant l'adoption de machines pour l'élevage ou l'aquaculture sont très limitées, très parcellaires, voire inexistantes. Il en va de même pour le secteur forestier. L'analyse de ces données limitées montre que les machines servant à l'élevage (machines à traire, par exemple) sont concentrées dans les pays à revenu élevé. En revanche, dans les pays à faible revenu et les pays à revenu intermédiaire, ce matériel est certes présent, mais plus souvent utilisé dans des unités de production à grande échelle. Cependant, la rareté et l'hétérogénéité des données font qu'il est difficile de cerner précisément la situation dans les différents contextes. En outre, la définition exacte d'une machine à traire n'est pas précise, tout comme le nombre de vaches traites par chaque machine. Avec l'évolution des techniques, ce nombre augmente, et celui des machines peut donc diminuer. Le Danemark en est un exemple représentatif: dans ce grand pays producteur de lait, l'utilisation des machines à traire a baissé et il est possible qu'il y ait eu un remplacement technologique par des méthodes plus avancées qui ne sont pas prises en compte par les statistiques⁹. Toutefois, des données empiriques tirées d'une étude de cas (Lely) suggèrent que la consolidation des exploitations laitières en Europe du Nord est la cause profonde de la diminution du nombre de machines à traire qui découle du remplacement des technologies et d'économies d'échelle plus importantes². ■

LA RÉVOLUTION NUMÉRIQUE ET SA CAPACITÉ DE TRANSFORMER L'USAGE DE LA MÉCANISATION MOTORISÉE ET DES PRATIQUES AGRICOLES

On suppose souvent qu'une quatrième révolution agricole a commencé, qui donnera aux technologies numériques un rôle essentiel dans la transformation de la production agricole,

notamment les cultures, l'élevage, l'aquaculture et la sylviculture, dans une optique d'efficacité et de durabilité accrues. Parmi ces technologies figurent l'intelligence artificielle (IA), les drones, la robotique, les capteurs et les systèmes mondiaux de navigation par satellite (GNSS), ainsi que d'autres outils numériques qui aident à automatiser l'analyse, la prise de décision et l'exécution de divers travaux agricoles, ce qui en améliore la précision et l'efficacité². Certaines de ces technologies sont déjà commercialisées, et d'autres seront bientôt prêtes²⁶.

Selon divers scénarios concernant l'évolution de l'agriculture dans les années et les décennies à venir, il est probable que le recours à différentes technologies numériques et d'automatisation augmentera^{27, 28}. Ces dernières années, la multiplication fulgurante des appareils portatifs (par exemple, les smartphones et autres téléphones mobiles, les capteurs, ou encore les appareils utilisant l'internet des objets [IdO]) est évidente et s'explique en grande partie par l'amélioration de l'accès aux réseaux mobiles et par l'extension de la couverture internet, même dans les régions les plus reculées du monde. En 2020, par exemple, 69 pour cent de la population en Amérique latine et dans les Caraïbes, 64 pour cent en Asie-Pacifique et 45 pour cent en Afrique subsaharienne disposaient d'un smartphone et, d'ici à 2025, ces taux devraient atteindre respectivement 81 pour cent, 79 pour cent et 67 pour cent²⁹. Cette progression est le résultat d'investissements massifs dans les infrastructures, tant par les pouvoirs publics que par le secteur privé. Google, par exemple, investit dans le premier câble internet sous-marin d'Afrique dans le cadre de son programme Equiano³⁰.

On trouvera ci-dessous une présentation et une analyse de la capacité de ces technologies s'agissant de transformer la mécanisation motorisée et les travaux agricoles en général.

Les technologies numériques sont en train de transformer les machines agricoles classiques

Les décideurs publics et les organisations internationales considèrent de plus en plus que le passage au numérique va révolutionner le secteur agricole. Au cœur de la plupart des technologies numériques se trouve la possibilité

de recueillir et d'échanger des données afin d'aider les producteurs agricoles ou d'autres parties prenantes à prendre des décisions et, en définitive, d'améliorer l'efficacité et l'efficience^{31, 32}. Ces dernières années, les technologies et services numériques ont fait l'objet d'une attention considérable de la part des donateurs, des centres de recherche et des organismes de développement^{29, 33, 34, 35}. De plus en plus souvent, ils sont intégrés aux machines motorisées, et pourraient ainsi transformer leur utilisation: les travaux agricoles sont effectués avec plus d'efficacité et de précision, et les machines agricoles deviennent accessibles dans de nouvelles régions ou à de nouveaux groupes socioéconomiques, comme les petits producteurs.

Ces technologies, pour bon nombre d'entre elles, reposent sur des applications accessibles depuis un téléphone portable, ou bien par l'intermédiaire d'un service d'appel ou de messagerie. Les services d'actifs partagés sont une sous-catégorie de services numériques, qui peuvent véritablement élargir l'accès à la mécanisation motorisée, en mettant en relation des propriétaires de matériel (tracteurs ou drones, par exemple), et parfois aussi des opérateurs, avec des producteurs agricoles qui en ont besoin. Les producteurs agricoles paient le propriétaire à l'heure ou à la superficie, et l'intermédiaire perçoit un pourcentage ou un montant fixe. Le service de biens partagés le plus connu est Hello Tractor (en activité dans sept pays d'Afrique ainsi qu'au Bangladesh, en Inde et au Pakistan)¹. L'**encadré 3** présente deux exemples de réussite concernant plusieurs pays africains et le Myanmar.

Les services d'actifs partagés ont pour premier intérêt de présenter un meilleur rapport coûts-avantages: les agriculteurs ont accès au matériel dont ils ont besoin sans avoir à l'acheter, et les sommes versées rendent celui-ci moins coûteux pour le propriétaire. Ces services sont particulièrement importants en Afrique subsaharienne, où extrêmement peu d'agriculteurs possèdent du matériel (voir l'**encadré 2**, page 25).

Un autre groupe de services numériques comprend les solutions de suivi du matériel, autrement dit des applications simples qui

automatisent le fonctionnement d'outils tels que les pompes d'irrigation^{36, 37}, ou les dispositifs GNSS pour suivre les déplacements, par exemple, du matériel ou des animaux. Ces types de services sont considérés comme les premières solutions d'agriculture intelligente à se faire jour pour les pays à faible revenu et les pays à revenu intermédiaire³⁸. Parmi les services plus avancés, citons les solutions IdO qui servent, par exemple, à surveiller et parfois à automatiser (en partie) les décisions concernant la gestion des cultures, et les soins prodigués au bétail ou aux poissons afin d'améliorer l'analyse, la prise de décision et l'exécution. On obtient ainsi une précision accrue, une meilleure efficacité et une augmentation de la productivité, tout en réduisant la pénibilité. Un exemple concret d'utilisation de l'IdO pour l'agriculture de précision nous vient de Chine, où il prend en charge un système intégré de télédétection automatique, d'alerte rapide et d'irrigation par micropulvérisation pour la production de thé; les variations des conditions environnementales sont détectées, des avertissements sont diffusés en temps utile et l'irrigation est mise en route automatiquement, en fonction des besoins, ce qui permet d'éviter les dégâts causés par la chaleur, le froid ou la sécheresse³⁹.

La transformation de l'utilisation des machines motorisées comme les tracteurs et le matériel de récolte, grâce aux technologies numériques, est quelque peu limitée, surtout dans les pays à faible revenu et les pays à revenu intermédiaire de la tranche inférieure^{1, 2}. En revanche, les modèles organisationnels relatifs à l'utilisation de machines motorisées connaissent des changements importants. Les producteurs des pays à faible revenu et des pays à revenu intermédiaire se tournent de plus en plus vers la propriété partagée, plutôt qu'individuelle, des machines. Le partage des actifs existe depuis longtemps, mais sans grand succès du fait, par exemple, de la méfiance qui existe entre les agriculteurs, les opérateurs et les propriétaires de machines, et des problèmes liés à l'entretien de celles-ci. Actuellement, les solutions IdO et GNSS, certes encore très rares chez les petits producteurs, sont en passe d'être largement adoptées par les prestataires de services (notamment ceux mentionnés dans l'**encadré 3**). En facilitant le suivi des machines,

ENCADRÉ 3 DES OUTILS NUMÉRIQUES POUR AMÉLIORER L'ACCÈS AUX SERVICES DE MÉCANISATION

Les outils numériques inspirés du modèle de transport privé Uber sont en plein essor et promettent de réduire les coûts de transaction des services en lien avec les tracteurs. TROTRO Tractor, au Ghana, et Tun Yat, au Myanmar, proposent la location de machines et le partage de services par l'intermédiaire d'une plateforme numérique et de services de téléphonie mobile. Ces outils peuvent véritablement rendre la mécanisation agricole inclusive.

TROTRO Tractor met en relation des petits producteurs et des propriétaires de machines agricoles, principalement de tracteurs, au moyen d'une plateforme numérique accessible depuis des applications mobiles, ainsi qu'à partir de données de services supplémentaires non structurées (USSD) pour les utilisateurs ne disposant pas d'un smartphone. TROTRO Tractor compte actuellement 75 000 agriculteurs inscrits au Bénin, au Ghana, au Nigéria, au Togo, en Zambie et au Zimbabwe. Cette société utilise à la fois un modèle d'entreprise à client et un modèle d'entreprise à entreprise, et préleve une commission correspondant à un pourcentage du coût du service.

Outre les tracteurs (qui servent à réaliser différents types de tâches, du labourage au hersage, en passant par la plantation, le semis et la pulvérisation) et les moissonneuses-batteuses, la plateforme TROTRO Tractor met également en relation des producteurs avec des propriétaires de drones qui proposent leurs services pour la cartographie et la pulvérisation d'herbicides. La cartographie par drone est de plus en plus demandée, car les agriculteurs mesurent l'importance des régimes fonciers et comprennent que des données foncières précises peuvent être cruciales lorsqu'ils sollicitent des services financiers auprès de banques ou de compagnies d'assurance.

SOURCE: Ceccarelli *et al.*, 2022².

Tun Yat prête des services analogues pour les tracteurs, au moyen d'une application pour smartphones, qui cible spécifiquement les petits et moyens agriculteurs, et donne la priorité aux femmes (qui représentent 30 pour cent des clients) et aux jeunes (25 à 30 pour cent des clients sont âgés de moins de 30 ans). Tun Yat possède cinq tracteurs et cinq moissonneuses-batteuses. L'entreprise propose sa gamme de services de mécanisation et de mise en relation à plus de 20 000 clients. Les activités concernées sont les suivantes: labourage, préparation des terres, ensemencement, récolte par moissonneuse-batteuse avec différents organes de coupe en fonction du type de récolte (haricots mungo ou maïs, par exemple) et cueillette (sésame ou arachide, par exemple). La plupart des clients sont des petits producteurs qui possèdent moins de 2 hectares de terres et qui ont particulièrement besoin de services de mécanisation fiables et abordables.

Le modèle commercial de Tun Yat fait la part belle à la diversification, puisque figurent parmi ses services la revente d'intrants (engrais, par exemple), le courtage en crédit et le nivellation au laser pour aider les agriculteurs des zones sujettes aux inondations à niveler leurs parcelles et à développer le drainage. L'entreprise propose également l'achat direct de matières premières auprès de groupements d'agriculteurs, lesquelles sont ensuite transformées en collations vendues dans des magasins de proximité.

En somme, le modèle commercial inspiré d'Uber profite aux agriculteurs qui ne possèdent pas de tracteurs et aux propriétaires de matériel. Ces derniers peuvent maximiser, surveiller de près et planifier l'utilisation des machines et la consommation de carburant, en proposant des tarifs compétitifs à une clientèle plus large.

elles permettent de renforcer la transparence et la confiance entre les prestataires et les utilisateurs. Le changement le plus important vient peut-être de l'incorporation de dispositifs IdO au sein de matériel de mécanisation traditionnel (association d'un outil de récolte motorisé provenant d'un service de location, de données GNSS et d'un opérateur formé à la conduite d'un tracteur, par exemple), ce qui peut améliorer l'efficacité des machines et les rendements¹.

Le potentiel des technologies numériques pour l'agriculture de précision non mécanisée

La section ci-dessus a montré comment les technologies numériques pouvaient transformer l'ensemble du paysage des machines agricoles, en améliorant la précision et l'accessibilité de la mécanisation. Néanmoins, l'adoption de la mécanisation agricole motorisée est encore limitée dans de nombreux pays à faible revenu et pays à revenu intermédiaire, particulièrement en Afrique

subsaharienne. L'agriculture de précision pour la production non mécanisée et l'adoption de cette pratique font l'objet de travaux de recherche de plus en plus nombreux^{40, 41, 42}. Des méthodes pour l'application manuelle d'engrais spécifique à chaque site ont été élaborées il y a longtemps (technologie à taux variable [TTV] pour les engrains utilisés dans la riziculture⁴³, par exemple), et le scanner pour sols portatif AgroCares est disponible dans plusieurs pays à faible revenu d'Afrique et d'Asie⁴⁴. Des exploitations agricoles non mécanisées d'Afrique et d'Asie ont entrepris de faire appel aux services d'aéronefs sans équipage à bord (UAV, aussi appelés drones), tandis que le GNSS peut servir à cartographier les limites des parcelles et à déterminer le régime foncier dans les exploitations agricoles non mécanisées⁴⁵.

On manque toutefois d'informations sur les taux d'adoption: on ne sait pas exactement combien de producteurs agricoles utilisent réellement les technologies numériques⁴⁶. Les résultats de deux études techniques commandées pour ce rapport^{1, 2} montrent que, sur le terrain, divers outils numériques et technologies de télédétection et de cartographie sont de plus en plus utilisés par les petits producteurs agricoles et les éleveurs pastoraux dans le monde entier (voir l'[encadré 4](#)). Les smartphones, dotés de divers capteurs et d'appareils photographiques intégrés à haute résolution, sont aujourd'hui l'outil le plus accessible à tous dans les pays à faible revenu et les pays à revenu intermédiaire. Grâce à des applications intégrées aux téléphones mobiles et à des interfaces adéquates, ils peuvent d'ores et déjà rendre accessibles des innovations très utiles et adaptées au contexte des pays à faible revenu, des pays à revenu intermédiaire et de l'agriculture à petite échelle: ils peuvent donner des résultats concrets. GoMicro en est un exemple. Grâce à une lentille microscopique fixée sur l'appareil photo du téléphone et à l'IA, cette solution permet de détecter rapidement les parasites et les maladies⁴⁷ et de réaliser de manière efficace et précise un contrôle qualité et un classement des produits agricoles, comme les céréales et les grains, le poisson, les fruits et les légumes¹. D'autres solutions numériques emploient des données obtenues par satellite ou par drone (sur les rendements, l'état des sols et la santé des plantes, par exemple) qu'un algorithme

analyse ensuite; les résultats peuvent alors servir à valider les données communiquées par les producteurs agricoles (sur la base d'observations et de l'expérience) ou pour fournir des conseils aux producteurs¹.

Les solutions numériques méritent l'attention des décideurs politiques et des organisations internationales. Il faut mener plus d'études afin de les adapter aux besoins des petits producteurs des pays à faible revenu et des pays à revenu intermédiaire, en particulier dans les pays les moins mécanisés, comme en Afrique subsaharienne¹. Les travaux de recherche et l'expérience indiquent qu'elles permettent une gestion des cultures adaptée au lieu, ce qui peut améliorer les rendements et réduire la quantité d'intrants sur les exploitations non mécanisées. Soulignons néanmoins deux difficultés. Premièrement, les technologies numériques sont parfois trop chères pour les petits producteurs, compte tenu des coûts actuels du matériel. Par exemple, un capteur d'azote portatif coûte entre 300 et 600 USD, ce qui est trop élevé pour un petit agriculteur qui ne souhaite l'utiliser que quelques fois par an⁴⁸. De même, le scanner AgroCares, qui est plus sophistiqué car il fournit des informations sur un plus large éventail d'éléments nutritifs du sol, se vend plus de 3 000 USD. Deuxièmement, les producteurs doivent apprendre à utiliser ces technologies; sans le savoir-faire, une mise en œuvre incorrecte peut conduire à des résultats indésirables, notamment une utilisation accrue d'intrants.

Il existe encore des endroits, principalement en Afrique subsaharienne, où les smartphones ne sont pas à la portée des petits producteurs ni des populations rurales^{1, 2}. En outre, des données de 2020 révèlent une importante fracture entre les zones rurales et les zones urbaines des pays en développement en matière d'accès à internet: 65 pour cent de la population a accès à internet en zone urbaine, contre seulement 28 pour cent en milieu rural⁴⁹. Les éléments recueillis pointent le coût élevé comme frein principal à l'adoption de ces technologies par les petits producteurs, malgré leur potentiel important d'amélioration de la productivité. Cela laisse à penser qu'un accès à faible coût aux technologies numériques par les petits producteurs, subventionné par les donateurs, n'est peut-être pas viable.

ENCADRÉ 4 OUTILS NUMÉRIQUES SANS LIEN AVEC LA MÉCANISATION: LES SOLUTIONS NON INCORPORÉES

Les solutions numériques non incorporées (voir le glossaire) ne sont pas liées à la mécanisation. Ce sont avant tout des solutions logicielles qui n'utilisent pas de machines agricoles. Au contraire, elles requièrent des ressources matérielles limitées, généralement un téléphone mobile, une tablette, un outil logiciel (applications de conseil, par exemple) et un logiciel ou une plateforme en ligne de gestion d'exploitation agricole. Cela les différencie des solutions numériques incorporées, qui associent des outils numériques à des machines afin d'interagir avec l'environnement.

La télédétection peut faire partie des solutions non incorporées, mais elle se limite aux données destinées à faciliter la prise de décision et la prospection. Comme le montrent les exemples ci-dessous, recueillis aux quatre coins du monde, ces solutions sont de plus en plus répandues. La société sud-africaine Aerobotics est implantée dans 18 pays. Elle propose des solutions non incorporées avec un système d'aéronef sans équipage à bord (UAS) et la télédétection pour aider les cultivateurs de fruits et de fruits à coque à prendre des décisions. Ces technologies permettent de détecter précocement les organismes nuisibles et les maladies, de suivre en temps utile les besoins en eau, en engrais et en nutriments, et de faciliter la gestion des rendements.

Au Maroc, SOWIT propose des solutions non incorporées utilisant la télédétection, les UAS pour la collecte d'images, et l'apprentissage automatique à partir d'informations issues de bases de données de terrain ou météorologiques. Ces technologies peuvent être utilisées pour les arbres fruitiers, les céréales et le colza. Elles permettent d'informer les agriculteurs des besoins en matière d'irrigation et de fertilisation, d'estimer les rendements, de surveiller la teneur en matière sèche du fourrage et d'inspecter les parcelles.

Au Népal, Seed Innovations propose une application Android permettant aux agriculteurs d'utiliser les analyses par satellite, les systèmes mondiaux de navigation par satellite (GNSS) et l'intelligence artificielle en vue de suivre les rendements des cultures (notamment en repérant les déficits ou les excès d'eau et de nutriments, et les risques liés aux organismes nuisibles et aux maladies) ainsi que d'accéder à des informations agronomiques et de les échanger.

TraSeable Solutions, dont le siège se trouve aux Fidji, compte 2 000 clients actifs dans sept petits États insulaires en développement du Pacifique. Cette entreprise propose deux solutions: la première est une application mobile qui renseigne les agriculteurs sur le secteur agricole, enregistre et gère les données



Il faut donc multiplier et diversifier les efforts afin de rendre ces outils plus accessibles. Les services d'actifs partagés, mentionnés ci-dessus, sont une solution et leurs fournisseurs proposent déjà une gamme de machines adaptées aux petites et aux grandes exploitations. Cependant, les faibles compétences numériques des producteurs agricoles peuvent aussi expliquer en grande partie la lenteur d'adoption des outils numériques. C'est pourquoi, dans de nombreux pays africains, les services de messages courts (SMS), de réponse vocale interactive (RVI) et de données de services supplémentaires non structurées (USSD) sont utilisés pour communiquer avec les petits producteurs. Par exemple, ICT4BXW et Justdiggit, deux services actifs en Afrique subsaharienne, avaient initialement adopté des technologies avancées, comme les smartphones, mais ont ensuite décidé d'utiliser des moyens plus simples

(SMS, USSD et RVI) en raison du faible taux de pénétration de ces téléphones et des compétences numériques insuffisantes dans la région¹.

Tant que les exploitants n'auront pas les compétences numériques nécessaires, il faudra prêter un appui technique intensif et continu, et fournir des informations sur les technologies numériques. Les téléphones mobiles rudimentaires sont désormais accessibles à presque tout le monde, mais les smartphones restent rares en Afrique subsaharienne. Par conséquent, les téléphones doivent être utilisés de concert avec des services de conseil reposant sur des données satellitaires adaptées aux besoins des producteurs (concernant, par exemple, les sources d'eau et les pâturages pour les éleveurs pastoraux, et les épidémies pour les cultivateurs de bananes)¹. ■

ENCADRÉ 4 (suite)

des exploitations, et assure le suivi des ressources, des inventaires, des ventes et des dépenses. Cette application permet également de créer des liens commerciaux entre les acteurs de la chaîne de valeur agricole. La deuxième solution concerne la pêche, et plus particulièrement la pêche au thon. Elle consiste à suivre chaque thon, préalablement équipé d'un dispositif d'identification, sur l'intégralité de la chaîne de valeur, du débarquement à la distribution. Cette solution permet également de gérer les flottilles, puisqu'elle apporte des informations sur l'équipage et sur les coûts d'exploitation et d'entretien. Elle fournit aussi des renseignements sur la capture du thon, y compris des données sur les sorties, des registres de prises, des analyses des lieux de pêche et des services d'information.

Au Pérou, Coopecan propose des services numériques pour toute la chaîne de valeur de la fibre d'alpaga. Diverses technologies apportent des solutions numériques relatives, entre autres, à la gestion des pâturages (imagerie par satellite), à la santé animale (dispositifs d'identification des animaux) ainsi qu'au traitement des fibres et aux ventes à l'exportation (technologie des chaînes de blocs). En outre, une assistance technique est proposée aux éleveurs qui ont besoin d'aide pour gérer leur troupeau

(état sanitaire des animaux, par exemple) ou les pâturages naturels (de plus en plus dégradés en raison d'un broutement excessif). Ces services sont complétés par un renforcement des capacités en ce qui concerne l'utilisation des solutions, et par un système de traçabilité qui permet de certifier la production sur les plans du bien-être animal, de la qualité des fibres et de la responsabilité environnementale et sociale, ce qui débouche sur de meilleures conditions de travail, une rémunération équitable et une amélioration du bien-être animal.

Dernier exemple, Agrinapsis est une plateforme de réseau social spécialisée en agriculture qui est active en Bolivie (État plurinational de), au Costa Rica, en Équateur, au Guatemala et au Mexique. Gérée par l'Institut interaméricain de coopération pour l'agriculture, cette entité facilite les échanges de connaissances entre petits producteurs. Des informations sont recueillies de façon participative puis vérifiées et notées par tous les clients et, si elles sont signalées comme étant suspectes ou de mauvaise qualité, une équipe technique les contrôle et les améliore. Agrinapsis permet un commerce électronique axé sur les petits producteurs, qui peuvent vendre leurs produits ou acheter des intrants répondant aux préoccupations environnementales.

SOURCES: McCampbell, 2022¹; Ceccarelli *et al.*, 2022².

L'ÉTAT DES TECHNOLOGIES D'AUTOMATISATION NUMÉRIQUE ET DE LA ROBOTIQUE DANS L'AGRICULTURE

Les sections précédentes de ce chapitre ont présenté les évolutions et les facteurs de la mécanisation agricole motorisée, ainsi que le rôle des technologies numériques dans la transformation de l'agriculture en ce qui concerne leur capacité d'améliorer l'agriculture de précision et de rendre l'accès aux machines agricoles plus inclusif. Dans la présente section, l'état actuel des technologies numériques d'automatisation dans l'agriculture

et les principaux facteurs d'adoption sont étudiés plus avant, sur la base des éléments factuels disponibles.

L'utilisation continue d'une technologie est le meilleur indicateur de son intérêt pour au moins certains producteurs et certaines entreprises agricoles⁴⁸. Les publications sur l'évolution de l'automatisation numérique dans l'agriculture aident à comprendre ses avantages, ses difficultés et l'évolution de son adoption. En résumé, l'adoption des technologies d'automatisation numérique dans l'agriculture a été sous-tendue par deux forces principales: la hausse de la demande alimentaire face à la diminution des ressources naturelles; et les évolutions survenues dans d'autres secteurs de l'économie, qui favorisent l'innovation dans le secteur agricole⁴⁸.

TABLEAU 2 DATES IMPORTANTES DE L'AUTOMATISATION NUMÉRIQUE DANS L'AGRICULTURE

Année	Technologie ou activité	Entreprise ou organisation	Pays	Référence
1974	Identification électronique du bétail	Université de l'État du Montana	États-Unis d'Amérique	Hanton et Leach, 1974 ⁵⁰
1983	Décret présidentiel autorisant l'usage civil du GPS	Gouvernement des États-Unis	États-Unis d'Amérique	Brustein, 2014 ⁵¹ Rip et Hasik, 2002 ⁵²
	Fertilisation et application de pesticides par drone	Yamaha	Japon	Sheets, 2018 ⁵³
1987	Fertilisation par TTV informatisée	Soil Teq	États-Unis d'Amérique	Mulla et Khosla, 2016 ⁵⁴
1992	Robots de traite	Lely	Pays-Bas	Lely, 2022 ⁵⁵ Sharipov <i>et al.</i> , 2021 ⁵⁶
1997	Aide à la conduite du matériel agricole par GNSS	Beeline	Australie	Rural Retailer, 2002 ⁵⁷
	Équipement optique N-Sensor	Yara	Norvège	Reusch, 1997 ⁵⁸
2006	Automatisation des régulateurs de section de rampe de pulvérisation	Trimble	États-Unis d'Amérique	Trimble, 2006 ⁵⁹
2009	Système de fin de rang pour planteuse	Ag Leader	États-Unis d'Amérique	Ag Leader, 2022 ⁶⁰
2011	Robot de désherbage	Ecorobotix Naïo Technologies	Suisse France	Ecorobotix, 2022 ⁶¹ Naïo, 2022 ⁶²
2013	Système d'assistance à la conduite de moissonneuse-batteuse	Claas	Allemagne	Claas, 2022 ⁶³
2017	Premier cycle de culture entièrement autonome	Université Harper Adams	Royaume-Uni	Hands Free Hectare, 2018 ⁶⁴
2018	Voiture à grains autonome	Smart Ag	États-Unis d'Amérique	Smart Ag, 2018 ⁶⁵
2022	Tracteur autonome de grande taille	John Deere	États-Unis d'Amérique	John Deere, 2022 ⁶⁶

NOTES: GPS, système de positionnement mondial; TTV, technologie à taux variable; GNSS, systèmes mondiaux de navigation par satellite.
 SOURCE: Lowenberg-DeBoer, 2022⁴⁸.

Pour comprendre l'évolution des technologies d'automatisation numérique dans l'agriculture, il faut rassembler des informations provenant de sources diverses, car les données sont rares (en particulier dans les pays à faible revenu et les pays à revenu intermédiaire) et, par ailleurs, aucun pays ou organisation ne procède à une collecte systématique de données sur l'utilisation de ces technologies. Une analyse isolée n'a qu'une valeur limitée car la technologie considérée et le pays concerné sont à chaque fois singuliers. Seule la prise en compte de l'ensemble des informations permet de faire ressortir des

grandes tendances. Le tableau 2 présente les dates clés de l'automatisation numérique dans l'agriculture, en indiquant le premier promoteur de chaque technologie. Il n'est pas facile de dater l'introduction de chaque technologie au niveau des producteurs: c'est pourquoi les dates, les pays et les technologies figurant dans le tableau ne sont que des indications des grandes tendances d'adoption; en effet, aucune technologie n'est entièrement prête à la sortie du laboratoire ou de l'atelier de conception, avant sa mise en œuvre sur les exploitations. Au contraire, l'adoption d'une technologie est une démarche

FIGURE 5 EXEMPLES DE TECHNOLOGIES NUMÉRIQUES ET ROBOTIQUES ASSOCIÉES À L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE, CLASSÉES PAR SYSTÈME DE PRODUCTION AGRICOLE

ÉLEVAGE	CULTURES	AQUACULTURE	FORêTS
Marquage électronique 	Tracteur sans conducteur 	Gestion automatisée de l'aquaculture 	Transport guidé par GPS
Robot de traite 	Robot pulvérisateur 	Nourrisseur automatique 	Surveillance des forêts
Nourrisseur automatique 	Robot de récolte 		

SOURCE: Figure élaborée par la FAO pour le présent rapport.

itératrice. Elle commence par des travaux de recherche fondamentale qui servent à démontrer son application possible, puis les réflexions scientifiques se concrétisent sous la forme de produits commerciaux utilisables. S'appuyant sur la figure 2 du présent rapport (page 6), la figure 5 présente d'autres exemples de technologies évoquées dans ce chapitre, catégorisées par système de production agricole. Ces exemples ne sont pas identiques aux technologies figurant dans le tableau 2, mais complémentaires.

Progrès de l'automatisation dans le domaine de la production animale

Comme on peut le voir dans le tableau 2, les premières technologies d'automatisation numérique ont notamment concerné le secteur de l'élevage. L'élevage de précision utilise des capteurs fixés sur les animaux ou sur le matériel installé dans les granges pour assurer une régulation climatique et surveiller l'état de santé, les déplacements et les besoins des animaux, notamment aux fins de la reproduction⁶⁷. Plusieurs technologies d'élevage de précision ont été mises au point pour faciliter la gestion

individuelle des animaux grâce à une identification électronique. Les robots de traite sont la technologie la plus répandue; ils permettent de traire les vaches sans intervention humaine directe. Les machines à traire classiques utilisent une pompe à vide, mais il faut nécessairement qu'une personne place le dispositif sur l'animal puis le retire. L'identification électronique, quant à elle, automatise le processus en donnant à un robot de traite l'accès à une base de données qui contient les coordonnées du pis de chaque vache⁶⁸. Ce système entièrement automatisé et adapté à la production animale ouvre des perspectives importantes en matière de réduction des coûts et d'augmentation de la productivité⁶⁹. Cependant, le bilan est mitigé quant aux gains financiers qu'apporteraient les robots de traite: certaines études font état de résultats positifs^{70, 71, 72}, tandis que d'autres n'y ont trouvé aucun avantage financier par rapport aux machines à traire habituelles⁷¹. Il semblerait donc que l'adoption de cette technologie ne dépende pas seulement de considérations financières mais tienne aussi à des considérations sociales, comme la souplesse accrue des horaires de travail et la meilleure qualité de vie, facteurs particulièrement importants dans les petites et moyennes

ENCADRÉ 5 AUTOMATISATION NUMÉRIQUE DE LA PRODUCTION ANIMALE: EXEMPLES RECUEILLIS EN AMÉRIQUE LATINE, EN AFRIQUE ET EN EUROPE

Crée en Argentine en 2019, la société Cattler exerce désormais ses activités dans d'autres pays, notamment le Paraguay, l'Uruguay et, plus récemment, le Brésil et les États-Unis d'Amérique. Elle propose un système automatisé de gestion des exploitations agricoles de bovins à viande. Celui-ci s'appuie sur des données satellitaires, fournit des observations et propose des idées pour améliorer la gestion. L'entreprise cible les exploitations de taille moyenne plutôt que les grandes exploitations. Cattler estime que l'un des principaux facteurs incitant à adopter le système est le besoin de simplifier les tâches et de rentabiliser les investissements.

Au Burkina Faso et au Mali, et bientôt au Niger, avec le soutien de l'Agence néerlandaise de développement international, GARBAL prête des services de conseil extrêmement adaptés au contexte dans les domaines de la production animale et végétale, ainsi que des marchés du fourrage, du lait et des céréales. Particulièrement destinées aux femmes et aux jeunes, les solutions numériques proposées aident les petits producteurs et les éleveurs pastoraux touchés par le changement climatique au Sahel à prendre des décisions au sujet des pâturages, de la migration des troupeaux, de la météo et de différentes pratiques agricoles. Ces solutions s'appuient sur l'imagerie par satellite, les SMS, les données de services supplémentaires non structurées (USSD) et un centre d'appel dont les opérateurs, eux-mêmes locaux, maîtrisent les langues parlées sur place. Le recours aux téléphones mobiles rend cette

solution très accessible. L'initiative a bénéficié, entre autres, de partenariats public-privé, de subventions, de liens avec les organisations locales d'agriculteurs et de pasteurs, et de passerelles entre connaissances traditionnelles et savoir scientifique. Parmi les principales difficultés rencontrées, on note la nécessité de trouver des solutions très adaptées au contexte, les problèmes de sécurité dans certains pays, les besoins importants en matière de renforcement des capacités, les problèmes de connectivité et de réception des réseaux, ainsi que les problèmes de qualité des données.

Lely, une entreprise familiale des Pays-Bas, propose de la robotique et des logiciels de gestion d'élevage laitier à destination des exploitations de taille moyenne ou grande, qui comptent plus de 100 vaches, mais elle ne vise pas à ce jour les plus grandes exploitations. Les principales technologies adoptées sont les robots de traite stationnaires, suivis des robots à lisier et des robots de nourrissage. Les robots de récolte de graminées permettent d'optimiser le rendement des herbages, tandis que les futurs produits se concentrent sur la réduction des émissions. Ces technologies sont accompagnées de logiciels de gestion de tous les travaux agricoles, comprenant des informations sur le bien-être des animaux. La technologie proposée peut permettre de résoudre les problèmes de faible disponibilité de la main-d'œuvre, de réglementation des émissions et de bien-être animal. Les principaux facteurs d'adoption sont l'efficacité énergétique, la réduction de l'utilisation des produits chimiques et la pénurie de main-d'œuvre.

SOURCE: Ceccarelli *et al.*, 2022².

exploitations. Cela dit, plus récemment, les grandes exploitations laitières (qui comptent plus de 1 000 vaches) ont emboîté le pas aux exploitations de taille moyenne en adoptant des systèmes de traite robotisés en raison de la pénurie de main-d'œuvre. Ainsi, le choix de recourir à la traite robotisée peut reposer sur des critères très différents dans les grandes exploitations laitières⁴⁸. L'**encadré 5** présente des exemples d'automatisation numérique de la production animale en Afrique, en Europe, en Amérique latine et dans les Caraïbes.

Au niveau mondial, les ventes de systèmes de traite automatisée sont passées de 1,2 milliard

d'USD en 2016 à 1,6 milliard d'USD en 2019, signe d'une demande croissante, bien que concentrée dans les pays à revenu élevé, parmi lesquels l'Allemagne, les Pays-Bas et le Royaume-Uni en sont des utilisateurs précoce^{73, 74}. De fait, si aucune statistique sur l'adoption de ces technologies ne compare différents pays et régions, les données montrent que cette adoption est cantonnée aux pays à revenu élevé, principalement en Europe du Nord⁷⁵. La demande est tirée à la hausse par le manque de main-d'œuvre rurale, auquel s'ajoute une rupture générationnelle. Le **tableau 2** (page 32) montre que le premier système de traite automatisée à vocation commerciale a été mis en

service aux Pays-Bas en 1992. Depuis lors, il s'est diffusé dans d'autres pays⁶⁹. L'absence de données concernant les pays à faible revenu et les pays à revenu intermédiaire laisse à penser que cette technologie en est quasiment absente^{48, 76}.

En plus des machines à traire, il existe aussi des technologies permettant d'alimenter automatiquement les vaches en leur donnant des concentrés en quantités variables selon leur production laitière⁷⁷. Il en va de même pour la volaille, dont les systèmes d'alimentation s'appuient sur le poids des oiseaux et le nombre d'œufs, et dont le contrôle informatisé de la ventilation se base sur la température et le taux d'humidité⁷⁸. Toutefois, les données et les éléments factuels concernant les évolutions et les facteurs d'adoption de ces technologies sont encore plus rares.

Progrès de l'automatisation dans le domaine de la production végétale

L'automatisation de la production végétale nécessite d'utiliser beaucoup de technologies relevant de l'agriculture de précision, à savoir la TTV, les GNSS, les robots, les drones et l'IA. Celles-ci peuvent nécessiter de recueillir des données spatiales grâce à un système d'information géographique (SIG), au moyen de renseignements issus de modèles de simulation des cultures, afin de connaître la quantité d'intrants nécessaire pour maximiser les rendements et les bénéfices⁶⁷. Ces applications utilisent des capteurs, notamment pour la détection proximale (mesure de l'azote dans le sol, par exemple) et la télédétection (imagerie par satellite, par exemple). Si la connectivité le permet, les utilisateurs peuvent partager ces données avec d'autres parties prenantes à l'aide de smartphones et d'applications faciles à utiliser qui présentent les données de manière simple³⁵.

L'adoption varie selon le produit agricole concerné, le coût du capital, le niveau des salaires et d'autres facteurs économiques. En tout état de cause, l'adoption par les petits producteurs agricoles est négligeable, car il n'y a pratiquement aucun travail de recherche sur l'adaptation à l'agriculture à petite échelle et il n'est pas facile de transférer la technologie des tâches mécanisées aux tâches non mécanisées.

Les GNSS et la TTV, associés à des machines motorisées, sont les technologies les plus utilisées dans la production végétale pour permettre l'autoguidage et l'application d'intrants à la volée. L'un des principaux facteurs d'adoption des technologies fondées sur les GNSS est leur capacité, pendant l'application des intrants (engrais, par exemple), d'éliminer à la fois les sauts accidentels et les chevauchements de plantes, ce qui se traduit par des économies d'intrants. Parmi les autres facteurs, citons la réduction de la fatigue des utilisateurs, la possibilité pour les membres de la famille de travailler plus longtemps, la souplesse dans le recrutement des conducteurs (puisque'ils n'ont pas besoin d'être hautement qualifiés ni très expérimentés), et les avantages environnementaux (puisque'il y a moins d'applications d'intrants qui se recouvrent), sans oublier d'autres avantages difficiles à quantifier et qui sont plutôt des effets secondaires de l'adoption. Par ailleurs, les avantages du guidage GNSS sont rapidement perçus (les économies d'intrants permises par la réduction des chevauchements, par exemple, sont presque immédiates) et visibles à la fois pour les agriculteurs et leur voisinage (la pousse de mauvaises herbes liée à l'absence de traitement par herbicide est vue d'un mauvais œil dans le milieu agricole), ce qui favorise aussi l'adoption de ces technologies⁴⁸.

La TTV permet de diminuer l'application d'intrants et d'optimiser les rendements des cultures, ce qui présente aussi des avantages environnementaux, en particulier si elle évite une application en excès. Pour ce qui est de la rentabilité des engrains TTV, les éléments factuels sont mitigés^{79, 80}. Cela explique la faible adoption, dans le monde entier, de la TTV fondée sur une carte pour l'application d'engrais, cette technologie étant d'ailleurs principalement utilisée dans les domaines où la rentabilité est régulière (application d'azote pour la betterave sucrière, par exemple).

Dans la catégorie d'automatisation la plus avancée, les robots de culture autonomes n'ont été commercialisés que très récemment. On les trouve surtout dans les pays à revenu élevé (notamment en France), où ils servent à désherber les légumes en agriculture biologique et les betteraves sucrières⁸¹. La première démonstration publique de machines de culture autonomes participant à la production et à la récolte d'une

culture commerciale a été réalisée dans le cadre du projet Hands Free Hectare, mis en place au Royaume-Uni en 2016 pour développer et mettre en avant l'automatisation agricole⁶⁴. Depuis lors, des fabricants ont annoncé la création de machines autonomes (voir le **tableau 2**, page 32), et plus de 40 jeunes entreprises sont en train d'en mettre au point. Les robots de culture autonomes, en particulier les petits robots en essaim, permettent des économies de main-d'œuvre, un meilleur enchaînement des tâches, une application plus précise des intrants et une moindre compaction du sol. Selon une étude portant sur 18 cas, les robots de culture autonomes utilisés pour la récolte, l'ensemencement et le désherbage sont viables du point de vue économique dans certaines circonstances⁸².

Dans certains pays, les machines agricoles autonomes requièrent une supervision humaine constante sur place, auquel cas les agriculteurs peuvent avoir intérêt à utiliser du matériel classique⁸³. Une étude a montré que la supervision à distance (depuis le bureau de l'exploitation, par exemple) n'était optimale que si la tâche autonome présentait relativement peu de difficultés⁸⁴. Elle a souligné la nécessité d'accroître les capacités en matière d'IA afin de permettre à la machine autonome de résoudre davantage de problèmes sans intervention humaine. De même, les limitations de vitesse imposées aux machines agricoles autonomes, comme il en existe aux États-Unis d'Amérique, peuvent nuire à la rentabilité⁸⁵.

Certains projets visent à créer de petites machines agricoles autonomes à faible coût pour les petites et moyennes exploitations, afin de compenser le manque de main-d'œuvre agricole dans les pays à faible revenu et les pays à revenu intermédiaire, ce qui pourrait présenter des avantages pour les jeunes ruraux en particulier^{86, 87, 88, 89}. Malheureusement, il n'existe pas d'analyses de faisabilité pour les pays à faible revenu ni les pays à revenu intermédiaire. Néanmoins, les publications disponibles suggèrent que l'adoption de robots autonomes dans ces pays pourrait présenter les atouts suivants: i) une réduction des besoins en main-d'œuvre, lorsque celle-ci est rare; ii) des coûts plus faibles et des économies réalisables à moindre échelle, qui rendent les technologies accessibles aux petites exploitations

utilisant la mécanisation classique; et iii) la possibilité d'utiliser ces technologies sur des parcelles irrégulières, de façon efficace sans être excessivement onéreuse, ce qui évite de transformer les paysages ruraux pour créer de grands champs rectangulaires (où la mécanisation traditionnelle est la plus efficace), étant donné que ce processus perturbe le milieu.

Les drones sont utilisés pour recueillir des informations et pour automatiser l'application des intrants, de la même manière que la TTV fondée sur une carte. Cela dit, leur usage est souvent soumis à des réglementations strictes en raison des préoccupations relatives à l'application excessive d'intrants, aux problèmes lors de l'épandage de pesticides et aux dangers pour l'aviation^{90, 91}. Au Royaume-Uni, par exemple, les drones ne sont autorisés à épandre des herbicides que dans des endroits inaccessibles et sous certaines conditions. En revanche, la Suisse tolère une application plus souple des intrants au moyen de drones, ce qui pourrait encourager d'autres pays européens à faire de même^{83, 92}. Environ 14 pour cent des détaillants agricoles aux États-Unis d'Amérique proposaient des services d'application d'intrants par drone en 2021, et ce taux devrait atteindre 29 pour cent d'ici à 2024⁹². L'application d'intrants par drone est une pratique également assez courante dans certains pays à revenu intermédiaire, comme le Brésil et la Chine⁹³.

Quelques avancées moins connues en matière d'automatisation: aquaculture, forêts et production végétale en environnement contrôlé

Face à la pénurie de main-d'œuvre et aux salaires élevés, l'automatisation numérique progresse dans le secteur de l'aquaculture. Les innovations qui automatisent le nourrissage et la surveillance sont largement adoptées, malgré les coûts d'investissement élevés qui s'y rapportent, car elles réduisent au minimum les besoins en main-d'œuvre (laquelle se limite à quelques opérateurs hautement qualifiés) et d'autres coûts variables de production⁹⁴. L'**encadré 6** présente des innovations récentes dans le domaine de l'aquaculture en Inde et au Mexique.

Dans le secteur des forêts, bon nombre de travaux de récolte du bois sont déjà fortement automatisés,

ENCADRÉ 6 NOUVELLES TECHNOLOGIES AQUACOLES: EXEMPLES RECUEILLIS EN INDE ET AU MEXIQUE

L'aquaculture a déjà prouvé qu'elle était cruciale pour la sécurité alimentaire et la nutrition au niveau mondial, car elle représente l'une des premières sources de protéines animales et sa production a augmenté de 7,5 pour cent par an depuis 1970⁹⁵. Au vu du potentiel de croissance de l'aquaculture, mais aussi de l'immensité des défis environnementaux que ce secteur doit relever à mesure qu'il intensifie sa production, de nouvelles stratégies de développement durable de l'aquaculture sont nécessaires. Ces stratégies doivent exploiter les innovations techniques dans des domaines tels que l'alimentation animale, l'élevage de sélection, la biosécurité et la lutte contre les maladies, ainsi que les innovations numériques. Cela peut permettre, ensuite, de renforcer la précision, d'améliorer la prise de décision, de faciliter la surveillance autonome et continue des poissons, et de réduire la dépendance à l'égard de la main-d'œuvre, améliorant ainsi la sécurité du personnel, la santé des poissons et leur bien-être, tout en augmentant la productivité, le rendement et la durabilité environnementale⁹⁶.

Le cas d'Aquaconnect, en Inde, en est une bonne illustration. L'Inde est certes l'un des plus grands producteurs aquacoles au monde (les récoltes s'élevaient à 7 millions de tonnes en 2018⁹⁵), mais le secteur se caractérise dans ce pays par un manque de transparence et l'inefficacité des chaînes de valeur. Aquaconnect utilise l'intelligence artificielle et les technologies de détection par satellite pour suivre les rendements des fermes aquacoles et fournir aux éleveurs de crevettes et de poissons (qui exercent, pour la plupart, à petite et moyenne échelles) des conseils en vue d'augmenter leur productivité. Cette solution est associée à une plateforme omnicanal qui vend des intrants agricoles à des prix abordables. Elle permet également de rapprocher les agriculteurs et les institutions financières et d'améliorer les liens avec les marchés. Ces solutions aident actuellement plus de 60 000 pisciculteurs et éleveurs de crevettes d'Inde à augmenter leur productivité, à renforcer leurs liens avec les marchés et à accéder plus facilement

au crédit et à l'assurance institutionnalisés¹. En parallèle, le Gouvernement indien a affecté environ 3 milliards d'USD à la modernisation de l'agriculture, y compris les chaînes de valeur de l'aquaculture et de la pêche, et a manifesté son intention de soutenir les initiatives (jeunes entreprises, par exemple) qui mettent en œuvre des technologies et encouragent les innovations.

La première ferme à crevettes robotisée au monde, Shrimpbox, mise au point à Oaxaca, au Mexique (voir l'étude de cas Atarraya à l'annexe 1), est un autre projet ambitieux susceptible de transformer le secteur aquacole. Elle repose sur des systèmes automatisés qui peuvent être suivis à distance grâce à des logiciels en mesure d'apprendre et de prendre des décisions. Ces systèmes sont rattachés à la lutte biologique contre les organismes nuisibles fondée sur des méthodes microbiennes afin de limiter l'accumulation de nitrates, de prévenir les maladies et d'économiser de l'eau dans la production de crevettes, ce qui permet de réduire considérablement la consommation d'eau, les besoins en main-d'œuvre, le risque de maladies et les pertes². Selon les créateurs de cette technologie, une ferme robotisée peut, sur 0,5 hectare, être aussi productive qu'une ferme traditionnelle de 100 hectares, tout en ne consommant que 5 pour cent de l'eau et en se passant d'antibiotiques⁹⁷. Shrimpbox permet d'élever des crevettes sous des climats plus froids et dans des zones dépourvues d'accès à l'océan. Des crevettes fraîches et de grande qualité peuvent ainsi être livrées dans des régions qui dépendent aujourd'hui des importations de produits congelés.

Aquaconnect et Shrimpbox ne sont que deux exemples parmi d'autres de nouvelles technologies destinées à rendre l'aquaculture plus durable, plus efficace et plus inclusive. Il faut toutefois donner la priorité au développement de l'aquaculture en Afrique et dans d'autres régions où les progrès technologiques sont plus lents et qui sont plus gravement touchées par l'insécurité alimentaire et la malnutrition⁹⁸.

grâce à des machines motorisées qui sont progressivement équipées d'outils numériques. Plus récemment, les technologies mobiles, associées à la réalité virtuelle et aux techniques de télédétection, ont ouvert la voie à des machines automatiques de pointe. Ce sont principalement les abatteuses et les porteuses de bois – machines sophistiquées servant à la coupe et au transport des grumes – qui sont visées par l'automatisation⁹⁸.

Les technologies numériques novatrices sont de plus en plus répandues. Une étude récente a révélé le poids important accordé aux innovations fondées sur la télédétection pour le suivi, la planification et la gestion des forêts, où les technologies d'apprentissage automatique jouent également un grand rôle dans la collecte, le traitement et l'analyse des données. L'adoption continue d'outils numériques est susceptible de soulever de »

ENCADRÉ 7 ÉVOLUTION DU SECTEUR DES FORÊTS: MÉCANISATION ET AUTOMATISATION NUMÉRIQUE

Le travail en forêt a toujours été rude et potentiellement dangereux, notamment lors de la phase de récolte du bois. Les méthodes qui nécessitent peu de moyens technologiques mobilisent une équipe spéciale composée d'un premier bûcheron et d'un bûcheron chargé de le seconder, aidée d'un groupe d'ouvriers dont la mission est de tailler les branches. Une fois la taille effectuée, une autre équipe spécialisée, formée d'une personne effectuant le marquage, d'un agent de coupe transversale et de deux ou trois traîneurs, débite les arbres en grumes¹⁰⁰. Comme ces méthodes d'exploitation manuelle demandent beaucoup de main-d'œuvre et exposent les ouvriers à des risques, elles sont beaucoup moins courantes aujourd'hui.

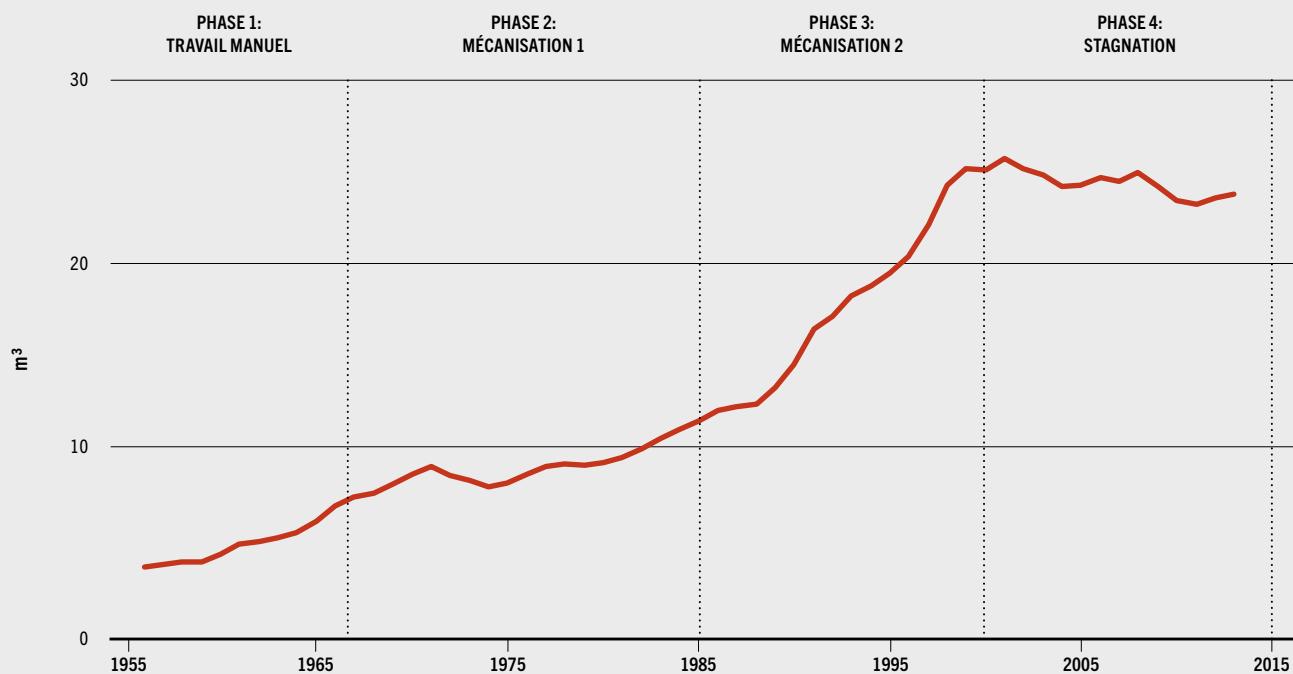
Dans les années 1950, l'exploitation forestière a commencé à évoluer, passant progressivement d'un travail essentiellement manuel à la mécanisation puis à une automatisation partielle. La récolte de bois peut être divisée en quatre phases distinctes: l'abattage des arbres, leur extraction, le tri et le chargement sur un site de débarquement, et le transport vers les marchés. Les machines de coupe sont aujourd'hui capables d'effectuer plusieurs tâches (abattage, extraction, coupe

transversale et tri). Ces machines ont permis des gains majeurs en matière d'efficacité et d'amélioration des conditions de travail. La mécanisation et l'automatisation numérique ont notamment pour avantage d'améliorer la sécurité et le confort du conducteur de l'engin. Grâce à cela, la productivité du travail a fait un bond. En Suède, la productivité par personne a été multipliée par six entre 1960 et 2010 (voir la figure correspondante).

Même dans ces systèmes d'exploitation forestière plus mécanisés, la main-d'œuvre représente généralement quelque 30 à 40 pour cent des frais d'exploitation dans les pays européens¹⁰². L'environnement de travail est stressant car les opérateurs doivent à la fois prendre des décisions rapidement, manœuvrer des machines complexes et déceler les écarts de qualité entre les grumes, ce qui limite leur nombre d'heures de travail. C'est pourquoi l'un des moyens d'accroître la productivité est d'augmenter le niveau d'automatisation. L'adoption de matériel autonome est motivée par la productivité et les coûts de fonctionnement. Une machine autonome est généralement plus lente qu'une machine manœuvrée par un opérateur, mais elle peut tout de même offrir un



FIGURE VOLUME DE BOIS SUR PIED PAR JOUR OUVRABLE DANS LE SECTEUR FORESTIER EN SUÈDE (MOYENNE GLISSANTE SUR TROIS ANS)



SOURCE: SkogForsk d'après McKinsey and Company, 2020¹⁰¹.

ENCADRE 7 (suite)

meilleur rapport coût-efficacité. Plusieurs machines semi-autonomes peuvent être pilotées simultanément par un même opérateur.

La plupart des machines modernes utilisées en forêt peuvent être facilement, et moyennant un coût relativement faible, reconvertis afin d'être télécommandées – il existe de nombreuses possibilités à l'heure actuelle. Comme nous venons de le signaler, ces machines sont généralement plus lentes (c'est particulièrement vrai pour une tâche complexe), et l'amélioration de la productivité ne suffira pas seule à justifier leur adoption. Cependant, leur emploi pourrait être envisagé pour d'autres raisons: pour garantir la sécurité de l'opérateur, ou lorsqu'un opérateur travaillant à plein temps sur place est sous-employé.

Il n'existe actuellement aucun système entièrement autonome en matière d'exploitation des forêts. Toutefois, l'extraction et le transport ultérieur des rondins et des grumes à l'aide de systèmes guidés par GPS ont été retenus comme les premières tâches probablement susceptibles d'être robotisées, et bientôt réalisables moyennant un investissement modeste en recherche-développement. L'abattage de plantations pourrait également devenir économiquement viable à plus long terme, mais au prix d'investissements considérables en recherche-développement¹⁰³. Enfin, le transport routier des grumes est un aspect des opérations forestières qui appelle une amélioration de la productivité dans la chaîne d'approvisionnement en bois. La technologie des camions sans conducteur évolue rapidement, et présente l'avantage de réduire les besoins en main-d'œuvre, et donc les coûts. Des véhicules autonomes sont déjà employés dans les exploitations minières pour les déplacements des camions hors de la voie publique, ce qui permet d'envisager leur utilisation en forêt.

Par ailleurs, de nouveaux systèmes de récolte plus respectueux de l'environnement sont aussi en phase d'élaboration. Les abatteuses-tronçonneuses mobiles

permettent de récolter le bois sur des terrains pentus, difficiles ou inégaux. L'objectif est notamment de limiter les atteintes aux sols forestiers causées par contact sans quitter la trajectoire continue des abatteuses à roues ou à chenilles¹⁰³. Bien que ce genre de système soit encore loin de la phase commerciale, une abatteuse forestière à balancier travaille déjà sans contact avec le sol en Nouvelle-Zélande. Son fonctionnement ne dépend pas des conditions du terrain (pente, irrégularités, etc.) car elle se maintient en hauteur et se déplace d'arbre en arbre en utilisant ceux-ci comme support, ce qui réduit les perturbations du sol¹⁰⁴.

Ces dispositifs respectueux de l'environnement peuvent être précieux dans les forêts où l'emploi de la mécanisation motorisée pour les récoltes risque de compacter et d'éroder les sols, ainsi que d'appauvrir la biodiversité. Enfin, si l'on considère que les bienfaits procurés par les forêts vont bien au-delà de la simple production de bois – il faut aussi citer le stockage du carbone, les produits forestiers non ligneux, la prévention de l'érosion, la purification de l'eau et les activités de loisirs –, il est important de déterminer en quoi l'automatisation numérique peut, au moyen de capteurs, donner plus de valeur à ces bienfaits. Un exemple intéressant à cet égard concerne le suivi de la déforestation, en particulier des activités illégales, à l'aide de données satellitaires. La capacité de suivi de la déforestation s'est nettement améliorée pour ce qui est de la granularité des données, lesquelles sont désormais disponibles mondialement à un rythme mensuel et à une résolution de 5 mètres. Le cas du bassin amazonien en offre une illustration concrète, avec la détection de la perte de superficie forestière causée par l'expansion des plantations de palmiers à huile en territoire autochtone en Équateur¹⁰⁵. Ces données en libre accès qui couvrent le monde entier sont un remarquable exemple de la façon dont les solutions numériques peuvent servir à analyser des problèmes.

- » nouvelles questions sur les écosystèmes forestiers en tant que paysages dynamiques, sociaux, écologiques et technologiques. Les futurs travaux de recherche devraient viser à étudier de plus près comment les chercheurs, les gestionnaires et les parties prenantes du secteur des forêts peuvent anticiper les incertitudes environnementales et technologiques qui touchent l'écosystème forestier et s'y adapter⁹⁹. L'**encadré 7** résume l'évolution du secteur des forêts sur le plan de la mécanisation et le potentiel de l'automatisation numérique.

L'agriculture en environnement contrôlé (AEC) est un autre secteur prometteur pour l'automatisation numérique: il désigne notamment la serriculture et l'agriculture verticale. Les serres sont la forme la plus courante d'environnement contrôlé dans le secteur agricole. Par leur nature même, elles se prêtent au suivi, au contrôle et à l'optimisation de leur environnement. Les innovations relatives aux capteurs et aux instruments à faible coût et à faible consommation d'énergie, aux dispositifs de communication, au traitement de données et

aux applications mobiles, ainsi que les progrès technologiques en matière de conception, de modèles de simulation et de génie horticole, ont permis de remplacer les serres classiques par des environnements contrôlés intelligents¹⁰⁶. Selon les jeunes entreprises spécialisées dans l'AEC, comme Food Autonomy en Hongrie, ioCrops en République de Corée et UrbanaGrow au Chili, il existe un véritable potentiel dans ce domaine².

Avant de se lancer dans un développement commercial à grande échelle, il convient de réaliser une analyse économique précise, étant donné les coûts de démarrage élevés qu'impliquent l'automatisation des serres et l'agriculture verticale¹⁰⁶. À l'instar de toutes les technologies présentées dans ce chapitre, le rapport entre le coût d'une plus grande automatisation et une rentabilité accrue est essentiel, et il doit être pris en compte dans les futures études pour déterminer s'il convient de poursuivre l'automatisation. ■

CONCLUSION

Dans ce chapitre, les auteurs ont présenté les évolutions et examiné les facteurs de la mécanisation motorisée dans les systèmes de production agricole, ainsi que les technologies d'automatisation numérique plus récentes. Ils ont mis en évidence les grandes disparités en matière de mécanisation dans le monde: l'Amérique latine et les Caraïbes, et l'Asie ont beaucoup développé la mécanisation, sous-tendue par l'évolution des systèmes d'exploitation agricole, les transformations structurelles et l'urbanisation, alors qu'en Afrique subsaharienne ces progrès ont été limités. Les auteurs se sont également intéressés aux exemples fructueux d'automatisation numérique dans l'agriculture et au potentiel que celle-ci présente s'agissant de transformer l'utilisation des machines agricoles.

Les discussions autour des avantages de la mécanisation et de l'automatisation numérique en agriculture commencent généralement par les économies de main-d'œuvre, mais s'orientent ensuite rapidement vers d'autres aspects. Dans le cas de la mécanisation motorisée, l'avantage le plus avéré est la réduction de la pénibilité, qui s'ajoute à la rapidité des tâches, et ce dans un

contexte où la main-d'œuvre agricole est rare et saisonnière. La mécanisation comporte certes des atouts en ce qui concerne la productivité de la main-d'œuvre, la réduction de la pauvreté, la sécurité alimentaire, l'amélioration de la nutrition, ainsi que la santé et le bien-être, mais elle suscite également des préoccupations au sujet du chômage¹⁰⁷, de l'appauvrissement de la biodiversité^{108, 109}, de la dégradation des sols^{115, 110} et des disparités croissantes entre les grandes et les petites exploitations^{111, 112}. Ces inquiétudes semblent essentiellement liées à la prédominance de la mécanisation motorisée à grande échelle, qui repose sur de gros tracteurs à quatre roues^{7, 113, 114}.

Les publications sur l'automatisation numérique prétendent que cette dernière peut résoudre certains des problèmes sociaux et environnementaux évoqués ci-dessus⁴⁸. Voici quelques exemples de ses avantages: les travaux des champs peuvent être effectués quelle que soit l'échelle de production (grâce à du matériel plus petit); l'application des intrants est précise; la compaction du sol est réduite (grâce à de petits robots en essaim); les tâches sur le terrain peuvent être réalisées dans des endroits difficiles d'accès pour les technologies manuelles ou mécaniques (sols humides et pentes raides, par exemple); l'exploitation peut être rentable dans des champs de petite taille et de forme irrégulière; et la collecte de données sur les cultures et le bétail peut être automatisée^{54, 82, 115}.

Le présent chapitre a mis en valeur un large éventail de solutions technologiques qui existent déjà en vue d'une éventuelle adoption dans des pays situés à différents stades de développement. L'enjeu, pour les pouvoirs publics, est de parvenir à une adoption inclusive en facilitant l'accès à tous, y compris aux petits producteurs, aux femmes, aux jeunes et aux groupes vulnérables, et de veiller à ce que les solutions technologiques disponibles soient adaptées au contexte et aux besoins particuliers des différents producteurs.

Une adoption inclusive, avec tous les défis que cela comporte, permettra aux pays de tirer parti des technologies d'automatisation numérique et de contribuer à la transformation des systèmes agroalimentaires de manière équitable et durable. Les cas évoqués dans ce chapitre témoignent de la possibilité pour les petits producteurs

de recourir aux services de mécanisation et à l'automatisation numérique tout en réduisant leur empreinte environnementale. Toutefois, il est de plus en plus évident que les choix des pouvoirs publics en matière de politiques influenceront l'orientation de ces technologies et leur adoption dans les différents pays et par différents producteurs. Ces choix stratégiques déterminent l'accès au crédit, le renforcement des capacités et l'information. Idéalement, les pays devraient essayer de créer des conditions équitables pour les technologies innovantes qui sont utiles localement aux systèmes agroalimentaires. Les entreprises

privées pourront ainsi faire correspondre l'offre et la demande de mécanisation motorisée, d'automatisation numérique et de robotique. Le chapitre suivant présentera l'intérêt économique de ces technologies et les transformations qu'elles sont susceptibles d'apporter dans le secteur de l'agriculture. Il montrera notamment comment la mécanisation motorisée, qui est souvent associée à des solutions numériques, peut encore jouer un rôle important, en particulier pour les petits producteurs des pays à faible revenu et des pays à revenu intermédiaire de la tranche inférieure, où l'adoption est lente. ■

**SERBIE**

Moissonneuse-batteuse
fonctionnant de manière
autonome dans un champ.
©Scharfsinn/
Shutterstock.com

CHAPITRE 3

INTÉRÊT ÉCONOMIQUE DES INVESTISSEMENTS DANS L'AUTOMATISATION DE L'AGRICULTURE

MESSAGES CLÉS

→ L'intérêt économique de la mécanisation motorisée repose sur les possibilités que celle-ci offre en matière de réduction des coûts de production, d'expansion et d'intensification de la production et d'amélioration de la productivité. Parmi les principaux obstacles à son adoption figurent un accès insuffisant aux services nécessaires (financement et services de vulgarisation, par exemple) – en particulier pour les personnes vulnérables, exclues et marginalisées, parmi lesquelles les petits producteurs et les femmes –, l'absence d'environnement commercial favorable, le manque de technologies adaptées à la petite agriculture et la précarité des infrastructures.

→ La mécanisation motorisée peut encore offrir des avantages à de nombreux pays à faible revenu et pays à revenu intermédiaire peu avancés sur la voie de son adoption. Ces pays devraient mettre à profit la vaste gamme de machines existantes et leurs multiples utilisations possibles, en les adaptant aux besoins locaux, en particulier à ceux des petits producteurs, qui exploitent généralement de petites surfaces ou travaillent sur des terrains irréguliers.

→ Les technologies numériques peuvent contribuer à ce que les travaux agricoles soient menés avec davantage de précision et plus rapidement, améliorer l'efficacité des services de conseil agricole et apporter des solutions aux problèmes environnementaux hérités de la mécanisation passée (érosion des sols, par exemple), tout en renforçant la résilience face aux chocs et aux facteurs de stress.

→ Les technologies numériques permettent de proposer des services de location de machines, y compris dans les pays à faible revenu, et ce faisant facilitent l'accès aux technologies pour les groupes qui en sont habituellement exclus, tels que les petits agriculteurs et les agricultrices. Les jeunes agriculteurs, en particulier, sont des agents clés de la conversion de l'agriculture familiale à l'automatisation.

→ L'intérêt économique des technologies d'automatisation numérique reste minime, en particulier dans les pays à faible revenu et les pays à revenu intermédiaire de la tranche inférieure, qui pâtissent d'une connectivité et d'un approvisionnement en électricité médiocres et d'un accès limité aux services (financement, assurance et éducation, par exemple). Le constat est encore plus criant pour la robotique associée à l'intelligence artificielle (IA), dont l'adoption devrait s'accélérer surtout parmi les grands producteurs des pays à revenu élevé.

→ Pour exploiter le potentiel des technologies d'automatisation numérique, il est nécessaire de s'attaquer aux facteurs qui freinent leur adoption – précarité des infrastructures, manque de compétences numériques, coût élevé des technologies et absence d'environnement porteur – et, parallèlement, d'investir dans la recherche et l'expérimentation à l'échelle planétaire, de manière à élaborer des technologies adaptées au contexte.

Le chapitre 2 a présenté les évolutions et les facteurs de l'automatisation de l'agriculture, et notamment de la mécanisation motorisée et des technologies d'automatisation numérique plus récentes associées à l'agriculture de précision. La mécanisation motorisée a été largement adoptée dans le monde, quoique les taux d'adoption varient entre les pays et en leur sein. La plupart des pays d'Afrique subsaharienne sont en retard de ce point de vue. Dans d'autres régions, l'accès à la mécanisation se révèle inégal, et généralement plus limité pour les groupes vulnérables tels que les petits producteurs et les femmes. Nous vivons actuellement les prémisses d'une vague d'automatisation numérique de l'agriculture, caractérisée par l'utilisation de capteurs, de robots, de l'IA et d'autres outils numériques aux fins de l'automatisation d'une ou de plusieurs composantes des tâches agricoles – analyse, prise de décision et exécution. Tandis que la mécanisation motorisée a été adoptée à grande échelle dans de nombreux pays, les producteurs agricoles et les entreprises agroalimentaires cherchent encore à déterminer quelles technologies d'automatisation numérique sont avantageuses et adaptées à leurs besoins, compte tenu des conditions locales et des techniques qu'ils utilisent actuellement. L'un des principaux obstacles à l'adoption de ces technologies réside dans le fait que les investissements requis ne sont pas perçus comme rentables, les coûts d'achat et de fonctionnement étant élevés par rapport aux coûts de main-d'œuvre associés aux systèmes actuels. D'autres facteurs entravent aussi l'adoption: manque de technologies adaptées à la production à petite échelle, accès insuffisant aux services d'entretien et de réparation, compétences numériques limitées, faible connectivité ou encore méfiance à l'égard des innovations. Dans le présent chapitre, les auteurs examinent l'incidence de ces facteurs sur l'intérêt économique que présente l'automatisation de l'agriculture et les moyens d'améliorer celui-ci.

L'intérêt économique des investissements dans les technologies agricoles repose sur les gains qu'elles peuvent offrir aux producteurs agricoles, ainsi qu'aux acteurs chargés de la production, de l'installation, de l'entretien ou de la réparation desdites technologies. L'hypothèse de départ est que les acteurs concernés – producteurs, distributeurs et prestataires de services d'entretien et autres – prennent des décisions rationnelles

pour maximiser leurs bénéfices et leur bien-être. Investir dans les technologies d'automatisation entraîne des coûts, qui ont tendance à croître si les technologies considérées sont peu accessibles à l'échelon local. Les producteurs et les fournisseurs de technologies ne passeront à l'automatisation que si les avantages surpassent les coûts.

Pour certaines technologies et dans certaines conditions, le coût des investissements est supérieur aux avantages qu'ils peuvent procurer, tout au moins à court terme, ce qui peut décourager l'investissement en dépit de ses retombées positives pour la société en général. Une intervention des pouvoirs publics est donc nécessaire pour faire coïncider les avantages privés et les intérêts de la société dans son ensemble, et ainsi rendre l'automatisation plus attractive. Ce chapitre porte également sur les problèmes (essentiellement de nature environnementale) liés à la mécanisation motorisée et sur les solutions que peuvent apporter les nouvelles technologies d'automatisation numérique, dont certaines sont encore à l'étude, pour y remédier (au moins partiellement). Ce point concerne tout particulièrement certains pays à faible revenu et pays à revenu intermédiaire de la tranche inférieure où la mécanisation motorisée, encore peu diffusée, peut désormais être mise en œuvre d'une façon durable, efficace et inclusive.

S'appuyant sur les études de cas réalisées pour ce rapport et les études plus générales existantes, ce chapitre présente et résume les données factuelles attestant l'intérêt économique de la mécanisation motorisée et des technologies d'automatisation numérique. Les auteurs s'intéressent ensuite à la façon dont les politiques et les investissements peuvent influer sur l'intérêt économique et orienter les incitations à l'adoption des technologies d'automatisation. Ils analysent en dernier lieu les trajectoires futures d'une vaste gamme de technologies et leur capacité de transformer l'agriculture et de la rendre plus durable, à la lumière des défis divers auxquels sont confrontés les producteurs à l'échelon local. ■

LA MÉCANISATION MOTORISÉE PEUT EFFECTIVEMENT PRÉSENTER UN INTÉRÊT ÉCONOMIQUE DANS DE NOMBREUX CONTEXTES

Un corpus d'études foisonnant s'est attaché à décrire les avantages de la mécanisation et la contribution qu'elle peut encore apporter au développement agricole et rural. En permettant aux producteurs d'effectuer les travaux agricoles plus rapidement et avec une efficacité accrue, elle peut conduire à une augmentation de la productivité agricole et des revenus, à des économies de main-d'œuvre et de coûts, ainsi qu'à une réduction de la pénibilité du travail, entre autres avantages. Dans les systèmes de riziculture intensive en zone humide d'Asie, par exemple, le passage de la charrue à traction animale au motoculteur a entraîné des économies financières considérables en réduisant la quantité de main-d'œuvre nécessaire pour préparer les terres. L'intensité et la productivité des récoltes de riz ont également augmenté grâce au recours à la mécanisation partagée pour la préparation des terres et le battage¹. L'emploi de petits moulins mécaniques pour les tâches extrêmement laborieuses et pénibles, telles que le décorticage du riz paddy ou la réduction des grains en farine, a par ailleurs engendré des gains de temps libre considérables, en particulier pour les femmes¹. La mécanisation a réduit les dommages causés aux cultures et les pertes de récoltes, comme on a pu l'observer en Inde, où l'utilisation de moissonneuses-batteuses a abaissé les pertes de riz et amélioré les rendements de 24 pour cent². S'appuyant sur deux études de cas récentes, l'**encadré 8** présente des données factuelles démontrant l'intérêt économique des investissements dans la mécanisation motorisée en Éthiopie et au Népal.

Même en Afrique subsaharienne, où la mécanisation n'est pas généralisée (voir le chapitre 2), des données montrent qu'elle a été source d'avantages importants. En Côte d'Ivoire, l'utilisation du tracteur a favorisé l'application d'intrants modernes et l'amélioration de la gestion des cultures, d'où une augmentation de

la productivité des terres et de la main-d'œuvre. Il ressort d'une étude menée dans 11 pays africains que l'utilisation du tracteur a amélioré le rendement du maïs d'environ 0,5 tonne par hectare³. En Éthiopie et au Ghana, les ménages qui utilisent des tracteurs ont augmenté leur production en mettant en culture davantage de terres plutôt qu'en cherchant à améliorer leurs rendements^{4, 5}. En Zambie, les ménages agricoles disposant de tracteurs ont pratiquement doublé leurs revenus en mettant en culture une part beaucoup plus élevée de leurs terres et ont dégagé une marge bénéficiaire brute par heure de travail agricole deux fois plus élevée que celle des autres ménages⁶. Bien que les besoins en main-d'œuvre par hectare aient diminué de moitié, la demande de main-d'œuvre non familiale a augmenté pour l'ensemble des activités non mécanisées sous l'effet de la hausse de la production. Le recours à des travailleurs salariés en lieu et place de la main-d'œuvre familiale a également allégé le fardeau supporté par les femmes et les enfants et favorisé la scolarisation de ces derniers.

Par conséquent, les avantages de la mécanisation agricole sont loin de se limiter à l'augmentation de la productivité agricole. La mécanisation libère de la main-d'œuvre familiale, qui peut ainsi se consacrer à des tâches non agricoles telles que la préparation des repas – d'où une amélioration de la nutrition – ou à un travail non agricole susceptible de renforcer leurs moyens de subsistance^{7, 8, 9}. Enfin, elle peut encourager la création d'emplois, par exemple de postes de mécaniciens affectés à l'entretien et à la réparation du matériel. La mécanisation peut créer des effets d'entraînement sur l'économie dans son ensemble en stimulant la demande de biens et de services non agricoles^{10, 11}. Elle peut aussi améliorer la sécurité sanitaire des aliments grâce aux technologies de conservation et d'entreposage (séchoirs et entreposage frigorifique, par exemple), qui limitent la contamination¹² lorsqu'elles sont correctement mises en œuvre. L'**encadré 9** illustre la contribution de l'automatisation de l'agriculture à l'amélioration de la sécurité sanitaire des aliments.

Par ailleurs, la mécanisation est synonyme de résilience accrue. Elle améliore en particulier la résilience de la production agricole face aux aléas climatiques, tels que les sécheresses, en permettant aux agriculteurs d'effectuer plus rapidement leurs

ENCADRÉ 8 ANALYSE COMPARATIVE COÛTS-AVANTAGES DE LA MÉCANISATION ET DE LA TRACTION MANUELLE ET/OU ANIMALE DANS LA PRODUCTION DE BLÉ: ÉLÉMENS RECUEILLIS EN ÉTHIOPIE ET AU NÉPAL

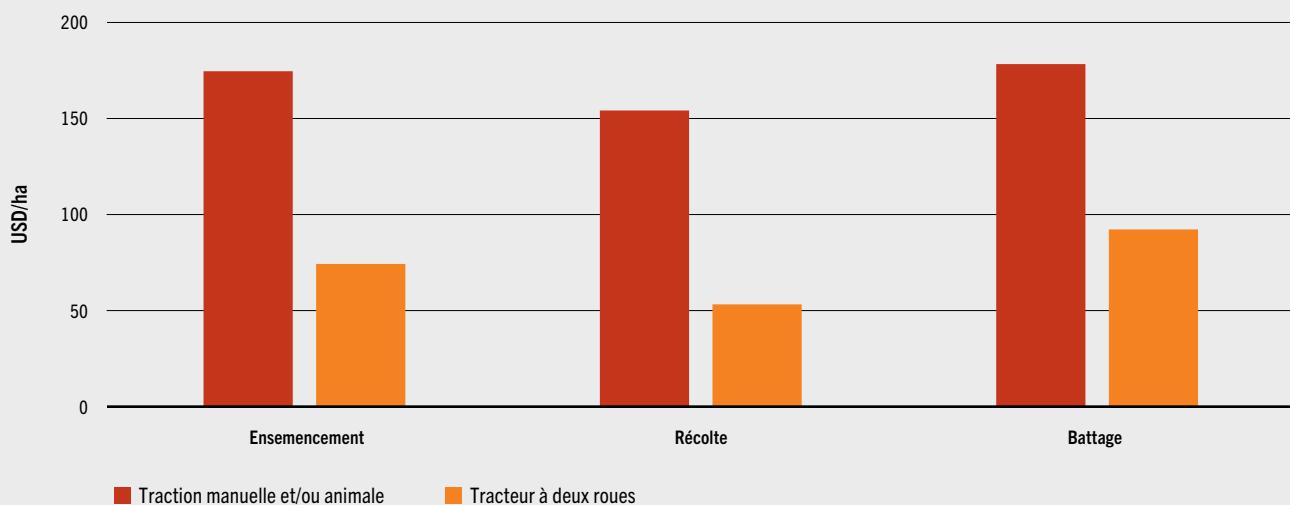
En Éthiopie, le coût des principales tâches liées à la culture du blé, à savoir l'ensemencement, la récolte et le battage, a baissé de 46 pour cent, 65 pour cent et 48 pour cent respectivement parmi les agriculteurs qui utilisaient un tracteur à deux roues en comparaison de ceux qui s'en tenaient à des technologies traditionnelles – outils manuels ou traction animale (voir la figure correspondante). Le coût du transport a également diminué. Les recettes totales moyennes ont augmenté, passant de 1 964 USD pour les pratiques traditionnelles à 2 567 USD pour les tâches mécanisées. Les coûts variables totaux se sont établis en moyenne à 526 USD pour les systèmes mécanisés et à 818 USD pour les systèmes traditionnels.

Par conséquent, les systèmes mécanisés ont dégagé une marge bénéficiaire brute de 2 041 USD, soit 78 pour cent de plus que les systèmes traditionnels. Ces résultats indiquent que la production mécanisée du blé est beaucoup plus productive et rentable que la production non mécanisée.

De même, au Népal, le recours à la mécanisation motorisée dans la culture du blé – avec l'emploi d'un fertiliseur, d'une moissonneuse et d'une batteuse montée sur un tracteur – a fait baisser les coûts d'exploitation totaux de presque moitié et élevé la marge bénéficiaire brute de 81 pour cent, pour la porter à 514 USD (voir le tableau page 47).

>>

FIGURE ANALYSE COMPARATIVE DU COÛT DES TÂCHES AGRICOLES RELATIVES À LA PRODUCTION DE BLÉ, AVEC ET SANS MATERIEL MOTORISÉ: LE CAS DE L'ÉTHIOPIE



SOURCE: Yahaya, à paraître¹⁵.

travaux agricoles et de s'adapter avec davantage de souplesse au changement des conditions météorologiques. Les pompes d'irrigation, par exemple, peuvent accroître ou stabiliser les rendements dans les régions où les pluies sont imprévisibles et les sécheresses fréquentes¹,

comme c'est souvent le cas au Proche-Orient et en Afrique du Nord¹³. La mécanisation renforce également la résilience face aux problèmes de santé qui peuvent toucher la main-d'œuvre familiale ou salariée et être lourds de conséquences pour la production agricole¹⁴.

ENCADRÉ 8 (suite)**TABLEAU ANALYSE COMPARATIVE DU COÛT DES TÂCHES AGRICOLES DANS LA PRODUCTION DE BLÉ AVEC ET SANS MATERIEL MOTORISÉ: LE CAS DU NÉPAL**

Postes	Pratique manuelle coût (USD/ha)	Pratique mécanisée coût (USD/ha)
Fumier	68	34
Semences	71	71
Engrais	87	87
Coût total des intrants	226	192
Préparation des sols, ensemencement et fertilisation	85	25
Irrigation	36	11
Récolte	102	48
Battage	174	116
Coût total des tâches agricoles	396	200
Transport	13	13
Coûts variables totaux	635	405
Production de céréales	868	868
Production de paille	51	51
Total des recettes	919	919
Marge bénéficiaire brute	283	514
<i>Rapport recettes/coûts</i>	<i>1,45</i>	<i>2,27</i>

NOTE: 1 USD = 117,57 NPR (roupies népalaises) au 6 avril 2021, taux de change de la Banque centrale du Népal.
 SOURCE: FAO, 2022¹⁶.

Pour renforcer l'intérêt économique de la mécanisation motorisée, il est essentiel de concevoir des solutions adaptées aux besoins locaux

Les données présentées jusqu'ici montrent que toutes les possibilités d'utilisation de la mécanisation motorisée n'ont pas été épousées, en particulier dans les contextes où son adoption est lente ou inexistante. Il peut être envisagé de sauter l'étape de la mécanisation et de passer directement à l'automatisation numérique et à la robotique associée à l'IA, mais cela n'est réellement possible que dans une poignée de pays à revenu élevé (voir le chapitre 2). Cela étant,

il existe une large gamme de solutions de mécanisation motorisée à la portée des pays à faible revenu et des pays à revenu intermédiaire de la tranche inférieure. L'intérêt économique de la mécanisation motorisée dépend en grande partie du contexte et des machines agricoles qu'il est envisagé d'adopter. Les grandes exploitations agricoles implantées sur des terrains plats peuvent utiliser avec profit de grandes machines telles que les moissonneuses-batteuses et les tracteurs à quatre roues. Pour leur part, les petits producteurs auront plutôt avantage à utiliser des machines de plus petite taille, comme les petits tracteurs à quatre ou deux roues, qui coûtent moins cher et sont plus respectueux de

ENCADRÉ 9 TIRER PARTI DE L'AUTOMATISATION DE L'AGRICULTURE POUR AMÉLIORER LA SÉCURITÉ SANITAIRE DES ALIMENTS

L'introduction de technologies telles que le stockage et le transport réfrigérés des aliments et les innovations en matière de déshydratation et de fumage a grandement amélioré la conservation et la sécurité sanitaire des aliments. Dans le secteur de l'élevage, par exemple, le système de rail à viande vertical utilisé pour l'habillage des carcasses dans les abattoirs est un moyen simple mais néanmoins efficace de prévenir la contamination de la viande. L'automatisation des processus de récolte, de tri et d'emballage des aliments réduit considérablement les risques de transmission des agents pathogènes d'origine alimentaire du personnel aux aliments. Le tri mécanique des arachides, qui permet d'écartier les graines présentant une infection fongique importante, a été un moyen extrêmement efficace d'améliorer la santé publique. Il est cependant important de suivre des règles sanitaires et d'hygiène appropriées pour utiliser le matériel, afin de prévenir les risques d'origine alimentaire venant des machines elles-mêmes. Par exemple, si elles ne sont pas correctement nettoyées, les machines utilisées pour les récoltes sont susceptibles d'introduire des allergènes dans la chaîne d'approvisionnement. Les machines peuvent

compromettre la sécurité sanitaire des aliments par d'autres manières également, telles que les fuites d'huile, les fluides hydrauliques et les gaz d'échappement.

Les progrès de l'automatisation numérique amènent d'autres améliorations encore: détection rapide des contaminants présents dans les aliments, possibilité d'enquêter rapidement sur les épidémies d'origine alimentaire grâce à des outils améliorés, et renforcement des systèmes de surveillance et de suivi. La télédétection appliquée à l'agriculture de précision permet de repérer rapidement les dégâts occasionnés par les organismes nuisibles et de procéder sans tarder à des applications ciblées de produits agrochimiques, évitant ainsi une utilisation excessive de ces produits. Les avantages ne sont pas systématiques, cependant: dans certains cas, l'automatisation peut nécessiter d'appliquer des quantités accrues de produits agrochimiques pour atteindre l'objectif recherché, ce qui peut être préjudiciable aux personnes comme à l'environnement. Il est également important d'assurer un accès équitable aux technologies et de traiter les problèmes liés à la confidentialité et à la propriété des données.

SOURCE: FAO, 2022¹⁷.

l'environnement¹⁸. Ces machines ont largement contribué à réduire la fracture en matière de mécanisation en Asie^{2, 19, 20}. Capables de contourner les souches d'arbre et les pierres, elles conviennent mieux aux besoins des petites exploitations et sont aussi plus faciles à manier, à entretenir et à réparer, et plus adaptées au microcrédit. Elles peuvent aussi être utilisées pour tracter un ripper ou un semoir pour semis direct en agriculture de conservation mécanisée, contribuant ainsi à améliorer la résilience climatique^{21, 22}. L'**encadré 10** donne un exemple concret de la façon dont les petites machines améliorent la résilience des petits producteurs au Myanmar.

En matière d'adaptation des machines motorisées aux besoins locaux, les innovations récentes ne se limitent pas à l'adaptation de la taille des machines. Les pays du Proche-Orient et d'Afrique du Nord sont de plus en plus confrontés à des pénuries d'eau qui limitent la croissance

de la production agricole. L'**encadré 11** traite de la plantation mécanisée sur plates-bandes surélevées en Égypte – exemple de synergies innovantes entre les instruments de mécanisation et l'amélioration des intrants et des pratiques culturelles, qui accroissent les rendements tout en permettant d'économiser les maigres ressources naturelles disponibles.

La mécanisation agricole figure actuellement au premier rang des priorités d'un grand nombre de pays à faible revenu, en particulier en Afrique subsaharienne, où elle était passée un temps à l'arrière-plan après les premiers échecs des programmes de mécanisation menés par les États²³. Il existe actuellement tout un débat sur la question de savoir quelles voies technologiques les pouvoirs publics et les partenaires de développement devraient privilégier, en particulier dans les régions qui ne sont pas encore passées à l'automatisation (la majeure partie de l'Afrique subsaharienne et de

ENCADRÉ 10 RENFORCER LA RÉSILIENCE DES PETITS PRODUCTEURS PAR LA PETITE MÉCANISATION MOTORISÉE

À la suite du cyclone de 2015 et de la sécheresse qui s'est abattue l'année suivante sur l'État de Rakhine, au Myanmar, la FAO a entamé, en collaboration avec le Gouvernement du Myanmar, un projet d'une année (2016-2017) qui a bénéficié de la contribution financière du Japon.

L'objectif était d'améliorer la sécurité sanitaire des aliments consommés par les ménages et de renforcer la résilience des petits producteurs dans les zones sujettes aux conflits et aux catastrophes naturelles. Dans le cadre d'une des composantes du projet, la FAO a étendu l'accès à de petites machines agricoles, telles que des tracteurs à deux roues et des pompes à eau. Les activités de mécanisation ont été déployées dans sept townships et 73 villages de l'État de Rakhine touchés par les inondations et les conflits. Au total, le projet a permis la distribution de 55 tracteurs à deux roues et 94 pompes à eau, et l'organisation de formations sur l'utilisation et l'entretien des petites machines. En outre, 146 villageois ont reçu une formation de conducteur de tracteur.

Les résultats font apparaître des avantages substantiels pour les agriculteurs et la communauté en général, avec une diminution des coûts de préparation des sols (1,6 USD par hectare) et d'importantes économies de temps (les tracteurs à deux roues travaillant sept fois plus rapidement

que les animaux de trait). Le fait de pouvoir préparer les sols rapidement a également eu un effet positif sur la résilience, les agriculteurs étant désormais mieux armés pour affronter les caprices du temps et les pénuries de main-d'œuvre, ainsi que d'autres aléas. L'amélioration des revenus et de la sécurité sanitaire des aliments est également provenue de la culture de légumes destinés à la consommation des ménages et à la vente, activité rendue possible par l'utilisation des pompes à eau installées pendant la saison sèche pour l'irrigation.

D'autres petites machines comme les séchoirs, les batteuses et les moissonneuses peuvent avoir un impact positif sur la résilience des petits producteurs et, en parallèle, favoriser la création d'emplois ruraux et alléger la charge de travail. Néanmoins, le choix d'une technologie de préférence à une autre doit être déterminé par le contexte local et l'évaluation des besoins. Il est par ailleurs essentiel qu'un soutien technique soit disponible et qu'il existe des ateliers de réparation et d'entretien ainsi que des techniciens dans les villages ou les zones environnantes, afin d'assurer les services liés à la mécanisation. Enfin, l'une des conclusions tirées du projet est que l'on aurait obtenu de bien meilleurs résultats en prêtant davantage d'attention aux femmes et aux jeunes.

SOURCE: FAO, 2019²⁴.

nombreuses régions montagneuses, notamment). Il n'existe pas de solution universelle, mais seulement des solutions optimales pour tel ou tel contexte¹⁸. Les décisions relatives à l'automatisation des tâches agricoles doivent tenir compte des conditions locales, notamment des possibilités et des obstacles, et de la demande du marché en matière de technologies de mécanisation.

Les outils à main et la traction animale conservent leur importance

En dépit des avantages de la mécanisation motorisée, des éléments indiquent que les technologies manuelles et la traction animale peuvent encore jouer un rôle important. La traction animale peut constituer une importante force motrice dans les exploitations

de très petite taille et morcelées, en particulier s'il existe des pâturages et des points d'eau et si les maladies animales peuvent être contenues¹⁸. La traction animale permet d'associer élevage et cultures et d'optimiser l'utilisation des ressources; par exemple, le fumier peut être utilisé pour les cultures, et les résidus de récolte pour l'alimentation des animaux. Pour de nombreux producteurs, c'est aussi la meilleure stratégie immédiate pour faire face aux pénuries d'énergie avant de passer à la mécanisation motorisée^{21, 27}. Pour la majorité des petits producteurs africains, le passage à la traction animale représenterait un réel progrès¹⁸.

Le même raisonnement s'applique aux outils à main évolués – c'est-à-dire les outils qui font principalement appel à la force humaine mais qui sont conçus intelligemment, de

ENCADRÉ 11 EN ÉGYPTE, LA PLANTATION MÉCANISÉE SUR PLATES-BANDES SURÉLEVÉES CONTRIBUE À L'AMÉLIORATION DE LA PRODUCTIVITÉ ET À L'UTILISATION DURABLE DE L'EAU

La plantation mécanisée sur plates-bandes surélevées est un moyen efficace d'accroître la productivité et les rendements des cultures, d'économiser les maigres ressources en eau disponibles et de réduire l'engorgement grâce à un drainage amélioré. Appliquée à la production de blé en Égypte, cette technologie a entraîné une augmentation de 25 pour cent de la productivité, due à des rendements améliorés, une diminution de 50 pour cent des coûts des semences, une réduction de 25 pour cent de l'utilisation d'eau et une baisse des coûts de main-d'œuvre. En conséquence, un programme de plantation mécanisée sur plates-bandes surélevées a été mis en place dans le cadre de la campagne nationale de blé de l'Égypte, et selon les estimations, environ 800 000 hectares de blé devraient être plantés suivant cette technique d'ici à 2023. On estime par ailleurs que, 15 ans après son démarrage, le projet générera des gains de plus de 4 milliards d'USD, qui profiteront en majeure partie aux plus d'un million de producteurs de blé que compte l'Égypte. Les autres avantages comprennent une réduction de la dépendance vis-à-vis des importations de blé (de plus de 50 pour cent

d'ici à 2025) et une amélioration de la productivité de l'eau sur plus de 200 000 hectares de terres pauvres en eau.

Pour donner de bons résultats, cette technologie doit impérativement être adaptée aux conditions locales et les composantes précises de la solution technologique doivent être dictées par le contexte. En Égypte, la solution technologique a été définie à l'issue d'une évaluation à long terme et se compose des éléments suivants: une variété de blé améliorée, semée à une densité de 108 kilogrammes par hectare; une période de semis allant du 15 au 30 novembre; l'utilisation d'une charrue et d'un semoir mécanisés pour la préparation des sols et la plantation; et l'application d'engrais azoté à une densité de 168 kilogrammes par hectare. Si elle est correctement adaptée à leurs besoins, cette technologie peut se révéler particulièrement intéressante pour les petites et moyennes exploitations. Elle est relativement abordable, peut être aisément mise en œuvre avec des tracteurs de petite taille, est adaptée aux cultures locales et se prête aussi bien à la monoculture (blé ou riz, par exemple) qu'à la polyculture intercalaire (maïs, betterave à sucre et fèves, par exemple).

SOURCES: Alwang *et al.*, 2018²⁵; Swelam, 2016²⁶.

manière à produire un maximum de résultats pour un minimum d'efforts. Ces outils sont particulièrement adaptés aux exploitations sur lesquelles l'emploi de machines est difficile. Ils allègent le travail de la main-d'œuvre, libérant du temps pour le repos ou d'autres activités rémunératrices, réduisent les coûts et la pénibilité et améliorent la résilience. L'**encadré 12** (page 51) présente un exemple concret des avantages procurés par ces outils, décrivant l'impact de l'utilisation du semoir manuel à tambour sur la rentabilité, l'efficience, la durabilité environnementale et la résilience au Népal et en République démocratique populaire lao.

En résumé, la possibilité d'utiliser des animaux de trait et des outils à main évolués dépend du contexte. Si elles sont moins performantes que les tracteurs, ces solutions permettent de surmonter les goulets d'étranglement liés à la main-d'œuvre, d'élever les rendements des cultures et d'étendre la surface de terres

agricoles. Dans de nombreux cas, les outils à main évolués et la traction animale sont sans doute les meilleures options possibles pour accroître la force motrice disponible. L'idée de trouver la solution la mieux adaptée peut aider les pouvoirs publics et les partenaires de développement à mieux cerner les voies technologiques à privilégier et les institutions et investissements qui leur sont associés, en tenant compte des caractéristiques agroécologiques et socioéconomiques des systèmes de production agricole de leurs pays respectifs. À mesure que les processus d'innovation liés à la mécanisation agricole avanceront en réponse à cette évolution du contexte, les voies technologiques devront être adaptées et ajustées. ■

ENCADRÉ 12 EN RÉPUBLIQUE DÉMOCRATIQUE POPULAIRE LAO, LES SEMOIRS À TAMBOUR FONT ÉCONOMISER DU TEMPS, DES EFFORTS ET DE L'ARGENT

Dans la province de Sayaboury, en République démocratique populaire lao, un semoir à tambour a été mis à l'essai sur le terrain dans le cadre d'un programme visant à encourager l'intensification durable de la riziculture, mis en œuvre par le Gouvernement et les petits producteurs avec le soutien de la FAO. Le semoir à tambour est un outil manuel utilisé pour planter des semences de riz prégermées. Il est plus avantageux que les méthodes de plantation traditionnelles, qui reposent sur le repiquage manuel et le semis à la volée. De fait, il réduit le temps de plantation de 90 pour cent, accroît la productivité de la main-d'œuvre de plus de 40 pour cent, réduit les

coûts de production de 20 pour cent et permet de réaliser des économies de semences de plus de 60 pour cent. Le semoir à tambour est en outre un outil respectueux de l'environnement: il fonctionne sans combustibles fossiles et convient aux approches agroécologiques telles que les systèmes de rizipisculture. Le semoir à tambour renforce la résilience des agriculteurs face au changement climatique, en leur laissant davantage de souplesse dans le choix de la période de plantation. En outre, dans l'éventualité où une catastrophe naturelle viendrait détruire le riz récemment planté, du riz pourra être replanté rapidement et sans difficulté avec le semoir à tambour.

SOURCE: Flores Rojas, 2018²⁸.

EXAMEN DE L'INTÉRÊT ÉCONOMIQUE DE L'AUTOMATISATION NUMÉRIQUE: ENSEIGNEMENTS TIRÉS DES ÉTUDES DE CAS

Dans la section précédente, les auteurs ont examiné l'intérêt économique de la mécanisation motorisée, soulignant les possibilités que celle-ci offre en améliorant la résilience, la productivité et l'efficience d'utilisation des ressources, ainsi qu'en réduisant la pénibilité du travail humain et les pénuries de main-d'œuvre. Ils ont aussi fait valoir que, dans certaines circonstances, l'énergie manuelle et animale peut encore amener des progrès. La présente section est consacrée à l'intérêt économique des investissements dans les technologies d'automatisation numérique. Les progrès obtenus sur les plans de la productivité, de l'efficience d'utilisation des ressources et des économies de main-d'œuvre ont joué un rôle clé dans l'adoption de ces technologies. Cependant, celles-ci ne sont pas sans entraîner des coûts, et beaucoup d'entre elles imposent des investissements initiaux massifs et ne peuvent être correctement mises en œuvre sans compétences

et connaissances spécifiques. Par ailleurs, les agriculteurs peuvent hésiter à investir dans certaines innovations qui sont trop éloignées des traditions et des normes culturelles et sociales. En ce cas, il peut être nécessaire que les pouvoirs publics et les prestataires de services interviennent pour expliquer les avantages attendus des investissements dans ces technologies. Dans ce cadre, la conduite d'essais, d'expériences et d'analyses coûts-avantages pourrait être un moyen d'établir la confiance nécessaire.

L'évaluation de l'intérêt économique des technologies d'automatisation numérique appliquées à l'agriculture est rendue difficile par le peu d'informations disponibles sur leur rentabilité. Exception faite de la mécanisation motorisée, les technologies d'automatisation numérique sont récentes, et les données relatives à leur adoption sont éparpillées et peu homogènes (voir le chapitre 2). De même, les informations sur les avantages économiques sont très variables et dépendent dans une certaine mesure du degré d'adoption des différentes technologies dans l'agriculture²⁹. C'est pourquoi le présent exposé s'appuie principalement sur les résultats de deux études techniques réalisées pour ce rapport^{30, 31}. Ces deux études reposent sur 27 études de cas, qui s'articulent autour d'entretiens menés auprès d'informateurs clés dans toutes les régions du

ENCADRÉ 13 ÉVOLUTION DE L'INTÉRÊT ÉCONOMIQUE DES SYSTÈMES DE TRAITE ROBOTISÉE

Les technologies d'automatisation gagnent du terrain dans le secteur de l'élevage. C'est le cas en particulier des systèmes de traite robotisée, utilisés dans les pays à revenu élevé³². Cette technologie présente un double avantage économique, en permettant de réaliser des économies de main-d'œuvre (de 18 à 30 pour cent, selon les estimations)³³ et en augmentant la production de lait (de 10 à 15 pour cent par vache)^{33, 34, 35}. Les données indiquent que les petites et moyennes fermes laitières (100 à 300 vaches) ont été les premières à adopter la traite robotisée, sous l'impulsion de jeunes agriculteurs qui voyaient dans cette technologie un moyen d'améliorer et d'assouplir leurs conditions de travail, en les dispensant de la nécessité de traire les animaux deux ou trois fois par

jour. L'intérêt économique de la traite robotisée repose davantage sur une organisation souple du travail et une amélioration de la qualité de vie que sur des avantages strictement économiques pour les petites exploitations. Néanmoins, des données plus récentes indiquent que les grandes fermes laitières (plus de 1 000 vaches) adoptent à leur tour ces systèmes pour faire face aux pénuries de main-d'œuvre²⁹. Compte tenu de leurs coûts de départ, les robots de traite ne sont pas viables pour les très petites fermes, qui se trouvent essentiellement dans des pays à faible revenu et des pays à revenu intermédiaire; ils peuvent en revanche être intéressants pour les élevages commerciaux qui disposent de troupeaux relativement importants.

monde. Les éléments qui en sont issus sont donc principalement de nature qualitative, reflétant l'expérience des prestataires de services d'automatisation numérique ou – dans une moindre mesure – des représentants des producteurs agricoles. Les 27 études de cas couvrent l'ensemble des régions du monde et des systèmes de production agricole (cultures, élevage, aquaculture et agroforesterie). Elles décrivent des solutions agricoles novatrices liées à la mécanisation motorisée ou à l'automatisation numérique, susceptibles d'être étendues ou déjà déployées à grande échelle, qui s'adressent aux exploitations petites ou grandes. Elles reflètent le point de vue des prestataires de services plutôt que celui des producteurs agricoles en tant qu'utilisateurs finaux. (Une description succincte de chaque étude de cas et de la méthode utilisée figurent à l'annexe 1^a.)

Préparation au changement d'échelle des technologies d'automatisation de l'agriculture: cadre d'étude

Les technologies décrites dans les 27 études de cas menées dans les différentes régions du monde varient considérablement en ce qui concerne la préparation à la mise en œuvre. La **figure 6** (page 53) indique, pour chaque catégorie de technologie,

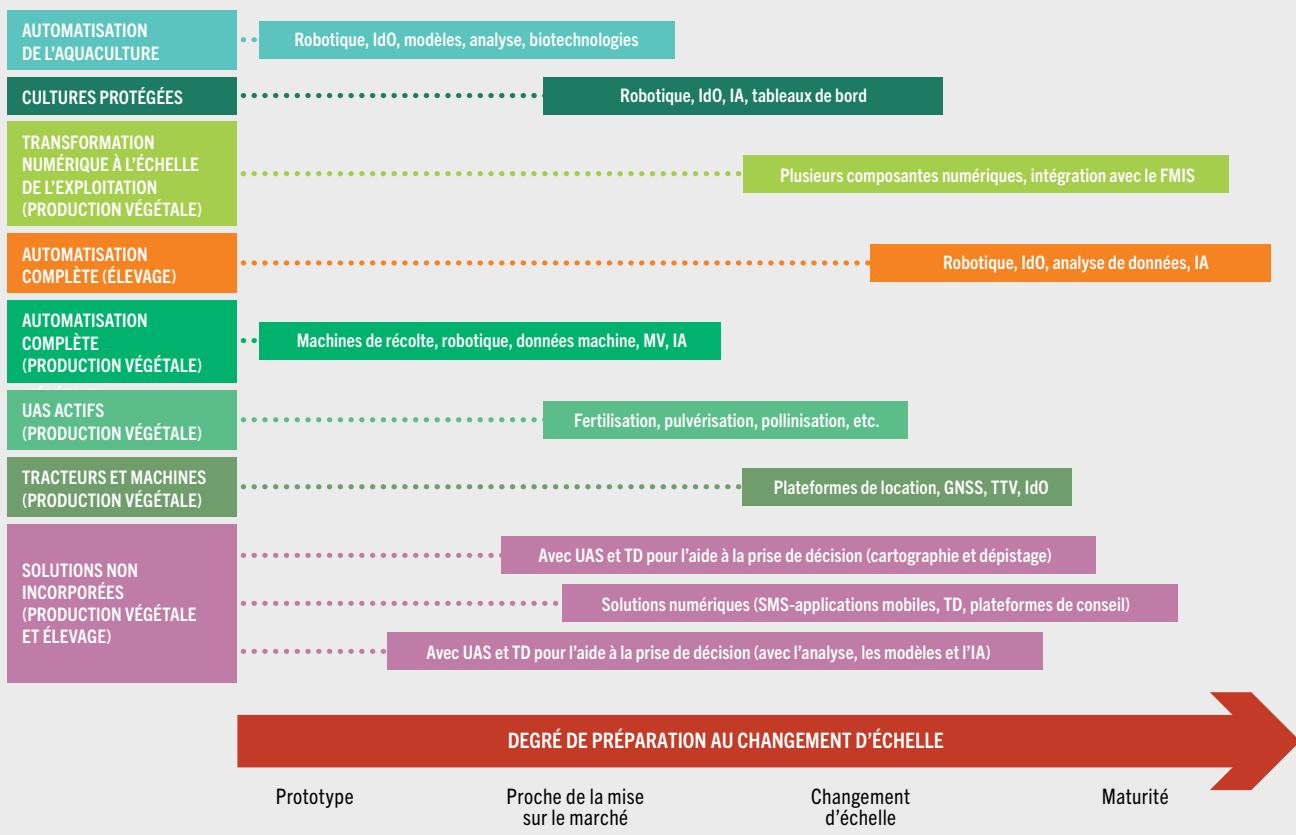
les solutions ayant atteint chacune des quatre phases de la préparation au changement d'échelle. Les solutions parvenues à maturité concernent, en majeure partie, l'automatisation de l'élevage et la conversion numérique à l'échelle de l'exploitation entière. Le matériel et les machines entièrement automatisés qui sont adaptés à la production animale offrent d'excellentes perspectives pour ce qui est des économies financières et des gains de productivité (voir l'**encadré 13**).

Pour ce qui est des technologies en phase de changement d'échelle, la **figure 6** présente un large éventail de catégories, parmi lesquelles les solutions numériques non incorporées (voir le glossaire), les systèmes d'aéronef sans équipage à bord (UAS, plus connus sous le nom de drones) et la télédétection, les solutions de mécanisation associées à des systèmes mondiaux de navigation par satellite (GNSS), les technologies à taux variable (TTV) et les solutions de serriculture. L'abondante littérature produite dans les années 1990 pour présenter les avantages des technologies utilisant les GNSS³⁶ ont facilité leur diffusion. Tel n'a pas été le cas pour les TTV, en revanche, les données relatives à leur rentabilité n'étant pas concluantes (voir le chapitre 2)²⁹.

Parmi les solutions qui sont encore au stade proche de la mise sur le marché ou à l'état de prototype, on trouve essentiellement l'automatisation avancée et la robotique appliquées à l'agriculture de plein

^a Pour une description plus détaillée, voir McCampbell, 2022³⁰ et Ceccarelli *et al.*, 2022³¹.

FIGURE 6 NIVEAUX DE PRÉPARATION AU CHANGEMENT D'ÉCHELLE DES TECHNOLOGIES D'AUTOMATISATION NUMÉRIQUE



NOTES: UAS, système d'aéronef sans équipage à bord; IdO, internet des objets; IA, intelligence artificielle; FMIS, système d'information de gestion agricole; MV, vision industrielle; GNSS, système mondial de navigation par satellite; TTV, technologie à taux variable; TD, télédétection. La préparation au changement d'échelle se divise en quatre phases: i) prototype – le concept a fait l'objet de tests et de démonstrations dans le cadre d'essais limités; ii) phase proche de la mise sur le marché – la solution fonctionne dans des conditions de production réelles, et le prestataire de services étudie un ou plusieurs modèles d'activité devant lui permettre de trouver des clients; iii) changement d'échelle – la solution a été adoptée par plusieurs utilisateurs finaux/clients, et un ou plusieurs modèles d'activité sont rentables; iv) maturité – la solution dispose d'une clientèle établie, un ou plusieurs modèles d'activité sont rentables, et la demande croît.

SOURCE: Ceccarelli et al., 2022³¹.

champ, à la serriculture et à l'aquaculture, ainsi que les UAS servant à la détection et à l'application d'intrants. Certaines technologies ont déjà fait la preuve de leur rentabilité et se substituent progressivement au travail manuel dans les pays à revenu élevé, où elles exécutent un large éventail de tâches telles que l'irrigation, le dépistage des organismes nuisibles, la récolte et le désherbage, ou encore la sélection et la cueillette des fruits.

Rien n'indique en revanche que ces technologies soient utilisées dans les pays à faible revenu et les pays à revenu intermédiaire.

Bon nombre de solutions n'ont pas encore dépassé les premières étapes du développement et de la commercialisation, et leur intérêt économique n'est pour l'instant pas établi. Parmi les 27 études de cas, certaines entreprises proposent des solutions

qui sont encore à l'état de prototype (GRoboMac et Seed Innovations), tandis que d'autres offrent des solutions proches de la mise sur le marché (Atarraya, Food Autonomy, GRoboMac, Harvest CROO Robotics, Hortikey et UrbanaGrow, par exemple). On trouve plusieurs exemples de solutions en phase de changement d'échelle (Aerobotics, Cattler, Cropin, ioCrops, SeeTree, SOWIT, TROTRO Tractor et Tun Yat, notamment) ou ayant atteint la maturité (Lely, ZLTO, ABACO, Egistic et Igara Tea). L'annexe 1 fournit de plus amples précisions sur la préparation au changement d'échelle de chaque technologie.

Les résultats des études de cas à la loupe

Du point de vue des prestataires de services, l'un des constats les plus importants qui se dégagent des études de cas est que seulement 10 des 27 entreprises semblent être rentables et financièrement viables. Elles ont atteint la phase de la maturité (voir la [figure 6](#)), et la plupart se trouvent dans des pays à revenu élevé ou des pays à revenu intermédiaire de la tranche supérieure et ont pour clients de grands producteurs, même s'il existe des exceptions (par exemple, une entreprise ougandaise de thé, qui s'adresse aux petits producteurs). Le fait que la plupart de ces entreprises opèrent dans des pays à revenu élevé – même si certaines ont vu le jour dans un pays à revenu intermédiaire de la tranche supérieure, comme Aerobotics en Afrique du Sud, Atarraya au Mexique et Cattler en Argentine – laisse à penser que l'intérêt économique des investissements dans ces technologies est plus établi dans les pays à revenu élevé.

Du point de vue de l'utilisateur, plus d'un tiers des études de cas indiquent que ces solutions procurent des avantages aux agriculteurs, sous la forme de gains de productivité et d'efficience ainsi que de nouveaux débouchés. En Ouganda, par exemple, une solution numérique visant à améliorer la productivité et l'efficience de la culture du thé (Igara Tea) a permis à 7 000 agriculteurs d'accroître leur production de 57 pour cent en cinq ans. Une entreprise de location de machines située au Myanmar (Tun Yat) affirme faire gagner à tous les agriculteurs qui ont recours à ses services environ 240 USD supplémentaires par an; ce résultat s'explique principalement par l'amélioration de la qualité du battage et des manipulations,

qui réduit le volume de pertes après récolte³¹. Dans trois autres cas portant, respectivement, sur l'élevage (GARBAL), les services de location de machines (TROTRO Tractor) et l'exploitation des arbres fruitiers (SeeTree), bien que les résultats des analyses de viabilité financière soient à ce jour peu probants, le fait que des agriculteurs paient déjà pour utiliser ces solutions signifie qu'investir dans ces technologies présente un intérêt économique. En l'absence d'informations sur cet intérêt, le nombre d'utilisateurs ou le volume d'investissements qu'une solution est parvenue à attirer peuvent donner une indication de sa viabilité financière. Dans cinq cas, par exemple, les prestataires de services ont communiqué le nombre de producteurs utilisant leurs services (Aerobotics, Cattler, Egistic, Lely et SOWIT), et dans deux cas, ils ont indiqué le volume d'investissements reçu par l'entreprise (Atarraya et Harvest Croo Robotics).

Beaucoup de ces technologies en sont encore au stade préliminaire, et leur intérêt économique n'est pas établi pour l'instant. Il faudra recueillir davantage de données probantes en procédant à des analyses coûts-avantages pour mieux comprendre comment les technologies peuvent être adaptées à des contextes déterminés ([l'encadré 14](#) donne un exemple qui concerne l'Europe).

Les informations recueillies à ce jour jettent un éclairage sur certains des déterminants de l'adoption de l'automatisation numérique et des facteurs qui y font obstacle. Premièrement, une augmentation du taux d'adoption d'une solution peut être interprétée comme le signe, d'une part, que cette solution effectue les tâches agricoles correctement, et d'autre part, que les agriculteurs savent l'utiliser. Une étude de cas consacrée à la conversion numérique dans la culture et l'élevage (ZLTO) montre que les producteurs agricoles manquent souvent de temps pour se familiariser avec les nouvelles solutions, en particulier celles qui ne sont pas directement intégrées aux machines; à l'inverse, lorsque les nouvelles machines agricoles sont déjà équipées d'appareils GNSS, l'adoption de cette technologie – qui permet de positionner la machine de façon plus précise pendant les travaux – s'en trouve facilitée³¹.

L'une des principales raisons pour lesquelles les producteurs agricoles sont réfractaires aux technologies d'automatisation numérique est le

ENCADRÉ 14 IMPACT DU PROJET DE PULVÉRISATEUR NUMÉRIQUE POUR VERGERS DE L'UNION EUROPÉENNE: ÉLÉMENTS RECUEILLIS EN POLOGNE ET EN HONGRIE

L'Union européenne a investi 20 millions d'euros dans le projet SmartAgriHubs, axé sur la conversion de l'agriculture européenne aux technologies numériques. L'une des composantes du projet, la Smart Orchard Spray Application, a pour objectif d'optimiser l'efficience et la qualité du traitement dans les vergers en utilisant des technologies de pulvérisation intelligentes en association avec des dispositifs IoT (internet des objets). Les pulvérisateurs IoT permettent de réduire sensiblement la consommation de produits phytosanitaires, dans la mesure où ils s'adaptent automatiquement aux différentes zones des vergers

SOURCE: IoF, 2019³⁷.

ainsi qu'à l'état de chaque plante. En outre, l'intégration du nuage de la Smart Orchard Spray Application aux processus et logiciels actuellement mis en œuvre par les agriculteurs contribue à améliorer l'efficience, la rentabilité et la durabilité de la production alimentaire. Grâce à sa traçabilité, la technologie peut aussi améliorer la sécurité sanitaire et la qualité des aliments. Chaque année, elle peut faire économiser aux producteurs 517 euros de carburant par hectare, réduire leurs dépenses en pesticides de 25 pour cent et accroître leurs recettes grâce à une prise de décision améliorée.

manque généralisé de compétences numériques et la méconnaissance des avantages que peuvent apporter ces solutions. À ces facteurs s'ajoute une résistance au changement, généralement associée au vieillissement de la population agricole. Ces aspects sont soulignés par des études de cas menées dans différentes régions (Abaco en Europe, ioCrops en République de Corée, Seed Innovations au Népal, SeeTree en Amérique, en Europe et en Afrique du Sud, TraSeable Solutions aux Fidji et dans d'autres pays du Pacifique, et Tun Yat au Myanmar) et ne se limitent pas aux pays à faible revenu et aux pays à revenu intermédiaire. Pour cette raison, le changement générationnel apparaît comme un facteur clé de l'adoption, les jeunes agriculteurs étant perçus comme des agents essentiels de la transformation numérique des exploitations familiales et de leur passage à l'automatisation avancée. Il ressort de trois études de cas menées aux États-Unis d'Amérique et en République de Corée (ioCrops) (Atarraya et Cattler) que les jeunes agriculteurs semblent être plus ouverts à l'innovation. Le renforcement des capacités est donc fondamental pour encourager l'adoption.

Autre facteur qui peut favoriser ou au contraire décourager l'adoption, l'attitude à l'égard du risque. Deux études de cas (Aerobotics et Cattler) indiquent que les grands producteurs sud-africains et argentins, respectivement, sont généralement plus dynamiques et plus ouverts aux solutions d'automatisation numérique que leurs homologues

des États-Unis d'Amérique. La raison principale en est que ces derniers se sentent moins exposés aux risques du marché, tandis que les premiers ont besoin d'être plus compétitifs sur le marché international. De fait, le dynamisme et la propension à la prise de risque des producteurs argentins et sud-africains sont sans doute liés à leur exposition à la concurrence internationale, qui favorise l'adoption de nouvelles technologies.

Les autres déterminants de l'adoption – également évoqués au chapitre 2 – comprennent les pénuries de main-d'œuvre (notamment saisonnière, comme le signalent GRoboMac, Igara Tea, SOWIT et TROTRO Tractor) et des conditions de travail plus sûres et moins pénibles (voir les cas de Lely et SOWIT). Une observation intéressante de TROTRO Tractor est que les pénuries de main-d'œuvre sont un puissant facteur d'adoption parmi les agricultrices, qui peinent davantage à recruter du personnel que leurs homologues masculins. En outre, les femmes effectuent leurs travaux agricoles plus tard, une fois que les hommes n'ont plus besoin des machines. Des solutions telles que TROTRO Tractor permettent aux femmes d'avoir du matériel à leur disposition, indépendamment de l'utilisation qu'en font les hommes³⁸. Autre constat intéressant, la pandémie de covid-19 a été citée comme un facteur incitatif dans deux études, la nécessité de réduire ou d'éviter les contacts physiques ayant renforcé l'attrait des solutions numériques (voir l'[encadré 15](#)). ■

ENCADRÉ 15 LA PANDÉMIE DE COVID-19 A AIGUISÉ L'INTÉRÊT POUR LES TECHNOLOGIES NUMÉRIQUES: ÉLÉMENTS RECUEILLIS DANS LE CADRE DE DEUX ÉTUDES DE CAS

Parmi les 27 études de cas réalisées pour ce rapport, deux ont mis en évidence le rôle de la pandémie de covid-19 en tant que facteur incitant à l'adoption de technologies. TROTRO Tractor, qui opère dans plusieurs pays d'Afrique subsaharienne, a indiqué que la pandémie avait largement encouragé l'utilisation de ses services. Sa plateforme a rendu les activités de culture possibles malgré les restrictions relatives aux déplacements, et l'adoption des services a été facilitée par un système de bons électroniques.

SOURCE: Ceccarelli *et al.*, 2022³¹.

TraSeable – dont l'application mobile, assortie d'outils numériques simples, permet aux agriculteurs du Pacifique de se tenir informés de l'actualité dans le secteur agricole – a également indiqué que la pandémie de covid-19 avait favorisé l'adoption de son produit. D'après la personne interrogée, la hausse impressionnante des téléchargements de cette application sortie en 2020 s'explique en partie par les restrictions des contacts en face-à-face mises en place pour juguler la propagation de la pandémie.

AU-DELÀ DE L'INTÉRÊT ÉCONOMIQUE: LE RÔLE DES INVESTISSEMENTS, DES POLITIQUES ET DE LA LÉGISLATION

La section précédente a présenté les éléments entrant en ligne de compte dans l'intérêt économique que présentent les technologies d'automatisation de l'agriculture. Elle a montré que la mécanisation agricole avait apporté des avantages considérables aux producteurs agricoles dans l'ensemble et que, à condition d'être adaptée aux besoins locaux, elle pouvait également avoir des avantages sur le plan de la durabilité grâce à une utilisation efficiente et plus économique des maigres ressources disponibles. Cette section a également permis de dégager, à partir d'un corpus de données certes limité, quelques enseignements importants qui aident à mieux comprendre l'intérêt économique des technologies d'automatisation numérique. Leur message principal est que l'intérêt économique de ces technologies est encore faible ou n'a pas atteint la maturité voulue pour diverses raisons, allant de la réticence des agriculteurs à assumer les risques associés à ces technologies encore nouvelles au fait qu'ils ne disposent pas des compétences numériques nécessaires pour les maîtriser.

Dans la présente section, les auteurs poussent l'analyse un peu plus loin, au-delà de l'intérêt économique, pour examiner les facteurs structurels (à savoir les politiques, la législation et l'investissement public) qui influent sur les motivations des producteurs agricoles et des fournisseurs de technologies d'automatisation et les encouragent à assumer les risques liés à l'adoption des technologies en question.

En Afrique, par exemple, où l'adoption a été plus lente que dans d'autres régions, la demande de mécanisation motorisée dans l'agriculture est déjà élevée et continue de croître. Néanmoins, le manque de connaissances et de compétences sur l'utilisation et l'entretien des machines, conjugué aux réglementations commerciales, aux politiques douanières et à la précarité des infrastructures, fait frein à l'adoption³⁹. Par ailleurs, dans de nombreux pays africains, la faiblesse des infrastructures entrave l'accès aux marchés urbains et élève le prix des services de mécanisation³⁸, en particulier pour les petits producteurs qui exploitent des parcelles de petite taille et morcelées⁹, ce qui n'incite pas à investir dans ces technologies^{19, 39}. L'amélioration des infrastructures de transport et des réseaux routiers réduit les coûts d'accès aux technologies, aux pièces détachées, aux services de réparation et au carburant pour les producteurs, et facilite ainsi l'émergence de marchés de services⁴⁰. Par ailleurs, en améliorant les approvisionnements en électricité et énergies renouvelables, les pouvoirs publics peuvent soutenir l'adoption de

technologies de mécanisation motorisée telles que les pompes d'irrigation fonctionnant à l'énergie solaire et les machines de transformation et de conservation^{19, 41, 42}.

De même, des infrastructures médiocres empêchent l'adoption des technologies d'automatisation numérique, en particulier dans les pays à faible revenu^{30, 31}. Le niveau limité ou l'absence de connectivité et d'autres infrastructures d'appui, notamment les infrastructures liées à l'électricité et aux données, sont régulièrement cités comme des obstacles à l'adoption dans la plupart des pays à faible revenu et des pays à revenu intermédiaire, y compris dans certaines des études de cas citées précédemment (Atarraya au Mexique et GARBAL en Afrique de l'Ouest, notamment). Les populations rurales sont généralement désavantagées s'agissant de l'accès à internet et aux smartphones, ce qui restreint leur accès à divers services utiles. Inversement, lorsque ces infrastructures sont en place, l'adoption augmente, deux études de cas (TraSeable aux Fidji et Tun Yat au Myanmar) constatant que la pénétration rapide de la téléphonie mobile avait créé un environnement favorable à l'adoption des solutions d'automatisation numérique³¹.

Le régime foncier joue un rôle important dans l'adoption des technologies en raison de son influence sur l'accès au financement et sur l'attitude des producteurs à l'égard de la prise de risque. En règle générale, la mécanisation agricole est d'abord adoptée par les grandes exploitations, qui bénéficient d'une plus grande sécurité foncière, ont plus facilement accès au crédit, aux services de vulgarisation et aux marchés, et sont plus aptes à prendre des risques⁴³. Des données recueillies un peu partout dans le monde indiquent que les grandes exploitations se mécanisent plus vite que les petites^{4, 44, 45, 46}. Cela étant, une petite taille d'exploitation ne devrait pas être un obstacle à l'adoption si l'on parvient à faire évoluer les solutions technologiques et institutionnelles pour les adapter à la mécanisation des petites exploitations. Par exemple, les services de mécanisation «migrateurs» – services de location qui couvrent de longues distances pour satisfaire la demande en différents endroits, traversant parfois plusieurs zones écologiques et plusieurs frontières nationales – sont très demandés dans de nombreux pays d'Asie et certains pays d'Afrique, même si,

encore une fois, ils pâtissent de la précarité des infrastructures et se heurtent à des problèmes aux frontières dans de nombreux pays africains^{4, 19, 47, 48}.

Dans les publications disponibles et les 27 études de cas réalisées pour ce rapport^{30, 31}, la législation est fréquemment citée comme un facteur limitant en raison des restrictions et des lourdeurs administratives qu'elle entraîne. Dans les pays à faible revenu et les pays à revenu intermédiaire, elle freine la diffusion et l'adoption de solutions telles que les UAV, les capteurs et les stations météorologiques. Ce constat vaut également pour certains pays à revenu intermédiaire de la tranche supérieure et pays à revenu élevé, comme l'illustrent les restrictions associées aux autorisations de vol dans l'Union européenne et en Afrique du Sud (citées par Aerobotics), les limitations de vitesse imposées aux machines autonomes aux États-Unis d'Amérique^{31, 49} et les restrictions relatives aux importations de drones et d'appareils utilisant l'IdO (mentionnées par Igara Tea en Ouganda et SOWIT en Afrique du Nord et en Asie de l'Ouest). La législation a également une incidence sur l'adoption des technologies d'automatisation numérique dans des secteurs particuliers tels que la serriculture et l'aquaculture. Le sentiment général est que la serriculture et la pisciculture ne sont pas naturelles, raison pour laquelle elles ne sont pas soutenues par les politiques publiques sectorielles. Par exemple, la législation de l'Union européenne exclut les aliments issus de la serriculture des produits biologiques exempts de substances chimiques³¹.

Parmi les autres facteurs importants qui limitent l'adoption des technologies numériques figurent l'absence de politiques et de textes de loi sur le partage des données et les infrastructures associées (cité par GARBAL en Afrique de l'Ouest) et l'insuffisance des politiques publiques, des textes de loi et des mesures d'incitation en faveur de l'innovation (mentionnée par SOWIT en Afrique du Nord) et des partenariats public-privé (signalée par Egistic au Kazakhstan). Dans un cas (Atarraya au Mexique), en revanche, l'absence de réglementation est perçue comme un avantage, les personnes interrogées considérant que son introduction serait source d'inefficacité bureaucratique.

Dans d'autres contextes, la législation est citée comme un facteur favorable à l'adoption.

En République de Corée, par exemple, l'étude de cas sur ioCrops montre que les investissements publics réalisés dans les systèmes agricoles de pointe sous forme d'essais, de démonstrations et de renforcement des capacités facilitent la diffusion des technologies d'automatisation numérique dans l'agriculture. Au Népal, les politiques publiques en matière d'assurance favorisent l'extension des solutions numériques et d'automatisation (voir l'étude de cas sur Seed Innovations).

Par l'intermédiaire de l'investissement, des politiques publiques et de la législation, les gouvernements peuvent amplement contribuer à créer un environnement propice à l'innovation et à faire en sorte que les technologies soient disponibles et accessibles à tous et qu'elles participent à des objectifs socialement souhaitables tels que l'inclusion et la durabilité environnementale. Dans bien des contextes, les politiques, la législation et l'investissement public sont nécessaires pour venir à bout des obstacles sur lesquels les acteurs privés n'ont pas de prise. Ce point est abordé de façon plus approfondie au chapitre 5. ■

TRAJECTOIRES FUTURES DE L'AUTOMATISATION DE L'AGRICULTURE: QUELQUES CONSIDÉRATIONS SUR L'ADOPTION INCLUSIVE ET LA DURABILITÉ ENVIRONNEMENTALE

La présente section porte sur les trajectoires futures que les technologies d'automatisation de l'agriculture pourraient emprunter pour différents types de pays et d'exploitations, à la lumière des facteurs structurels qui peuvent influer sur la diffusion et l'adoption de ces technologies. Elle présente une analyse des possibilités qui permettraient de rendre l'agriculture mécanisée plus durable. Les avantages apportés par la mécanisation motorisée ont eu pour revers un certain nombre d'effets négatifs sur

l'environnement; ainsi, l'expansion des terres agricoles s'est-elle faite au détriment des forêts ou des pâturages de savane⁵⁰. Les auteurs se penchent également sur les possibilités d'automatisation de la petite agriculture et sur certaines des conséquences économiques et sociales des trajectoires futures de l'automatisation.

Possibilités de rendre l'agriculture hautement mécanisée plus durable

Dans les pays à revenu élevé, mais aussi dans de nombreuses exploitations agricoles commerciales de pays à faible revenu et de pays à revenu intermédiaire, l'agriculture est déjà hautement mécanisée, notamment en raison de la rareté ou de la saisonnalité de la main-d'œuvre. De grandes machines sont souvent employées pour réaliser des économies d'échelle. Des données indiquent cependant que cette pratique a contribué à l'érosion des sols, à la déforestation, à l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre (GES) et à l'appauvrissement de la biodiversité⁵¹. Dans de nombreux pays, les prestataires de services utilisent généralement des machines de grande taille et s'adressent essentiellement à des agriculteurs dont les terres ne comportent plus ni arbres ni souches^{40, 52}; or, la suppression des arbres présents sur les exploitations et la modification des modes de culture induite par la mécanisation peuvent contribuer à l'érosion des sols⁷. Qui plus est, l'érosion et la dégradation des sols dues à l'emploi de machines grandes et lourdes font baisser les rendements^{38, 53}. L'utilisation de grands tracteurs a bouleversé la physionomie des paysages ruraux, dans la mesure où les producteurs ont fréquemment agrandi et remodelé leurs parcelles, causant une diminution de la diversité agricole et de la biodiversité pour l'alimentation et l'agriculture^{50, 52}. La mécanisation motorisée est associée à une diminution de la diversité des cultures car elle encourage le passage à des cultures qui se prêtent davantage à la mécanisation, telles que le blé, le maïs et le riz⁴. Malheureusement, les agriculteurs ne sont pas enclins à adopter des pratiques favorables à la biodiversité telles que l'agriculture de conservation, les cultures intercalaires et la rotation des cultures, car elles requièrent une forte intensité de main-d'œuvre⁵⁴. Enfin, la mécanisation conduit souvent à une spécialisation accrue et à une moindre diversification des produits, qui peuvent affaiblir la résilience⁵⁵.

Pour remédier à ces problèmes, il serait possible d'adapter les innovations en matière de mécanisation motorisée à des machines plus petites et plus légères, pouvant réduire la compaction des sols et les impacts négatifs sur l'environnement. L'automatisation adaptée à l'échelle de production et aux conditions locales peut grandement atténuer ces effets. Les robots autonomes peuvent réduire l'utilisation de produits chimiques et d'énergie, ainsi que les émissions de GES pour ceux d'entre eux qui fonctionnent avec des sources d'énergie renouvelables⁵⁶. La recherche technique et agronomique appliquée peut aider à trouver les solutions de mécanisation les mieux adaptées aux conditions agroécologiques locales. Les États peuvent aussi adopter des politiques qui encouragent l'accès à des machines et à du matériel plus respectueux de l'environnement^{38, 40}.

L'agriculture de conservation peut réduire l'érosion des sols en remplaçant les charrues par des rippers ou des plantoirs pour semis direct. Couplées à la rotation des cultures et au maintien d'une couverture permanente des sols, ces pratiques qui entraînent une perturbation minimale des sols peuvent amoindrir l'érosion des sols de 99 pour cent⁵⁷. L'agriculture de conservation semble être une voie d'avenir pour l'agriculture, mais il est nécessaire de trouver des solutions adaptées à la situation locale pour éviter certaines difficultés⁵⁸. Dans ce contexte, le Centre pour la mécanisation agricole durable – une institution régionale relevant de la Commission économique et sociale pour l'Asie et le Pacifique – et des partenaires situés au Cambodge ont coorganisé, en mai 2019, une formation régionale sur la mécanisation adaptée à l'agriculture de conservation⁵⁹.

Le passage aux énergies renouvelables est important non seulement sur le plan environnemental, mais aussi d'un point de vue financier. Les études de cas sur TROTRO Tractor au Ghana et Tun Yat au Myanmar montrent que l'augmentation et l'instabilité des prix des carburants constituent des obstacles importants à l'adoption (voir l'annexe 1). De plus, les énergies renouvelables ouvrent de nouvelles possibilités en matière d'automatisation motorisée sur les différents segments de la chaîne de valeur et peuvent se révéler particulièrement avantageuses dans les zones rurales reculées⁶⁰. Néanmoins, les sources d'énergie renouvelables actuellement

disponibles ne permettent pas d'accomplir toutes les tâches agricoles de façon efficiente. L'électricité, par exemple, n'est pas adaptée aux opérations de préparation des terres qui demandent une grande quantité d'énergie. Des recherches sont nécessaires pour déterminer quelles solutions d'énergie renouvelable hors réseau sont les plus efficientes pour les différents types de machine tout au long de la chaîne de valeur⁵¹.

Le chapitre 2 a montré que les pénuries de main-d'œuvre, ainsi que la nécessité d'accroître l'efficience et la résilience face aux chocs et aux situations de stress de nature climatique, jouaient un rôle moteur dans l'introduction des technologies d'automatisation numérique et de la robotique associée à l'IA sur les exploitations agricoles hautement mécanisées. Les données indiquent que ces technologies peuvent être bénéfiques à l'environnement et utiles pour guider les innovations futures; néanmoins, le corpus de données étant limité et de nombreuses solutions n'ayant pas dépassé les premières étapes du développement et de la commercialisation (voir la figure 6, page 53), il n'est pas possible de tirer des conclusions générales sur leurs avantages potentiels. À mesure que ces technologies seront perfectionnées et qu'elles se diffuseront dans le monde, notamment dans le cadre d'une utilisation partagée ou de services de location, les petits agriculteurs pourraient les adopter à leur tour³¹.

Dans les pays à revenu élevé, les robots remplacent le travail manuel dans des tâches telles que l'irrigation, le dépistage des organismes nuisibles, la récolte et le désherbage, ou encore la sélection et la cueillette des fruits. Ainsi, dans une étude de cas (Harvest CROO Robotics), le prestataire de services a indiqué que 70 pour cent des producteurs de fraises aux États-Unis d'Amérique avaient déjà investi dans son projet de mise au point de robots cueilleurs (voir l'encadré 16). La robotique peut être bénéfique pour l'environnement si elle permet de réduire, voire de supprimer, l'utilisation des pesticides et des herbicides. Les robots autonomes utilisés pour la culture permettent d'économiser de la main-d'œuvre, d'effectuer les travaux plus rapidement, d'optimiser les quantités d'intrants appliquées et de réduire la compaction du sol, en particulier s'il s'agit de petits robots utilisés en essaim. Il ressort d'un tour d'horizon de 18 études que les robots autonomes utilisés pour

ENCADRÉ 16 DES ROBOTS CUEILLEURS POUR REMÉDIER AUX PÉNURIES DE MAIN-D'ŒUVRE DANS LA CULTURE DES FRAISES

Les machines de récolte automatisée cueillent, inspectent, nettoient et emballent les légumes cultivés de façon autonome. Harvest CROO Robotics a vu le jour aux États-Unis d'Amérique autour d'un projet de robot cueilleur, qui visait à remédier aux pénuries de main-d'œuvre touchant le secteur de la production de fraises. Chaque machine dispose de 16 robots indépendants, qui circulent dans les champs, inspectent la qualité et la maturité des fraises, avant de les cueillir, de les nettoyer et de les emballer. Par conséquent, cette technologie se substitue entièrement à la main-d'œuvre manuelle pour l'analyse, la prise de décision et l'exécution des tâches.

Harvest CROO Robotics propose l'une des rares solutions actuellement connues aux États-Unis d'Amérique

pour la cueillette de fraises. Elle a reçu des capitaux d'investissement provenant d'environ 70 pour cent des producteurs de fraises du pays – généralement des exploitations de grande taille – qui voient en elle une réponse à leurs problèmes de pénurie et de coûts de main-d'œuvre. L'entreprise a adopté un système à la demande, en vertu duquel les producteurs paient à proportion du volume récolté.

Une fois que la technologie aura changé d'échelle, l'objectif est de pouvoir commander toute une flotte de machines à distance, à partir d'un centre d'opérations; en plus de la cueillette, de l'inspection, du nettoyage et de l'emballage des fraises, il sera possible de recueillir des données qui seront ensuite diffusées auprès des cultivateurs.

SOURCE: Ceccarelli *et al.*, 2022³¹.

la récolte, l'ensemencement et le désherbage sont économiquement viables dans certaines circonstances^{61, 62, 63}. Les robots en essaim, en particulier, sont avantageux pour les exploitations qui cultivent des champs de petite taille et de forme irrégulière⁶⁴. Il convient que les décideurs et les producteurs acquièrent une vision plus claire de ces avantages pour que le développement des technologies correspondantes attire davantage d'investissements.

Possibilités d'automatisation de la petite agriculture peu ou non mécanisée

La petite agriculture comprend une grande diversité d'unités de production. Certaines ont adopté un modèle de commercialisation poussée et utilisent des technologies modernes, y compris la mécanisation motorisée, tandis que d'autres pratiquent une agriculture de subsistance avec des outils simples. Celles-ci sont en général lourdement tributaires de la main-d'œuvre familiale et ne mécanisent qu'une partie de leurs travaux agricoles, voire aucun. Pourtant, dans de nombreux contextes, elles pourraient tirer parti du développement des marchés de location de machines. Le marché de la location tend à être dominé par les grandes machines, qui se déplacent

d'une zone agroécologique à une autre, à l'intérieur des pays et par-delà les frontières nationales. Pour profiter de ces services, les producteurs ont été contraints d'adapter leurs exploitations et leurs systèmes de production compte tenu de l'accent mis sur la production agricole à grande échelle. C'est pourquoi il est urgent de trouver des solutions personnalisées, d'une part pour corriger les effets négatifs passés de la mécanisation, et d'autre part pour faciliter l'expansion de celle-ci et ainsi accroître la productivité de façon durable.

Les petites machines sont mieux adaptées à la petite agriculture

Des solutions technologiques telles que les petits tracteurs à deux ou quatre roues ont joué un rôle clé dans le développement de la mécanisation en Asie^{2, 19, 20}. Les tracteurs à deux roues sont sans doute plus rentables et mieux adaptés aux petites exploitations. Ils sont capables de contourner les souches d'arbre et les pierres et réduisent au minimum l'appauvrissement de la biodiversité, dans la mesure où il n'est pas nécessaire de défricher les terrains en profondeur avant de les utiliser. Ils sont aussi plus faciles à manier, à entretenir et à réparer, et plus adaptés au microcrédit^{22, 65}. Les mêmes arguments s'appliquent à un éventail plus large de machines agricoles motorisées qui ne requièrent pas

ENCADRÉ 17 INTÉRÊT ÉCONOMIQUE DE L'ADOPTION DE LA MÉCANISATION MOTORISÉE PAR LES FEMMES: ÉLÉMENTS RECUEILLIS AU NÉPAL

La mécanisation motorisée peut favoriser l'autonomisation des femmes et répondre à leurs besoins de trois manières: i) les femmes peuvent être clientes des prestataires de services de mécanisation, le recours à ces services rendant le travail agricole moins pénible et laissant davantage de temps pour se reposer ou se consacrer à d'autres activités sociales ou économiques; ii) elles peuvent être opératrices de machines et de matériel ou être employées dans une entreprise de location en mécanisation, auquel cas elles utilisent leurs compétences techniques pour percevoir un revenu; et iii) elles peuvent, en tant qu'entrepreneuses, gérer leur propre entreprise de services de location en mécanisation agricole et vendre des services de mécanisation à d'autres agriculteurs, dont elles tirent des recettes.

Un rapport récemment établi par la FAO donne des informations sur des machines et du matériel qui ont été expérimentés avec succès sur le marché et sont utilisés pour la production végétale et les travaux après récolte au Népal. L'objectif est d'encourager et de faciliter l'accès des femmes à la mécanisation agricole motorisée, qu'elles exercent en tant qu'opératrices de matériel ou chefes d'entreprise. Voici plusieurs exemples de machines motorisées qui ont été adoptées par des femmes:

► La **désherbeuse mécanique** se décline en plusieurs types et plusieurs tailles. Elle est utilisée pour le

désherbage et le travail du sol entre les rangs dans les cultures à large espacement telles que les légumes, le maïs et la canne à sucre. D'après le rapport, en comparaison du travail manuel, une seule machine est capable de désherber une surface extrêmement vaste. Des cultivatrices de maïs du district de Dang ont indiqué qu'elles pouvaient économiser 10 000 roupies népalaises (84 USD) par bigha (unité de surface équivalant à 0,66 hectare) en utilisant une grande désherbeuse mécanique au lieu de payer un désherbage manuel.

► La **batteuse mobile** est une batteuse à moteur utilisée pour le riz ou le blé en gerbes. Elle supprime la pénibilité du battage à la main, fait gagner du temps et augmente considérablement la quantité de graines battues (d'un facteur de 8 à 10 en comparaison du battage manuel). Compte tenu de son taux de battage élevé, elle convient aux prestataires de services individuels ainsi qu'aux centres de location personnalisée.

► L'**égreneuse de maïs** est utilisée pour séparer les grains de l'épi. Elle élimine la pénibilité de l'égrenage à la main et les douleurs occasionnées par ce travail, fait gagner du temps et égrène beaucoup plus de grains dans un temps donné (30 à 40 fois plus que l'égrenage manuel). De plus, le maïs égrené occupe moins de place que le maïs en épi, ce qui facilite le stockage.

SOURCE: Justice, Flores Rojas et Basnyat, 2022⁶⁶.

un remodelage ou un nettoyage en profondeur des parcelles et sont, par conséquent, plus favorables à la biodiversité. Ces machines peuvent également contribuer à l'égalité des genres (voir l'**encadré 17**, qui décrit comment, au Népal, des femmes ont utilisé de petites machines motorisées avec succès), entraînant de possibles économies de main-d'œuvre et de ressources et œuvrant à l'autonomisation des femmes.

Les technologies d'automatisation numérique présentent de nombreux avantages, mais leur utilisation dans la petite agriculture se heurte à de nombreuses difficultés

Le corpus croissant de recherches consacrées à l'agriculture de précision dans les pays à revenu faible et à revenu intermédiaire de la tranche

inférieure souligne la nécessité d'adapter le potentiel des technologies d'automatisation numérique à la petite agriculture^{67, 68, 69}. Pour encourager l'adoption de ces technologies, certains prestataires envisagent d'offrir des services de conseil gratuits aux petits producteurs, en fondant leur modèle d'activité sur les recettes potentielles qu'ils pourraient tirer de la vente des données recueillies auprès des agriculteurs³¹. Cette approche pourrait constituer un point de départ encourageant, sous réserve que les acteurs concernés respectent les normes relatives au partage de données et à la protection de la vie privée. On relève en outre, chez certains agriculteurs, une volonté de cultiver les mêmes plantes sur des parcelles adjacentes et de partager le coût des services de conseil sur les

UAS (notamment au Burkina Faso⁷⁰, au Ghana⁷¹ et au Rwanda⁷²).

Les technologies numériques ont également favorisé l'essor des services de conseil agricole aux petits agriculteurs³⁰. Dans les pays à faible revenu, les solutions numériques les plus fréquemment mises en œuvre sont les outils numériques non incorporés, dont le coût est bas, mais l'incertitude reste grande quant à leur impact sur la productivité et la durabilité environnementale. En outre, les données disponibles ne sont pas suffisantes pour concevoir des services de conseil adaptés aux besoins des petits producteurs. Par ailleurs, le faible niveau des compétences numériques crée des obstacles au changement d'échelle, et une importante fracture numérique pénalise les femmes et d'autres groupes vulnérables, qui ont moins accès à ces solutions. Un autre problème commence à se faire jour dans de nombreux pays: l'absence de législation sur la confidentialité et la protection des données, qui peut entraîner l'utilisation abusive de données par des tiers⁷³.

Des recherches sont actuellement menées sur l'utilisation de drones pour l'épandage d'intrants tels que les engrains et les produits chimiques sur les petites exploitations (y compris en Afrique)^{74, 75}; la phase de commercialisation a commencé, mais les solutions utilisées ont une capacité de prise de décision autonome très limitée et s'appuient principalement sur des cartes. L'application d'intrants par drone présente de multiples avantages: amélioration de la précision, réduction de l'exposition aux pesticides, possibilité de traiter des parcelles auxquelles les machines ne peuvent pas accéder (à cause d'une humidité excessive du sol ou de difficultés physiques d'accès), et absence de dommages aux cultures sur pied dus aux déplacements des machines. La rentabilité dépend du coût des équipements, de l'efficacité de l'application, des économies d'intrants que permet l'application localisée et des gains de rendement découlant du fait que les drones causent moins de dégâts que les machines au sol. La disponibilité et l'accessibilité financière des drones revêtent une importance clé pour les petits agriculteurs, qui possèdent rarement leur propre matériel. Ces technologies comportent leur lot de difficultés, liées notamment à la nécessité de réapprovisionner régulièrement les réservoirs de pulvérisation, les cellules d'engrais ou les trémies de semences, de

recharger les batteries, de concevoir des étiquettes de pesticides pour les applications localisées, de former les utilisateurs et de gérer la dérive des produits vers les zones non ciblées. Surmonter ces difficultés suppose de disposer de capacités techniques et institutionnelles suffisantes, ce qui, en soi, peut créer une difficulté supplémentaire dans de nombreux pays à faible revenu et pays à revenu intermédiaire⁷⁶.

L'un des obstacles à l'adoption des solutions d'automatisation numérique par les petits producteurs étant leur coût, il est particulièrement important de les rendre plus abordables en améliorant les technologies, en les adaptant à l'échelle de production et en mettant au point des modèles d'activité novateurs. L'exemple des ordinateurs et des smartphones illustre parfaitement ce point: lorsqu'ils ont commencé à être fabriqués en grande série, ces appareils sont devenus beaucoup plus abordables, ouvrant la voie à leur emploi plus généralisé dans l'agriculture de précision³¹. Dans certains contextes, la production agricole peut souffrir du manque d'eau; au Mali, un exemple de mise en œuvre réussie de serres automatisées (dans lesquelles l'application d'eau et de pesticides est commandée par ordinateur) montre que ces technologies peuvent améliorer l'efficience d'utilisation de l'eau et des intrants⁷⁷.

Élevage de précision

L'élevage de précision est surtout pratiqué dans les systèmes intensifs des pays à revenu élevé, où la santé, le statut reproducteur et le comportement des animaux sont surveillés à l'aide de capteurs. L'identification électronique et les chaînes de blocs facilitent la traçabilité des animaux commercialisés par les systèmes extensifs et sont de plus en plus couramment utilisées pour améliorer la qualité des produits²⁹. Cependant, ces technologies de pointe sont inabordables pour de nombreux éleveurs dans les pays à faible revenu, où une technologie plus fréquemment utilisée en élevage de précision est celle du clôturage virtuel, qui permet de maintenir les animaux à l'intérieur d'un périmètre déterminé au moyen d'alertes sonores, de chocs électriques ou d'autres dispositifs d'avertissement. Ces technologies allègent la pénibilité et les besoins en main-d'œuvre, facilitent la gestion de la reproduction, la collecte d'informations et la gestion intensive, et rendent les clôtures

pratiquement superflues. Pour leur part, les appareils GNSS aident les éleveurs à localiser les animaux qui pâturent sur de vastes étendues ouvertes et peuvent être reliés à des capteurs qui surveillent la température, les mouvements et d'autres indicateurs de la santé et du statut reproducteur des animaux. Néanmoins, surveiller chaque animal individuellement avec un appareil GNSS coûte actuellement trop cher pour les systèmes de pâturage extensifs. Comme pour les cultures, ces technologies ne deviendront accessibles aux systèmes d'élevage extensifs des pays à faible revenu qu'à la faveur d'un travail de reconception (permettant une production en série et une diminution des coûts) et de l'adoption de modèles d'activité novateurs⁷⁹. Les applications mobiles facilitant l'accès à des informations utiles pour la gestion de l'élevage sont très prometteuses en ce qui concerne l'élevage de précision⁷⁸.

Des observations éparses effectuées au Kenya indiquent que les éleveurs pastoraux sont de plus en plus nombreux à utiliser ces applications pour connaître l'état des herbages et savoir où trouver de la nourriture en quantité suffisante lorsqu'ils se déplacent avec leurs troupeaux⁷⁹. Les applications utilisant les données satellitaires facilitent le diagnostic et le signalement des maladies animales, ce qui permet aux éleveurs d'intervenir rapidement et de façon ciblée⁷⁸.

Accords de partage d'actifs à l'appui de la mécanisation

Les outils numériques recèlent également de nombreuses possibilités pour ce qui est d'améliorer le partage d'actifs dans le domaine de la mécanisation agricole parmi les petits producteurs. Par exemple, les traceurs GNSS et les logiciels de gestion de flotte – tels que ceux conçus dans le sillage des applications de transport privé avec chauffeur comme Uber – laissent espérer une réduction sensible des coûts de transaction des petits producteurs et des prestataires qui louent les services de machines, et peuvent faciliter la supervision des opérateurs de machines par les prestataires de services²⁹. TROTRO Tractor en Afrique et Tun Yat en Asie en sont l'illustration. Ces initiatives se heurtent néanmoins à plusieurs difficultés, telles que le mauvais état des routes et le faible niveau de connectivité, ainsi que le caractère saisonnier de la demande, qui atteint des pics à des moments précis. Les prestataires de services envisagent de

se tourner vers des innovations institutionnelles pour surmonter ces difficultés. Par exemple, le recours à des agents de réservation pour regrouper plusieurs petits agriculteurs permet de réduire les coûts de transaction associés à la desserte de chaque agriculteur et d'assurer la continuité de l'activité⁸⁰. Cette solution pourrait faciliter l'adoption progressive des systèmes GNSS de positionnement précis et des systèmes de commande de machine avancés; à cette perspective s'ajoute celle de voir l'agriculture de précision se développer encore davantage par le biais des TTV, y compris dans les pays à faible revenu et les pays à revenu intermédiaire. La principale contrainte associée à l'utilisation d'appareils GNSS sur de grandes machines est que les champs doivent être rectangulaires; or, dans de nombreuses petites exploitations agricoles, ce n'est pas le cas.

Robots à intelligence artificielle

Les robots qui ont été conçus pour les exploitations des pays à revenu élevé sont rarement adaptés aux pays à faible revenu et aux pays à revenu intermédiaire, où l'agriculture reste dominée par les petits producteurs, qui ont largement recours à la main-d'œuvre familiale et effectuent de nombreuses opérations manuellement.

Par exemple, les machines destinées à la récolte automatisée du coton dans les pays à revenu élevé sont très efficaces mais ne conviennent qu'aux parcelles où tous les plants de coton arrivent à maturité au même moment. Cela est dû au fait que ces machines peuvent abîmer les plants lors de la récolte. Cette solution ne convient donc pas aux exploitations traditionnelles d'Afrique de l'Ouest et d'Inde, qui cultivent un coton de grande qualité à floraisons échelonnées; dans ces pays, la campagne cotonnière s'étend sur environ 150 à 160 jours et voit se succéder trois ou quatre cueillettes³¹.

Le coût est un obstacle supplémentaire à l'adoption, en particulier pour les petits producteurs des pays à faible revenu et des pays à revenu intermédiaire, où l'on rencontre très peu d'exemples de solutions robotiques. La plupart d'entre elles concernent des cultures ou des systèmes de culture traditionnellement fondés sur le travail manuel et sont adaptées aux contextes et aux défis locaux, de sorte qu'elles ne nécessitent pratiquement aucune modification des structures agricoles actuelles. L'adoption de ces solutions peut aussi être motivée par des facteurs de nature socioéconomique, tels

ENCADRÉ 18 | ROBOTS DE CULTURE AUTONOMES À BAS COÛT: UN TABLEAU À GRANDS TRAITS

Un exemple de robot potentiellement réalisable et adapté aux besoins des petits producteurs serait un petit robot autonome à roues capable d'ensemencer, de désherber puis de récolter, qui coûterait à peu près le même prix qu'une moto (500-1 000 USD) – machine que les ménages agricoles des pays à faible revenu sont nombreux à posséder, et qui constitue donc une référence de prix pertinente. Des robots sur jambes pourraient également être utiles dans les champs car ils sont capables de contourner les obstacles, mais ils coûtent beaucoup plus cher. Grâce à leurs capacités d'apprentissage par intelligence artificielle, les robots de culture autonomes laissent augurer une forte augmentation de la production alimentaire, allant bien au-delà des niveaux actuellement atteignables. Néanmoins, produire des robots spécialisés pour chaque culture et pour des conditions agroécologiques précises est une activité à coût élevé et à faible volume. Dans ces conditions, un modèle d'activité plausible pourrait être le suivant: un fabricant produirait une machine générique autonome, assortie d'une panoplie d'outils adaptés à différentes tâches, dont certains seraient fabriqués localement. La machine autonome serait équipée d'un appareil utilisant le système mondial de navigation par satellite (GNSS) de manière à pouvoir créer des cartes (couleur du sol, résistance du sol sur la base de la force requise pour le binage ou encore rendement, par exemple). Elle pourrait être alimentée par diverses sources d'énergie (carburant, énergie solaire ou méthane, par exemple).

SOURCE: Lowenberg-DeBoer, 2022²⁹.

Pour rendre ces machines autonomes plus abordables, en particulier dans les premiers temps, une solution consisterait à les proposer à la location ou à facturer des prestations de services de travail agricole.

Cette machine agricole générique autonome pourrait ouvrir la voie à de nombreux autres types d'automatisation numérique. Par exemple, équipée d'un capteur, la machine autonome pourrait déterminer les besoins en engrangé⁸⁴, exploiter les cartes des sols, des végétaux et des rendements précédemment enregistrées, détecter les organismes nuisibles, les maladies et les plantes adventices et, par suite, appliquer les insecticides, fongicides ou herbicides éventuellement nécessaires.

Les petits producteurs éprouveront des difficultés pour accéder à l'automatisation numérique, mais d'un autre côté, ces millions d'exploitants représentent un débouché commercial et un nouveau marché prometteur. Des processus similaires de recherche, de développement technologique et d'entrepreneuriat ont été menés en Afrique et en Asie du Sud dans le domaine du stockage hermétique des céréales⁸⁵. Avant l'apparition du sac de stockage amélioré de céréales Purdue (PICS), les fabricants étaient peu enclins à investir dans des solutions innovantes de stockage de céréales destinées aux petits agriculteurs, dont le pouvoir d'achat était jugé trop faible. Mais depuis lors, le succès du sac PICS, qui s'est vendu par millions dans plus de 30 pays, a ouvert la voie à un grand nombre d'imitateurs et de concurrents.

que le manque de main-d'œuvre saisonnière. Enfin, des facteurs comme l'amélioration de l'accès à l'éducation, l'exode rural, la stigmatisation sociale et les politiques publiques d'aide aux personnes sans emploi peuvent amoindrir l'intérêt du travail manuel faiblement rémunéré^{73, 81, 82, 83}.

D'après les études publiées à ce jour, les robots autonomes spécialement conçus pour les conditions qui prévalent dans les pays à faible revenu et les pays à revenu intermédiaire apportent les avantages potentiels suivants: i) diminution des besoins en main-d'œuvre; ii) réduction des coûts et économies réalisables à moindre échelle, qui ont pour corollaire que ces technologies sont accessibles aux petites exploitations travaillant en mécanisation traditionnelle; et iii) possibilité

d'utiliser ces technologies de façon économique sur des champs de forme irrégulière, ce qui évite de devoir reconfigurer les paysages ruraux en vastes champs rectangulaires, sur lesquels la mécanisation traditionnelle donne les meilleurs résultats. Malheureusement, pour ces pays, il n'existe pas d'analyses de faisabilité qui permettraient de justifier l'intérêt économique des investissements dans ces technologies²⁹. Cela tient en partie au fait que les entités qui mettent au point ces solutions n'ont pas la capacité d'attirer ni de retenir un personnel qualifié capable de mener de telles analyses; il s'agit généralement de petites entreprises qui sont en concurrence avec de grosses sociétés³¹. L'**encadré 18** présente les possibilités et les défis associés à l'élaboration de robots destinés aux petits producteurs.

Conséquences plus générales des technologies d'automatisation numérique pour l'agriculture

Bien souvent, les technologies agricoles ont des conséquences économiques, sociales et environnementales qui vont bien au-delà des avantages et des coûts au niveau de chaque exploitation. Ainsi la mécanisation motorisée de l'agriculture a-t-elle fréquemment eu pour corollaire une augmentation de la taille des exploitations, un remodelage des champs et un déclin des populations rurales. Les technologies d'automatisation numérique présentent un potentiel considérable s'agissant de remédier aux problèmes environnementaux liés à l'agriculture fortement mécanisée, évoqués ci-dessus. Si elles sont judicieusement conçues, elles peuvent également apporter de multiples avantages à la petite agriculture, en particulier si elles se conjuguent à l'emploi de machines motorisées adaptées. À l'avenir, si elles sont bien développées et adoptées à grande échelle, les technologies d'automatisation numérique examinées dans ce chapitre, y compris les robots et l'intelligence artificielle, pourraient amener des avantages plus généraux, dont voici quelques exemples:

- ▶ **Structure des exploitations:** les petits robots en essaim permettent de réaliser des économies à moindre échelle et suppriment les incitations à étendre la taille des exploitations, évitant ainsi les perturbations sociales et environnementales. En rendant le travail moins pénible, en améliorant la rentabilité et en rehaussant l'image de l'agriculture en tant que secteur de pointe, les robots en essaim peuvent aider les communautés rurales à retenir leurs jeunes et à attirer des travailleurs d'autres secteurs (la question de la jeunesse sera abordée plus en détail au chapitre 4). La mécanisation motorisée de l'agriculture a conduit à l'abandon des petits champs de forme irrégulière; les robots en essaim peuvent permettre de récupérer certaines de ces parcelles délaissées, souvent caractérisées par des sols de bonne qualité, des précipitations fiables et une proximité avec les marchés, afin d'y pratiquer une agriculture commerciale. De plus, à mesure que les robots en essaim amélioreront la rentabilité de ces champs, les programmes de subventions aux petites exploitations pourraient devenir

moins coûteux. Enfin, les exploitations de petite ou grande taille qui utilisent encore la traction animale pourraient sauter l'étape de la mécanisation motorisée et passer directement à l'automatisation numérique, ce qui éviterait de devoir remodeler les paysages ruraux et contribuerait ainsi à plus de biodiversité.

- ▶ **Structure du marché des machines agricoles:** le fait de rendre diverses technologies d'automatisation numérique accessibles à la petite et moyenne agriculture (qui recouvre la culture, l'élevage et l'aquaculture) pourrait s'accompagner de changements dans la structure du marché des machines. De nouveaux débouchés pourraient apparaître pour les entrepreneurs qui ont la capacité technique de mettre au point des machines et du matériel abordables, fiables et autonomes et de lier ces technologies à des modèles d'activité novateurs.
- ▶ **La protection des cultures en tant qu'activité de service:** la protection des cultures repose actuellement en majeure partie sur la vente de grandes quantités de pesticides. Les pulvérisations ciblées réduisent la quantité de produits utilisée dans des proportions pouvant atteindre 90 pour cent, ce qui représente un avantage considérable pour l'environnement, tandis que le désherbage mécanique ou au laser offre un moyen de se passer entièrement des herbicides²⁹. Ces technologies pourraient renforcer le rôle des entrepreneurs locaux qui proposent des machines autonomes standardisées capables de détecter les plantes adventices et les organismes nuisibles. Ces machines pourraient être mises à la disposition des agriculteurs sur la base de prestations de services facturées ou leur être vendues directement.
- ▶ **Un élevage et une aquaculture plus sûrs, plus efficaces et plus résilients:** l'automatisation numérique peut grandement faciliter le travail à distance et contribuer à réduire la charge de travail, tout en améliorant la gestion³⁰. Les travaux de recherche se multiplient sur les possibilités d'appliquer les technologies numériques à l'aquaculture et de faire évoluer en profondeur les modèles d'activité y afférents et la structure des exploitations du secteur³¹. Les technologies de l'internet des

objets, par exemple, sont capables de contrôler automatiquement l'état de l'eau, permettant aux pisciculteurs d'intervenir immédiatement si c'est nécessaire⁸⁸. Dans l'élevage, la généralisation des capteurs biométriques, qui surveillent en temps réel la santé et le comportement de chaque animal, permet aux producteurs d'obtenir des informations en temps réel et, grâce à elles, de mener des interventions ciblées qui peuvent présenter de nombreux avantages, dont une utilisation réduite des antibiotiques. Les capteurs peuvent aussi être associés à la technologie des chaînes de blocs, qui peut permettre d'assurer la traçabilité des produits d'origine animale de la ferme à l'assiette et offre des avantages considérables lorsqu'elle est appliquée à la surveillance épidémiologique, prévenant les pertes économiques et les pandémies d'origine alimentaire associées aux maladies animales⁸⁹.

D'autres retombées se manifesteront à mesure que les technologies évolueront et deviendront plus accessibles. Les conséquences exactes dépendront néanmoins de nombreux facteurs, parmi lesquels les caractéristiques de la technologie, la connectivité, les cadres juridiques et réglementaires, les décisions commerciales des sociétés et des jeunes entreprises, les réactions des médias sociaux et les attitudes culturelles à l'égard de l'automatisation numérique dans l'agriculture. Les pouvoirs publics peuvent encourager la diffusion des technologies et aider à l'obtention de résultats positifs au moyen de différents leviers – infrastructures numériques, adoption d'approches juridiques et réglementaires adéquates, recherche et éducation (voir le chapitre 5). ■

CONCLUSION

Ce chapitre a présenté les éléments factuels justifiant l'intérêt économique de diverses technologies d'automatisation. L'intérêt économique de la mécanisation agricole motorisée est solidement établi, compte tenu des avantages que représentent, entre autres, la réalisation d'économies de coûts substantielles, liées à la diminution des besoins en main-d'œuvre, l'assurance d'effectuer les travaux agricoles rapidement, la réduction de la pénibilité du travail,

l'expansion et l'intensification de la production agricole, et le renforcement de la résilience face aux chocs climatiques et sanitaires. La mécanisation a en outre permis de libérer la main-d'œuvre familiale de certaines tâches agricoles, offrant aux membres du ménage la possibilité de se consacrer à un travail non agricole susceptible d'améliorer leurs moyens de subsistance.

Au cours de la prochaine décennie, la mécanisation devrait continuer de jouer un rôle important dans la transformation agricole des pays où son adoption a été lente – en particulier en Afrique subsaharienne –, mais il faudra l'adapter aux besoins locaux au moyen de stratégies fondées sur une évaluation scrupuleuse de la demande. Différents types et différentes tailles de machines, adaptés à diverses caractéristiques topographiques et agroclimatiques, peuvent répondre aux besoins des petits producteurs. Les solutions technologiques telles que les petits tracteurs à quatre ou deux roues – et, plus généralement, l'ensemble des petites machines agricoles, plus favorables à l'agrobiodiversité pour l'alimentation et l'agriculture – ont un rôle à jouer dans les contextes où l'adoption est encore faible.

Malgré son potentiel, la mécanisation tarde à s'imposer dans de nombreuses régions du monde à cause de facteurs structurels tels que la précarité des infrastructures, le manque de compétences techniques et l'absence d'un environnement commercial favorable. Un grand nombre de régions et de groupes socioéconomiques n'ont toujours pas accès à la mécanisation en raison de contraintes financières ou de facteurs structurels limitants, par exemple des politiques restrictives ou des infrastructures insuffisantes. L'appui des politiques publiques aux biens publics ou collectifs doit être renforcé par un appui aux services d'intérêt général. Cela suppose d'encourager les activités de recherche-développement dans le domaine de l'agriculture ainsi que les services de transfert de connaissances (formation et assistance technique, notamment), et de soutenir le développement et l'entretien des infrastructures (amélioration des routes rurales, des systèmes d'irrigation et des infrastructures de stockage, par exemple). Ces deux points d'ancre de l'appui aux services d'intérêt général peuvent favoriser l'émergence d'un environnement propice à l'automatisation sans fausser les incitations de marché, et sont souvent

nécessaires pour rendre l'automatisation viable, particulièrement dans les pays à revenu faible et les pays à revenu intermédiaire⁹⁰.

Pour leur part, les technologies d'automatisation numérique – en particulier les robots de culture et l'automatisation numérique dans l'aquaculture – en sont encore aux premières étapes de l'élaboration et de la commercialisation, et leur impact économique sur les producteurs agricoles reste incertain. L'élevage de précision a atteint une plus grande maturité mais demeure concentré dans les pays à revenu élevé. D'autres technologies telles que les solutions numériques non incorporées, les UAS actifs et la télédétection, les solutions de mécanisation avec GNSS et TTV et les solutions destinées à la serriculture sont en train de changer d'échelle. Néanmoins, les 27 études de cas examinées dans le présent chapitre, qui couvrent un large éventail de régions du monde, indiquent que ces technologies ne se sont pour l'instant révélées rentables que dans les pays à revenu élevé, et seulement pour les grands producteurs. Il faudra à l'évidence recueillir des données supplémentaires sur les avantages et les coûts des technologies pour savoir lesquelles peuvent être adaptées à d'autres contextes.

Comme dans le cas de la mécanisation, divers facteurs structurels tels que le manque de connectivité, d'électricité et de compétences numériques et la méconnaissance du potentiel des technologies ont une incidence sur l'intérêt économique des technologies d'automatisation numérique. Les données issues des études publiées et des études de cas laissent penser que les jeunes agriculteurs ont un rôle clé à jouer dans la conversion des exploitations agricoles familiales aux technologies numériques et à l'automatisation

de pointe. Les autres facteurs importants qui peuvent favoriser l'adoption sont l'intensification de la concurrence venant des marchés internationaux, le manque de main-d'œuvre et la perspective d'une pénibilité réduite et de meilleures conditions de travail. Dans quelques cas, les plateformes numériques donnant accès aux services de mécanisation peuvent aussi aider les femmes à surmonter le biais social qui s'exerce à leur encontre et à accéder plus facilement aux services (voir le chapitre 4).

Par ailleurs, les outils numériques modifient le paysage de la mécanisation en favorisant l'expansion des marchés de location de machines, grâce à une forte réduction des coûts de transaction. Ajoutons que certaines technologies d'automatisation numérique peuvent aider à corriger une partie des effets environnementaux délétères de la mécanisation passée. Pour remédier à ces problèmes, il est nécessaire d'adapter les innovations en matière de mécanisation motorisée à des machines plus petites et plus légères, pouvant réduire la compaction des sols et les impacts négatifs sur l'environnement. La recherche technique et agronomique appliquée peut aider à déterminer quelles solutions de mécanisation sont les mieux adaptées aux conditions agroécologiques locales.

Dans ce chapitre, les auteurs ont également évoqué le rôle que peuvent jouer les politiques publiques, la législation, l'investissement et l'innovation dans l'aplanissement des obstacles structurels à l'adoption et dans l'adaptation des interventions aux petits producteurs et aux enjeux environnementaux. Les chapitres 4 et 5 aborderont de façon plus approfondie les questions de l'impact social de l'automatisation et du rôle des politiques publiques, respectivement. ■

**KENYA**

Un agriculteur pratiquant l'agriculture de conservation dans le comté de Makueni, à Kathonzweni.
©FAO/Luis Tato

CHAPITRE 4

INCIDENCES SOCIOÉCONOMIQUES ET POSSIBILITÉS ASSOCIÉES À L'AUTOMATISATION DE L'AGRICULTURE

MESSAGES CLÉS

- ➔ Le processus d'automatisation de l'agriculture peut améliorer la productivité et créer de nouveaux emplois, dans l'agriculture et, plus généralement, dans les systèmes agroalimentaires, offrant ainsi des débouchés aux jeunes travailleurs, aux femmes et aux groupes marginalisés tels que les personnes handicapées.
- ➔ Pour bien comprendre toutes les conséquences sociales de l'automatisation de l'agriculture, il nous faut aller au-delà de la production primaire et examiner les incidences sur les systèmes agroalimentaires dans leur globalité.
- ➔ Lorsque les salaires augmentent et que la main-d'œuvre est rare, l'automatisation peut être bénéfique à la fois aux producteurs et à la main-d'œuvre salariée. Elle peut en particulier aider les petits agriculteurs à surmonter les pénuries de main-d'œuvre et leur laisser du temps pour se consacrer à des activités non agricoles de nature à améliorer leur bien-être.
- ➔ D'un autre côté, lorsque la main-d'œuvre est abondante et que des subventions viennent alléger le coût de l'adoption de l'automatisation, celle-ci peut être source de suppressions d'emplois et de chômage, touchant en particulier les travailleurs pauvres et peu qualifiés.

➔ L'automatisation inclusive impose de mettre en œuvre une approche ascendante qui donne la priorité au renforcement des compétences et des capacités et fasse participer les femmes, les jeunes et l'ensemble des parties concernées à la conception des activités de développement des technologies pour tenir compte de leurs préoccupations, de leurs besoins et de leurs connaissances.

➔ Les autorités publiques doivent se garder de recourir à des subventions créatrices de distorsions, qui risquent d'aggraver le chômage, ainsi que de restreindre l'automatisation au motif de préserver les emplois et les revenus, car cela rendrait l'agriculture moins compétitive et moins productive. Elles doivent au contraire s'attacher à mettre en place un environnement favorable qui permette la pleine participation des femmes, des jeunes, des petits producteurs et des autres groupes vulnérables et marginalisés, de sorte que tous profitent de l'automatisation.

➔ Il sera nécessaire, en parallèle, de s'attaquer aux causes profondes de la pauvreté, de la vulnérabilité et de la marginalisation pour s'assurer que l'automatisation n'aggrave pas l'exclusion des groupes les plus vulnérables et les plus marginalisés.

Aux chapitres 2 et 3 ont été examinés les évolutions et les déterminants de la mécanisation motorisée et des technologies d'automatisation numérique, ainsi que leurs incidences (potentielles) sur la productivité, l'efficience, la résilience et la durabilité environnementale. Dans ce chapitre, les auteurs se penchent sur les conséquences de l'automatisation de l'agriculture en ce qui concerne l'inclusion, cherchant en particulier à déterminer à qui elle profite et à qui elle nuit. Ils commencent par passer en revue les caractéristiques des systèmes agroalimentaires et les effets possibles de l'automatisation sur la main-d'œuvre employée dans ce secteur. Ils examinent ensuite les effets de l'automatisation de l'agriculture sur l'emploi décent et sur les différents groupes socioéconomiques et démographiques concernés par ce processus – petits et grands producteurs, travailleurs agricoles sans terre et agriculteurs indépendants, femmes et jeunes. Ils font ici valoir que les pays, en fonction de leur niveau de transformation agricole et structurelle, ne recevront pas ces effets de la même manière, et donc que l'automatisation présentera pour eux des défis différents sur le plan des politiques. ■

ANALYSE DES INCIDENCES SOCIALES DE L'AUTOMATISATION SELON L'APPROCHE DES SYSTÈMES AGROALIMENTAIRES

La production agricole connaît des transformations rapides. L'adoption de technologies permettant d'économiser de la main-d'œuvre – allant des tracteurs, batteuses et moissonneuses dans les pays à faible revenu et les pays à revenu intermédiaire aux solutions de haute technologie fondées sur l'intelligence artificielle (IA), rencontrées principalement dans les pays à revenu élevé – intervient dans le contexte d'un processus continu de transformation agricole et d'évolution des systèmes agroalimentaires.

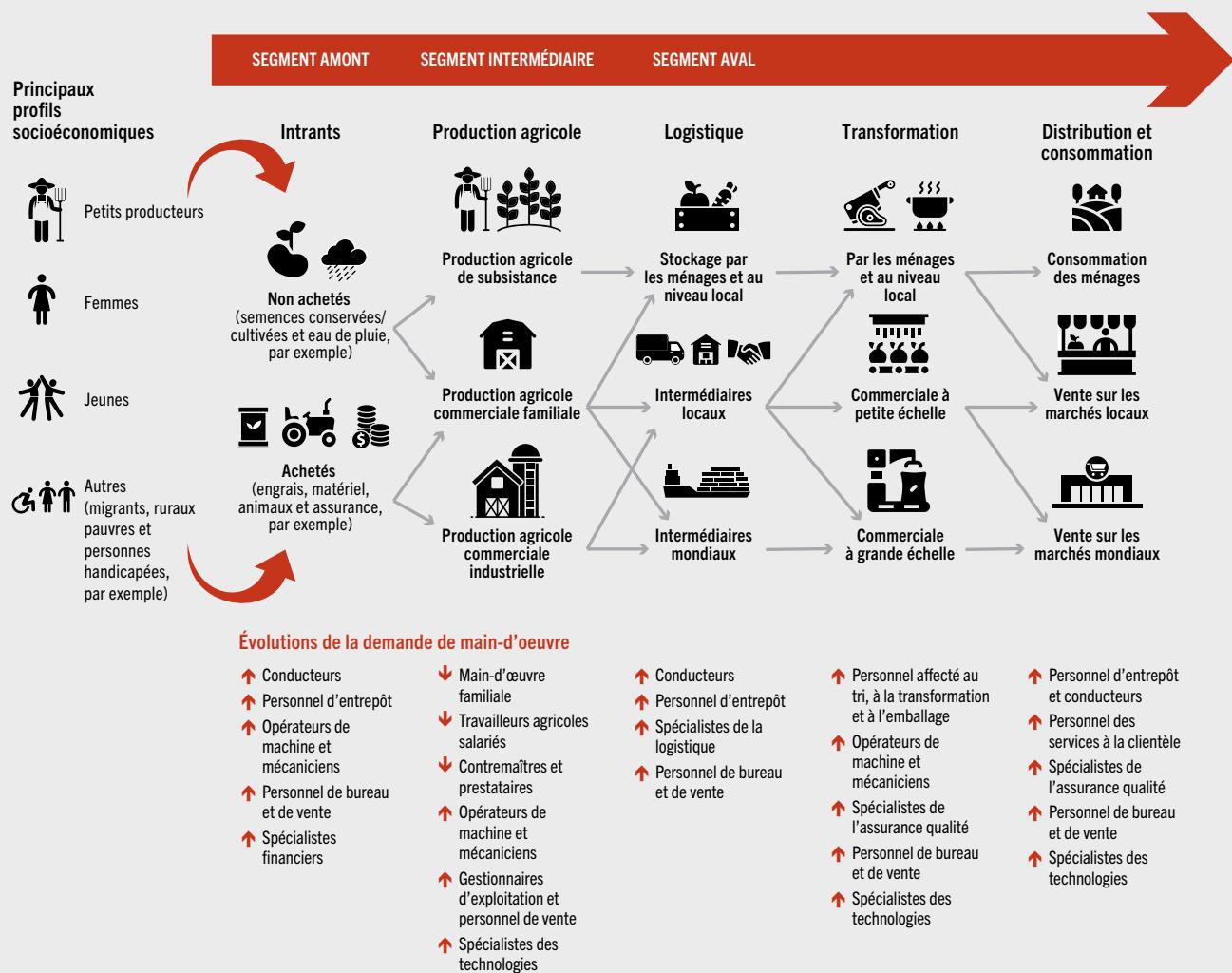
Comprendre la dynamique des systèmes agroalimentaires est essentiel pour pouvoir analyser et prévoir les effets de l'automatisation

à chacun des points clés des systèmes, en tenant compte des compromis éventuellement nécessaires et des conséquences imprévues. Les réactions des secteurs situés en amont et en aval sont également importantes pour comprendre les conséquences de l'automatisation sur la production agricole, les prix, les flux commerciaux et l'emploi décent. Celles-ci dépendent aussi de la nature de la chaîne de valeur agroalimentaire, pour reprendre la typologie de l'édition 2021¹ de la présente publication: i) chaînes de valeur traditionnelles, principalement liées à la petite agriculture de subsistance; ii) chaînes de valeur en transition, souvent liées à la petite et moyenne agriculture familiale à vocation commerciale; ou iii) chaînes de valeur modernes, dans lesquelles l'agriculture commerciale industrielle à grande échelle joue un rôle majeur. Ces types de chaîne de valeur diffèrent à de nombreux égards, notamment par leurs besoins en main-d'œuvre. Il est essentiel de bien saisir les liens bidirectionnels qui existent tout au long des chaînes de valeur agroalimentaires pour comprendre l'impact des technologies d'automatisation, notamment en déterminant comment les besoins en main-d'œuvre évoluent au sein des différents segments des systèmes agroalimentaires et les possibilités qu'ont les travailleurs de passer d'un segment à un autre. Les effets sont aussi fonction, entre autres, de la répartition des rôles entre les femmes et les hommes, des catégories de travailleurs considérées (migrants ou locaux, saisonniers ou non-saisonniers, par exemple) et des profils de compétence des travailleurs.

Dérypter les systèmes agroalimentaires

La figure 7 présente un cadre conceptuel permettant d'analyser l'impact de l'automatisation sur l'emploi dans les différents segments des systèmes agroalimentaires. Elle illustre certaines des principales caractéristiques des trois grands types de chaîne de valeur mentionnés ci-dessus, en distinguant les marchés amont, intermédiaire et aval, et en recensant les principales activités menées sur chacun de ces marchés. Elle indique également les liens qui existent entre les différents marchés et met en évidence les différences entre les principales activités de marché pour trois catégories distinctes de producteurs agricoles – exploitants pratiquant une agriculture de subsistance, exploitations commerciales familiales

FIGURE 7 ANALYSE DES EFFETS DE L'AUTOMATISATION SUR L'EMPLOI SELON L'APPROCHE FONDÉE SUR LES SYSTÈMES AGROALIMENTAIRES



SOURCE: Figure élaborée par la FAO d'après Charlton, Hill et Taylor, 2022³.

et exploitations commerciales industrielles. Plusieurs groupes socioéconomiques et démographiques (partie gauche de la figure) sont considérés comme des acteurs clés des systèmes agroalimentaires; ils comprennent les petits producteurs, les femmes, les jeunes et d'autres groupes marginalisés (personnes handicapées et migrants, par exemple) – quoique ces derniers soient fréquemment la catégorie la plus exclue, la plus marginalisée et la plus vulnérable.

Le processus d'automatisation de l'agriculture ouvre la voie à l'adoption d'une approche inclusive, permettant à l'ensemble des individus – en particulier les personnes vulnérables, exclues et marginalisées – de prendre part aux processus de développement et d'en tirer profit grâce à l'amélioration des chances, à l'accès aux ressources productives et naturelles, à l'autonomisation, à la capacité d'agir et au respect des droits. L'inclusion est à la fois un moyen de faire mieux

et plus de façon équitable, et une fin en soi garantissant que personne ne soit laissé de côté².

Au bas de la [figure 7](#) se trouve une liste des principales catégories de travailleurs opérant sur chaque marché, accompagnées de flèches indiquant comment les technologies d'automatisation pourraient influencer (à la hausse ou à la baisse) la demande pour chaque catégorie – même s'il faut garder à l'esprit que les effets réels dépendront du contexte et nécessitent d'être vérifiés de façon empirique. Les technologies d'automatisation réduisent la demande de main-d'œuvre pour les tâches qui sont automatisées mais, simultanément, elles créent de nouvelles tâches qui entraînent de nouveaux besoins en main-d'œuvre, par exemple pour l'entretien et l'exploitation des machines. La [figure 7](#) offre un point de référence pour l'exposé à suivre sur les conséquences de l'automatisation de l'agriculture du point de vue de l'inclusion. Cette section présente des informations générales sur les liens de marché qui, au sein des systèmes agroalimentaires, sont essentiels pour diffuser l'impact de l'automatisation sur l'emploi dans les différentes composantes de ces systèmes.

Types de production agricole

La production agricole (segment intermédiaire) occupe une place centrale et se compose des trois catégories précédemment décrites (voir la [figure 7](#)). Dans l'agriculture de subsistance, la production s'inscrit dans la stratégie de subsistance des ménages; les achats d'intrants sont réduits et le ménage consomme la majeure partie de ce qu'il produit⁴. La production de subsistance est courante dans les pays à faible revenu, mais correspond aussi au mode de production des petites exploitations familiales en milieu rural dans les pays à revenu élevé⁵. Si l'agriculture de subsistance désigne la production de denrées alimentaires destinées à la consommation propre du ménage, elle n'implique pas que le ménage produit la totalité des aliments qu'il consomme; en fait, les ménages qui pratiquent l'agriculture de subsistance sont souvent lourdement tributaires des achats d'aliments^{6,7,8}.

Dans l'agriculture commerciale familiale, les activités de production représentent une composante importante de la stratégie de création de revenus du ménage; la plupart des intrants sont achetés, et les produits agricoles sont vendus

sur les marchés locaux, nationaux et mondiaux. L'agriculture commerciale familiale englobe les petits producteurs des pays à faible revenu et des pays à revenu élevé, ainsi que les exploitations de taille moyenne à relativement grande détenue et gérées par des ménages dans des pays à revenu élevé.

Enfin, l'agriculture commerciale industrielle regroupe des entreprises qui opèrent à grande échelle. Elle est plus répandue dans les pays à revenu élevé, mais peut aussi être rencontrée dans des pays à faible revenu, sous la forme de plantations et de grands domaines agricoles⁹.

Les activités exercées à ce point clé du système agroalimentaire sont toutes directement associées à la culture, l'élevage, la pêche et l'aquaculture, ainsi qu'aux forêts et à l'agroforesterie. Les tâches menées dans ce contexte comprennent l'entretien et la préparation des sols, la plantation, le désherbage et les soins aux plantes, l'élagage et la récolte, ainsi que la reproduction, l'élevage, les soins quotidiens et la surveillance sanitaire des animaux. À ce stade, l'automatisation de certaines tâches agricoles peut entraîner une hausse de la production, avec des répercussions sur les activités en aval – transport, emballage, stockage, transformation et distribution. Ces activités en aval entraîneront un surcroît de demande pour la plupart des catégories de travailleurs, en raison de l'augmentation du volume de production à gérer.

Activités en amont et en aval

Les activités en amont comprennent toutes les activités associées à la fourniture d'intrants pour la production agricole. Elles englobent, en gros, la production et la distribution des semences, des engrains, des machines, des aliments pour animaux et du matériel d'irrigation, ainsi que la fourniture de services d'assurance, d'assistance technique et de financement. L'agriculture de subsistance repose essentiellement sur l'utilisation d'intrants non achetés (semences récupérées, notamment), d'aliments pour animaux issus des plantes cultivées, ainsi que de l'eau de pluie (par opposition à l'irrigation)¹⁰. En fonction de leur taille, de leur lieu d'implantation et d'autres caractéristiques, les exploitations commerciales familiales utilisent des intrants achetés ou non achetés, voire les deux. Dans cette représentation des systèmes agroalimentaires (voir la [figure 7](#),

page 71), les innovations technologiques agricoles concernent le plus souvent les intrants et reposent sur la mise au point de semences, d'aliments pour animaux, d'engrais ainsi que de matériel et de machines améliorés (ou moins coûteux), ce qui englobe les technologies d'automatisation. Une fois adoptées, ces technologies modifient la façon dont les intrants sont utilisés dans la production agricole (segment intermédiaire).

Les activités en aval comprennent les activités après récolte/abattage/capture, telles que le stockage, le transport, la transformation, l'emballage, la vente en gros et au détail et, enfin, la consommation par les ménages et les services alimentaires. Dans l'agriculture de subsistance, ces activités sont menées à l'échelon du ménage ou du village^{11, 12}. Dans l'agriculture commerciale familiale, les opérations logistiques peuvent être conduites à l'échelon du ménage ou du village, mais avec l'aide d'intermédiaires locaux ou mondiaux. Pour leur part, les producteurs agricoles industriels s'approvisionnent auprès de différents sites et stockent la marchandise dans de vastes entrepôts conçus à cet effet. Le transport des produits peut être maritime, aérien, ferroviaire ou routier. La distribution désigne la vente de produits agricoles en vrac aux transformateurs ou aux grossistes. En règle générale, les technologies d'automatisation entraînent une hausse de la production agricole sur le segment intermédiaire, qui peut à son tour favoriser l'expansion, la croissance et la poursuite des innovations technologiques en aval. L'introduction de la récolteuse de tomates motorisée, par exemple, a eu pour effet une augmentation de la quantité de tomates à transformer, ce qui a favorisé l'innovation dans le secteur de la transformation¹³. Inversement, les innovations qui voient le jour en aval peuvent influencer la demande de produits sur les marchés amont et intermédiaire et, par voie de conséquence, encourager l'adoption de technologies par les producteurs agricoles. À titre d'exemple, la baisse des coûts de transformation des tomates en boîte peut provoquer une augmentation de la demande de ce produit, incitant les cultivateurs de tomates à adopter des technologies adéquates (variétés améliorées, matériel d'irrigation et récolteuses, par exemple) pour accroître leur production et répondre à cette hausse de la demande.

Les grossistes et les détaillants, parmi lesquels figurent des microentreprises informelles, et la consommation à l'échelon des ménages et des services alimentaires constituent le dernier point clé des systèmes agroalimentaires.

Le passage à l'automatisation dans la vente en gros et au détail, la restauration et les services alimentaires a réduit les besoins en main-d'œuvre¹⁴ et augmenté la productivité et les ventes¹⁵. L'avancée technologique la plus notable dans le secteur mondial de la distribution est l'essor du commerce en ligne¹⁶, qui aiguise l'innovation technologique en amont, en particulier les innovations concernant la durabilité (production d'emballages plus durables, par exemple¹⁷) et, dans les pays à faible revenu, l'amélioration des infrastructures de transport, de la logistique et des services en ligne^{18, 19, 20}. En Inde, l'explosion des plateformes de commerce en ligne a permis aux agriculteurs d'écouler leurs produits sur des marchés plus vastes et à des prix plus élevés²¹. Dans le cas de la Chine, diverses études de cas montrent que le commerce en ligne rural a créé des possibilités de diversification et ouvert de nouveaux marchés pour les populations et communautés rurales de plusieurs régions du pays, y compris pour des groupes vulnérables comme les femmes et les jeunes²². ■

EFFETS DE L'AUTOMATISATION DE L'AGRICULTURE SUR LA MAIN-D'ŒUVRE

L'automatisation peut influer sur la production agricole et l'emploi décent de diverses manières. Dans la production végétale, elle permet d'étendre la surface de terres cultivées ou d'améliorer le rendement à l'hectare, entraînant dans les deux cas une hausse de la production. Dans l'élevage, elle peut améliorer la productivité de la main-d'œuvre et rendre le travail considérablement moins pénible, en permettant aux travailleurs de traire ou nourrir les animaux avec un minimum d'interventions manuelles. Le même raisonnement s'applique à la pêche, à l'aquaculture et aux forêts (voir le chapitre 2). Dans le cas des forêts, l'amélioration de la sécurité des travailleurs est un avantage supplémentaire important qui encourage

ENCADRÉ 19 ANALYSE DE L'AUTOMATISATION DE L'AGRICULTURE SOUS L'ANGLE DE L'EMPLOI DÉCENT

L'emploi rural décent désigne tout emploi, métier, travail, activité commerciale ou service effectué contre rémunération ou bénéfice par des femmes, des hommes, des adultes et des jeunes dans des zones rurales et qui²³: i) respecte les normes fondamentales du travail telles qu'elles sont définies dans les conventions de l'Organisation internationale du Travail (OIT) (c'est-à-dire qui ne tolère ni le travail des enfants, ni le travail forcé, ni la discrimination et qui garantit le droit à la négociation); ii) fournit un revenu suffisant pour vivre décemment; iii) garantit un niveau suffisant de sécurité et de stabilité de l'emploi; iv) comprend des mesures relatives à la santé et à la sécurité; v) évite les heures de travail excessives et vi) favorise l'accès à la formation. L'analyse de l'automatisation de l'agriculture sous l'angle de l'emploi décent suppose d'évaluer les effets de l'automatisation sur les aspects suivants:

Travail des enfants. Selon une étude empirique récente portant sur sept pays en développement, l'utilisation de tracteurs (et de moissonneuses-batteuses en Inde) réduit de 5 à 10 pour cent la probabilité que les enfants soient mis au travail et, parallèlement, améliore leur niveau de scolarisation. Cependant, lorsque l'accès aux

études est limité, l'introduction de machines agricoles peut simplement déplacer la main-d'œuvre enfantine des activités agricoles vers des activités non agricoles²⁴.

Revenu suffisant. Dans certaines situations, l'automatisation peut contribuer à améliorer les revenus, les moyens de subsistance, la rentabilité et les possibilités d'emploi^{25, 26}. En Ouganda, par exemple, l'utilisation des téléphones mobiles est associée à une hausse du revenu des ménages et une amélioration de l'égalité des genres, rendues possibles par l'accès facilité aux marchés, aux services et à l'information²⁷.

Sécurité et santé au travail. Les nouvelles technologies peuvent réduire la pénibilité et les risques sanitaires (en réduisant l'utilisation d'herbicides et de pesticides, par exemple)²⁸.

Réduction du temps de travail. L'automatisation de l'agriculture libère du temps qui peut être consacré au repos et à des activités de loisir. Les petits producteurs peuvent aussi mettre à profit ce temps gagné pour exercer un emploi en dehors de l'agriculture, et ainsi avoir des revenus plus stables et des moyens de subsistance plus résilients.

l'automatisation. Tous ces atouts peuvent permettre d'accroître considérablement le bien-être. Cependant, lorsque l'automatisation suppose des économies d'échelle élevées, son adoption généralisée par les grands producteurs peut amener les petits producteurs à cesser leur activité et précipiter la consolidation du secteur agricole. À mesure que la demande de main-d'œuvre décroît et que les nouvelles technologies rendent certains profils de compétence obsolètes, les technologies d'automatisation peuvent prendre la place des travailleurs, particulièrement les plus pauvres d'entre eux, pour qui il peut être difficile de trouver un emploi ailleurs. Des politiques, une législation et des investissements adéquats sont nécessaires pour éviter, atténuer ou corriger les effets sociaux négatifs de l'automatisation, en particulier sur les personnes les plus vulnérables.

Les sections qui suivent concernent l'impact de l'automatisation de l'agriculture sur l'emploi dans les systèmes agroalimentaires dans différents

contextes. Le présent rapport analyse l'impact de l'automatisation de l'agriculture sous l'angle spécifique de l'emploi rural décent, défini comme un emploi convenablement rémunéré et exercé dans des conditions de travail raisonnables. L'**encadré 19** décrit les normes de l'emploi décent à l'aune desquelles il convient d'évaluer l'impact des technologies d'automatisation de l'agriculture.

Les effets de l'automatisation de l'agriculture sur l'emploi sont difficiles à mesurer car, en règle générale, ils recouvrent non seulement des changements dans les activités de production agricole, mais aussi des changements en amont dus à la modification de la demande d'intrants et des changements en aval concernant le transport et la logistique, la transformation, la distribution et la vente au détail. À mesure que s'opère la transformation agricole, les travailleurs quittent l'agriculture pour des emplois mieux rémunérés, et la part des personnes travaillant dans ce secteur continue de diminuer, comme on

I'a vu dans le chapitre 1 (voir la **figure 3**, page 9). Ce processus rebat les cartes de l'offre et de la demande de main-d'œuvre dans tous les systèmes agroalimentaires, dans la mesure où il affecte la production, la transformation et la distribution des aliments et des autres produits agricoles. Lorsque des changements surviennent à tous les points clés des systèmes agroalimentaires plus ou moins simultanément, il est difficile, voire impossible, d'attribuer les effets sociaux – les changements relatifs à l'emploi décent et les conséquences pour les femmes, les jeunes et les petits producteurs, par exemple – à des événements spécifiques du processus d'automatisation de l'agriculture. Comprendre le processus de transformation des systèmes agroalimentaires est une étape indispensable pour bien saisir ses effets sociaux, en particulier sur l'emploi. Il est à noter que ce chapitre ne traite pas des possibles incidences *indirectes* de l'adoption de l'automatisation (l'augmentation de la demande de chercheurs et de scientifiques pour l'élaboration de technologies et leur amélioration, par exemple), pas plus qu'il ne prend en considération les conséquences à l'échelle de l'économie entière, qui peuvent aussi avoir des répercussions sociales importantes. Savoir comment les différents effets possibles s'associeront dans les faits demeure une question d'ordre empirique, et le résultat final dépendra des circonstances prévalant dans les différents pays et sociétés.

La **figure 7** (page 71) permet d'illustrer deux points principaux. Premièrement, l'automatisation de l'agriculture peut produire de multiples effets, et l'on peut supposer que ses incidences sur l'emploi agricole seront variées. La demande de main-d'œuvre peu qualifiée – familiale ou salariée – devrait diminuer si de nombreuses tâches sont automatisées. L'automatisation de certaines activités peut aider à surmonter les goulets d'étranglement liés à la main-d'œuvre et permettre ainsi une augmentation de la production, soit par expansion horizontale, soit par intensification. L'automatisation devrait conduire à une hausse de la demande de travailleurs relativement qualifiés, qui sont complémentaires des nouvelles technologies. Deuxièmement, l'impact global de l'automatisation de l'agriculture sur l'emploi décent dans les systèmes agroalimentaires sera probablement très différent des effets sur les sites d'activité agricole

considérés individuellement. Il est tout à fait possible que l'automatisation entraîne une baisse de l'emploi saisonnier faiblement rémunéré sur les exploitations agricoles, mais une hausse des emplois moins saisonniers et mieux rémunérés dans les secteurs amont et aval. La question est de savoir si les effets sociaux positifs de l'augmentation des emplois moins saisonniers et mieux rémunérés compenseront les effets négatifs de la diminution de l'offre d'emplois saisonniers peu rémunérés, de sorte que les travailleurs touchés par cette baisse trouvent une autre activité.

Le caractère saisonnier du travail est une préoccupation pour l'agriculture partout dans le monde. La production végétale et l'élevage sont des activités intrinsèquement saisonnières. Cela signifie que certaines saisons peuvent être marquées par un chômage et un sous-emploi importants, et d'autres par de graves pénuries de main-d'œuvre. Pour un producteur agricole, le fait de manquer de main-d'œuvre aux périodes critiques (pendant les récoltes ou la tonte des animaux, par exemple) peut être lourd de conséquences pour le déroulement des travaux agricoles et provoquer des pertes, voire compromettre la poursuite de l'activité. L'automatisation qui limite la demande excédentaire de main-d'œuvre durant certaines saisons pourrait, en théorie, contribuer à maintenir l'emploi à d'autres saisons. Ce point soulève plusieurs questions importantes. Quelles tâches agricoles sont les plus faciles à automatiser et pendant quelles saisons, et coïncident-elles avec les pénuries de main-d'œuvre ressenties par les exploitations? Inversement, quelles conséquences attendre pour les travailleurs non qualifiés les plus pauvres, qui se trouvent privés d'emploi lorsque leur employeur passe à l'automatisation et que leurs compétences deviennent obsolètes? Quelles politiques adopter pour rendre le processus d'automatisation plus productif, plus efficace, plus durable et plus inclusif?

Pour les cultures à forte intensité de main-d'œuvre – principalement les fruits et les légumes –, les tâches effectuées pendant les périodes les plus difficiles du point de vue de la main-d'œuvre sont souvent les plus difficiles à automatiser car les machines sont susceptibles d'abîmer les plantes et les fruits. À titre d'illustration, il est instructif de se pencher sur l'automatisation dans les régions agricoles les plus riches, où

les salaires agricoles sont relativement élevés et les solutions d'automatisation courantes. En Californie (États-Unis d'Amérique), les travaux de préparation des sols, qui comprennent le labour superficiel et profond et le niveling, sont entièrement mécanisés. La récolte des produits destinés à la transformation (tomates et raisin de cuve, par exemple) est automatisée. En revanche, la récolte des fruits et des légumes destinés à la consommation directe, plus difficile à automatiser, reste manuelle, bien que l'on commence à voir émerger des solutions robotiques de cueillette, qui apportent une réponse à la pénurie de cueilleurs et à la hausse rapide des salaires.

Ces nouvelles possibilités d'emploi sont accessibles à de nombreuses catégories de travailleurs. Les conducteurs, le personnel des entrepôts, les opérateurs de machine et les mécaniciens peuvent tous exercer leur métier avec un bagage scolaire limité, mais leurs situations diffèrent sur les plans de la rémunération, de la sécurité de l'emploi et des compétences requises^{29, 30}. Par ailleurs, ces emplois peuvent être saisonniers, en particulier s'ils sont proposés par de petites entreprises de transformation, ou stables s'ils concernent de grandes entreprises commerciales de transformation. Dans les deux cas, ils sont moins saisonniers que les emplois exercés dans les champs. La grande majorité de ces emplois sont occupés par des hommes^{31, 32}. Le personnel de bureau et de vente et les spécialistes qui doivent se prévaloir d'un niveau d'instruction, de formation et d'expérience plus élevé sont les mieux rémunérés et comptent généralement une proportion plus élevée de femmes³³.

Conséquences pour les petits producteurs et les producteurs pratiquant une agriculture de subsistance

Les conséquences sur la demande de main-d'œuvre dépendent du type de travail effectué et du type de production. Les producteurs pratiquant une agriculture de subsistance ont recours à la main-d'œuvre familiale pour leurs activités de production. La plupart sont pauvres, en proie à l'insécurité alimentaire, et ont un accès limité aux marchés et aux services³⁴. Dans l'État plurinational de Bolivie, jusqu'à 83 pour cent des petits producteurs sont pauvres, contre une moyenne nationale d'environ 61 pour cent.

En Éthiopie, où 30 pour cent de la population vit sous le seuil national de pauvreté, l'indice numérique de pauvreté est de 48 pour cent parmi les petits producteurs. Au Viet Nam, plus de la moitié des petits producteurs sont pauvres, contre seulement 20 pour cent environ de la population générale. Dans ces conditions, le fait que les personnes pratiquant l'agriculture soient plus pauvres s'explique – au moins en partie – par leur faible productivité, ces ménages survivant grâce à une agriculture de subsistance ou de quasi-subsistance. Si ces agriculteurs adoptaient l'automatisation, leurs exploitations deviendraient plus productives et ils pourraient améliorer leurs revenus et leurs moyens de subsistance en augmentant leur production; ils pourraient ainsi faire de leur ferme une exploitation commerciale familiale. En Zambie, par exemple, où des tracteurs ont été mis à la disposition de petites exploitations familiales, les producteurs ont plus que doublé leurs revenus, principalement en cultivant une plus grande superficie de terres et en appliquant davantage d'intrants (principalement des engrains), d'où une augmentation des rendements de 25 pour cent³⁵. L'automatisation libère du temps qui peut être consacré à d'autres activités, telles que l'éducation des enfants, et engendre des avantages économiques à long terme pour les ménages. Elle offre également la possibilité aux membres d'un ménage de chercher du travail dans des secteurs non agricoles.

L'automatisation de l'agriculture peut également ouvrir des débouchés sur des marchés à plus forte valeur ajoutée et permettre aux ménages agricoles de signer des contrats avec des supermarchés ou des acheteurs étrangers, sous réserve qu'ils puissent livrer des produits de qualité en quantité constante. La participation à ces marchés à valeur ajoutée élevée peut considérablement améliorer le bien-être des ménages agricoles. Au Kenya, des contrats conclus entre des supermarchés et des petits maraîchers ont permis d'accroître les revenus de ménages de producteurs de plus de 40 pour cent, et la baisse des indicateurs de pauvreté multidimensionnelle qui en a découlé a été la plus marquée parmi les ménages les plus pauvres³⁶. Par ailleurs, une hausse significative de la consommation de calories, de vitamine A, de fer et de zinc a été constatée parmi les ménages agricoles qui vendaient leur production aux supermarchés³⁷.

ENCADRÉ 20 EFFETS DE LA RÉCOLTE MÉCANISÉE DE LA CANNE À SUCRE SUR LA MAIN-D'ŒUVRE AU BRÉSIL

Le Brésil s'est doté d'un ensemble de lois et de règlements interdisant, à partir de 2020, le brûlage des champs de canne à sucre avant coupe, pratique nocive pour l'environnement. Cette interdiction a mis fin à la récolte manuelle, qui implique le brûlage avant récolte, et a conduit les producteurs à investir de plus en plus dans la récolte mécanisée. Cette législation a eu des effets positifs sur l'environnement, en réduisant la pollution, et a amené des gains de productivité, mais on a estimé en parallèle qu'elle entraînerait une baisse de 52 à 64 pour

cent de la main-d'œuvre directement employée dans la production de canne à sucre. Il est attendu que les travailleurs les moins qualifiés (n'ayant pas fait plus de trois ans d'études) soient les plus durement touchés, mais que la demande de main-d'œuvre qualifiée dans le secteur augmente. De tels changements dans la situation de l'emploi imposent que les pouvoirs publics interviennent au plus vite pour protéger les personnes les plus vulnérables contre les effets négatifs de l'automatisation.

SOURCE: Guilhoto *et al.*, 2002³⁹.

Même dans d'autres régions d'Afrique où la main-d'œuvre est relativement abondante et les taux de fécondité élevés, des éléments indiquent que la production est freinée par le manque de main-d'œuvre agricole. L'automatisation offre ainsi la possibilité d'améliorer la production et les revenus des ménages. Une étude menée sur des données recueillies au niveau des exploitations dans quatre pays d'Afrique de l'Est et d'Afrique australe justifie les efforts déployés actuellement pour mécaniser l'agriculture africaine, la main-d'œuvre et les autres sources d'énergie agricole figurant parmi les principaux facteurs qui limitent la productivité agricole dans la région³⁸.

Bon nombre des avantages potentiels de l'automatisation de l'agriculture ne sont ni immédiats ni automatiques. Les petits producteurs et les exploitants qui pratiquent l'agriculture de subsistance ne possèdent pas les connaissances techniques ni les compétences de gestion requises pour profiter des possibilités offertes par l'automatisation de l'agriculture. Il leur faut aussi actualiser et moderniser leurs modèles d'activité pour les aligner sur les normes et les exigences actuelles des marchés. Pour ces raisons, il est important de renforcer leurs capacités et de mettre en place des services de conseil ruraux efficaces donnant un accès rapide à l'information sur les technologies et les marchés (voir le chapitre 5).

Conséquences sur la production commerciale à moyenne et grande échelle

Les unités de production familiales à vocation commerciale sont détenues et exploitées par une main-d'œuvre familiale, mais peuvent aussi faire appel à une main-d'œuvre salariée (travailleurs agricoles, contremaîtres et prestataires, par exemple). L'automatisation peut permettre de réduire la demande concernant ces trois catégories de main-d'œuvre mais peut aussi inciter les producteurs à étendre leurs activités. Si des producteurs commerciaux familiaux décident de se développer de manière à adopter un modèle d'agriculture commerciale industrielle, leur main-d'œuvre familiale sera très probablement remplacée par des professionnels salariés – gestionnaires d'exploitation, personnel de vente, opérateurs de machine et mécaniciens. Si, comme c'est souvent le cas, l'adoption des technologies est motivée par la hausse des salaires et la raréfaction de la main-d'œuvre, l'automatisation aura pour effet probable de doper la productivité de la main-d'œuvre et les salaires, ce qui signifie qu'elle pourrait améliorer le bien-être tant des producteurs que du personnel salarié. Néanmoins, les technologies d'automatisation peuvent aussi prendre la place des travailleurs, en particulier les plus pauvres et les moins qualifiés d'entre eux, les obligeant à chercher un emploi dans d'autres secteurs. Cela pourrait exercer des tensions négatives sur les salaires de la main-d'œuvre non qualifiée, dont le profil de

compétences limite ses chances de trouver un autre emploi (voir l'[encadré 20](#)). Autre possibilité, les exploitations pratiquant l'agriculture de subsistance pourraient cesser complètement leur activité sous l'effet de l'adoption de technologies par les exploitations commerciales – processus connu sous le nom de consolidation agricole. En ce cas, il faudra prévoir des politiques, une législation et des investissements adéquats pour s'assurer que les producteurs pratiquant une agriculture de subsistance et les petits producteurs, ainsi que la main-d'œuvre peu qualifiée, ne soient pas laissés de côté mais puissent tirer parti de l'automatisation de l'agriculture. Il sera peut-être nécessaire de fournir une protection sociale et des formations ciblées pendant la phase de transition.

Les exploitations pratiquant une agriculture commerciale industrielle emploient toutes les catégories de main-d'œuvre à l'exception de la main-d'œuvre familiale. Ce sont les exploitations les plus en pointe, et l'automatisation y est généralement très développée. Elles bénéficient souvent d'économies d'échelle et de capitaux qui leur permettent d'acquérir des technologies robotiques supplémentaires, susceptibles de réduire fortement leurs besoins en main-d'œuvre (avec des conséquences potentiellement négatives pour les travailleurs, en particulier les travailleurs peu qualifiés) ou de modifier le type de main-d'œuvre requis sur l'exploitation. Dans le contexte de l'automatisation numérique, par exemple, un ancien conducteur de tracteur pourra être amené à superviser un essaim de machines agricoles autonomes ou à se recycler pour devenir réparateur. Cependant, pour la plupart des exploitations, les robots ne sont en général pas économiquement viables, sauf lorsque la main-d'œuvre vient à manquer. À titre d'illustration, bien que les technologies de traite robotisée soient utilisées à des fins commerciales depuis de nombreuses décennies, peu d'exploitations laitières les ont adoptées aux États-Unis d'Amérique, où la main-d'œuvre agricole reste relativement bon marché⁴⁰. En Europe de l'Ouest, en revanche, ces technologies sont utilisées à des fins commerciales depuis les années 1990.

De façon générale, si l'adoption des technologies d'automatisation est motivée non pas par la rareté de la main-d'œuvre mais par le fait que leur prix est maintenu à un niveau artificiellement bas (au

moyen de subventions publiques, par exemple), elle risque de s'accompagner de suppressions d'emplois et de chômage. Ces suppressions peuvent pénaliser durement les travailleurs agricoles, et l'impact global dépendra des possibilités qu'ils auront d'occuper les nouveaux emplois créés en amont et en aval (voir la [figure 7](#), page 71). D'un autre côté, l'adoption des technologies agricoles, encouragée par la hausse des salaires et l'intensification de la concurrence pour attirer une main-d'œuvre de plus en plus rare, devrait déboucher sur une augmentation des salaires et de la productivité globale, ce qui profitera à la fois aux producteurs et au personnel salarié.

L'automatisation des exploitations dans les pays à revenu élevé ou les régions à revenu élevé au sein des pays pourrait avoir un effet négatif sur les transferts de fonds des migrants vers les pays et régions pauvres. Si la demande de travailleurs migrants agricoles non qualifiés diminue, il pourrait en résulter une augmentation du chômage dans les pays et régions d'origine des migrants, ainsi qu'une baisse des transferts de fonds⁴¹. Au Brésil, l'automatisation de la récolte du café a entraîné une forte baisse de la demande de travailleurs non qualifiés – principalement des migrants internes venant de régions plus pauvres du pays – mais une hausse de la demande de travailleurs qualifiés⁴². Cet exemple montre que des politiques sociales inclusives doivent pouvoir être mobilisées immédiatement pour aider les travailleurs non qualifiés qui ont perdu leur emploi à en trouver un autre ailleurs.

L'automatisation semble souvent intervenir dans des contextes marqués par une diminution de la main-d'œuvre agricole et une hausse des salaires dans les régions d'émigration. L'[encadré 21](#) décrit comment la raréfaction de la main-d'œuvre dans les régions d'émigration du Mexique a favorisé l'automatisation de l'agriculture aux États-Unis d'Amérique. Une autre étude menée dans ce dernier pays a mis en évidence que l'automatisation des serres avait stimulé le chiffre d'affaires brut des entreprises horticoles, leur permettant de verser des salaires plus élevés, de retenir les travailleurs migrants plus longtemps et de réduire leurs embauches de nouveaux travailleurs qualifiés⁴³. ■

ENCADRE 21 AUTOMATISATION ET COMMUNAUTÉS RURALES D'ORIGINE DES MIGRANTS: LE CAS DE LA CALIFORNIE

À mesure que la production végétale augmente et que l'offre locale de travailleurs agricoles diminue, les pays ont recours à l'immigration pour accéder à de nouvelles sources de main-d'œuvre agricole. Par exemple, en Californie (États-Unis d'Amérique), les immigrés représentent plus de 90 pour cent de la main-d'œuvre agricole. De nos jours, tous les pays à revenu élevé font appel à des ouvriers agricoles étrangers. On pourrait penser à première vue que l'automatisation est préjudiciable aux communautés d'origine des migrants. En Californie, cependant, l'automatisation de l'agriculture n'est pas arrivée par hasard. Au Mexique, pays d'origine de la plupart des immigrés, les taux de fécondité baissent, les niveaux de scolarisation augmentent fortement et les possibilités d'emploi dans le secteur non agricole s'améliorent, réduisant l'offre de main-d'œuvre rurale. Les programmes de construction d'établissements scolaires secondaires dans les zones rurales du Mexique donnent accès aux études à des garçons et des filles qui, sinon, chercheraient un emploi dans l'agriculture, accélérant la transformation du secteur agricole. De fait,

les personnes plus instruites sont plus susceptibles de travailler en dehors de l'agriculture, même lorsqu'elles émigrent⁴⁴. Ceci explique que l'offre de main-d'œuvre agricole en Californie ait fortement diminué; entre 2008 et 2018, les salaires agricoles y ont augmenté 18 pour cent plus rapidement que les salaires non agricoles.

Avant que l'offre de main-d'œuvre agricole mexicaine ne commence à baisser, dans les années 1990, l'adoption et le développement de nouvelles technologies permettant des économies de main-d'œuvre ne présentaient pas beaucoup d'intérêt en Californie. Aujourd'hui, dans les deux pays, une course s'est engagée entre automatisation et diminution de la main-d'œuvre agricole. Le processus d'automatisation commence généralement par les tâches qui exigent le plus de main-d'œuvre et qui sont les plus faciles à automatiser. Cependant, à mesure que des solutions plus évoluées sont mises au point et commercialisées, les États-Unis d'Amérique, en particulier, commencent à automatiser des tâches plus complexes telles que la cueillette des fruits et des légumes.

SOURCES: Charlton, Hill et Taylor, 2022³; Taylor et Charlton, 2018⁴⁵.

L'AUTOMATISATION DE L'AGRICULTURE OUVRE DE NOUVELLES POSSIBILITÉS ENTREPRENEURIALES ET DES DÉBOUCHÉS PORTEURS DE TRANSFORMATION QUI AURONT DES INCIDENCES SUR LA NUTRITION ET LES CONSOMMATEURS

Les évolutions de l'automatisation dans l'agriculture peuvent ouvrir de nouvelles possibilités entrepreneuriales, par exemple dans les domaines de l'agriculture biologique et

des plantes ayant des propriétés aromatiques, médicinales ou nutritionnelles intéressantes. Elles pourraient également contribuer à revivifier des cultures anciennes à haute teneur en nutriments, qui se prêtaient mal à la mécanisation. C'est déjà ce qui se passe dans certains pays à revenu élevé. En France, en 2018, 150 robots étaient utilisés pour le désherbage des betteraves à sucre et des légumes biologiques⁴⁶. Si l'on considère que l'une des principales contraintes de l'agriculture biologique et biodynamique est le coût élevé de la main-d'œuvre, l'utilisation de machines de désherbage autonomes pour la lutte contre les plantes adventices et le recours à l'IA pour la détection des pathologies végétales peuvent favoriser l'expansion rapide de la production biologique et, en conséquence, faire baisser sensiblement les prix des produits biologiques. C'est là une bonne nouvelle pour les consommateurs qui voudraient acheter des produits biologiques mais n'en ont pas la possibilité à cause de leurs prix actuellement élevés⁴⁷.

Un autre exemple est celui du maïs.

La mécanisation de la production de maïs s'est accompagnée du développement de variétés hybrides donnant des épis de hauteur à peu près uniforme, qui facilitent la récolte mécanique. Malheureusement, ce processus de sélection végétale a entraîné la perte de certaines qualités nutritionnelles et culinaires. Il est possible aujourd'hui de retrouver ces qualités grâce aux machines autonomes à IA, qui sont adaptées à la récolte des variétés de maïs traditionnelles aux épis de différentes hauteurs, plus savoureuses et plus nutritives. De même, la mécanisation de la récolte des tomates a imposé l'utilisation de variétés qui mûrissent uniformément, mais ce choix a eu pour contrepartie des pertes nutritionnelles et gustatives. Les capacités de récolte sélective des machines autonomes permettent d'envisager la production commerciale de variétés anciennes plus savoureuses⁴⁷.

Outre les possibilités entrepreneuriales évoquées ci-dessus, l'automatisation peut procurer des avantages supplémentaires aux consommateurs en réduisant les coûts de production des aliments. Pour les consommateurs, le risque principal est que l'automatisation renforce la concentration de l'industrie alimentaire autour d'une poignée de grandes entreprises à position dominante qui fixeraient des prix monopolistiques, pénalisant les consommateurs et réduisant la production à des niveaux non optimaux pour la société. D'un autre côté, les grandes entreprises bénéficient d'économies d'échelle qui leur permettent de produire des marchandises à moindre coût en comparaison de leurs concurrents de plus petite taille. Si l'on parvient à éviter une concentration excessive, les consommateurs continueraient de tirer plus d'avantages de cette situation que d'un marché parfaitement concurrentiel composé d'un grand nombre de petits producteurs. Dans l'agglomération de Los Angeles (États-Unis d'Amérique), contrairement aux petits commerces alimentaires de détail, les supermarchés n'augmentent pas les prix des produits alimentaires en fonction de la concentration du marché ni de l'augmentation de leurs parts de marché. La concurrence que se livrent les supermarchés les empêche de fixer des prix monopolistiques, de sorte que les consommateurs profitent des coûts réduits découlant des gains d'efficience permis par les économies d'échelle⁴⁸.

Les politiques qui encouragent la concurrence sur le marché sont essentielles pour limiter la consolidation des entreprises et protéger le bien-être des consommateurs³.

Si les technologies d'automatisation ne sont pas neutres du point de vue de l'échelle de production, il existe un risque que les petits producteurs et les petits transformateurs soient amenés à cesser leur activité, car ils ne bénéficieront pas des économies d'échelle nécessaires pour rester concurrentiels. Cependant, ce n'est pas là une conséquence inéluctable de l'introduction de l'automatisation numérique dans l'agriculture; pour l'éviter, il faut que les technologies d'automatisation numérique à haute performance et à faible coût (c'est-à-dire indépendantes de l'échelle de production) deviennent aussi banales que les téléphones mobiles. Sous réserve que des infrastructures numériques d'appui et un environnement juridique, réglementaire et culturel adéquat soient en place, il y a de grandes chances que les zones rurales connaissent un développement économique durable fondé sur une agriculture certes intensive, mais durable. Quant à savoir si les pays – en particulier les pays à faible revenu et les pays à revenu intermédiaire – bénéficieront de l'automatisation de l'agriculture ou en pâtiront, cela dépendra de la façon dont ils géreront cette transition. Les pays qui se doteront des infrastructures matérielles, économiques, juridiques et sociales nécessaires à l'automatisation numérique devraient être gagnants. Ceux qui ignoreront ce défi pourraient perdre les emplois agricoles manuels faiblement rémunérés sur lesquels ils peuvent compter actuellement, sans créer de nouvelles possibilités d'emplois agricoles mieux rémunérés tirant parti de l'automatisation. L'histoire nous enseigne que la coopération internationale est essentielle pour préparer la transition; cependant, la volonté politique n'est pas moins essentielle pour reconnaître les possibilités qui se profilent et agir en conséquence^{3, 47, 49}. ■

UN PROCESSUS INCLUSIF D'AUTOMATISATION DE L'AGRICULTURE

Les auteurs du présent rapport voient dans l'automatisation de l'agriculture une chance, doublée d'une responsabilité qui consiste à intégrer

les groupes particulièrement vulnérables, exclus et marginalisés dans les systèmes agroalimentaires par l'intermédiaire de leurs moyens de subsistance. Ces groupes comprennent les petits producteurs, les éleveurs pastoraux, les petits pêcheurs et sylviculteurs et les communautés forestières, les salariés agricoles, les microentreprises et travailleurs du secteur informel, les personnes sans terre et les migrants².

Tous ensemble, ils sont à l'origine d'une grande partie de la production alimentaire et sont les gardiens des ressources naturelles et de la biodiversité. Pourtant, ils restent marginalisés, sont dénués d'un accès équitable aux ressources, n'ont pas de droits fonciers, ne participent pas aux processus d'élaboration des politiques et de prise de décision, et sont touchés de façon disproportionnée par le changement climatique et les phénomènes climatiques extrêmes. Ces personnes sont les plus susceptibles d'être privées d'accès à des aliments salubres et nutritifs, aux ressources, aux marchés, aux services publics et sociaux de base, aux infrastructures, aux outils et technologies, à la protection sociale et aux débouchés rémunérateurs². Remédier aux multiples obstacles et contraintes auxquels elles sont confrontées est essentiel pour réaliser une automatisation inclusive de l'agriculture, qui donnera naissance à une petite agriculture durable, résiliente, productive et efficiente.

Ce processus doit accorder une attention prioritaire à la pauvreté et à l'extrême pauvreté, qui sont des caractéristiques communes à tous les groupes susmentionnés. Sur cinq personnes qui vivent sous le seuil international de pauvreté, quatre résident dans des zones rurales et tirent au moins une partie de leurs moyens de subsistance des systèmes agroalimentaires⁵⁰. La plupart ne peuvent jouir de toutes les dimensions du bien-être ni exercer pleinement leurs droits humains individuels et collectifs fondamentaux. Les cadres juridiques sont importants pour garantir la reconnaissance, la protection et la promotion des droits humains de tous. Les autorités publiques devraient prendre les mesures qui conviennent pour assurer la représentation des groupes marginalisés et vulnérables (tels que les peuples autochtones et les personnes handicapées) dans la prise de décision, déterminer les effets négatifs que l'automatisation pourrait avoir sur les droits humains – en

particulier de ces groupes – et prendre des mesures spéciales pour prévenir, faire cesser ou atténuer les conséquences préjudiciables de l'automatisation.

Les questions de genre et la situation des jeunes sont deux autres dimensions clés de l'inclusion. Elles sont traitées comme des thèmes transversaux distincts dans le Cadre stratégique 2022-2031 de la FAO, de manière à mettre en exergue leur importance et à faire en sorte qu'elles bénéficient d'une attention particulière². Les politiques, la législation et les investissements devraient garantir la mise en œuvre d'approches de suivi fondées sur les droits humains, ce qui comprend la collecte de données ventilées permettant de mesurer les effets de l'automatisation sur les moyens de subsistance, les droits et les chances des jeunes et des femmes. Les questions relatives à l'égalité des genres et à la jeunesse sont abordées séparément dans les sections qui suivent. De nombreuses autres personnes sont confrontées à l'exclusion et à la marginalisation dans le contexte de l'automatisation de l'agriculture, en raison de critères tels que la race, le sexe, la pauvreté et le statut socioéconomique, la langue, l'appartenance ethnique, la religion, l'âge, le handicap ou la caste, entre autres. La situation des peuples autochtones et des personnes handicapées en est une bonne illustration (voir l'[encadré 22](#), page 82).

Conséquences de l'automatisation de l'agriculture sur l'égalité des genres

Les conséquences de l'automatisation agricole sur l'égalité des genres sont complexes et variées. Elles dépendent de la façon dont les tâches agricoles manuelles qui viennent d'être automatisées étaient auparavant réparties entre les femmes et les hommes, ainsi que de la division du travail entre les genres dans les systèmes agroalimentaires et au sein des ménages (répartition des actifs, par exemple). Dans de nombreuses régions, la répartition des rôles masculins et féminins sur les exploitations est relativement rigide. Au Maroc, par exemple, la culture des crocus, dont on extrait le safran, est une activité essentiellement masculine, alors que la transformation des fleurs – travail pénible à forte intensité de main-d'œuvre – est presque exclusivement du ressort des femmes⁵². Dans ces conditions, l'automatisation de la culture du crocus libérerait surtout de la main-d'œuvre

ENCADRÉ 22 INCLUSION DES PERSONNES HANDICAPÉES

Les personnes handicapées sont souvent exclues des processus de développement en raison de leurs handicaps psychosociaux, physicosensoriels ou intellectuels, ce qui les prive d'un accès juste et équitable aux opportunités sociales et économiques. La pauvreté, l'insécurité alimentaire et la malnutrition peuvent être des causes de handicap, et inversement, les personnes handicapées sont exposées à un risque accru de pauvreté, de faim et de malnutrition. L'agriculture est l'un des trois secteurs où il est le plus dangereux de travailler: les travailleurs y sont exposés à un large éventail de risques, effectuent de longues heures de travail dans des conditions médiocres et, bien souvent, ne sont pas couverts par des politiques ou une législation adéquates en matière de santé et de sécurité au travail.

L'automatisation peut contribuer à créer des emplois décents ne comportant plus de risques liés au travail et à rompre les liens entre pauvreté, malnutrition et handicap. L'inclusion des personnes handicapées peut également être facilitée par: i) l'adaptation et l'amélioration des technologies d'automatisation de l'agriculture existantes

et l'élaboration de nouvelles technologies adaptées aux besoins particuliers des personnes handicapées et faisant appel à des moyens de communication autres que ceux utilisés habituellement (gros caractères, écriture braille, langue des signes, par exemple) et l'adoption de formats visuels, audio (bandes ou disques enregistrés) et électroniques; et ii) le renforcement des compétences techniques des personnes handicapées dans l'agriculture et les systèmes agroalimentaires plus généralement.

Il est particulièrement important d'aider les jeunes handicapés à devenir indépendants et actifs. La FAO s'appuie sur ses écoles pratiques d'agriculture et d'apprentissage de la vie pour les jeunes afin de corriger les disparités d'accès aux études et de lutter contre la stigmatisation et le manque de débouchés économiques dont souffrent les personnes handicapées, en utilisant des technologies novatrices. Ces écoles représentent un moyen simple mais efficace de former les enfants et les jeunes vulnérables à l'agriculture et de leur permettre d'acquérir les compétences de la vie courante.

SOURCE: FAO, 2022^{2,51}.

masculine. Si, de surcroît, elle entraînait une augmentation de la production de fleurs, s'ensuivrait alors une hausse de la demande de main-d'œuvre féminine. Cela pourrait être une bonne nouvelle pour la main-d'œuvre féminine salariée, mais une mauvaise pour la main-d'œuvre féminine familiale.

Une étude de cas sur la Zambie indique que les tâches à forte intensité de main-d'œuvre (le désherbage, par exemple) étaient partagées entre les femmes et les hommes. Lorsque des tracteurs ont commencé à être utilisés pour la préparation des sols, les activités de culture ont augmenté, sans que cela fasse peser une charge supplémentaire disproportionnée sur les femmes ou les enfants. Au contraire, l'ensemble des membres des ménages ont bénéficié d'un surcroît de temps libre³⁵. D'autres données recueillies en Afrique australe et en Afrique de l'Est montrent que, dans bien des cas, la mécanisation de la préparation des sols se substitue au travail aussi bien féminin que masculin – mais plus particulièrement au travail des femmes, dont l'activité principale est le

désherbage, une tâche très pénible³⁸. Dans l'ouest du Kenya, l'adoption de la mécanisation motorisée a également libéré du temps aux femmes comme aux hommes, et les ménages ont pu investir davantage dans l'éducation des enfants⁵³. Ces exemples montrent qu'il est important de bien comprendre la répartition spécifique des rôles entre les genres pour saisir l'impact de l'automatisation sur les femmes; il faut se garder de généralisations hâtives, selon lesquelles l'automatisation ne bénéficierait qu'aux hommes au motif que ce sont essentiellement les tâches masculines qui sont automatisées. On trouvera dans l'**encadré 23** d'autres exemples d'utilisation réussie des technologies d'automatisation agricole par les femmes et les jeunes.

Bien que l'automatisation de l'agriculture permette de libérer du temps aux femmes et d'alléger leur charge de travail tout en augmentant la productivité, les revenus et le niveau de bien-être, les recherches indiquent que les femmes sont en retard sur les hommes en matière d'adoption des technologies agricoles en raison de difficultés

ENCADRÉ 23 INCLUSION DES FEMMES ET DES JEUNES: ÉLÉMENTS RECUEILLIS AU MOYEN DES ÉTUDES DE CAS

Plusieurs des études de cas citées dans le chapitre 3 mettent fortement l'accent sur le développement technologique en tant que facteur d'autonomisation des femmes et des jeunes. Parmi les exemples de réussite dans ce domaine, citons les prestataires de services suivants:

Igara Tea. Environ 18 pour cent des utilisateurs sont des femmes, dont 4 pour cent sont cheffes de famille. À l'échelle de l'exploitation, les jeunes représentent 65 pour cent de la main-d'œuvre. Plus de la moitié de la main-d'œuvre employée dans la transformation des feuilles de thé est composée de femmes et de jeunes.

TraSeable Solutions. Les femmes et les jeunes représentent environ 40 pour cent et 15 pour cent respectivement des utilisateurs enregistrés.

Tun Yat. Environ 30 pour cent des utilisateurs sont des femmes, et 25 à 30 pour cent sont des jeunes âgés de 30 ans ou moins. Ces chiffres s'expliquent également par les migrations internes des hommes, qui vont chercher du travail en ville tandis que les femmes restent sur place pour s'occuper des travaux agricoles. En se concentrant sur l'emploi des femmes et des jeunes au niveau local, Tun Yat favorise l'autonomisation des femmes dans les zones rurales. L'entreprise emploie des femmes et des jeunes pour les travaux liés à la transformation et à la sécurité sanitaire des aliments, ainsi qu'à des postes de conducteur de tracteur et de mécanicien.

SOURCE: Ceccarelli *et al.*, 2022⁵⁴.

d'accès aux capitaux, aux intrants et aux services (information, vulgarisation, crédit et engrais), d'une accessibilité physique limitée et de normes culturelles⁵⁵. À titre d'illustration, l'Institut ghanéen de gestion et d'administration publique estime que 78,6 pour cent des agricultrices de la zone côtière du pays n'ont pas accès aux services de tracteurs⁵⁶. Bien souvent, les femmes ne peuvent ni adopter les technologies d'automatisation ni occuper des emplois nécessitant des compétences en exploitation et gestion agricoles en raison de leur niveau d'instruction plus faible, du manque d'outils et de matériel adaptés, de l'absence d'infrastructures et de l'insuffisance des fonds alloués aux programmes de vulgarisation féminine⁵⁶.

Ce sont souvent les hommes qui réalisent les transactions commerciales liées aux services d'automatisation à l'échelle de l'exploitation. Par conséquent, ce sont aussi eux qui prennent les décisions et qui ont la main sur les ressources nécessaires aux investissements dans l'automatisation (en particulier les capitaux)⁵⁶. L'ergonomie du matériel et des outils agricoles est généralement pensée pour les hommes et fait peu de cas des femmes⁵⁷. Au Bangladesh, celles-ci

n'utilisent pas les pompes d'irrigation à cause de leur complexité technologique, des exigences physiques qu'impose leur mise en œuvre et de la difficulté de recruter et superviser des ouvriers agricoles⁵⁸. Il existe un besoin évident de concevoir des technologies d'automatisation adaptées aux femmes et qui leur soient accessibles. Ainsi, un examen récent des études publiées insiste-t-il sur la nécessité d'intégrer – dans les recherches et politiques futures – les différences entre femmes et hommes intervenant dans la conception, la promotion et l'adoption des technologies d'automatisation afin de réduire la charge de travail des femmes et d'améliorer les résultats du point de vue du bien-être⁵⁵.

Surmonter ces contraintes liées au genre est nécessaire pour améliorer la productivité, la sécurité et le confort et pour réduire la pénibilité dans le cadre d'un développement exhaustif et durable de la société⁵⁷. Pour encourager les femmes à adopter les technologies, les décideurs et les partenaires locaux d'exécution doivent également évaluer l'environnement d'appui et promouvoir l'élaboration et la diffusion de technologies et la fourniture de services tenant compte des questions de genre. Ces technologies sont celles qui sont

ENCADRE 24 «DES FEMMES SUR LE SIÈGE CONDUCTEUR»: FAIRE PROGRESSER L'AUTONOMISATION DES FEMMES GRÂCE AU TRACTEUR

Le programme de formation à l'utilisation des tracteurs «Des femmes sur le siège conducteur» a pour but de faire tomber les obstacles qui freinent l'accès des femmes à l'automatisation agricole, domaine traditionnellement dominé par les hommes. Ce programme de formation a pour objectif d'encourager durablement la participation et l'initiative des femmes dans les activités liées aux machines agricoles au Ghana.

Grâce au programme, 182 conductrices de tracteur ont obtenu leur certificat depuis 2018. Le taux élevé d'achèvement du programme montre que les femmes peuvent très bien conduire des tracteurs et les entretenir.

SOURCE: GIZ, 2020⁵⁶.

Les lauréates ont créé une association des conductrices de tracteur pour s'organiser et s'entraider.

La participation des femmes au processus d'automatisation a contribué à faire évoluer les mentalités, non seulement des femmes mais aussi des professionnels, des employeurs et de la société en général. Maintenant qu'elles ont trouvé un emploi, ces femmes peuvent participer à la sécurité et à la stabilité de leur environnement familial et prendre des décisions importantes concernant les ressources et le revenu du ménage. Par conséquent, cette opération a renforcé l'égalité des genres dans le monde du travail et à la maison.

adaptées aux caractéristiques physiques tant des femmes que des hommes⁵⁹. Les politiques, la législation et les investissements doivent également permettre de renforcer les capacités et l'autonomie des femmes, ainsi que l'égalité des genres sur les plans de la propriété et du contrôle des principaux actifs productifs⁶⁰. Des stratégies et des mesures ciblées qui visent simultanément à lever les obstacles à l'adoption des technologies auxquels les femmes se heurtent aux niveaux du ménage, des services et des politiques peuvent donner des résultats positifs. Des éléments recueillis au Ghana montrent, par exemple, que la mise en place de formations destinées aux femmes aux points clés de la chaîne de valeur qui sont généralement dominés par les hommes peut avoir un impact positif non seulement pour les femmes mais aussi pour la communauté dans son ensemble (voir l'**encadré 24**, page 84)⁵⁶.

Un examen des différences entre femmes et hommes pour ce qui est de la participation aux marchés naissants des services de location de moissonneuses-batteuses au Bangladesh met en lumière tout le potentiel de ces services⁵⁸. En particulier, les femmes ont été gagnantes de diverses manières: en exerçant des fonctions de gestionnaire ou même d'entrepreneuse de services de mécanisation, ainsi qu'en retirant des avantages directs et indirects de la location de ces services pour leurs propres récoltes. Les initiatives

valorisant les services de location devraient chercher à prêter un appui aux femmes, à la fois comme entrepreneuses et comme utilisatrices de machines.

Mobiliser les jeunes ruraux – possibilités et défis

Il a été constaté que les jeunes agriculteurs étaient les premiers à s'emparer des innovations agricoles. C'est pourquoi ils sont considérés comme des agents clés du changement générationnel et de la transformation de l'agriculture⁵⁴. L'automatisation de l'agriculture laisse augurer l'apparition de nouveaux types d'emplois qui différeront des emplois agricoles traditionnels, souvent caractérisés par des conditions de travail plus médiocres et plus dangereuses et par une faible rémunération. Ces nouveaux emplois font appel à des technologies novatrices dont l'exploitation productive nécessite des compétences spécifiques, synonymes de salaires décents et de conditions de travail plus sûres.

Une étude récente sur les perceptions qu'ont les parties prenantes d'un ensemble de grands thèmes pertinents pour la transformation de l'agriculture africaine montre que, dans l'ensemble, celles-ci sont très confiantes dans la capacité de l'agriculture d'attirer des jeunes, 78 à 98 pour cent d'entre elles étant d'accord avec cette affirmation.

Néanmoins, une proportion importante de participants (72 à 97 pour cent) considérait que les jeunes n'étaient pas suffisamment associés aux processus politiques, et une part non négligeable (48 à 79 pour cent) déplorait l'absence de modèles susceptibles d'inspirer les jeunes dans le monde agricole. Certaines des personnes interrogées avaient aussi l'impression que les systèmes éducatifs ne préparaient pas correctement les jeunes au marché du travail, en particulier au Bénin (70 pour cent) et au Kenya (63 pour cent)⁶¹. Les emplois très qualifiés sont hors de portée pour la majorité des jeunes ruraux⁶², raison pour laquelle il est essentiel que les jeunes acquièrent les compétences nécessaires. Les politiques gouvernementales et l'investissement public devraient accorder la priorité à la mise en valeur du capital humain et au renforcement des capacités, en mettant plus particulièrement l'accent sur la jeunesse⁵⁴. ■

L'AVENIR DE LA MAIN-D'ŒUVRE AGROALIMENTAIRE

À mesure que les technologies d'automatisation permettant d'économiser de la main-d'œuvre gagnent du terrain dans l'agriculture, le profil des travailleurs évolue. Ils sont non seulement moins nombreux mais aussi plus qualifiés et capables de compléter les nouvelles technologies, de plus en plus complexes. L'une des questions majeures qui se posent aux pays, quel que soit leur niveau de revenu (élevé, intermédiaire ou faible), est de savoir d'où viendra la main-d'œuvre agricole de demain et comment on pourra l'aider à passer de tâches manuelles essentiellement peu qualifiées à des activités faisant appel à des technologies plus complexes et évoluées, notamment les nouvelles technologies numériques, qui devraient stimuler la demande de travailleurs qualifiés sur les exploitations et pousser les salaires agricoles à la hausse⁶³.

La crainte de voir les robots de cueillette remplacer des millions de travailleurs agricoles n'ayant pas d'autres perspectives d'emploi n'est guère fondée. En général, l'automatisation des emplois agricoles et l'évolution de la main-d'œuvre agricole sont des processus graduels et qui varient selon

les localités, les plantes cultivées et les tâches à accomplir. Les incitations les plus fortes à adopter des méthodes permettant des économies de main-d'œuvre concernent certaines tâches qui présentent une intensité de main-d'œuvre élevée et peuvent être automatisées facilement et à moindre coût. Au fil du temps – mais pas partout en même temps –, l'offre de travailleurs agricoles s'amenuise, phénomène étroitement lié à la hausse des revenus, à la baisse de la fécondité, à l'élévation du niveau d'instruction et au développement des possibilités d'emploi hors du secteur agricole. Par conséquent, s'il ne fait aucun doute que la main-d'œuvre agricole diminue, ce recul ne s'opère pas au même rythme partout dans le monde.

Au lieu de supprimer rapidement de grandes quantités d'emplois, l'automatisation se poursuivra probablement de manière progressive. Au fur et à mesure de la diminution de l'offre de main-d'œuvre agricole, certaines tâches seront automatisées tandis que d'autres continueront de nécessiter une main-d'œuvre abondante. Avec un peu de chance, le développement et l'adoption de techniques permettant des économies de main-d'œuvre continueront d'être guidés par les signaux du marché, et un processus d'automatisation progressive libérera les travailleurs peu qualifiés des tâches qui viennent d'être automatisées pour les réorienter vers d'autres activités plus difficiles à automatiser. Grâce à certaines activités – la préparation et le labourage des sols, par exemple –, l'automatisation rendra davantage de terres cultivables, ce qui stimulera la demande de travailleurs affectés à d'autres tâches (plantation, désherbage, éclaircissement, récolte) à mesure que la production alimentaire augmentera.

Cela ne veut pas dire que tout se passera sans heurts. L'adoption (ou la non-adoption) de technologies permettant des économies de main-d'œuvre engendrera du chômage (ou des pénuries de main-d'œuvre) à certains moments et à certains endroits. Une automatisation excessive peut se produire si une découverte soudaine facilite l'accès des agriculteurs à certaines technologies permettant des économies de main-d'œuvre, les incitant à adopter ces technologies même si les salaires sont bas. Ce scénario est peu susceptible d'arriver dans les pays à revenu élevé, où les pénuries de main-d'œuvre rurale et les pressions

à la hausse sur les salaires sont déjà la norme. Dans les pays à faible revenu et les pays à revenu intermédiaire, en particulier ceux caractérisés par une main-d'œuvre rurale abondante et des salaires faibles, une automatisation excessive et trop rapide pourrait être préjudiciable aux travailleurs employés dans les exploitations commerciales, en particulier ceux dont le profil de compétences est rendu obsolète par les nouvelles technologies³. L'**encadré 20** (page 77) illustre ce cas de figure à l'aide d'un exemple venant du Brésil. Quoi qu'il en soit, l'automatisation peut quand même améliorer les moyens de subsistance des petits producteurs dans la mesure où elle permet aux membres de la famille de consacrer davantage de temps à l'éducation des enfants et, le cas échéant, d'occuper un emploi non agricole, et où elle améliore l'efficacité, la productivité et la résilience.

Inversement, l'automatisation pourrait être insuffisante, en particulier si les politiques publiques mettent des freins à l'automatisation des exploitations agricoles dans l'espoir de protéger les emplois dans ce secteur. Dans le contexte de la contraction de l'offre de main-d'œuvre agricole et de la hausse des salaires, supposer que la limitation de l'automatisation préservera l'emploi et les revenus agricoles est probablement une erreur, et ce pour deux raisons. Premièrement, des politiques restrictives en matière d'automatisation sont de nature à rendre les exploitations moins compétitives et à les empêcher de développer leur production en réponse à l'essor des marchés intérieurs ou des exportations. Deuxièmement, pour améliorer les salaires et les conditions de travail des ouvriers agricoles, il est essentiel de les rendre plus productifs en couplant leur force de travail aux nouvelles technologies. La plupart des travailleurs agricoles dans le monde perçoivent un revenu familial qui les place sous le seuil de pauvreté; or, les chances de sortir de la pauvreté resteront minces en l'absence de technologies qui permettent d'améliorer la productivité des travailleurs. Si on limite l'adoption des technologies qui permettent des économies de main-d'œuvre (et donc améliorent la productivité des travailleurs), les salaires des ouvriers agricoles se maintiendront à des niveaux durablement bas³.

Compte tenu de ces éléments, accroître la production alimentaire dans un contexte de baisse de l'offre de main-d'œuvre agricole tout

en poursuivant le développement des systèmes éducatifs pour préparer la main-d'œuvre de demain constitue un défi de taille pour les responsables politiques du monde entier. Qui plus est, ce défi ne se limite pas à la production primaire mais concerne aussi les autres segments des systèmes agroalimentaires, notamment la transformation et la distribution. Si le nombre de travailleurs disposant des compétences nécessaires pour compléter les nouvelles technologies reste insuffisant, il sera difficile de satisfaire la demande croissante de produits alimentaires dans le monde, en particulier dans les régions où la main-d'œuvre agricole augmente lentement, voire diminue. ■

CONCLUSION

Pour comprendre les conséquences sociales de l'automatisation de l'agriculture, il faut adopter un regard introspectif pour déterminer quelles tâches agricoles sont automatisées et comment elles sont liées aux autres tâches. Il faut aussi porter l'attention vers l'extérieur pour comprendre comment la production agricole interagit avec les segments amont et aval des systèmes agroalimentaires ainsi qu'avec l'économie en général. À un instant donné, l'automatisation produit un impact sur certaines tâches effectuées sur certaines exploitations. Elle libère des travailleurs de ces tâches spécifiques pour d'autres travaux agricoles à plus forte intensité de main-d'œuvre ainsi que pour d'autres activités situées plus en amont ou plus en aval de la chaîne de valeur agroalimentaire ou dans d'autres secteurs de l'économie.

On imagine généralement que l'automatisation va créer du chômage et tirer les salaires agricoles vers le bas. Dans certains scénarios, c'est effectivement le cas. Néanmoins, l'expérience passée montre que l'innovation et l'adoption de technologies permettant des économies de main-d'œuvre sont souvent des processus de longue haleine. Il n'est pas évident de concevoir des machines capables de reproduire la dextérité et l'habileté humaines dans l'exécution des tâches agricoles. On trouve de nombreux exemples dans lesquels l'automatisation d'une tâche agricole (la préparation des sols au moyen d'un tracteur, par exemple) entraîne une augmentation de la demande de main-d'œuvre pour d'autres tâches (l'ensemencement, le

désherbage, l'éclaircissage et la récolte, par exemple). L'automatisation peut donc stimuler l'emploi agricole en permettant aux exploitations d'accroître leur production en réponse à la croissance de la demande intérieure et mondiale de produits alimentaires.

Des éléments indiquent que la croissance de la production agricole, facilitée par l'automatisation, encourage la création d'emplois à d'autres points clés des systèmes agroalimentaires – production d'intrants en amont, et activités de logistique, de stockage, de transformation et de commercialisation en aval des exploitations. Par ailleurs, l'automatisation s'accompagne de nouvelles possibilités entrepreneuriales ouvrant la voie à la création de nouvelles entreprises.

Les effets du développement et de l'adoption de technologies agricoles permettant des économies de main-d'œuvre sur l'emploi et les salaires dépendront en grande partie des facteurs ayant motivé l'automatisation. Les signaux du marché – et plus spécifiquement les variations des salaires par rapport aux prix d'autres facteurs – créent des incitations et des contre-incitations à l'adoption de ces méthodes sur les exploitations agricoles. Du côté de l'offre, à la faveur des avancées massives de la recherche-développement, les agriculteurs auront continuellement accès à de nouvelles solutions d'automatisation pour un nombre croissant de tâches, et pour un coût qui diminuera graduellement. Savoir quel sera l'impact global demeure une question d'ordre empirique, qui dépendra également du poids de l'agriculture dans l'économie et des répercussions que l'automatisation de l'agriculture pourrait entraîner à l'échelle de l'ensemble de l'économie.

Pour les perspectives d'augmentation de la production alimentaire mondiale, c'est une bonne nouvelle en raison de l'amenuisement

de la main-d'œuvre agricole dans le monde. D'un autre côté, un développement très rapide de l'automatisation de l'agriculture, ou des politiques publiques qui encourageraient l'adoption de l'automatisation de façon prématurée, pourraient provoquer des changements abrupts de la demande de main-d'œuvre et rompre le lien entre l'automatisation et la disponibilité de la main-d'œuvre. L'automatisation pourrait alors aller de pair avec une hausse du chômage et une baisse ou une stagnation des salaires agricoles à certains endroits et à certains moments. Pour les pouvoirs publics, la réaction la plus évidente devrait consister à éviter les distorsions du marché qui encouragent une automatisation prématurée et à faire acquérir sans tarder aux travailleurs les compétences dont ils auront besoin pour accéder à de nouveaux emplois mieux qualifiés. Cela est particulièrement important pour les jeunes et les femmes, qu'un certain nombre d'obstacles techniques, économiques et culturels empêchent de tirer pleinement parti de ces avantages. Compte tenu du risque que l'adoption des technologies par les exploitations agricoles commerciales n'amène les petits producteurs à cesser leur activité, il sera important de protéger les moyens de subsistance des petits exploitants et d'éviter que ceux-ci soient laissés de côté.

Dans ce chapitre, les auteurs ont suggéré des pistes pour encourager une automatisation inclusive de l'agriculture qui fasse une plus large place aux femmes, aux jeunes et aux petits producteurs. Les politiques publiques en matière d'automatisation de l'agriculture ont un rôle à jouer à cet égard, en même temps qu'elles doivent faire en sorte que l'automatisation soit un vecteur de transformation des systèmes agroalimentaires. Le rôle des politiques publiques et de la législation est examiné plus en détail dans le chapitre 5. ■



THAÏLANDE

Des robots analysent le feuillage des cultures, la fertilisation foliaire et la pollinisation.
©PopTika/
Shutterstock.com

CHAPITRE 5

MESURES POSSIBLES EN FAVEUR D'UNE AUTOMATISATION EFFICACE, DURABLE ET INCLUSIVE DE L'AGRICULTURE

MESSAGES CLÉS

- ➔ Il est essentiel de mettre en place un environnement propice à une adoption responsable des technologies d'automatisation, et il faut pour cela des instruments d'action publique qui fonctionnent ensemble de manière cohérente. Il s'agit, entre autres, de cadres juridiques et institutionnels appropriés, de mesures d'incitation et de mesures d'appui aux services d'intérêt général dans les domaines liés aux infrastructures, à l'éducation, à la formation, à la recherche et aux processus d'innovation du secteur privé.
- ➔ Les investissements destinés à promouvoir une automatisation responsable doivent être définis en fonction des conditions propres au contexte, comme la situation en matière de connectivité et les infrastructures, les problèmes liés aux connaissances et aux compétences, et les inégalités d'accès aux technologies d'automatisation.
- ➔ Les politiques visant à remédier aux problèmes de durabilité environnementale et à renforcer la résilience doivent tenir compte des synergies potentielles entre l'automatisation et d'autres approches en matière de durabilité, telles que l'aménagement paysager et l'agriculture de conservation.
- ➔ Les décideurs publics doivent s'attacher à mettre en place une législation et des cadres réglementaires transparents, à prêter un appui aux services d'intérêt général – notamment des recherches sur des technologies (projets pilotes, essais, etc.) centrées sur les exploitants agricoles et impulsées par la demande – sans créer de distorsions et à dispenser

des formations pour aider les travailleurs à opérer une transition vers de nouvelles activités, dans l'agriculture ou d'autres secteurs.

➔ Il revient aux producteurs agricoles de choisir quelles technologies adopter à partir du large éventail disponible, mais le rôle des pouvoirs publics est de veiller à assurer, par leurs interventions, un accès inclusif à l'automatisation de l'agriculture. Les initiatives multipartites qui diffusent des connaissances sur l'automatisation, par exemple, peuvent également faciliter l'adoption des technologies.

Comme nous l'avons vu dans les chapitres précédents, l'automatisation de l'agriculture offre de nombreuses possibilités de transformer de manière durable et inclusive les systèmes agroalimentaires, mais elle comporte aussi des risques. Des initiatives doivent être menées en parallèle par des acteurs privés, publics et le secteur associatif, avec des objectifs cohérents et complémentaires, afin d'offrir un environnement propice à l'automatisation de l'agriculture, qui permettra de tirer parti des possibilités, d'atténuer les risques et d'opérer une transformation durable et inclusive de l'agriculture. Faisant fond sur les enseignements tirés des études de cas élaborées pour ce rapport (voir l'annexe 1) et sur les publications disponibles, le présent chapitre définit les instruments d'action publique et les instruments juridiques qui peuvent encourager une adoption durable et inclusive de l'automatisation dans l'agriculture, sans laisser personne de côté. Le principe fondamental qui sous-tend

l'automatisation de l'agriculture est un *changement technologique responsable*, qui débouche sur des systèmes agroalimentaires efficaces, productifs, inclusifs, résilients et durables. Le changement technologique responsable est un processus qui nécessite d'anticiper les effets des technologies sur la productivité, la résilience et la durabilité, tout en mettant l'accent sur les groupes marginalisés et vulnérables, notamment les femmes, les jeunes et les petits producteurs. Ce processus doit englober l'ensemble des parties prenantes, répondre à leurs préoccupations et s'inspirer de leurs idées et de leurs connaissances¹. Pour être responsable, l'automatisation de l'agriculture doit être souple, centrée sur les agriculteurs, impulsée par la demande, respectueuse de la confidentialité des données et de la diversité culturelle, participative et inclusive dans sa conception, et transparente. Le contexte est essentiel et ne doit pas être négligé, et les technologies doivent répondre aux besoins locaux et faire intervenir les acteurs locaux en s'appuyant sur leur capacité d'innover pour s'adapter.

VERS UNE AUTOMATISATION RESPONSABLE DE L'AGRICULTURE

Comme tout changement technologique, l'automatisation de l'agriculture provoque inévitablement son lot de bouleversements dans les systèmes agroalimentaires, apportant des avantages, mais imposant aussi des compromis, qui font au bout du compte des gagnants et des perdants. Les initiatives visant à accélérer son adoption doivent tenir compte des processus socioéconomiques et politiques qui peuvent soit entraver, soit stimuler le développement des technologies et leur adoption. L'automatisation de l'agriculture a différentes répercussions sur les systèmes agroalimentaires. Elle influe sur les moyens de subsistance des groupes vulnérables par ses impacts possibles sur la sécurité alimentaire et la nutrition, la résilience, la réduction de la pauvreté et l'emploi dans les zones rurales – et a ainsi potentiellement des effets sur les inégalités. Elle a indirectement une incidence sur le bien-être général des communautés, ce qui

peut influer sur la durabilité environnementale, et notamment sur la conservation des ressources naturelles et la biodiversité. Compte tenu de ces impacts, le changement technologique responsable doit occuper une place centrale dans les débats politiques axés sur l'inclusion et la durabilité.

Les mesures visant à rendre les systèmes agroalimentaires plus durables, plus inclusifs et plus résilients doivent faire participer toutes les parties intéressées – notamment les petits producteurs et les autres groupes marginalisés et vulnérables, pour lesquels les technologies d'automatisation de l'agriculture sont généralement hors de portée^{1,2}. Le présent chapitre expose un éventail d'options possibles en matière de politiques, d'institutions, de législation et d'investissements pour mettre en pratique la notion de changement technologique responsable, et les organise en quatre grands domaines. Ensemble, elles forment une feuille de route qui permet de s'assurer que l'automatisation de l'agriculture contribue à des systèmes agroalimentaires efficaces, productifs, durables, résilients et inclusifs. Ces différentes options reposent sur les principales constatations tirées des études de cas et des publications mentionnées dans ce rapport. Elles visent à lever les principaux obstacles à l'adoption décrits et analysés dans les chapitres 2 à 4. Les politiques, qui se complètent et se renforcent mutuellement, sont représentées à la figure 8 et résumées ci-après.

► **Politiques générales visant à mettre en place un environnement propice.** Ces mesures comprennent des politiques qui ne sont pas directement liées à l'alimentation et l'agriculture, mais qui favorisent néanmoins l'adoption de l'automatisation dans ce secteur. Elles visent les insuffisances existantes ou potentielles dans les infrastructures – telles que les routes, l'énergie et la connectivité – en parallèle avec les politiques nationales en matière de financement et de gestion de données.

► **Politiques, législation et investissements ciblant l'agriculture.** Ces mesures sont directement liées à l'alimentation et l'agriculture, et ciblent le secteur globalement. Elles portent, entre autres, sur la recherche agronomique, les services de transfert de connaissances et les financements destinés à l'automatisation de l'agriculture.

FIGURE 8 ENSEMBLE DES MESURES POSSIBLES EN FAVEUR D'UNE AUTOMATISATION RESPONSABLE DE L'AGRICULTURE



SOURCE: Figure élaborée par la FAO pour le présent rapport.

ENCADRÉ 25 DIFFÉRENTS TYPES DE SOUTIEN DES POUVOIRS PUBLICS POUVANT FAVORISER L'AUTOMATISATION DE L'AGRICULTURE

À l'échelle mondiale, le soutien à l'alimentation et à l'agriculture a atteint près de 630 milliards d'USD par an en moyenne sur la période 2013-2018³. La plus grande partie de cette aide cible les producteurs agricoles au niveau individuel, au moyen de politiques visant les échanges et le marché ou au moyen de subventions principalement liées à la production (soutien aux prix de certains produits, par exemple) ou à certains facteurs de production variables (engrais dans certains pays). Ce soutien peut influer de différentes manières sur l'intérêt économique de l'automatisation. Il peut ainsi avoir une incidence sur les denrées de base produites: le soutien à l'agriculture est en effet largement axé sur les féculents dans les pays à faible revenu et les pays à revenu intermédiaire de la tranche inférieure, et sur les produits laitiers et les autres aliments riches en protéines dans les pays à revenu élevé et dans les pays à revenu intermédiaire de la tranche supérieure. Ces produits déterminent ensuite les options en matière de technologies d'automatisation, lesquelles se prêteront à certaines productions mais pas à d'autres. À l'échelle mondiale, environ un tiers du soutien total est octroyé sous la forme de mesures d'incitation par les prix pour certains produits ou groupes de produits.

De la même manière, l'adoption de l'automatisation peut dépendre de l'appui apporté aux facteurs de production, et en particulier des mesures d'incitation qui favorisent l'accumulation de capital. L'octroi de crédits subventionnés aux producteurs agricoles avantagera les

technologies d'automatisation à forte intensité de capital. Le caractère inclusif du processus d'automatisation dépendra des bénéficiaires de ce soutien – grands ou petits producteurs. Environ un dixième de l'aide apportée aux agriculteurs à titre individuel dans le monde repose sur les facteurs de production.

Le soutien lié à la production – fondé sur les prix ou sur les facteurs de production – fausse les incitations et peut ainsi devenir contre-productif, en favorisant de manière non intentionnelle certains producteurs par rapport à d'autres. Le caractère inclusif peut être renforcé par des mesures d'appui spécifiques, mais ce n'est généralement pas la logique qui les sous-tend.

Le soutien apporté aux services d'intérêt général cible l'alimentation et l'agriculture globalement et n'est pas directement lié à la production, à des producteurs en particulier ni à des facteurs de production spécifiques. Il comprend l'aide aux activités de recherche-développement agricole et les services de transfert de connaissances (formation et assistance technique, par exemple), ainsi que le développement et l'entretien des infrastructures (amélioration des routes rurales, des systèmes d'irrigation, des infrastructures de stockage, de la connectivité, entre autres). Ce type de soutien est important pour faciliter le recours à l'automatisation, et présente l'avantage de ne pas s'accompagner d'incitations qui faussent les marchés et de ne pas favoriser certains acteurs par rapport à d'autres.

► Politiques mises en place pour veiller à ce que l'automatisation contribue à des systèmes agroalimentaires durables et résilients.

L'objectif prioritaire de ces mesures est d'encourager les producteurs agricoles à utiliser des technologies d'automatisation qui permettent, entre autres, de conserver les ressources naturelles, d'appuyer la durabilité environnementale et de renforcer la résilience.

► Politiques visant à favoriser un processus inclusif d'automatisation, au service de tous. Ces mesures complètent celles des trois autres catégories et visent à ce que tous les acteurs – notamment les groupes marginalisés, comme les femmes, les petits producteurs et les jeunes – puissent bénéficier de l'automatisation de l'agriculture, et à remédier aux effets potentiellement

préjudiciables sur les revenus et les moyens de subsistance.

Un domaine très important en matière d'action publique est celui de l'appui aux services d'intérêt général. Cet appui public n'est pas directement lié à la production agricole ni à l'utilisation d'intrants (voir l'[encadré 25](#), page 92). Il est essentiel pour créer un environnement propice aux activités commerciales dans l'agriculture et dans les systèmes agroalimentaires de manière plus générale. Il ne fausse pas les incitations, mais permet aux producteurs agricoles, à leurs fournisseurs d'intrants et de services et aux autres parties concernées de créer des entreprises florissantes, de prendre des décisions en connaissance de cause en matière d'automatisation et de stimuler l'innovation. Malheureusement, un

sixième seulement de l'appui total à l'alimentation et l'agriculture (111 milliards d'USD environ) relève de l'appui aux services d'intérêt général³. C'est là où il est le plus nécessaire qu'il est le plus faible, c'est-à-dire dans les pays où l'agriculture reste l'un des secteurs clés pour l'économie, l'emploi et les moyens de subsistance (dans les pays à faible revenu et dans certains pays à revenu intermédiaire de la tranche inférieure)⁴. Pour placer tous les acteurs sur un pied d'égalité en ce qui concerne l'automatisation de l'agriculture, ces pays devront probablement augmenter l'appui qu'ils prêtent aux services d'intérêt général, ce qui nécessitera toutefois un volume important de financement en faveur du développement.

Lors de la conception des politiques et de la planification des investissements, les pouvoirs publics devront également trouver un équilibre entre des objectifs économiques, environnementaux et sociaux qui divergent et parfois s'opposent. La pertinence des politiques, investissements et autres mesures d'action publique qui sont proposés ci-après varie selon le contexte. Chaque État doit établir ses priorités d'action en fonction non seulement des défis qu'il doit relever, mais aussi des capacités et des ressources nationales – notamment financières – qu'il peut mobiliser pour concevoir des politiques et les concrétiser.

Les sections suivantes présentent plus en détail les politiques et les investissements recommandés au regard des quatre catégories mentionnées plus haut.

POLITIQUES GÉNÉRALES VISANT À METTRE EN PLACE UN ENVIRONNEMENT PORTEUR

À l'échelle mondiale, la demande de technologies destinées à remplacer la main-d'œuvre et à améliorer la précision des tâches agricoles a joué un rôle essentiel dans la mécanisation par le passé, et est actuellement l'un des principaux moteurs de l'automatisation numérique et de la robotique. Par des politiques, une législation

et des investissements généraux en faveur du développement agricole, les pouvoirs publics peuvent structurer l'environnement d'appui au profit des parties intéressées – des producteurs agricoles aux fabricants, en passant par les prestataires de services et les acteurs de la logistique⁴. Favoriser le développement agricole et investir dans celui-ci – par l'amélioration des infrastructures, par exemple – peut notamment contribuer à asseoir l'intérêt économique des technologies d'automatisation numérique. Ce type de politiques et d'investissements joue un rôle essentiel dans la correction des dysfonctionnements du marché et la réduction des coûts de transaction entraînés par les problèmes de connectivité, d'approvisionnement en électricité, de protection des données et d'accès aux services (financement, assurance et éducation, par exemple), et améliore l'efficience économique globale. Les sections ci-après mettent en lumière les domaines d'action importants.

Amélioration des infrastructures de transport

Des infrastructures précaires peuvent faire supporter des coûts de transaction élevés s'agissant d'accéder aux éléments de production et aux intrants et d'atteindre les marchés des produits, ce qui diminue les incitations à investir dans la technologie, notamment dans l'automatisation de l'agriculture. De meilleures infrastructures de transport facilitent l'accès des agriculteurs aux marchés à forte valeur ajoutée, réduisent les coûts de transaction liés aux machines, aux pièces détachées, aux réparations et aux carburants, et favorisent la création de marchés de services (itinérants)⁵. Il est notamment très important d'améliorer le transport en Afrique subsaharienne, où il est généralement de qualité médiocre (voir les chapitres 2 et 3). Cette amélioration a également tout son intérêt dans d'autres pays à faible revenu et pays à revenu intermédiaire où l'utilisation de l'automatisation dans l'agriculture semble limitée.

Investissement dans les infrastructures énergétiques

Aucune technologie d'automatisation ne fonctionne sans énergie. La plupart des machines dépendent des combustibles fossiles (bien que certaines soient électriques), et l'automatisation

numérique nécessite de l'électricité. Même dans les pays où le réseau électrique dessert les zones rurales, l'électricité est généralement disponible uniquement dans les agglomérations. L'accès à l'électricité dans les champs est rare, même dans les pays à revenu élevé. De nombreux pays à faible revenu et pays à revenu intermédiaire dépendent ainsi de la production d'électricité hors réseau pour l'approvisionnement énergétique des zones rurales – à supposer que ces dernières aient effectivement accès à l'électricité. Les politiques qui améliorent l'approvisionnement en électricité (par le développement de l'alimentation électrique hors réseau fondée sur des ressources renouvelables, par exemple) peuvent contribuer à appuyer le secteur manufacturier local, et faciliter l'adoption de l'automatisation numérique et de la mécanisation de l'agriculture (pompes pour l'irrigation ou machines pour la transformation et la conservation, par exemple)^{6, 7}. Les pouvoirs publics souhaiteront peut-être mettre l'accent sur le potentiel des énergies renouvelables en matière de mécanisation électrique tout au long de la chaîne de valeur⁸. Les énergies renouvelables financées par des investissements locaux peuvent en outre amortir, du moins dans une certaine mesure, les chocs dans le secteur de l'énergie et les fluctuations des prix des carburants qui compromettent la rentabilité de l'agriculture.

Amélioration des infrastructures de communication

L'amélioration des infrastructures de communication est particulièrement importante pour augmenter l'adoption des technologies numériques et des technologies d'automatisation. Les problèmes de connectivité sont très répandus dans de nombreux pays à faible revenu et pays à revenu intermédiaire, mais peuvent également toucher certains pays à revenu élevé. Par ailleurs, l'accès à internet est également essentiel pour l'automatisation numérique: il permet de mettre à jour les logiciels, de renforcer les capacités informatiques (grâce à l'informatique dématérialisée) et d'accéder à des données de télédétection ou d'autres bases de données. À l'échelle mondiale, l'accès à internet est souvent rare et coûteux dans les zones rurales, notamment dans les pays à faible revenu et les pays à revenu intermédiaire. Parmi les politiques qui encouragent

le développement des infrastructures numériques rurales, citons les prêts à faible taux d'intérêt aux fournisseurs d'accès à internet opérant en milieu rural et l'appui aux coopératives de communication qui proposent des services de données. En Europe, la connectivité s'est améliorée dans les zones rurales grâce à la mise en œuvre de différentes solutions, notamment des initiatives privées, publiques ou impulsées par les communautés, reposant pour la plupart sur une collaboration entre différentes parties (voir le cas de la Slovénie présenté à l'[encadré 26](#), page 95). Ces exemples montrent l'importance des partenariats public-privé-communauté pour l'amélioration de la connectivité et des infrastructures dans les zones rurales⁹. La législation peut également jouer un rôle: dans certains pays, l'accès à internet est un droit protégé par la loi (en Finlande, par exemple)¹⁰.

Les investissements doivent aussi cibler les infrastructures d'appui connexes, comme les ensembles de données publiques sur les prévisions météorologiques et les calendriers de production agricole et animale. L'initiative multipartite Digital Public Goods Alliance (DPGA), dont la FAO est membre, est un exemple de coopération dans ce domaine. Dans de nombreux secteurs, y compris l'agriculture, elle facilite la découverte, l'élaboration et l'utilisation de biens publics numériques, et l'investissement dans ce domaine.

Amélioration générale des marchés du crédit et des politiques de change

Le recours au crédit est essentiel pour investir dans l'automatisation de l'agriculture et pour financer les technologies agricoles de manière générale. L'accès des petits producteurs, et notamment des femmes, au crédit est généralement limité en raison, entre autres, de l'absence de garanties (titres fonciers, par exemple) et des coûts de transaction élevés¹². Du fait des taux d'intérêt prohibitifs, il leur est souvent impossible d'obtenir des crédits pour financer l'achat de machines^{5, 12} et d'autres technologies d'automatisation. À la différence des semences, des engrains et des pesticides, les technologies d'automatisation sont onéreuses, et leurs coûts s'étalent sur plusieurs années. Les politiques de taux d'intérêt peuvent influer fortement sur le rythme de l'automatisation, comme on a pu le voir dans différents pays asiatiques^{6, 13}. Les politiques de change peuvent

ENCADRÉ 26 RÉSEAU À HAUT DÉBIT OUVERT À KOMEN (SLOVÉNIE)

En Slovénie, 50 pour cent environ de la population – près d'un million de personnes – vivent dans des zones rurales qui comptent en moyenne 30 habitants au kilomètre carré. Komen, municipalité de la région de Carst (ouest de la Slovénie) où la densité de population est faible et continue de diminuer, a reçu des fonds de l'Union européenne pour créer un réseau à haut débit ouvert. Un partenariat public-privé s'est saisi de cette occasion de réduire le fossé numérique en déployant rapidement des infrastructures, et a obtenu des taux de pénétration élevés. L'accent tout particulier mis sur la durabilité à long terme et les dépenses d'exploitation a constitué un facteur clé de la réussite globale de ce projet.

Komen comprend près de 1 340 ménages regroupés en 35 villages, sur une superficie totale de 103 kilomètres carrés. Ses terrains rocheux et difficiles et sa faible population en faisaient une zone non viable pour les

prestataires de services commerciaux compte tenu des coûts importants et des rendements minimes. La municipalité a élaboré le projet avec l'aide d'un partenaire privé.

Les travaux ont été réalisés rapidement, dans des délais très courts. Les autorités locales ont collaboré activement avec le partenaire privé; elles ont aidé à résoudre les problèmes de permis, et la municipalité a pu délivrer rapidement les documents nécessaires – ce qui s'est avéré essentiel pour respecter le calendrier des travaux. Les activités de communication et de sensibilisation menées auprès de tous les citoyens de la région de Carst ont été très efficaces et ont permis d'entretenir de bonnes relations avec la population. Cette coopération étroite entre les partenaires durant la phase de déploiement s'est rapidement traduite par des taux de pénétration élevés.

SOURCE: Commission européenne, 2020¹¹.

aussi influer sur l'automatisation du fait de leur incidence sur les coûts d'importation des machines, des pièces détachées et des carburants^{5, 13}. Garantir des taux d'intérêt abordables en matière de crédit ainsi que des taux de change stables est essentiel pour favoriser les investissements à long terme dans la plupart des technologies d'automatisation.

Mise en place de politiques et d'une législation nationales transparentes en matière de données

Les technologies d'automatisation numérique reposent souvent sur la collecte de quantités considérables de données relatives à la production végétale et animale, à l'aquaculture et aux activités forestières. Ces données peuvent comprendre des informations protégées, ce qui pose des problèmes de respect de la confidentialité aux producteurs agricoles. Les données qui ne sont pas protégées par des lois sur la confidentialité peuvent avoir une valeur marchande élevée, et des cadres juridiques pourront être nécessaires pour définir clairement les bénéficiaires de l'utilisation de ces données. Une législation transparente sur la protection, le partage et la confidentialité des données est un

facteur particulièrement propice à l'automatisation numérique, car elle permet de renforcer la confiance des agriculteurs. Il faut en particulier des règles claires concernant la propriété et le contrôle des données. Le «respect de la vie privée dès la conception», c'est-à-dire l'intégration de la protection des données dans la conception des technologies, est une notion qu'il sera utile d'envisager.

Il est également nécessaire de favoriser un passage au numérique à la fois progressif et responsable dans le secteur agricole, notamment en développant et en appuyant les infrastructures nationales de données. L'interopérabilité (qui se caractérise par une communication précise et fiable entre machines) est essentielle au partage des données, et doit être définie sur le plan technique et être encadrée sur le plan juridique. L'interopérabilité juridique définit le cadre réglementaire des échanges de données, tout en protégeant des aspects tels que la confidentialité.

Une autre question connexe est celle des capacités institutionnelles et politiques en matière de transformation numérique et d'automatisation. On sait d'expérience que, dans les pays à faible

revenu et les pays à revenu intermédiaire, de puissantes entreprises privées du secteur technologique devancent souvent la mise en place d'un système de gouvernance dans ce domaine, ce qui peut avoir des conséquences néfastes. On parle dans ce cas de colonialisme numérique^{14, 15}, système dans lequel de grandes entreprises concentrent le pouvoir et l'influence, par exemple au moyen de logiciels propriétaires, pour récupérer des données auprès de leurs utilisateurs et en tirer des bénéfices. La plupart des pays à faible revenu et des pays à revenu intermédiaire ne sont pas en mesure de développer un secteur numérique compétitif avec leurs propres ressources. Toutefois, il est important de renforcer les capacités en matière de gouvernance nationale et régionale pour pouvoir au moins orienter les technologies d'automatisation, plutôt que de laisser s'opérer le processus inverse. Il est également important de mettre en place des coopérations pour relever les défis liés aux données, à l'instar de l'initiative DPGA, qui regroupe des partenaires très divers aux fins de la diffusion de biens publics numériques. En outre, ces initiatives mettent en lumière les possibilités offertes par la communication numérique en matière de partage d'informations sur les technologies d'automatisation et de sensibilisation à leur potentiel.

POLITIQUES, LÉGISLATION ET INVESTISSEMENTS CIBLANT L'AGRICULTURE

Les décideurs publics doivent, au-delà des politiques, de la législation et des investissements d'ordre général, viser le secteur agricole afin de promouvoir plus directement l'automatisation. Les pouvoirs publics ont à leur disposition un éventail de politiques, de mesures législatives, d'investissements et d'autres interventions pour cibler le secteur, et en particulier les petits producteurs, en vue de favoriser l'adoption des technologies d'automatisation. Il s'agit, entre autres, des politiques foncières, des investissements dans le renforcement des capacités, de la législation sur l'assurance qualité, de la recherche appliquée et des financements ciblés. L'ordre de priorité de ces différents instruments dépend largement du contexte, et notamment

du niveau de développement global du pays ou de la région ainsi que des caractéristiques agroclimatiques et topographiques de l'agriculture. Des stratégies nationales en matière d'automatisation de l'agriculture sont nécessaires pour orienter des actions, des politiques et des investissements plus spécifiques. Elles sont essentielles dans les domaines où l'automatisation est inexistante ou encore à ses prémices. Ce type de stratégies nationales doit reposer sur des enquêtes et des études de terrain qui tiennent compte de l'expérience des chercheurs, des producteurs agricoles, des prestataires de services et des fabricants. L'adoption de machines et de matériel numérique spécifiques doit résulter des conditions dans lesquelles les producteurs travaillent ainsi que de leurs besoins, qui varient d'un pays à l'autre et à l'intérieur d'un même pays. En Afrique, où l'automatisation de l'agriculture est encore limitée, les pouvoirs publics sont convenus d'accélérer son adoption, conscients des avantages de la révolution numérique (voir l'[encadré 27](#), page 97).

Les sections suivantes présentent les politiques, les investissements et la législation sur lesquels les pouvoirs publics peuvent s'appuyer, en fonction de la situation et des besoins des producteurs, pour exploiter le potentiel des technologies d'automatisation et établir l'intérêt économique de celles-ci pour un éventail de producteurs aussi large que possible.

Amélioration de l'accès aux technologies d'automatisation, en particulier pour les petits producteurs

Comme indiqué plus haut, le fonctionnement des marchés du crédit a des incidences notables sur l'accès aux financements qui permettent d'utiliser des technologies coûteuses telles que l'automatisation. Les agriculteurs peuvent puiser dans leur épargne pour acheter des machines, mais s'ils n'ont pas suffisamment de ressources, ils doivent recourir au crédit. Les pouvoirs publics peuvent influer sur le processus par des mesures relatives au crédit qui visent directement l'automatisation de l'agriculture. Les prêts à l'investissement sont la solution la plus couramment utilisée pour financer l'automatisation, mais ils peuvent être limités par le manque de garanties ou être très coûteux. Les différentes solutions possibles sont

ENCADRÉ 27 STRATÉGIES NATIONALES EN FAVEUR D'UNE ADOPTION PLUS LARGE DES OUTILS NUMÉRIQUES DANS LE SECTEUR AGRICOLE AFRICAIN

L'Union africaine (UA) et plusieurs États africains ont entrepris d'accélérer les mesures visant à mettre en place un environnement propice à l'utilisation efficace des outils numériques pour transformer les systèmes agroalimentaires. L'une des principales mesures prises récemment est la Stratégie en matière d'agriculture numérique de l'UA, placée sous la direction du Département de l'économie rurale et de l'agriculture de la Commission de l'Union africaine. Elle fait suite à la Stratégie de transformation numérique de l'Afrique (2020-2030), qui concerne notamment l'agriculture¹⁶. La Stratégie en matière d'agriculture numérique, qui n'a pas encore été officiellement adoptée, encourage les pouvoirs publics à mieux tirer profit de la puissance des innovations numériques pour stimuler la performance, l'inclusion et la durabilité de l'agriculture et d'autres

secteurs ruraux, en appelant à mettre en place des stratégies en faveur de l'agriculture numérique et à utiliser la transformation numérique pour renforcer les services de mécanisation.

Par ailleurs, Smart Africa, un organisme intergouvernemental créé par des chefs d'État et de gouvernement africains, a élaboré un schéma directeur des technologies agricoles pour l'Afrique, AgriTech Blueprint for Africa¹⁷; quelques années auparavant, la FAO et l'Union internationale des télécommunications avaient proposé aux pays un guide pour l'élaboration de stratégies en matière d'agriculture numérique¹⁸. En Afrique, de nombreux ministères de l'agriculture tirent parti de ces différentes initiatives pour élaborer de nouvelles politiques qui leur permettront de mieux exploiter les possibilités offertes par la transformation numérique.

les garanties contractuelles, les dispositifs de garantie des emprunts, les groupes de caution solidaire et les systèmes de location avec option d'achat. Dans le cas des systèmes de location avec option d'achat, différentes mesures d'incitation peuvent être utilisées, notamment des subventions de contrepartie ou des subventions ciblées (qui ne faussent pas les marchés)²⁶. Ces outils sont utilisés dans certains pays asiatiques pour renforcer l'accès des agriculteurs au crédit¹³. Les autres pistes comprennent le financement des chaînes de valeur, le crédit coopératif (en Inde, par exemple²⁷) et les produits d'épargne et d'assurance, notamment pour le plus gros matériel²⁶. Parallèlement aux producteurs et aux prestataires de services, les fabricants locaux et les ateliers d'entretien et de réparation peuvent également avoir besoin de recourir à l'emprunt^{5, 22}.

Les éléments fournis par les 27 études de cas examinées au chapitre 3 montrent que, lorsque les producteurs agricoles – notamment les petits exploitants – ont des capacités financières insuffisantes, les prestataires de services peuvent se tourner vers d'autres modèles d'activité pour rendre leurs solutions rentables. Dans certains cas, les services sont liés à un crédit, à une assurance ou à des contrats agricoles, tels que des accords d'agriculture contractuelle qui garantissent l'achat

de la production et un prix fixe pour les matières premières. Ces dispositifs contribuent à réduire les risques liés à la production, augmentent la capacité d'investissement et débouchent sur des rendements plus élevés et des produits de meilleure qualité. En l'absence de législation sur l'agriculture contractuelle ou les chaînes d'approvisionnement qui renforce la capacité contractuelle des petits producteurs, ces modèles d'activité peuvent engendrer des verrouillages technologiques (obliger les agriculteurs à utiliser des services spécifiques) ou des liens de dépendance non souhaités et des rapports de force déséquilibrés qui ont des conséquences socioéconomiques indésirables. Ces solutions peuvent en outre contraindre les agriculteurs, les acheteurs et les prestataires de services à adopter les comportements et les pratiques agronomiques attendus par les acteurs qui détiennent une puissance plus importante sur les marchés. Par ailleurs, elles font entrer les agriculteurs dans un système privé fermé²⁵. Les services structurés plus organisés aident à réduire les risques associés à la production, mais peuvent également restreindre les options qui s'offrent aux agriculteurs. Il faut une législation qui protège les petits producteurs des contrats coercitifs.

Un autre domaine dans lequel les pouvoirs

publics peuvent intervenir pour faciliter l'accès au financement est celui des régimes fonciers. La précarité foncière dissuade les producteurs agricoles d'investir dans des technologies agricoles – et dans leurs exploitations de manière générale – du fait de la grande incertitude qu'elle suscite quant à la possibilité de tirer un jour parti des investissements réalisés. Elle restreint l'accès au crédit, car les agriculteurs ne peuvent pas utiliser leurs titres de propriété en tant que garantie. Elle est particulièrement problématique si l'investissement en question est d'un montant élevé et doit être remboursé sur plusieurs années (une machine motorisée, par exemple). Une plus grande sécurité foncière facilite l'accès au crédit, notamment pour les petits producteurs, et incite à investir dans des machines. Au Myanmar, par exemple, les réformes des régimes fonciers ont considérablement augmenté la probabilité d'obtenir un prêt bancaire pour l'achat de machines agricoles²³. Les agriculteurs peuvent utiliser les fonds empruntés pour acheter des intrants, comme des engrains ou des semences améliorées – les synergies entre ces intrants et le recours à des machines et du matériel numérique contribuent à augmenter la productivité et l'efficience d'utilisation des ressources. Le crédit à l'automatisation doit être à l'initiative des acteurs des marchés et obéir à une logique de viabilité commerciale. Les initiatives publiques visant à financer directement l'automatisation se heurtent souvent à des problèmes majeurs de gouvernance^{26, 28}.

Les politiques commerciales peuvent favoriser l'accès aux technologies d'automatisation de l'agriculture. Les droits élevés à l'importation, les formalités douanières complexes et les barrières non tarifaires, telles que les mesures sanitaires, peuvent entraver l'achat de matériel d'automatisation. En Asie, la suppression des restrictions relatives aux importations a grandement facilité la mécanisation¹³; de nombreux pays d'Afrique ont exonéré les machines de droits à l'importation, mais d'autres ont conservé certains droits en place^{12, 13}. Dans d'autres pays encore, les machines sont exonérées la plupart du temps de droits à l'importation, mais de nombreuses pièces détachées font l'objet de droits de douane élevés, ce qui compromet la pérennité de la mécanisation. Il est possible de favoriser une baisse des coûts de transaction des technologies d'automatisation

et de stimuler l'adoption de celles-ci en réduisant les droits de douane sur les machines, le matériel numérique et les pièces détachées, et en allégeant les formalités douanières. Les pouvoirs publics doivent s'attacher en priorité à exonérer de droits et de taxes les machines et le matériel qui sont les plus adaptés aux conditions locales et qui permettent de relever les principaux défis au regard des objectifs nationaux qui concernent l'amélioration de la productivité et le renforcement de la durabilité et de la résilience.

Renforcement des connaissances et des compétences

Les fabricants, les propriétaires, les opérateurs et les techniciens des machines, ainsi que les producteurs agricoles, doivent tous acquérir les connaissances et les compétences nécessaires pour concevoir, gérer, utiliser, entretenir et réparer le matériel d'automatisation agricole. L'absence de ces connaissances spécialisées peut compromettre la rentabilité et la durabilité des technologies d'automatisation; or souvent, leur acquisition n'est guère favorisée⁵. C'est notamment le cas au Ghana, où 86 pour cent des tracteurs subissent des pannes fréquentes et de longue durée en raison d'un mauvais entretien et d'un manque d'opérateurs et de mécaniciens qualifiés¹⁹. Les initiatives publiques visant à renforcer les connaissances et les compétences jouent un rôle clé depuis le début du processus de mécanisation dans le monde entier²⁰. Les centres de formation professionnelle, qui associent théorie et travaux pratiques, peuvent être particulièrement utiles pour apporter les connaissances et les compétences nécessaires. La formation des personnes qui supervisent l'automatisation numérique est également essentielle. En Australie, le code d'usages élaboré à l'intention des utilisateurs de machines dotées de fonctions autonomes met l'accent sur la marche à suivre pour alerter les responsables et signaler les incidents²¹.

Le manque de compétences numériques et de compétences en matière de supervision, d'entretien et de réparation des technologies d'automatisation constitue un autre obstacle majeur à l'automatisation numérique dans le monde entier, en particulier pour les petits producteurs (voir le chapitre 3). Il est essentiel d'accroître le capital humain, et un programme de renforcement

des capacités est nécessaire, parallèlement à des investissements pour mettre à niveau les compétences numériques. Ce programme doit cibler non seulement les producteurs agricoles, mais aussi d'autres acteurs, à tous les stades des chaînes de valeur, de la fourniture d'intrants et de services aux activités menées plus en aval (transformation et commercialisation, par exemple). Ce type de programme est indispensable pour permettre aux travailleurs de passer d'emplois peu qualifiés à des emplois très qualifiés, et il est particulièrement important pour les jeunes – souvent considérés comme les principaux moteurs de la transition de l'agriculture familiale vers l'automatisation, car ils ont tendance à adhérer plus facilement que leurs parents à ces technologies. Les politiques et les investissements publics doivent par conséquent cibler les jeunes travailleurs ruraux.

Investissement dans les activités de recherche-développement appliquées

Les technologies d'automatisation sont en grande partie le fruit d'activités de recherche-développement privées. Les pouvoirs publics peuvent apporter un appui général par l'intermédiaire des institutions compétentes et mener ou financer des recherches portant sur des solutions techniques, agronomiques et économiques pour favoriser une automatisation durable et adaptée aux conditions locales.

Le programme de recherche doit également comprendre des études sur l'impact de solutions d'agriculture de précision spécifiques en matière de rentabilité, de durabilité environnementale (notamment les empreintes carbone, hydrique et énergétique), de sécurité au travail et d'inclusion des femmes, des jeunes et des autres groupes vulnérables. Un autre domaine important concerne les différents types d'agriculture pratiqués dans des environnements protégés ou contrôlés (agriculture verticale ou serriculture, par exemple), qui ne sont pas toujours bien perçus par les consommateurs ni les décideurs publics. Il est également essentiel d'élaborer et de valider des modèles agronomiques spécifiques afin de mieux comprendre la réaction des cultures à certaines technologies d'agriculture de précision, comme la technologie à taux variable (TTV). Les pouvoirs publics peuvent appuyer les systèmes nationaux de recherche et d'innovation – privés ou publics – en

vue d'adapter et de mettre à niveau les machines et le matériel numérique existants en fonction des besoins des producteurs, à mesure que les systèmes agricoles évoluent.

Des recherches doivent être menées sur l'utilisation des mégadonnées et des analyses agricoles en tant que bien public permettant d'offrir des services consultatifs gratuits aux petits producteurs. Il est également recommandé de se tourner vers la recherche appliquée pour étudier l'adaptation des solutions automatisées selon les régions, les pays, les conditions agroécologiques, les orientations en matière de production et les types d'exploitation (voir l'[encadré 28](#)). Des idées qui ont fonctionné à certains endroits ne seront peut-être pas envisageables ailleurs. Pour encourager le développement d'une agriculture autonome présentant les caractéristiques requises, il faut des cadres de recherche-développement qui réunissent innovateurs et agriculteurs pour concevoir des solutions et les adapter à l'échelle adéquate. On peut citer comme exemple le programme Science and Technology into Practice de l'organisme Innovate UK, au Royaume-Uni. Ce programme est financé par des fonds publics et exige des innovateurs qu'ils collaborent avec les utilisateurs finaux tout au long des projets, organisent des démonstrations, recueillent les observations des agriculteurs et y donnent suite.

Le dernier domaine de recherche est celui de l'évolution des rapports de force dans les pays à faible revenu et les pays à revenu intermédiaire du fait de la dépendance croissante à l'égard des technologies de transformation numérique et d'automatisation. Il est nécessaire de comprendre les intérêts commerciaux des grands acteurs des secteurs de l'élaboration de technologies et de la prestation de services technologiques, et les répercussions qu'ils peuvent avoir sur les petits producteurs, notamment en ce qui concerne la concentration du pouvoir, la redistribution des terres et des richesses, et la perte ou la création de connaissances et de compétences, ainsi que les incidences sur la main-d'œuvre et l'emploi.

Assurance qualité et élaboration de normes de sécurité

Une insuffisance de l'assurance qualité (essais et certification des machines, du matériel et des

ENCADRÉ 28 ADAPTATION DE L'AUTOMATISATION NUMÉRIQUE À DIFFÉRENTS CONTEXTES: ÉLÉMENTS FACTUELS ISSUS DE 27 ÉTUDES DE CAS

Les 27 études de cas exposées dans le présent rapport montrent comment adapter l'automatisation numérique aux besoins locaux selon le système de production, le pays et le type d'exploitation. S'agissant de la production végétale, par exemple, on dispose d'éléments indiquant la mise au point de petites machines automatisées dans des pays à faible revenu – cueilleuse de thé en Ouganda, par exemple, ou engins de récolte automatisée du coton (tâche qu'il est difficile d'automatiser, comme cela a été mentionné au chapitre 3) en Afrique de l'Ouest et en Inde. Ces technologies sont actuellement à la disposition des petits et moyens producteurs, et leur utilisation devrait se répandre (par l'intermédiaire d'organisations de producteurs dans le cadre de centres de recrutement).

Dans l'élevage de précision, les modèles d'activité et les modèles de services relatifs aux robots de traite offrent des enseignements précieux sur l'application des technologies

aux différents types d'exploitations. Les robots de traite sont principalement utilisés dans des exploitations de taille moyenne ou grande dans les pays à revenu élevé, mais d'autres technologies sont adaptées aux petites exploitations en intérieur ainsi qu'aux systèmes fondés sur le pâturage et la libre circulation des vaches dans les pays à revenu intermédiaire.

Enfin, en ce qui concerne l'agriculture en milieu contrôlé, on constate que les serres sont de plus en plus courantes dans les pays à revenu élevé et les pays à revenu intermédiaire où l'on trouve un certain niveau d'automatisation (climatisation, par exemple). On voit ces solutions apparaître dans le monde entier, de l'Arabie saoudite au Chili, en passant notamment par le Mexique. L'agriculture en milieu contrôlé, et en particulier les serres, offre des possibilités importantes d'association de la robotique à l'IA.

SOURCE: Ceccarelli *et al.*, 2022²⁵.

pièces détachées) peut dissuader de recourir à diverses technologies d'automatisation de l'agriculture, car elle accroît l'incertitude et les risques associés à leur achat¹³. Au Ghana, par exemple, un décortiqueur de maïs à atteler à un tracteur est moins cher lorsqu'il est produit localement que lorsqu'il est importé, mais sa qualité est difficile à évaluer avant l'achat en raison de l'absence de normes et de systèmes de certification. De nombreux agriculteurs optent donc pour des marques étrangères⁵. Il peut être matériellement impossible, pour des fabricants de petite ou moyenne envergure qui ne disposent pas de chaînes de montage, de réaliser des essais; de plus, ceux-ci ne sont pas incités à le faire si les marchés locaux n'exigent pas de certification officielle. Cela étant, l'État, les marchés et des organisations du secteur associatif peuvent procéder à des essais afin de réduire concrètement l'asymétrie de l'information sans pour autant augmenter notablement le coût des machines. L'existence d'un service public de validation qui évalue le rapport coût-efficience, l'efficacité et la facilité d'utilisation des technologies peut favoriser leur adoption. De la même façon, le renforcement des institutions qui définissent les normes peut

stimuler la fabrication et la commercialisation de technologies d'automatisation²².

Les décideurs publics doivent veiller à la sécurité dans le domaine de l'automatisation de l'agriculture au moyen d'un ensemble équilibré de lois et de règlements. Il faut couvrir tous les aspects, positifs comme négatifs, et s'appuyer sur des consultations ouvertes et des échanges avec l'ensemble des parties prenantes, avant et après la mise en place de la réglementation. Au Royaume-Uni, par exemple, les pouvoirs publics ont, pour des questions de sécurité, limité de manière drastique l'utilisation de drones pour l'épandage d'intrants, et ce malgré ses avantages notables pour l'environnement et la sécurité des personnes. Cette législation exige également qu'une personne chargée de la supervision des machines autonomes soit constamment présente sur place pour s'assurer que celles-ci ne causent pas d'accidents. Les analyses ont montré qu'une telle législation réduisait à néant les avantages économiques liés au matériel autonome pour les producteurs de petite taille ou de taille moyenne et ne permettait de réaliser des économies qu'à plus grande échelle, rendant ces technologies rentables

uniquement sur les grandes exploitations²⁴. Dans le cadre d'un processus d'élaboration des politiques transparent et inclusif, ce type de constatations pourrait amener à revoir la stratégie.

Pour garantir la sécurité, les pouvoirs publics doivent mettre en place des cadres transparents. Ces cadres comprennent essentiellement des inspections (pour vérifier le respect des obligations par les utilisateurs), des normes comprenant des instructions, et des mécanismes permettant une autoréglementation, par exemple par des systèmes d'assurance (systèmes volontaires qui établissent des normes de production concernant la sécurité sanitaire des aliments, le bien-être animal et la protection de l'environnement). Les normes peuvent être juridiquement contraignantes ou non. En Australie, un code d'usages régissant l'utilisation de machines autonomes dans le secteur agricole a été adopté²¹. Ce code donne les assurances nécessaires aux agriculteurs pour adopter des solutions autonomes et aux fabricants pour dimensionner ces dernières. Il vise à normaliser l'approche en matière d'automatisation des machines. Il couvre plusieurs domaines, notamment la gestion des risques d'ordre général et la préparation aux situations d'urgence, le transport des véhicules d'un champ à un autre, les obligations d'entretien et de réparation, la gestion des situations d'urgence et les normes et dispositions législatives. Une initiative similaire est actuellement déployée au Royaume-Uni pour les robots, y compris ceux utilisés dans l'agriculture⁹.

Exploitation du potentiel des technologies d'automatisation de l'agriculture à faible coût

Lorsqu'il n'y a pas d'intérêt économique à investir dans de grosses machines, en raison de contraintes financières ou de l'inadéquation de ce matériel aux conditions topographiques locales (terrain accidenté, par exemple) ou à la taille des exploitations (parcelles très petites ou fragmentées, par exemple), les petites machines peuvent apporter des avantages considérables aux cultivateurs, notamment ceux qui possèdent de petites parcelles dans des zones relativement marginales. Ce type de machines et de matériel comprend les tracteurs à deux roues et les motoculteurs, les semoirs à tambour, les plantoirs rotatifs et les désherbeuses mécaniques²⁵.

L'intérêt économique de l'adoption de petites machines a été établi (voir l'[encadré 17](#), page 61). Ces technologies simples peuvent en effet réduire de manière notable la pénibilité du travail, tout en faisant gagner du temps et économiser des intrants, et permettent une amélioration de la productivité et un renforcement de la résilience en ajustant au mieux le calendrier des tâches. Elles sont également plus respectueuses de l'environnement, car elles ne nécessitent pas ou presque pas de combustibles fossiles pour fonctionner, et se prêtent pour un grand nombre d'entre elles aux approches agroécologiques, telles que les systèmes de rizipisciculture et les pratiques d'inondation et d'assèchement alternés (technologies qui permettent de réduire la quantité d'eau utilisée dans les rizières sans compromettre le rendement). Dans certains contextes, elles permettent une meilleure inclusion des femmes, lesquelles peuvent être tenues à l'écart de la mécanisation en raison des normes culturelles et des traditions^{29, 30}.

Les technologies telles que la réponse vocale interactive (RVI), les données de services supplémentaires non structurées (USSD) et le service de messages courts (SMS), parallèlement aux centres d'appel, sont disponibles dans la plupart des pays à faible revenu et des pays à revenu intermédiaire, et constituent ainsi les solutions les plus courantes – sinon les seules – pour les petits producteurs, en particulier en Afrique subsaharienne. Elles donnent accès à des offres groupées de services, car les agriculteurs peuvent les utiliser avec l'appareil de leur choix et quelles que soient leurs compétences numériques, sont peu onéreuses et nécessitent peu d'entretien. Les offres groupées, qui associent souvent divers services secondaires (fourniture d'informations sur les marchés et les conditions climatiques et météorologiques et de données de suivi des exploitations en temps réel, par exemple), permettent en outre de relier les acteurs entre eux. Du fait de leur accessibilité élevée, ces technologies peuvent réduire la fracture numérique. Elles sont moins sensibles aux dysfonctionnements des infrastructures, car elles requièrent peu d'énergie et des infrastructures de données plus simples que les technologies évoluées axées sur les données, et offrent une rentabilité maximale des investissements. Cependant, il est important que les solutions proposées répondent aux besoins locaux tout en offrant des conseils fiables²⁵.

POLITIQUES MISES EN PLACE POUR QUE L'AUTOMATISATION DE L'AGRICULTURE CONTRIBUE À DES SYSTÈMES AGROALIMENTAIRES DURABLES ET RÉSILIENTS

Dans le présent chapitre, nous avons jusqu'ici examiné un ensemble de mesures destinées à lever les obstacles à l'adoption de l'automatisation agricole, en axant le propos sur les besoins des petits producteurs. Cette section est consacrée à ce qu'il faut faire pour veiller à ce que l'automatisation de l'agriculture contribue à des systèmes agroalimentaires durables et résilients et n'aggrave pas la dégradation de l'environnement. Comme indiqué plus haut, la mécanisation motorisée a apporté de nombreux avantages, notamment des gains de productivité, et a permis entre autres de renforcer la sécurité alimentaire, de réduire la pauvreté et d'améliorer la santé et le bien-être. Toutefois, ces progrès ont souvent été obtenus au détriment de la durabilité environnementale, avec des conséquences telles que l'appauvrissement de la biodiversité, la compaction et l'érosion des sols, et la dégradation des ressources en eau. Ces conséquences peuvent être considérablement réduites voire évitées grâce à des politiques, une législation et des investissements appropriés et à l'utilisation de technologies plus évoluées telles que les solutions d'automatisation numérique. Les sections ci-après portent sur les domaines d'action importants.

Protection contre l'appauvrissement de la biodiversité, la dégradation des terres et les émissions de dioxyde de carbone

La mécanisation motorisée peut conduire à une expansion des terres agricoles au détriment des forêts et de la savane, et contribuer ainsi au changement climatique et à l'appauvrissement de la biodiversité (voir le chapitre 3). Ces conséquences négatives peuvent être limitées – au moins partiellement – voire évitées au moyen

de la planification et du contrôle de l'utilisation des terres, grâce à des technologies d'automatisation numérique qui ciblent les terres les plus intéressantes du point de vue de l'atténuation du changement climatique et de la conservation de la biodiversité. Les investissements doivent être conformes aux Principes pour un investissement responsable dans l'agriculture et les systèmes alimentaires, adoptés par le Comité de la sécurité alimentaire mondiale³¹.

Des stratégies de culture durable telles que les systèmes associant production végétale, élevage et exploitation forestière, qui ont moins d'incidences sur le climat et qui permettent une plus grande biodiversité, peuvent également jouer un rôle dans l'atténuation des effets préjudiciables sur l'environnement³². L'initiative Justdiggit (voir l'annexe 1), qui fait l'objet de l'une des 27 études de cas examinées au chapitre 3, œuvre en faveur d'une restauration à grande échelle des paysages en Afrique, par exemple en transformant des terrains de parcours dégradés en terres vertes et fertiles. Ce processus de restauration des paysages est mis en œuvre grâce à la récupération de l'eau de pluie, à la gestion des pâturages et à la taille des arbres. Il bénéficie de l'assistance de capteurs de télédétection qui surveillent la croissance des arbres et calculent les quantités de carbone stocké³³. Dans certains pays, les pouvoirs publics ont réussi à limiter l'expansion des terres agricoles grâce à la planification et au contrôle de l'utilisation des ressources foncières. De telles initiatives et pratiques doivent être encouragées et reproduites ailleurs lorsque cela est possible. Dans d'autres pays, les interventions des pouvoirs publics ont contribué à des effets indésirables, par exemple lorsqu'elles ont favorisé des systèmes de culture en blocs ou des investissements fonciers à grande échelle. Il convient d'arrêter les interventions de ce type encore en place, et d'éviter de les reproduire ailleurs.

L'association de plusieurs technologies peut permettre de réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) et d'augmenter le stockage du carbone dans le sol; l'agriculture peut ainsi avoir des émissions nettes négatives tout en conservant une productivité élevée. On estime pouvoir réduire de 71 pour cent les émissions de GES au cours des 15 prochaines années dans les cultures en lignes, en exploitant les synergies entre l'automatisation

numérique, les ressources génétiques végétales et microbiennes, et l'électrification. D'après les estimations, les pratiques actuelles de cultures en lignes sont responsables de quelque 5 pour cent des émissions totales de GES aux États-Unis d'Amérique et dans l'Union européenne. Les nouveaux marchés de services écosystémiques, volontaires ou réglementaires, peuvent inciter à progresser dans cette transition et orienter les investissements privés et publics vers le développement de technologies³⁴.

Des machines plus légères peuvent limiter la compaction et l'érosion des sols, souvent causées par les grosses machines motorisées. Par ailleurs, l'agriculture de conservation avec rotation des cultures permet une réduction de l'érosion des sols qui peut aller jusqu'à 99 pour cent grâce à l'utilisation de décompacteurs ou de machines de plantation directe, et favorise ainsi une perturbation minimale du sol (labour zéro), le maintien d'une couverture permanente et une diversification des espèces végétales³⁵. Elle semble être la voie à suivre à l'échelle mondiale, notamment dans les pays à faible revenu et les pays à revenu intermédiaire²². Des données probantes montrent que l'association de la mécanisation motorisée et de la réduction du labour peut déboucher sur des synergies entre productivité et santé des sols³⁶. Cependant, pour surmonter certaines difficultés associées à cette pratique, il faut élaborer des solutions adaptées aux besoins locaux³⁷. La recherche technique et agronomique appliquée peut porter sur l'étude des solutions de mécanisation les mieux adaptées aux conditions agroécologiques locales. On constate, par exemple, une augmentation des recherches sur l'épandage d'intrants par drone dans les petites exploitations – une technologie qui présente de nombreux avantages potentiels: réduction de l'exposition aux pesticides et application possible dans les champs qui sont trop humides ou difficiles d'accès pour des machines, ainsi qu'à des cultures sur pied (évitement des dommages causés aux cultures par le passage des machines).

Incitations à utiliser les technologies d'automatisation connues pour être respectueuses de l'environnement

Une mécanisation bien dimensionnée, dans laquelle les machines sont adaptées à la taille des

exploitations (et non le contraire)³⁸, peut contribuer à réduire les effets négatifs sur l'environnement. Les petits tracteurs à deux ou quatre roues, par exemple, sont plus faciles à manœuvrer que les gros autour des éléments du paysage et des arbres qui se trouvent sur les exploitations. Les petits robots en essaim – en phase expérimentale actuellement – peuvent procurer des avantages environnementaux, notamment réduire la compaction du sol tout en offrant des rendements plus élevés. La plupart des robots agricoles actuellement à l'étude n'ont que très peu de capacité décisionnelle mais, à long terme, l'intelligence artificielle (IA) pourra les mettre au service de la durabilité environnementale. Des robots en essaim dotés de l'IA, par exemple, peuvent éviter des obstacles dans les champs et cibler précisément les organismes nuisibles et les plantes adventices, ce qui permet de réduire l'emploi de produits chimiques et de préserver la biodiversité.

L'ajustement de ces technologies à la bonne échelle est un défi majeur. Il est cependant nécessaire si l'on veut optimiser leur potentiel en matière de réduction des effets préjudiciables sur l'environnement et d'augmentation durable de la productivité (voir le chapitre 3). Les coûts d'achat et les dépenses d'exploitation élevés représentent un obstacle important à cet ajustement, notamment pour les petits producteurs; pour augmenter l'accessibilité économique, il convient de mettre l'accent sur l'amélioration des technologies et les modèles d'activité innovants. Les téléphones portables offrent un bon exemple: leur caractère adaptable les a rendus plus abordables et a ouvert la voie aux smartphones, qui sont de plus en plus utilisés dans l'agriculture de précision.

Les agriculteurs eux-mêmes sont les mieux placés pour déterminer les solutions de mécanisation qui sont adaptées aux conditions agroécologiques locales. Les pouvoirs publics doivent mettre en place un environnement porteur, et diffuser des informations sur les technologies disponibles et la manière de les utiliser pour atteindre plusieurs objectifs, dont la durabilité environnementale. On peut citer comme exemple de ce type d'appui informationnel le catalogue de la mécanisation élaboré par la FAO en collaboration avec le Centre pour le développement des infrastructures et de la mécanisation et l'Association des entrepreneurs du secteur des machines agricoles au Népal.

Ce catalogue comprend des informations simples concernant les différentes machines disponibles sur le marché népalais, et met l'accent sur celles qui tiennent compte de la dimension de genre et celles qui sont adaptées à la production agricole à petite échelle²⁹.

Plusieurs États ont adopté une législation visant à atténuer les incidences négatives des chaînes d'approvisionnement en produits agricoles aux niveaux environnemental et social et obligeant les entreprises à instaurer des systèmes de vérification préalable fondés sur l'analyse des risques³⁹. La Commission européenne a ainsi adopté une proposition de directive sur le devoir de vigilance des entreprises en matière de durabilité. Cette directive vise à favoriser un comportement durable et responsable des entreprises tout au long des chaînes de valeur mondiales. Les entreprises doivent déterminer, prévenir, supprimer ou atténuer les incidences négatives de leurs activités sur les droits humains (travail des enfants et exploitation des travailleurs, par exemple) et sur l'environnement (pollution et appauvrissement de la biodiversité, par exemple). Pour les entreprises, ces nouvelles dispositions apporteront une sécurité juridique et établiront des règles du jeu équitables; pour les consommateurs et les investisseurs, elles offriront une plus grande transparence⁴⁰.

Sensibilisation et amélioration de la communication

L'un des enseignements tirés des 27 études de cas est que les consommateurs ne sont pas encore au fait de l'agriculture de précision ni de son potentiel en matière d'efficience, de durabilité environnementale et de bien-être animal. En effet, si le terme «agriculture à faible niveau d'intrants» (et son association avec la durabilité environnementale) est une notion immédiatement compréhensible pour les consommateurs, l'«agriculture de précision» ne trouve pas encore d'écho chez eux. La communication est la clé. Le fait que les produits issus de l'agriculture verticale, par exemple, ne puissent pas être étiquetés comme «biologiques» dans certains pays empêche de communiquer sur leurs avantages auprès des consommateurs. Les politiques peuvent contribuer à donner un caractère prioritaire à la législation et à la certification relatives à l'agriculture de précision, afin de

faire clairement apparaître ses avantages aux consommateurs ainsi que l'intérêt économique des investissements dans ce secteur (voir le chapitre 3). Pour que l'agriculture de précision apporte autant d'avantages environnementaux que possible, il est essentiel d'instaurer un dialogue d'un bout à l'autre des systèmes agroalimentaires²⁵. La communication numérique peut jouer un rôle essentiel en matière de sensibilisation, de diffusion d'informations et de promotion de l'agriculture de précision.

POLITIQUES VISANT À FAVORISER UNE AUTOMATISATION INCLUSIVE DE L'AGRICULTURE, AU SERVICE DE TOUS

L'un des principaux défis en matière d'automatisation de l'agriculture, étant donné son biais en faveur des exploitations de grande taille, est le risque de laisser pour compte les groupes marginalisés – tels que les femmes, les petits producteurs et les jeunes. Le coût élevé de nombreuses technologies d'automatisation et les compétences qu'elles exigent peuvent aggraver les inégalités et élargir le fossé numérique. L'automatisation peut s'accompagner d'une augmentation du chômage et de pertes d'emplois pour les travailleurs non spécialisés, et peut ainsi non seulement avoir des incidences préjudiciables sur le plan de l'inclusion, mais aussi fausser la perception des avantages qu'elle peut apporter. Les politiques peuvent jouer un rôle fondamental en permettant d'atténuer ou même d'éviter les incidences négatives évoquées ci-dessus et en faisant en sorte que l'automatisation contribue à une transformation inclusive de l'agriculture.

Des innovations techniques et institutionnelles pour réduire le fossé technologique

Les technologies plus récentes, notamment celles liées à la révolution numérique, peuvent rendre l'automatisation indépendante de l'échelle de production et donc plus accessible aux

différents acteurs. Le déploiement de machines de taille peu importante a permis aux petits producteurs d'automatiser de nombreuses tâches agricoles (voir le chapitre 3). Les mécanismes institutionnels, tels que la fourniture de services partagés et la propriété coopérative, facilitées par les technologies numériques, ont favorisé l'utilisation des technologies d'automatisation⁴¹. Il revient aux agriculteurs de choisir les solutions d'automatisation les plus adaptées aux conditions agroécologiques locales; les pouvoirs publics, quant à eux, doivent veiller à ce que tous les acteurs se trouvent sur un pied d'égalité. Ils peuvent aider à créer des marchés de services en améliorant les infrastructures rurales, en mettant en place de bonnes conditions juridiques, en facilitant la circulation transfrontière et en renforçant les connaissances et les compétences des prestataires de services, notamment en organisant des formations en gestion d'entreprise. Les organisations du secteur associatif, telles que les associations de producteurs et les coopératives, peuvent contribuer à réduire le coût des transactions avec les petits producteurs, par exemple en permettant aux agriculteurs de se regrouper⁴². Les outils numériques peuvent résoudre certains des problèmes liés aux marchés de services et réduire les coûts de transaction. Les pouvoirs publics peuvent faciliter l'utilisation de ce type d'outils en renforçant la connectivité ainsi que les compétences numériques et la confiance en ces technologies⁴³.

Mesures visant à faire en sorte que les femmes tirent profit de l'automatisation

L'automatisation peut avoir des impacts positifs comme négatifs sur les femmes, et il est essentiel de tenir compte des besoins de ces dernières pour éviter qu'elle leur soit préjudiciable²⁶. Les femmes ont souvent moins accès aux technologies d'automatisation – en partie parce que leurs parcelles sont plus petites et plus fragmentées, et parce qu'elles ont plus de mal à accéder aux marchés, au crédit et aux services de vulgarisation (voir le chapitre 4). Les politiques, la législation et les investissements qui visent à éliminer ces désavantages (en améliorant les droits fonciers des femmes et l'accès de ces dernières au crédit et aux services de vulgarisation) peuvent contribuer à renforcer leur accès à l'automatisation. Il est important d'utiliser des approches de suivi

fondées sur les droits humains, en recueillant des données ventilées pour mesurer les répercussions sur les moyens de subsistance, les droits et les possibilités des femmes. Les cadres juridiques nationaux doivent en outre prévoir des analyses d'impact de la réglementation tenant compte des questions de genre, et permettre d'élaborer et de budgétiser des mesures visant à éviter, ou du moins à atténuer, diverses incidences sur les femmes. Les cadres juridiques doivent tenir compte des défis spécifiquement liés au genre auxquels les femmes sont confrontées et prévoir des mesures pour les relever. Celles-ci comprennent l'allocation de ressources financières pour étendre l'accès des femmes à l'entrepreneuriat par le crédit, la formation (notamment les compétences numériques) et des mesures conçues pour améliorer leur accès aux marchés des intrants et des produits.

Le faible accès des femmes à la mécanisation est également dû aux normes sociales. Les points de départ possibles pour remédier à ce problème comprennent les campagnes de sensibilisation (exemples de réussite de femmes prestataires de services ou exploitantes) et le soutien aux coopératives ou associations d'appui à la mécanisation créées par des femmes, au sein desquelles ces dernières gèrent collectivement des machines et peuvent renforcer leurs connaissances et leurs compétences et accéder à des financements. Davantage de recherches seront nécessaires pour mieux comprendre comment on peut améliorer l'accès des femmes à la mécanisation. L'automatisation nécessite des fonds importants au démarrage, ce qui a des incidences considérables sur la compétitivité des femmes, étant donné qu'elles ont souvent des entreprises de petite taille et une faible capacité d'investissement.

Les femmes peuvent en outre avoir plus de mal à faire part de leurs besoins en raison de leur faible autonomisation⁴⁴. Les politiques, la législation et les investissements qui utilisent des approches de suivi fondées sur les droits humains et renforcent le pouvoir des femmes peuvent aider celles-ci à mieux exprimer leurs besoins. On peut axer les activités publiques de recherche-développement sur les technologies de mécanisation qui favorisent l'égalité des genres, et concevoir celles-ci en fonction des besoins des femmes.

Accent sur la jeunesse rurale pour une transition progressive et inclusive à l'ère du numérique

L'un des grands défis du développement agricole est l'exode rural des jeunes – notamment ceux qui ont un niveau d'instruction élevé –, lesquels laissent derrière eux une population de plus en plus âgée, ce qui pose de sérieux problèmes en ce qui concerne la pérennité de l'agriculture et des systèmes agroalimentaires. L'automatisation de l'agriculture peut grandement concourir à inverser cette tendance. Elle peut pallier le manque de main-d'œuvre, et les technologies numériques peuvent inciter les jeunes ruraux à s'intéresser à des emplois dans le secteur agroalimentaire, y compris sur les exploitations agricoles, car elles ouvrent de nouvelles perspectives d'emploi, avec de meilleures conditions de travail et des revenus plus élevés⁴⁵.

Comme nous l'avons mentionné dans les chapitres précédents, les jeunes agriculteurs sont souvent les premiers à adopter et à exploiter les technologies d'automatisation – en partie parce qu'ils ont un accès plus facile à l'information et aux technologies numériques, telles que les smartphones – et contribuent ainsi de manière déterminante à l'automatisation de l'agriculture²⁵. Ils allient à leurs connaissances et à leur savoir-faire dans le domaine agricole les compétences numériques nécessaires pour utiliser les nouvelles technologies⁴⁶. Un programme d'action en faveur de l'automatisation de l'agriculture, ciblant les jeunes ruraux et visant à leur faire acquérir les compétences nécessaires pour occuper de nouveaux emplois hautement qualifiés, devra être ajouté aux priorités des pouvoirs publics. Il devra renforcer leurs capacités non seulement dans le domaine de la production agricole, mais aussi dans celui des activités de haute technologie exercées aux différents stades des chaînes de valeur agroalimentaires. Il faudra le compléter par un soutien financier et un appui stratégique, ainsi que par des activités de recherche, de développement et d'assistance technique, afin de proposer une approche globale de la transformation des systèmes agroalimentaires. L'enseignement public peut contribuer de manière essentielle à une transition sans heurt et à un accès équitable aux nouvelles possibilités d'emploi⁴⁷. Ce point est particulièrement important, car les jeunes

ruraux vont probablement continuer à quitter l'agriculture, notamment dans les pays à faible revenu et les pays à revenu intermédiaire, mais ils pourront ensuite se diriger vers les emplois plus qualifiés proposés à d'autres niveaux des systèmes agroalimentaires.

Dans le cadre des initiatives de développement impulsées par les communautés, les jeunes doivent participer aux processus de consultation, de planification et de prise de décision.

Des cadres juridiques peuvent appuyer ces initiatives en créant un environnement propice au développement local, en instaurant des quotas obligatoires en matière de participation des jeunes et en établissant des organisations de jeunes.

Amélioration des services de vulgarisation agricole et de conseil rural

Les services de vulgarisation financés par des fonds publics ont toujours joué un rôle important pour favoriser un processus d'automatisation agricole inclusif. Outre les diverses difficultés auxquelles les petits producteurs doivent faire face, l'accès limité à des services consultatifs fiables et dispensés en temps voulu est l'un des principaux obstacles à l'accroissement de leur productivité. Dans le monde entier, les services de vulgarisation financés par des fonds publics contribuent de manière significative à la transformation de l'agriculture, car ils représentent une source majeure d'informations. De nombreux pays continuent d'utiliser différentes approches en matière de vulgarisation. Du fait du manque de personnel bien formé à la vulgarisation – un problème majeur dans la plupart des pays à faible revenu et des pays à revenu intermédiaire –, la vulgarisation en ligne complète de manière utile les services habituels en proposant des modèles numériques pour la production et la diffusion de connaissances. Portée à plus grande échelle, elle peut déboucher sur une nouvelle génération de services de vulgarisation, au service notamment de solutions d'automatisation sur mesure^{48, 49}.

Il est urgent de recueillir et de transformer les connaissances jusque-là négligées et de les mettre à la disposition des producteurs au moyen de nouveaux systèmes de prestation de services qui permettent d'adapter les résultats scientifiques

pour proposer des conseils sur mesure en fonction du contexte et du profil des producteurs. Les enseignements tirés de deux études techniques élaborées pour le présent rapport indiquent que les outils numériques sont en mesure de révolutionner les services de vulgarisation et de conseil: des méthodes innovantes peuvent faciliter considérablement l'accès à ces services et renforcer les compétences nécessaires pour utiliser l'automatisation de manière durable^{25, 33}. Dans certains cas (Igara Tea en Ouganda; SOWIT en Éthiopie, au Maroc, au Sénégal et en Tunisie, et Tun Yat au Myanmar, par exemple), les prestataires assurent également des services de vulgarisation. Leurs solutions comprennent une assistance aux producteurs agricoles dans le cadre de l'utilisation des services et des machines. Les technologies numériques – IdO, enregistrements audio et vidéo et appels sur des téléphones portables, SIG, modèles de simulation et télédétection, par exemple – peuvent ouvrir des perspectives totalement nouvelles en matière de diffusion des connaissances. Il convient de mobiliser et d'exploiter ces technologies pour combler les lacunes d'information et apporter aux agriculteurs les indications dont ils ont besoin. Ces différents enseignements font apparaître que, parallèlement aux services de vulgarisation financés par des fonds publics, les partenariats public-privé peuvent contribuer de manière importante à améliorer l'accès des agriculteurs à un appui sur le terrain. Enfin, les outils numériques peuvent aussi faciliter les services de conseil agricole dans le cadre des arrangements d'agriculture contractuelle ou des contrats au sein des chaînes d'approvisionnement.

Prévention des effets néfastes sur l'emploi

L'automatisation peut avoir des effets très divers, positifs comme négatifs, sur l'emploi rural (voir le chapitre 4). Lorsqu'elle apparaît comme une réponse aux forces du marché (des salaires ruraux en hausse en raison d'une transformation structurelle, par exemple) ou qu'elle remplace une main-d'œuvre familiale non rémunérée, il y a peu de risques qu'elle engendre du chômage; elle aide, au contraire, à pallier le manque de main-d'œuvre. En revanche, si elle est favorisée de manière artificielle par des dépenses publiques à grande échelle (subventions aux importations de machines, par exemple) - avant qu'il y ait

effectivement une demande dans ce domaine -, il est possible qu'elle entraîne du chômage, des pertes d'emplois et une baisse ou une stagnation des salaires ruraux. Les décideurs publics doivent donc veiller à ne pas soutenir l'automatisation tant que celle-ci n'est pas nécessaire; toutefois, ils ne doivent pas non plus faire obstacle à son adoption au motif qu'elle va se substituer au travail humain et créer du chômage.

Les formes de soutien public qui permettent de fournir des biens publics ou collectifs en appuyant les services d'intérêt général – lesquels contribuent à instaurer un environnement propice au secteur agroalimentaire et à d'autres secteurs – sont les plus susceptibles d'opérer une transition sans heurt vers une plus grande automatisation, sans engendrer de chômage. On peut notamment citer le soutien aux activités de recherche-développement dans le domaine agricole et aux services de transfert de connaissances (formation et assistance technique, par exemple), ainsi que le développement et l'entretien des infrastructures (amélioration des routes rurales, des systèmes d'irrigation, des infrastructures de stockage et de la connectivité à internet, entre autres). Les grandes avancées en matière de recherche-développement, principalement dans le secteur privé, mettent à la portée des agriculteurs de nouvelles solutions d'automatisation agricole de moins en moins coûteuses, ce qui est un point positif au regard de la nécessité d'augmenter la production alimentaire dans un contexte de contraction de la main-d'œuvre à l'échelle mondiale.

Renforcement des compétences numériques au service de l'inclusion

Les agriculteurs et les professionnels de l'agriculture doivent acquérir les compétences nécessaires pour gérer les nouveaux systèmes agricoles automatisés et pour accéder à de nouveaux emplois plus qualifiés dans les systèmes agroalimentaires. Ce renforcement des compétences doit être l'une des priorités de l'action publique. Il est particulièrement intéressant que les jeunes acquièrent des compétences, car ils constituent une force de transformation²⁵. Dans certains contextes, il peut être utile de cibler les enfants dans les écoles, car ils peuvent jouer le rôle de passerelle technologique pour leurs

parents⁴¹, et les établissements d'enseignement qui apportent déjà des connaissances agronomiques et zootechniques aux agriculteurs peuvent étendre leurs services aux compétences numériques. L'accès à l'information est essentiel pour permettre aux agriculteurs de suivre le rythme imposé par un monde de plus en plus concurrentiel. Par ailleurs, l'information devrait toujours être un bien public; sa diffusion relève de la responsabilité des pouvoirs publics. Si elles disposent de bonnes compétences et d'un accès à l'information, les personnes qui perdront leur emploi auront les moyens soit d'accompagner l'arrivée des nouvelles technologies sur les exploitations, soit de trouver un autre travail dans la chaîne d'approvisionnement agroalimentaire, en amont ou en aval de la production agricole. Parallèlement, les producteurs agricoles qui exercent leurs activités à temps partiel peuvent également acquérir de meilleures compétences, qui leur permettront de trouver un emploi non agricole et d'augmenter et de diversifier leurs revenus.

CONCLUSION

L'automatisation de l'agriculture a une contribution importante à apporter à la réalisation des objectifs de développement durable (ODD). L'édition 2022 de *La Situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture* met l'accent sur la manière dont la mécanisation et l'automatisation numérique peuvent transformer l'agriculture afin qu'elle contribue à des systèmes agroalimentaires plus efficaces, plus productifs, plus durables, plus inclusifs et plus résilients. Les auteurs analysent les différentes difficultés auxquelles sont confrontés les producteurs qui souhaitent recourir aux technologies d'automatisation et donnent des orientations en matière de politiques, de législation, d'interventions et d'investissements, en tenant compte de l'hétérogénéité qui caractérise le monde agricole (grandes et petites exploitations, femmes et hommes, jeunes et personnes plus âgées) dans ses divers secteurs de production – culture, élevage, aquaculture et agroforesterie.

Le présent rapport explique également que l'automatisation de l'agriculture peut amener à opérer des arbitrages entre les objectifs

économiques, environnementaux et sociaux, et que le juste équilibre entre ces différents aspects dépend du contexte. La palette de technologies – ainsi que de politiques, de législation, d'interventions et d'investissements – qu'il conviendra de promouvoir dépendra du niveau de développement économique, des institutions en place, des conditions agronomiques locales, des caractéristiques des producteurs et des objectifs des décideurs publics. Les différents instruments d'action publique et instruments juridiques présentés dans ce chapitre ne s'excluent pas mutuellement. Il faut au contraire les associer pour créer les conditions propices à une adoption responsable de l'automatisation dans l'agriculture. Les décideurs publics doivent tenir compte du fait que l'adoption dépend des conditions propres au contexte, et connaître les problèmes pressants qui se posent dans une zone donnée (connectivité, inégalités, pauvreté) avant d'associer des instruments d'action publique et des instruments juridiques pour mettre en place des mesures ciblées.

Les agriculteurs, les prestataires de services et les fabricants peuvent tous avoir un intérêt financier à investir dans les technologies d'automatisation, mais ils n'ont pas la même puissance sur le marché. L'un des messages clés est qu'il revient aux agriculteurs de choisir les technologies d'automatisation qu'ils souhaitent utiliser – à partir du très large éventail disponible – et que le principal rôle des interventions des pouvoirs publics est de mettre en place un environnement porteur, propre à stimuler l'innovation, mais également de prendre des mesures d'incitation pour rendre le processus d'automatisation aussi inclusif que possible. Les initiatives multipartites qui consistent à diffuser des connaissances sur l'automatisation au niveau national ou international peuvent être un moyen efficace de lever les obstacles à l'utilisation.

Le rapport souligne que les interventions et les investissements publics qui favorisent le développement économique général sont essentiels pour créer un environnement porteur. Les priorités, en revanche, seront différentes selon les objectifs ultimes des décideurs publics. Alors que dans les pays à revenu élevé, c'est la rareté de la main-d'œuvre qui est le moteur de l'adoption de l'automatisation, l'objectif des pays

à faible revenu et des pays à revenu intermédiaire est plutôt d'améliorer les moyens de subsistance ruraux, la sécurité alimentaire globale et la nutrition. Dans ces pays, les pouvoirs publics pourront favoriser une révolution numérique axée sur la création de possibilités d'emploi décent accessibles aux groupes vulnérables – petits producteurs, femmes et jeunes, notamment – afin de ne laisser personne de côté tout en progressant dans la réalisation des ODD. Il leur faudra porter une attention particulière aux besoins

spécifiques de ces groupes afin de proposer une transition inclusive.

En résumé, nous espérons que cette édition de *La Situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture* contribuera à la concertation et au débat sur les possibilités offertes par l'automatisation de l'agriculture et sur les actions à mener pour transformer les systèmes agroalimentaires de sorte qu'ils deviennent plus durables, plus productifs, plus inclusifs, plus efficaces et plus résilients. ■

**UKRAINE**

Vue aérienne d'un champ vert avec système d'irrigation circulaire des cultures.
©Volodymyr Rozumii/
Shutterstock.com

ANNEXES

ANNEXE 1

Description des études de cas

112

ANNEXE 2

Tableaux statistiques

140

ANNEXE 1

DESCRIPTION DES ÉTUDES DE CAS

MÉTHODE ADOPTÉE POUR LES 27 ÉTUDES DE CAS

Les études de cas ont été recueillies par une équipe de chercheurs du Centre de recherche de l'Université de Wageningue et par Mariette McCampbell, pour établir un état des lieux des technologies d'automatisation de l'agriculture dans le monde et analyser les obstacles à leur adoption ainsi que les facteurs déterminant cette adoption. Chaque cas représente une entreprise ou une organisation qui a développé et/ou mis en œuvre une ou plusieurs solutions répondant à la définition d'une automatisation de l'agriculture présentée au chapitre 1. Les études de cas ont été sélectionnées à partir des critères suivants: i) elles couvrent toutes les régions du présent rapport (Ceccarelli *et al.*, 2022) ou sont représentatives des pays du Sud (Asie de l'Est et du Sud-Est, Asie du Sud, Afrique subsaharienne, Amérique latine et Caraïbes) (McCampbell, 2022); ii) elles couvrent les systèmes de production agricole suivants: cultures, élevage, aquaculture et agroforesterie; iii) elles sont représentatives d'une solution d'automatisation de l'agriculture qui est nouvelle, mais transposable – voire déjà transposée – à plus grande échelle; iv) elles ciblent les petits producteurs agricoles aussi bien que les grands. Les informations ont été recueillies au cours d'entretiens avec des informateurs clés, puis complétées par d'autres

informations sur l'agriculture, les compétences numériques, l'automatisation, les politiques et les lois provenant de sources secondaires de données nationales et de travaux publiés. Les entretiens se sont déroulés en ligne – en anglais ou en espagnol – et ont été enregistrés (voix et images) pour être transcrits et analysés. Pour chaque solution, les entretiens ont permis d'aborder principalement la durabilité économique, environnementale et sociale, ainsi que les obstacles à l'adoption de la solution considérée et les facteurs déterminant cette adoption. Une analyse thématique a été réalisée sur les données des entretiens au moyen d'un cadre de codification.

Il est possible que les 27 études de cas sélectionnées ne représentent pas toute la palette des technologies disponibles, mais elles donnent une vision globale des tendances et des développements mondiaux dans le domaine de l'automatisation de l'agriculture. Les données de ces études de cas ont servi de données initiales à deux documents d'information, celui de Ceccarelli *et al.* (2022), qui reprend les données de 22 cas, et celui de McCampbell (2022), qui se sert des données de 10 cas; cinq cas figurent dans les deux documents.

SOURCES: McCampbell, 2022¹; Ceccarelli *et al.*, 2022².

RÉSUMÉ DES ÉTUDES DE CAS

ABACO



Année de création
2013



Nombre actuel d'utilisateurs
Non divulgué



Zone d'activité
Europe (siège situé en Italie), Asie centrale, Amérique du Sud



Secteurs ciblés
Cultures, forêts, élevage

Services fournis

Une plateforme numérique opérant dans le domaine de l'agriculture de précision, qui recueille et partage des données relatives aux terres, à l'agriculture et à la météorologie. D'autres applications concernent le secteur de l'agriculture biologique et la gestion territoriale à l'usage des administrations nationales et locales.

Clients et utilisateurs ciblés

Les organisations d'agriculteurs, les agriculteurs (petites et grandes exploitations) et les administrations nationales et locales. Les autres groupes ciblés sont les compagnies d'assurances, les laboratoires d'analyse des sols et les exploitants d'aéronefs sans équipage à bord (UAV).

Modèle économique et viabilité financière

Les recettes proviennent de souscriptions à plusieurs niveaux (agriculteurs) et de contrats de service (gouvernements). L'offre s'adapte aux besoins du client et peut aller d'un modèle gratuit proposant des fonctionnalités limitées à une souscription payante calculée en fonction de la taille de l'exploitation et d'autres paramètres.

Facteurs déterminants

La demande de technologies d'agriculture de précision et la nécessité de se conformer aux normes et règlements environnementaux. Une utilisation gratuite sur une période limitée est offerte aux petits producteurs.

Obstacles

Le temps nécessaire pour apprendre comment fonctionne la plateforme et la nécessité de traduire cette plateforme dans différentes langues pour étendre son utilisation à d'autres pays. Dans certains pays (en Afrique, par exemple), les langues locales, auxquelles s'ajoutent le faible taux de pénétration du smartphone et des infrastructures informatiques limitées, sont considérées comme des obstacles à la personnalisation des solutions.

Politiques bloquantes ou facilitatrices

Aucun obstacle à l'adoption dû aux politiques n'a été noté. Les facteurs déterminants d'adoption liés aux politiques sont la politique agricole commune (PAC) de l'Union européenne ainsi que les objectifs de son pacte vert pour l'Europe et les mécanismes associés d'octroi de subventions; et des règlements spécifiques sur l'utilisation de pesticides.



Personnes interrogées
Giovanna Roversi et Fabio Slaviero

AEROBOTICS



Année de création
2014



Nombre actuel d'utilisateurs
300



Zone d'activité
18 pays, dont l'Afrique du Sud,
l'Australie, le Chili, l'Espagne,
les États-Unis d'Amérique, le
Pérou et le Portugal



Secteur ciblé
Arbres fruitiers (y compris
fruits à coque)

Services fournis

Une détection précoce des organismes nuisibles et des maladies au moyen de capteurs et de drones et de l'imagerie par satellite. Aerobotics propose également les ensembles de données localisées nécessaires à l'utilisation de la technologie à taux variable (TTV) dans l'irrigation et la fertilisation, et mesure la croissance et la performance des arbres, estimant les rendements et planifiant la récolte.

Clients et utilisateurs ciblés

Les grands producteurs de fruits et de fruits à coque de 18 pays (à revenu élevé principalement); les compagnies assurant les agriculteurs ainsi que les transformateurs qui produisent des jus de fruit et les détaillants.

Modèle économique et viabilité financière

S'appuient sur une souscription annuelle à plusieurs niveaux de services. Le paiement demandé aux cultivateurs est calculé par hectare (ou par acre) et réglé annuellement ou mensuellement. Différents services sont groupés selon les besoins du client, le coût dépendant des caractéristiques requises. Le modèle économique appliqué diffère dans le cas des compagnies d'assurance récolte, qui paient une redevance par hectare/acre pour

des données recueillies à des fins d'inspection ou d'audit. Le chiffre d'affaires de la société est réalisé à 95 pour cent aux États-Unis d'Amérique, 40 pour cent provenant du marché de l'assurance récolte. Jusqu'ici, l'argent investi dans la société l'a été principalement sous forme de capital-investissement.

Facteurs déterminants

La demande d'application à taux variable de produits agrochimiques, pour une utilisation plus économique de ces produits et une atténuation des effets préjudiciables sur l'environnement. Aux États-Unis d'Amérique, les agriculteurs adoptent les innovations technologiques et les solutions numériques, et donc Aerobotics.

Obstacles

Un manque d'information des agriculteurs.

Politiques bloquantes ou facilitatrices

Aux États-Unis d'Amérique, les règlements applicables aux drones sont clairs et l'utilisation de ces aéronefs est permise, alors qu'en Afrique du Sud, l'observation de la réglementation s'avère très coûteuse.



Personne interrogée
Benjamin Meltzer

AGRINAPSIS



Année de création
2020



Nombre actuel d'utilisateurs
Non connu



Zone d'activité
Bolivie (État plurinational de), Costa Rica, Équateur, Guatemala, Mexique



Secteurs ciblés
Tous

Services fournis

Un réseau social spécialisé dans l'agriculture permettant aux exploitants d'accéder à des connaissances et à des informations en dialoguant avec des experts et des praticiens. Les utilisateurs vérifient et notent les informations, ce qui permet à Agrinapsis de s'assurer qu'elles sont fiables et de haute qualité. Agrinapsis offre aussi aux exploitants une plateforme de commerce électronique sur laquelle vendre leur production agricole et acheter les intrants dont ils ont besoin (semences ou engrains, par exemple).

Clients et utilisateurs ciblés

Principalement les petits agriculteurs, et plus particulièrement les femmes et les jeunes. Cela étant, toute personne œuvrant dans le domaine agricole – des universitaires et des étudiants aux agronomes – peut trouver un intérêt à la solution. L'utilisation de la plateforme de commerce électronique est réservée aux agriculteurs; les grandes exploitations constituées en société n'y ont pas accès.

Modèle économique et viabilité financière

Le financement est assuré par l'Institut interaméricain de coopération pour l'agriculture (IICA). En tant qu'organisation sans but lucratif, Agrinapsis ne tire aucun revenu des services fournis. Le projet est encore à un stade embryonnaire, aussi est-il difficile d'évaluer sa viabilité.

Facteurs déterminants

L'expérience des petits producteurs constitue une mine de connaissances non partagées. Agrinapsis a donc pour objectif de rendre ce savoir accessible d'un pays à l'autre, après avoir vérifié sa validité.

L'organisation se veut un outil de démocratisation des connaissances et de stimulation du changement dans le domaine social et environnemental. Les compétences numériques accrues, en particulier chez les jeunes, la possibilité pour les femmes (surtout les plus âgées d'entre elles) de se rencontrer et l'essor des influenceurs assurant la promotion d'Agrinapsis, sont des facteurs qui ont joué un rôle essentiel dans l'expansion de la plateforme, d'autant plus qu'il s'agit du seul réseau social spécialisé dans l'agriculture en Amérique latine.

Obstacles

L'absence d'accès à internet dans les zones reculées et les zones rurales, malgré les efforts déployés aux niveaux national et international pour améliorer la connexion. L'absence de compétences numériques demeure courante dans les zones rurales, en particulier chez les aînés; l'offre linguistique doit être élargie pour plus d'inclusion (l'État plurinational de Bolivie, à lui seul, compte huit langues officielles).

Politiques bloquantes ou facilitatrices

L'incertitude politique peut influer sur la viabilité de la plateforme, car celle-ci est financée par l'Institut interaméricain de coopération pour l'agriculture, lequel dépend du soutien de ses 34 États membres.



Personne interrogée
Santiago Velez

AQUACONNECT



Année de création
2018



Nombre actuel d'utilisateurs
60 000



Zone d'activité
Inde



Secteur ciblé
Aquaculture (crevettes)

Services fournis

Des solutions numériques d'aquaculture permettant de suivre et de documenter les résultats des exploitations aquacoles, de rapprocher les aquaculteurs des fournisseurs d'intrants et des acheteurs de produits frais, et de faciliter l'accès au financement, à l'assurance et aux marchés. Aquaconnect gère aussi des sites physiques (AquaHubs) dans les communautés – ce qui améliore son réseau sur le dernier kilomètre – où les producteurs peuvent acheter des intrants, vendre des produits et obtenir des services consultatifs.

Clients et utilisateurs ciblés

Les producteurs de crevettes à petite et moyenne échelle.

Modèle économique et viabilité financière

Les aquaculteurs peuvent utiliser gratuitement les solutions, telles que l'application Aquaconnect, le bazar électronique et la boutique web. Les recettes proviennent des parties prenantes avec lesquelles les agriculteurs sont en contact (banques, assureurs, transformateurs ou fournisseurs d'intrants, par exemple). Le chiffre d'affaires correspond aux frais facturés lors de chaque transaction réalisée via les services de mise en relation et d'intelligence des données. En outre, des fonds propres sont apportés et utilisés pour développer les activités. Jusqu'ici, le modèle économique est rentable.

Facteurs déterminants

La demande créée par la faible productivité et l'inefficience des liens avec les marchés. Le service contribue à améliorer la durabilité environnementale, ainsi que l'efficience, la prédictibilité et la transparence le long de la chaîne de valeur. L'intérêt des aquaculteurs pour les technologies

numériques croît lentement. La présence physique d'une équipe sur le terrain encourage à adopter les technologies et permet de fournir un appui technique.

Obstacles

Le manque de capacités des aquaculteurs à se servir des technologies numériques. Le coût élevé des technologies de pointe, telles que les appareils IdO, limite l'abordabilité. Les prêts que les agriculteurs peuvent obtenir par hectare de terre sont plafonnés et ne suffisent pas si l'on veut investir dans le matériel et la production aquacole de façon générale. Les taux des primes d'assurance de l'aquaculture sont nettement plus élevés que pour une production végétale.

Politiques bloquantes ou facilitatrices

Le Gouvernement indien a alloué 3 milliards d'USD à la modernisation de l'agriculture, filières aquacoles comprises. Les pouvoirs publics s'intéressent aux jeunes entreprises qui mettent en œuvre des technologies le long de la chaîne de valeur, comme en témoignent les politiques visant à soutenir ces sociétés. En revanche, l'aquaculture ne reçoit actuellement aucune subvention et il n'existe aucune aide spécifique aux outils IdO.



Personne interrogée
Sudhakar Velayutham

ATARRAYA



Année de création
2019



Nombre actuel d'utilisateurs
Non connu



Zone d'activité
États-Unis d'Amérique,
Mexique



Secteur ciblé
Aquaculture (crevettes)

Services fournis

Shrimpbox est une ferme crevetticole automatisée et contrôlée, installée dans des conteneurs d'expédition (les «shrimp boxes»). Chaque conteneur est équipé de capteurs et utilise l'apprentissage automatique, les mégadonnées, la biotechnologie et la robotique pour commander les opérations d'aquaculture, notamment l'apport nutritionnel, la qualité de l'eau et la teneur en oxygène.

Clients et utilisateurs ciblés

Principalement les producteurs de crevettes, mais aussi les éleveurs de volailles qui souhaitent se convertir à la crevetticulture. À ceux-ci s'ajoutent les restaurants, les universités, les entreprises et les consommateurs qui recherchent ou qui veulent servir des produits comestibles de la mer frais et produits de façon durable. Quelques restaurants sont également partenaires d'Atarraya.

Modèle économique et viabilité financière

La rentabilité n'est pas atteinte car l'activité en est encore aux premiers stades. Initialement, Shrimpbox dépendait des subventions octroyées par le Gouvernement mexicain, mais on constate désormais un intérêt croissant des investisseurs privés. Le modèle économique n'a pas encore été décidé. Atarraya semble hésiter à gérer directement la solution du fait des difficultés que présente la transposition à plus grande échelle. La formule privilégiée est celle de l'aquaculture contractuelle, dans laquelle Atarraya loue la solution en crédit-bail, mais, pour que cette option soit attrayante, il faut que le transfert de technologie se fasse sans heurt. Des clients (venus de Chine) se sont manifestés pour acheter Shrimpbox, mais la société Atarraya n'est pas prête à donner suite.

Facteurs déterminants

La forte demande de crevettes dans le monde, conjuguée aux pratiques nocives pour l'environnement de la plupart des exploitations crevetticoles. Les pratiques actuelles sont associées à de fortes pertes du fait de la propagation rapide des maladies et sont également la cause d'une destruction de la mangrove, un lieu essentiel de fixation du carbone dans le monde. À l'inverse, le service proposé par Atarraya améliore la production de crevettes de façon durable et souple, sans qu'il soit nécessaire, par exemple, de se trouver à proximité de l'océan. Le changement de génération est un facteur très important et prometteur pour ce qui est d'accroître l'adoption de cette solution, les jeunes agriculteurs étant bien plus ouverts à la mise en œuvre de nouvelles technologies.

Obstacles

Le scepticisme des producteurs plus âgés, associé à l'éloignement, entraîne une résistance à un changement de modèle d'activité. La piètre qualité de l'infrastructure routière constitue également un obstacle de taille, compte tenu de la logistique lourde requise.

Politiques bloquantes ou facilitatrices

Des subventions à la recherche-développement ont facilité les premiers stades du projet, mais ces aides ont pris fin.



Personne interrogée
Daniel Russek

CATTLER



Année de création
2019



Nombre actuel d'utilisateurs
Non connu



Zone d'activité
Amérique latine et Caraïbes,
États-Unis d'Amérique



Secteur ciblé
Élevage (bovin)

Services fournis

Initialement, deux produits indépendants: i) un système prédictif du poids des animaux; ii) un système d'automatisation de la gestion d'étable. La société a depuis développé un système de gestion entièrement automatisée d'une exploitation bovine, qui utilise des capteurs, l'imagerie par satellite, le marquage électronique et des systèmes d'affouragement pour exécuter des tâches qui vont de l'alimentation automatique et de la prédition quotidienne des taux de croissance et de la nutrition au suivi de la santé des animaux et au diagnostic.

Clients et utilisateurs ciblés

Les éleveurs bovins à la tête d'une exploitation de moyenne ou grande taille (entre 2 000 et 40 000 têtes de bétail), et travaillant principalement dans le secteur de la viande (parc d'engraissement). Aujourd'hui, les exploitants travaillant sur les segments des veaux de vaches allaitantes et des jeunes bovins à viande engrangés au pâturage constituent également une cible potentielle.

Modèle économique et viabilité financière

Le chiffre d'affaires est encore réalisé sur la vente des deux logiciels indépendants, fonctionnant sur téléphone portable ou sur ordinateur de bureau, malgré l'orientation croissante sur le système complet automatisé. Pour exploiter ce système, Cattler est passé à un modèle «freemium»: le niveau d'entrée est gratuit, mais ne comprend

que quelques fonctions élémentaires du produit. Si les utilisateurs veulent y ajouter des appareils ou des fonctionnalités, ils doivent souscrire un abonnement dont le prix varie en fonction des fonctionnalités ajoutées. Le nombre d'utilisateurs n'est pas connu, mais on estime le nombre des animaux pris en compte à 90 millions aux États-Unis d'Amérique, 200 millions au Brésil et 50 millions en Argentine.

Facteurs déterminants

La réduction des coûts, puisque le système contribue à automatiser plusieurs opérations. Les agriculteurs du secteur ont de plus en plus besoin d'exécuter ces opérations de façon plus intégrée pour gagner en efficience.

Obstacles

Aux États-Unis d'Amérique, le rythme d'adoption est lent comparé à celui enregistré en Argentine. La raison avancée est que les éleveurs argentins ont besoin d'être plus dynamiques et plus compétitifs sur le marché international.

Politiques bloquantes ou facilitatrices

La facilité d'accès des agriculteurs au crédit est un facteur favorable. En Argentine, l'incertitude politique constitue un obstacle; aux États-Unis d'Amérique, des politiques protectrices pourraient décourager les agriculteurs d'adopter des solutions nouvelles.



Personne interrogée
Ignacio Albornoz

COOPECAN



Année de création
2008



Nombre actuel d'utilisateurs
1 500



Zone d'activité
Pérou



Secteur ciblé
Élevage (alpaga)

Services fournis

Des services numériques – services de conseil, suivi des pâturages et traçabilité animale, mais aussi une chaîne de blocs (lancée en 2020) – visant à améliorer et à certifier les normes de bien-être des animaux et la qualité de la fibre d'alpaga, de façon à accroître la valeur de celle-ci.

Clients et utilisateurs ciblés

Principalement les petits éleveurs des hauts plateaux péruviens, dont les troupeaux comptent de 50 à 100 têtes et dont les revenus annuels sont compris entre 1 500 et 1 800 USD. Les intermédiaires de la chaîne de valeur de la fibre d'alpaga, notamment les distributeurs, les fournisseurs et les consommateurs qui se préoccupent de l'origine du produit, sont également ciblés.

Modèle économique et viabilité financière

En activité depuis 2008. Ces 10 dernières années, la coopérative a étendu son périmètre d'activité et a élaboré de grands projets pour améliorer les conditions de travail, offrant une rémunération équitable et protégeant le bien-être animal. Des fonds externes fournis par des donateurs soutiennent le service, le but n'étant pas de générer des profits.

Facteurs déterminants

La demande croissante de transparence et les normes de bien-être animal dans la filière de la fibre d'alpaga, débouchant sur un produit de plus grande valeur.

Obstacles

Le manque d'accès à internet dans les zones reculées et l'absence de sociétés informatiques nationales pour soutenir le service, auxquels s'ajoute le vieillissement des éleveurs d'alpaga. Actuellement, la majorité des éleveurs sont des femmes et des personnes âgées, car les conditions de travail et l'isolement découragent les jeunes de prendre la relève. Ceux-ci préfèrent faire des études en ville et trouver un emploi mieux payé.

Politiques bloquantes ou facilitatrices

L'incertitude politique se traduit par des changements fréquents de politique, ce qui fait obstacle à un soutien au secteur.

Personne interrogée
Dagoberto Fernandez

CROPIN



Année de création
2010



Nombre actuel d'utilisateurs
225



Zone d'activité
Présence mondiale
(principalement en Afrique
subsaharienne et en Inde)



Secteur ciblé
Cultures

Services fournis

Une plateforme logicielle offrant un système complet de gestion des exploitations et des exploitants. Le système fait appel à des technologies telles que l'analyse de mégadonnées, l'intelligence artificielle, les capteurs IdO et la télédétection pour fournir des observations sur différents niveaux de la chaîne de valeur et aider les gestionnaires à prendre de meilleures décisions.

Clients et utilisateurs ciblés

Les entreprises agricoles, les sociétés productrices de semences, les entreprises d'intrants agricoles, les exportateurs de fruits et de légumes, les négociants en produits de base, les banques, les institutions financières et les institutions de microcrédit, les fournisseurs d'assurance récolte, les pouvoirs publics et les institutions et organismes de développement.

Modèle économique et viabilité financière

Le portefeuille de clients se partage entre le secteur des entreprises et le secteur du développement. La majeure partie du chiffre d'affaires est réalisée avec le secteur des entreprises (60 à 65 pour cent), qui comprend des clients travaillant dans le domaine de l'agriculture intelligente, du marché numérique et de la traçabilité le long de la chaîne de valeur. Concernant le secteur du développement, la société fournit aux pouvoirs publics, aux banques et aux institutions de développement des données très localisées sur les exploitations et les exploitants, en échange d'une subvention. Au final, les données aident les clients à évaluer la solvabilité des petits producteurs et aident les banques à fournir des prêts et des assurances aux agriculteurs.

Facteurs déterminants

Les déficits importants de données et d'informations entraînent des asymétries de l'information le long des chaînes de valeur, d'où la demande d'un logiciel fondé sur les données. Les clients du secteur des entreprises tirent parti des services fournis dans le domaine de l'automatisation et de la mécanisation des exploitations pour maximiser la valeur par hectare et la traçabilité au niveau des exploitations. Les clients du secteur du développement exploitent les modèles de données agrégées et la science des données de Cropin, et exercent une influence sur le secteur industriel en prodiguant des conseils en matière de politiques fondés sur les données.

Obstacles

Le manque d'actifs numériques, les compétences numériques insuffisantes et la mauvaise connectivité des données, l'aversion pour le risque.

Politiques bloquantes ou facilitatrices

En Inde, le Ministère de l'agriculture et du bien-être des agriculteurs a développé des applications numériques majeures, dans le cadre de l'initiative India Digital Ecosystem of Agriculture (IDEA), pour stimuler l'adoption des technologies par les exploitants. Le National Agriculture Market (eNAM) est un portail indien de commerce électronique visant à créer un marché national uniifié des produits agricoles. Enfin, le Direct Benefit Transfer (DBT) Central Agri Portal, lancé en 2013, est un portail national uniifié regroupant les dispositifs de transferts sociaux directs destinés à l'agriculture. Le portail aide les agriculteurs à utiliser des machines agricoles modernes à l'aide de subventions.



Personne interrogée
Arjun Goyal

EGISTIC



Année de création
2018



Nombre actuel d'utilisateurs
Près de 1 500



Zone d'activité
Kazakhstan



Secteur ciblé
Cultures

Services fournis

Une solution intégrée de suivi et de gestion des zones cultivées, utilisant la télédétection, une navigation par satellite de haute précision, des systèmes de géo-information et des technologies d'apprentissage automatique. Les services comprennent: des applications d'analyse (prévision de rendement, historique de rotation des cultures); des images satellites des champs; des séances de conseil numérique; un système de conduite équipé d'un GPS pour les tracteurs et les moissonneuses-batteuses; une gestion des activités agricoles; et une analyse agrochimique des sols.

Clients et utilisateurs ciblés

Principalement les grands exploitants, mais aussi les distributeurs de produits alimentaires, les entreprises agrochimiques et les entreprises de production d'engrais. La plupart des utilisateurs enregistrés de la plateforme se situent dans la tranche d'âge des 18-45 ans.

Modèle économique et viabilité financière

Les recettes proviennent des abonnements annuels à la plateforme. À compter de 2022, la plateforme est financièrement viable et attire les investisseurs. En 2021, elle a reçu la dernière série de subventions. L'abonnement comprend aussi une assistance technique, telle que des webinaires, des vidéos et un guide de l'utilisateur.

Facteurs déterminants

La demande croissante de solutions de gestion automatisée d'exploitation chez les agriculteurs à la tête de grandes exploitations. Ceux-ci rentabilisent très vite leurs investissements grâce aux économies de carburant réalisées sur les machines agricoles.

Obstacles

La mauvaise connexion à internet dans les zones rurales.

Politiques bloquantes ou facilitatrices

La société souhaite transposer ses services à plus grande échelle en intégrant ses données avec celles de l'État, mais les cadres d'action publique actuels ne prévoient aucune mesure en faveur des partenariats public-privé.



Personne interrogée
Zhandos Kerimkulov

FOOD AUTONOMY



Année de création
2018



Nombre actuel d'utilisateurs
2



Zone d'activité
Hongrie



Secteurs ciblés
Mini-légumes, légumes feuilles, jeunes plants et plantes destinées à la cosmétique, produits sur des sites d'agriculture verticale

Services fournis

Différentes recettes et technologies de production végétale et les solutions matérielles et logicielles correspondantes pour une agriculture verticale, ainsi que des fermes verticales modulaires complètes, contrôlées à distance, pour des applications industrielles et de recherche. Toutes les technologies proposées sont disponibles sous la forme de services distincts ou totalement intégrés dans des fermes verticales.

Clients et utilisateurs ciblés

Des utilisateurs opérant à petite, moyenne ou grande échelle dans le domaine de la production de plants, de la recherche et de la production alimentaire.

Modèle économique et viabilité financière

Actuellement, le financement de l'activité d'agriculture verticale vient principalement d'investissements internes effectués par la branche de Food Autonomy spécialisée dans les éclairages pour la culture d'intérieur. Une subvention accordée par le Gouvernement hongrois soutient l'établissement agricole de recherche. Le modèle FaaS (*Farming as a service*, agriculture-service) conduit l'exploitation en lieu et place de l'utilisateur, tandis que le modèle PaaS (*Plants as a service*, production végétale-service) offre au client une capacité exclusive de production.

Facteurs déterminants

La demande croissante de produits biologiques de haute qualité, obtenus de façon durable, et abordables; l'intérêt croissant pour l'agriculture verticale; un mode de production faiblement consommateur d'énergie et d'eau; la possibilité de produire des aliments localement, à proximité des villes et dans des régions arides.

Obstacles

Un investissement initial élevé.

Politiques bloquantes ou facilitatrices

Le Gouvernement hongrois promeut l'automatisation et l'utilisation de données en agriculture. Cela étant, s'il soutient la production locale d'aliments, il n'accorde aucune aide directe à l'agriculture verticale. De plus, les règlements ne reconnaissent pas l'agriculture verticale comme étant une agriculture biologique, même si la production se fait dans un environnement sans chimie.



Personne interrogée
Zoltan Sejpes

GARBAL



Année de création
2017



Nombre actuel d'utilisateurs
Plus de 500 000



Zone d'activité
Burkina Faso, Mali
(et bientôt Niger)



Secteurs ciblés
Élevage (pastoral),
grandes cultures

Services fournis

Une solution numérique intégrée offrant aux petits producteurs et éleveurs pastoraux de la région du Sahel des conseils extrêmement contextualisés sur les terres de pacage indiquées, la migration des troupeaux, la météo, les pratiques agricoles et les marchés. La solution utilise des données satellitaires et d'autres données. Elle comprend également un marché numérique permettant de se procurer du fourrage et de vendre du lait et des céréales.

Clients et utilisateurs ciblés

Les petits exploitants, les éleveurs pastoraux, les négociants et les propriétaires de troupeaux. Les femmes représentent 22 à 30 pour cent des utilisateurs.

Modèle économique et viabilité financière

L'activité est fondée sur un partenariat public-privé, un point essentiel pour vaincre l'aversion pour le risque des donateurs et des bailleurs de fonds lorsqu'il est question de développer des solutions numériques innovantes dans des contextes fragiles. GARBAL compte principalement sur le financement de donateurs et les contributions des partenaires au projet. Les recettes proviennent des communications avec le centre d'appels (facturées en fonction du temps d'utilisation) ou des sommes modestes payées pour l'utilisation de données de services supplémentaires non structurées (USSD). Malgré ces recettes, réinvesties dans la solution, le seuil de rentabilité est loin d'être atteint. La stratégie économique vise à générer de nouvelles recettes par l'intermédiaire du marché numérique et d'une solution de financement numérique.

Facteurs déterminants

La remise en cause des connaissances traditionnelles des agriculteurs et des éleveurs pastoraux du fait du changement climatique et de l'insécurité et la

menace qui pèse sur les moyens de subsistance des exploitants. La solution est susceptible d'améliorer l'accès aux marchés et de soutenir la résilience et les capacités d'adaptation des agriculteurs face aux crises. La formule du partenariat public-privé est essentielle pour que les utilisateurs finaux acceptent la solution. Le renforcement des capacités et le taux de pénétration des téléphones mobiles, encore que, bien souvent, il ne s'agisse pas de smartphones, facilitent aussi l'adoption. Enfin, la collaboration directe avec les agriculteurs et les éleveurs pastoraux locaux et avec leurs organisations est fondamentale pour gagner leur confiance et accroître la diffusion.

Obstacles

Des besoins différents d'un pays à l'autre, d'où la nécessité d'adapter la solution à la situation de chaque pays. L'instabilité politique et l'insécurité qui règnent dans certains pays constituent un défi, tout comme le manque d'infrastructures numériques (énergie, connectivité, smartphones, par exemple). Les autres problèmes rencontrés sont le manque de compétences, la méconnaissance des avantages des technologies, et la qualité insuffisante et la mauvaise gestion des données.

Politiques bloquantes ou facilitatrices

L'appui accordé par les ministères locaux (partage de bases de données, par exemple) a été déterminant car il a fourni un contenu utile au service consultatif. En revanche, l'instabilité politique et l'insécurité freinent les investissements dans certains pays.



Personne interrogée
Catherine Le Come

GROBOMAC



Année de création
2014



Nombre actuel d'utilisateurs
Sans objet (la solution est encore en phase de test)



Zone d'activité
Inde



Secteur ciblé
Coton

Services fournis

Une récolteuse de coton électrique, semi-autonome et conduite par une seule personne, qui fonctionne sans endommager les cultures, à l'aide d'un bras robotisé à haute vitesse, assisté d'une technologie de recherche visuelle et d'intelligence artificielle. Ce système permet une récolte de précision de multiples capsules dans des systèmes de culture multirangs.

Clients et utilisateurs ciblés

Dans un premier temps, la solution cible les agriculteurs qui cultivent le coton à moyenne et grande échelle; les petits exploitants pourront éventuellement être inclus dans un deuxième temps. À long terme, la machine peut être utilisée par des organisations de producteurs agricoles, des fermes collectives et des centres de recrutement, l'Inde soutenant une organisation de service qui permet d'exécuter des tâches agricoles selon un modèle de paiement à l'utilisation. La machine a été conçue pour être principalement conduite par des femmes, car celles-ci représentent l'essentiel de la main-d'œuvre employée à la récolte du coton en Inde.

Modèle économique et viabilité financière

Il ne s'agit pas encore d'une solution commerciale. La société est principalement financée par des investissements personnels et des subventions. Dans l'avenir, le but est de vendre des robots directement aux utilisateurs, puis, à plus long terme, à des exploitants et des prestataires de services.

Facteurs déterminants

Le manque de travailleurs manuels durant les saisons de forte embauche.

Obstacles

Les investisseurs n'appréhendent pas encore pleinement les avantages de cette technologie. De plus, le retour sur investissement peut être long.

Politiques bloquantes ou facilitatrices

Le Gouvernement indien encourage les jeunes entreprises qui travaillent pour l'agriculture en leur octroyant des subventions. Ainsi, GRoboMac a reçu une aide de 30 000 USD environ. La société a également répondu à une demande de propositions de robotique-service dans l'État du Telangana, dans le sud de l'Inde, avec une proposition de récolte du coton.



Personne interrogée
Manohar Sambandam

HARVEST CROO ROBOTICS



Année de création
2013



Nombre actuel d'utilisateurs
Non connu



Zone d'activité
États-Unis d'Amérique



Secteur ciblé
Fraise

Services fournis

Des robots circulant de façon autonome sur l'exploitation pour cueillir, inspecter, nettoyer et emballer des fraises. Chaque robot possède 16 bras indépendants qui exécutent les tâches agricoles de façon autonome sur 16 rangs.

Clients et utilisateurs ciblés

Les grands producteurs de fraises (exploitant plus de 10 ha).

Modèle économique et viabilité financière

La solution n'est pas encore commercialisée. Les fonds proviennent d'investisseurs privés et d'institutions financières, le secteur public ne jouant qu'un rôle mineur. Le modèle économique est celui du paiement au service rendu, dans lequel le montant dépend du volume récolté. Si la demande est forte, on prévoit que les investisseurs de la première heure seront prioritaires.

Facteurs déterminants

Le manque de main-d'œuvre et le coût croissant de celle-ci, en particulier au pic des périodes de récolte. C'est pourquoi 70 pour cent environ des producteurs de fraises du pays ont investi dans la société. La technologie a été testée avec succès en situation réelle sur des exploitations.

Obstacles

La montée en puissance de la fabrication des éléments matériels et logiciels nécessaires.

Politiques bloquantes ou facilitatrices

La Fondation nationale pour la science a apporté un soutien limité. Les politiques ne sont pas considérées comme des moteurs importants ni comme des obstacles caractérisés.



Personne interrogée
Gary Wishnatzki

HORTIKEY



Année de création
2015



Nombre actuel d'utilisateurs
Non divulgué



Zone d'activité
Pays-Bas



Secteur ciblé
Tomate

Services fournis

Un système intégré ne nécessitant aucune infrastructure nouvelle, qui se compose d'un robot autonome, équipé de caméras, d'un logiciel intelligent utilisant des algorithmes et d'une intelligence artificielle et fournit des données et des estimations fiables concernant les récoltes, comme le nombre de tomates et leur stade de maturité, grâce à des mesures quotidiennes. Les indications tirées de ces données, associées à des données climatiques et météorologiques, permettent de produire, pour une entreprise précise, des prévisions de récolte sur une à quatre semaines.

Clients et utilisateurs ciblés

Les producteurs de tomates opérant à moyenne ou grande échelle dans un environnement contrôlé (sous serre, par exemple).

Modèle économique et viabilité financière

Les recettes proviennent des ventes de robots et des abonnements mensuels payés pour le logiciel. Robot et logiciel peuvent aussi être mis à disposition dans le cadre d'un contrat de service, moyennant une redevance mensuelle globale. Le développement est actuellement financé par les investissements de parties prenantes.

Facteurs déterminants

La valeur que représentent pour les exploitants les prévisions de récolte. La variabilité des prix des tomates demande des estimations exactes de la capacité de production, et l'augmentation de taille des exploitations nécessite une expertise dans la culture de ce fruit.

Obstacles

Le scepticisme de certains producteurs de tomates à l'égard de la technologie. Créer la confiance demande du temps.

Politiques bloquantes ou facilitatrices

Le programme Connaissance et innovation des Pays-Bas promeut l'investissement dans l'innovation. Dans certains pays, des lois empêchent le partage de données avec d'autres pays, ce qui complique l'expansion sur certains marchés.



Personne interrogée
Andreas Hofland

ICT4BXW



Année de création
2018



Nombre actuel d'utilisateurs
Plus de 7 000



Zone d'activité
Rwanda



Secteur ciblé
Banane

Services fournis

Une gamme de services de conseil et d'information concernant la production de la banane, y compris la formation en ligne. Les services sont disponibles sur smartphones et sur des téléphones plus rudimentaires, associés à des informations non numériques (un calendrier cultural imprimé, par exemple). Un accent particulier est mis sur le diagnostic et la surveillance du flétrissement bactérien du bananier causé par *Xanthomonas* et sur la collecte de données relatives aux terres agricoles. Les producteurs de bananes s'inscrivent via une application Android et peuvent ainsi accéder aux services, ce qui aide les agents de vulgarisation et les fonctionnaires de l'État à surveiller les maladies. ICT4BXW utilise des drones pour cartographier les terres servant à produire des bananes, recueillant des informations sur les variétés cultivées et les récoltes touchées par des maladies.

Clients et utilisateurs ciblés

Les petits producteurs de bananes, les agents de vulgarisation locaux et l'État du Rwanda (principalement les chercheurs et les techniciens l'Office rwandais de développement de l'agriculture et des ressources animales).

Modèle économique et viabilité financière

L'activité n'est pas rentable actuellement. Le service est gratuit et repose sur des dons du Ministère fédéral allemand de la coopération économique et du développement; il ne génère donc pas de recettes. Dans l'avenir, on espère que le Ministère rwandais de l'agriculture investira dans la solution et élaborera des plans permettant de passer à une offre de service groupée. Deux modèles économiques sont possibles: i) faire de ICT4BXW un modèle de bien

public; ou ii) intégrer les outils dans un écosystème numérique plus large que les agriculteurs pourraient utiliser moyennant une petite redevance, dont un pourcentage permettrait à ICT4BXW de maintenir ses services. Des partenariats permanents ont été noués avec des entreprises commerciales, Arifu et VIAMO.

Facteurs déterminants

La demande croissante de solutions permettant de diagnostiquer et de lutter contre le flétrissement bactérien du bananier causé par *Xanthomonas*, qui menace la production d'une culture d'importance majeure pour la sécurité de l'alimentation et des revenus au Rwanda. En outre, l'utilisation accrue de smartphones et l'intérêt des pouvoirs publics pour l'usage des technologies numériques dans l'agriculture facilitent l'adoption de ce type de solutions.

Obstacles

Le faible taux de pénétration du smartphone et un manque de compétences numériques.

Politiques bloquantes ou facilitatrices

Le Gouvernement rwandais promeut l'utilisation de smartphones par les agriculteurs et la transformation numérique du secteur agricole au moyen de politiques ciblées. Il fournit aussi parfois un renforcement des capacités en matière de développement et de maintenance des technologies numériques.



Personne interrogée
Julius Adewopo

IGARA TEA

**Année de création**

1969 (investissement dans les solutions numériques à partir de 2017)

**Nombre actuel d'utilisateurs**

Plus de 7 000

**Zone d'activité**

Ouganda

**Secteur ciblé**

Thé

Services fournis

Des technologies numériques utilisées à différentes fins: fourniture d'information sur les profils des producteurs de thé, les limites des exploitations, l'utilisation des terres et la couverture des sols; localisation et suivi de la production de feuilles de thé; évaluation de l'état de santé des théiers; simulation de la capacité de production; fourniture d'informations aux prêteurs; services consultatifs et service de vulgarisation en ligne sur mesure; et facilitation de l'accès au crédit. Dans l'avenir, de petits dispositifs de mécanisation sont envisagés pour améliorer la précision et réduire le travail lié à la récolte, par exemple.

Clients et utilisateurs ciblés

Les petits producteurs de thé. Approximativement 18 pour cent des utilisateurs sont des femmes et les jeunes exploitants effectuent 65 pour cent du travail agricole. Plus de la moitié de la main-d'œuvre employée dans la transformation des feuilles de thé est composée de femmes et de jeunes. Les banques et les prestataires de services de crédit font aussi partie du public cible.

Modèle économique et viabilité financière

Initialement financée par des subventions, la société réalise actuellement un chiffre d'affaires en vendant le thé pour le compte des producteurs. Igara Tea fait office d'acheteur, de transformateur et de vendeur de thé. Il valorise et vend le thé sur les marchés locaux et internationaux pour le compte des parties prenantes (les producteurs de thé) qui lui cèdent la matière première. La transformation numérique aide à optimiser les achats, en permettant d'économiser jusqu'à 70 pour cent des coûts associés aux carnets de quittances, aux stylos, au papier, etc. Le délai d'amortissement des investissements dans le matériel et le logiciel a été de 1,5 an. Aujourd'hui, la société investit dans le matériel et le logiciel sans l'aide de subventions.

Facteurs déterminants

Les acheteurs, les agriculteurs et les fournisseurs de crédit souhaitent davantage de certitude, de transparence et de rapidité. Le développement d'engins de récolte des feuilles de thé est dicté par la hausse des coûts de main-d'œuvre.

Obstacles

Une capacité de transformation limitée qui bride l'expansion; des prix du thé bas à l'échelle mondiale; des agriculteurs qui ne disposent pas de moyens suffisants pour investir dans des machines. Igara Tea est considérée comme élaborant un programme de partage de la mécanisation.

Politiques bloquantes ou facilitatrices

La République de l'Ouganda est déterminée à faire progresser l'utilisation des solutions technologiques pour résoudre les problèmes de développement du pays. Toutefois, il est toujours difficile d'obtenir un soutien financier public. Les niveaux élevés de bureaucratie alourdissent les coûts, et des règlements et politiques clairs sur l'utilisation de drones seraient nécessaires.



Personne interrogée
Hamlus Owoyesiga

ioCrops



Année de création
2018



Nombre actuel d'utilisateurs
Plus de 200



Zone d'activité
République de Corée



Secteur ciblé
Cultures sous serre (tomates et poivrons, par exemple)

Services fournis

Des solutions autonomes de gestion des cultures, comprenant une surveillance des conditions climatiques dans les serres; une plateforme d'analyse de données et de prise de décision; des avis et des prévisions en matière de gestion des cultures; une culture automatisée; un pilotage à distance des tâches agricoles permettant de gérer des exploitations de par le monde sans qu'un gestionnaire de serre spécialisé ne soit présent sur chaque exploitation.

Clients et utilisateurs ciblés

Les serriculteurs travaillant à moyenne ou grande échelle. On estime qu'en République de Corée, moins de 10 pour cent des serres appartiennent à des femmes, et moins de 30 pour cent à des jeunes.

Modèle économique et viabilité financière

Les recettes proviennent de la vente de capteurs et de solutions fondées sur le web. ioCrops loue également des serres automatisées et conduit toutes les tâches de serriculture, de la gestion des conditions climatiques et de la gestion des cultures à la gestion de la main-d'œuvre et de la logistique après récolte. La majeure partie des investissements proviennent de fonds de capital-risque, les subventions n'apportant qu'une contribution limitée.

Facteurs déterminants

Le besoin de solutions automatisées s'accroît à mesure que la taille des exploitations augmente. La superficie couverte par les serres s'accroît, tout comme le nombre de grands exploitants. La jeune génération est plus ouverte aux solutions informatiques. Les salaires augmentent et l'offre de main-d'œuvre diminue.

Obstacles

Le scepticisme de certains exploitants à l'égard des solutions de haute technologie. Il existe également un risque que cette technologie conduise les petits producteurs à la faillite.

Politiques bloquantes ou facilitatrices

Le Gouvernement de la République de Corée investit dans des serres de haute technologie, y compris en formant des exploitants et en permettant à des sociétés telles que ioCrops d'expérimenter des solutions. En revanche, les pouvoirs publics craignent que ce type de solutions ne cause du tort aux petits producteurs, aussi agissent-ils en parallèle pour maintenir des systèmes plus traditionnels.



Personne interrogée
JinHyung Cho

JUSTDIGGIT



Année de création
2009



Nombre actuel d'utilisateurs
Plus de 700 000



Zone d'activité
Kenya, République-Unie
de Tanzanie



Secteurs ciblés
Arbres, graminées

Services fournis

Des solutions numériques et des solutions de communication (SMS, applications mobiles, drones, imagerie par satellite, apprentissage automatique, par exemple) mises au service d'une restauration à grande échelle des paysages en Afrique, par une transformation, par exemple, des terrains de parcours dégradés par les éleveurs pastoraux maasaï du Kenya en terres vertes et fertiles. Plus spécifiquement, ces solutions informent les agriculteurs sur la restauration des paysages, surveillent la croissance des arbres et l'évolution du paysage au fil du temps et peuvent aussi calculer les volumes de carbone ainsi piégés. Justdiggit aide aussi les femmes à vendre des semences et des récoltes de graminées autochtones.

Clients et utilisateurs ciblés

Les petits agriculteurs et éleveurs pastoraux et ceux qui pratiquent une agriculture ou un élevage de subsistance. Justdiggit travaille également avec des formateurs – dont une moitié de femmes – qui initient les agriculteurs à l'agroforesterie et au reverdissement des terres.

Modèle économique et viabilité financière

Justdiggit est une organisation sans but lucratif dont le financement dépend des dons. Elle travaille avec un grand réseau de médias partenaires qui s'emploient activement à lever des fonds et à susciter l'intérêt aux Pays-Bas et en Afrique. Justdiggit reçoit des dons de consommateurs, d'entreprises privées, de grandes institutions et programmes de financement ainsi que de quelques fondations familiales. L'organisation a connu une croissance régulière. Ses effectifs sont passés de 4 à 40 personnes en sept ans environ. Son objectif est de devenir moins dépendante des dons afin de faciliter la transposition à plus grande échelle.

Facteurs déterminants

La sensibilisation croissante à l'accélération du changement climatique. La solution permet d'augmenter les rendements des cultures et les disponibilités en eau, ce qui améliore les revenus et les moyens de subsistance, et de réduire l'érosion des sols et le ruissellement, ce qui profite à la fertilité et à l'humidité des sols. L'intérêt pour les solutions s'inspirant de la nature et les solutions de reverdissement est en plein essor.

Obstacles

Le faible taux de pénétration des smartphones, le manque de compétences numériques et l'accès limité à internet. Il est souvent nécessaire de renforcer les capacités des formateurs dans le domaine numérique.

Politiques bloquantes ou facilitatrices

Au Kenya, la parcellisation des terres peut susciter la méfiance car les propriétaires fonciers décident si la terre demeure publique ou s'il s'agit d'une terre privée, subdivisée en parcelles plus petites.



Personne interrogée
Sander de Haas

LELY



Année de création
1948



Nombre actuel d'utilisateurs
Plus de 25 000



Zone d'activité
Amérique du Nord,
Australie, Europe



Secteur ciblé
Production laitière

Services fournis

Des solutions robotiques et des solutions logicielles (gestion) pour la production laitière. Plus précisément, l'entreprise fournit des robots fixes de traite, d'évacuation des effluents et de nourrissage et développe des solutions de gestion des bâtiments d'élevage (pour contrôler les émissions de gaz) ainsi que des robots de récolte d'herbe fraîche. Par ailleurs, le logiciel de gestion fournit des informations et des services consultatifs sur toutes les activités de l'exploitation, y compris sur la santé et le bien-être des animaux.

Clients et utilisateurs ciblés

Les producteurs laitiers de taille moyenne ou grande (mais pas ceux de très grande taille).

Modèle économique et viabilité financière

Le chiffre d'affaires est généré par les ventes de solutions et les contrats de service. L'entreprise propose des arrangements associant un financement et un contrat de location-exploitation, qui encouragent les agriculteurs à franchir le pas. Elle reçoit en outre des pays et de l'Union européenne des financements sous la forme de subventions. Le chiffre d'affaires est estimé à 650 millions d'EUR, dont une part importante est réinvestie dans la recherche et l'innovation.

Facteurs déterminants

La recherche d'une plus grande souplesse dans les horaires de travail et d'une moindre pénibilité; le manque de main-d'œuvre; le respect des règlements environnementaux (réduction des émissions des exploitations laitières, par exemple); les préoccupations liées au bien-être animal; la fourniture de services financiers; les gains en matière d'efficacité énergétique et l'utilisation de sources d'énergie renouvelables. Les solutions proposées s'intègrent facilement dans les exploitations conventionnelles.

Obstacles

Non mentionné.

Politiques bloquantes ou facilitatrices

D'une part, les facteurs qui facilitent l'adoption sont les règlements en matière d'environnement et de bien-être animal et les programmes de subventions pour l'investissement dans des solutions qui réduisent les émissions des bâtiments d'élevage. D'un autre côté, l'adoption peut être freinée si les agriculteurs attendent de recevoir des subventions pour investir. Le débat sur les nouvelles réglementations relatives à la libre circulation et au comportement naturel des animaux dans les exploitations nécessitera de nouvelles stratégies pour adapter les solutions de traite proposées actuellement.



Personne interrogée
Martijn Bruggeman

SEED INNOVATIONS



Année de création
2019



Nombre actuel d'utilisateurs
1 500



Zone d'activité
Népal



Secteur ciblé
Cultures

Services fournis

Une application Android – PlantSat – qui met l'analyse de données satellite au service des agriculteurs pour leur permettre de suivre l'état des cultures, et notamment de détecter les menaces, telles que le manque ou l'excès d'eau et de nutriments, et d'accéder à des informations agronomiques et d'en échanger. Les services intégrés comprennent: l'identification des menaces pesant sur la production, le calcul de la quantité d'azote et de l'humidité des plantes, des notifications relatives aux calendriers agricoles, l'assistance d'experts, des informations météorologiques et l'enregistrement des données concernant l'exploitation. Offre groupée de services simplifiés, l'application permet de réduire les exigences en matière de connectivité (saisie hors ligne des données) et de diminuer les dépenses de fonctionnement (par exemple en limitant l'espace serveur nécessaire pour stocker les points de données).

Clients et utilisateurs ciblés

Principalement les exploitations de taille moyenne ou grande pour les services de conseil à l'aide de satellites, et les petits producteurs tournés vers les marchés pour les services consultatifs généraux.

Modèle économique et viabilité financière

La solution est actuellement gratuite pour les agriculteurs. Ultérieurement, l'entreprise commercialisera des plans d'abonnement annuels pour les compagnies d'assurances, qui auront ainsi accès aux informations recueillies et pourront suivre les cultures et les résultats des agriculteurs et déterminer l'admissibilité des demandes d'indemnisation. Quelque 40 pour cent des financements proviennent de subventions.

Facteurs déterminants

Les exigences limitées en matière de connectivité et le faible coût de la solution.

Obstacles

La défiance à l'égard des nouvelles technologies.

Politiques bloquantes ou facilitatrices

Le Gouvernement népalais aide les agriculteurs qui génèrent de faibles revenus à participer à des dispositifs d'assurance au moyen de subventions couvrant 75 pour cent de leur prime. Par ailleurs, il convient de noter l'absence de règles ou de réglementations strictes en matière de protection de la vie privée, de sécurité des données ou de propriété intellectuelle qui pourraient freiner l'adoption de la solution.



Personne interrogée
Suman Ghimire

SEETREE



Année de création
2017



Nombre actuel d'utilisateurs
Plus de 3 000



Zone d'activité
Afrique du Sud, Brésil, Chili, Espagne, États-Unis d'Amérique, Grèce, Mexique, Portugal (et analyse de données et recherche-développement en Israël)



Secteur ciblé
Arbres fruitiers (y compris fruits à coque)

Services fournis

Des solutions numériques via une plateforme d'intelligence des données, pour surveiller la santé des arbres, l'optimisation et la croissance des fruits, gérer les stocks et la production, estimer les rendements, suivre les activités agricoles et mesurer leur impact.

Clients et utilisateurs ciblés

Principalement les grands cultivateurs, mais aussi les coopératives fruitières, pour toucher les petits producteurs.

Modèle économique et viabilité financière

L'accès moyennant un abonnement annuel à la plateforme d'intelligence des données, par une application web ou mobile. Les services aident les cultivateurs à employer les ressources avec précision, à gérer les stocks et à optimiser l'utilisation de la main-d'œuvre. La plateforme génère actuellement un chiffre d'affaires par hectare compris entre 30 et 100 USD; plus l'exploitation est de taille importante, plus le prix par hectare est faible.

Facteurs déterminants

La forte demande, de la part des cultivateurs qui possèdent de grandes exploitations, de solutions qui augmentent la productivité et l'efficacité d'utilisation des ressources, et réduisent les incertitudes liées aux rendements et aux prix du marché. On note également un intérêt grandissant pour le piégeage du carbone (pour l'obtention de crédits carbone).

Obstacles

La défiance des cultivateurs à l'égard des technologies numériques et leur manque de compétences numériques, qui ne leur permet pas de mesurer l'intérêt de la solution à partir des démonstrations pilotes. Par ailleurs, les cultivateurs attendent un guichet unique qui leur permette d'appliquer les recommandations issues de processus décisionnels fondés sur les données et du réseautage avec les acteurs des chaînes d'approvisionnement locales. Dans certaines régions, la faiblesse des liens commerciaux entre les fournisseurs d'intrants ralentit l'utilisation et empêche certains cultivateurs d'accéder à des recommandations et de les mettre en œuvre.

Politiques bloquantes ou facilitatrices

Sans objet.



Personne interrogée
Israel Talpaz

SOWIT



Année de création
2017



Nombre actuel d'utilisateurs
Plus de 17 490



Zone d'activité
Éthiopie, Maroc,
Sénégal, Tunisie



Secteurs ciblés
Fruits, céréales, colza

Services fournis

Des outils d'aide à la décision et des analyses d'informations, principalement pour l'irrigation, l'utilisation d'engrais et l'estimation des rendements.

Clients et utilisateurs ciblés

Les grandes entreprises agroalimentaires et les producteurs de petite taille ou de taille moyenne. Au Maroc, plus de 20 pour cent des agriculteurs bénéficiant des services sont des femmes. Le personnel de SOWIT comprend également une large part de femmes (44 pour cent), et ne compte que des jeunes.

Modèle économique et viabilité financière

Le modèle est fondé sur un abonnement annuel. Le prix annuel par hectare varie entre 10 et 70 USD en fonction du nombre d'outils d'aide à la décision demandés (interfaces multilingues en accès à la fois mobile et web, notamment). Depuis sa création, SOWIT a mobilisé des ressources grâce à des levées de fonds et à des subventions d'organismes de développement tels que l'Agence des États-Unis pour le développement international. En 2021, les subventions représentaient 25 pour cent du chiffre d'affaires.

Facteurs déterminants

L'impact du changement climatique et d'autres facteurs influant sur la disponibilité en eau pour l'irrigation, et le besoin croissant d'optimiser l'utilisation de la ressource. Partant, la demande

de systèmes proposant des recommandations quotidiennes et localisées concernant l'irrigation. La solution peut aussi optimiser l'utilisation des engrains, dont les prix augmentent également. Les compagnies d'assurances doivent de plus en plus s'adapter et proposer des polices d'assurance abordables pour les cultures. SOWIT offre une alternative à l'assurance indicelle, car elle peut fournir des estimations de rendement fondées sur la situation réelle. Un agriculteur peut assurer une culture en fonction du rendement attendu, qui correspond au rendement moyen dans sa zone agroclimatique.

Obstacles

Au Maroc, des obstacles technologiques aux importations et des options de paiement numérique limitées pour les clients.

Politiques bloquantes ou facilitatrices

Au Maroc, les pouvoirs publics investissent dans l'innovation pour le secteur agricole, par exemple en promouvant l'entrepreneuriat agricole auprès des jeunes, en renforçant le rôle des coopératives agricoles et en mettant au point de nouvelles subventions pour les solutions numériques. En particulier, la stratégie Génération Green 2020-2030 vise à relier 2 millions d'agriculteurs aux plateformes numériques, dont celle de SOWIT. Cependant, l'absence de réglementation de l'utilisation des drones représente un obstacle au développement de la technologie. C'est pourquoi SOWIT est passée à la télédétection par satellite.



Personne interrogée
Hamza Rkha Chaham

TRASEABLE SOLUTIONS



Année de création
2018



Nombre actuel d'utilisateurs
Plus de 2 000



Zone d'activité
Fidji, îles Cook, îles Salomon,
Papouasie-Nouvelle-Guinée,
Samoa, Tonga, Vanuatu



Secteurs ciblés
Cultures, thon, bois d'œuvre

Services fournis

Un ensemble d'outils numériques qui fournissent aux agriculteurs des informations sur le secteur, ainsi que sur leur propre exploitation – ressources, stocks, ventes et charges, notamment. La solution contribue également à créer des liens avec les marchés.

Par ailleurs, l'entreprise propose une solution axée sur la pêche au thon, qui permet un étiquetage et un suivi des poissons tout au long de la chaîne de valeur. Cette solution comprend un module de gestion de la flotte, qui fournit des informations sur les équipages, les dépenses de fonctionnement, les frais d'entretien, les captures de thon, etc.

Clients et utilisateurs ciblés

Principalement les petits producteurs, mais aussi certains producteurs de taille moyenne, ainsi que les organisations d'agriculteurs et les entreprises agroalimentaires (essentiellement celles qui exportent). Les femmes et les jeunes représentent respectivement 40 pour cent et 15 pour cent environ des utilisateurs. Les clients sont principalement des organismes de développement qui recherchent des données à l'échelle régionale.

Modèle économique et viabilité financière

Les agriculteurs peuvent télécharger gratuitement la solution, mais les organisations d'agriculteurs, les entreprises agroalimentaires, les entreprises de pêche et les usines de transformation doivent s'acquitter d'un abonnement (plusieurs niveaux disponibles) pour accéder aux services. L'entreprise propose des services de conseil, qui génèrent la majeure partie des recettes, et a bénéficié de subventions pour financer son activité.

Facteurs déterminants

L'intérêt croissant des producteurs – en particulier des exportateurs – pour des services efficaces et peu onéreux de collecte de données; l'intérêt croissant des organisations d'agriculteurs pour des services de renforcement des capacités et de conseil; l'obligation de respecter la réglementation en matière de sécurité sanitaire des aliments et les règles de traçabilité. La pandémie de covid-19 a accéléré l'adoption des solutions numériques et a fait croître l'intérêt pour ce type de services. Les organismes de développement considèrent les capacités de TraSeable Solutions en matière d'acquisition de données et de réseautage dans la région comme une proposition de valeur intéressante.

Obstacles

La réglementation stricte sur les données, qui ne favorise pas la création et la gestion des solutions numériques. Les faibles compétences numériques des agriculteurs.

Politiques bloquantes ou facilitatrices

Non mentionné.



Personne interrogée
Kenneth Katafono

TROTRO TRACTOR



Année de création
2016



Nombre actuel d'utilisateurs
75 000



Zone d'activité
Bénin, Ghana, Nigéria, Togo,
Zambie, Zimbabwe



Secteur ciblé
Cultures arables

Services fournis

Une plateforme de location numérique qui offre un vaste éventail de machines et de matériel agricoles et met les petits producteurs en relation avec les propriétaires qui proposent des services de location. Récemment, des propriétaires de drones ont commencé à proposer des services (cartographie et pulvérisation, par exemple). Toutes les machines sont équipées de la balise IdO (internet des objets) de TROTRO.

Clients et utilisateurs ciblés

Les petits exploitants agricoles, mais des exploitations de taille moyenne ou grande font également partie des clients, ainsi que de plus en plus d'entreprises agricoles opérant sous contrat. Près de 40 pour cent des clients sont des femmes, et l'entreprise souhaiterait faire progresser ce pourcentage.

Modèle économique et viabilité financière

Les recettes proviennent principalement des frais de mise en relation facturés pour chaque location de machines agricoles (10 pour cent par transaction). Des recettes supplémentaires sont générées par les ventes de balises GNSS IdO (les propriétaires qui louent leurs machines par l'intermédiaire de la plateforme sont obligés de les équiper de ce dispositif). L'entreprise est rentable dans tous les pays dans lesquels elle opère, à l'exception du Ghana – les résultats insatisfaisants dans ce pays étant peut-être dus au fait que seulement 40 pour cent des utilisateurs enregistrés sont des clients réguliers. L'entreprise dépend en partie de subventions, qu'elle utilise principalement pour étendre ses activités.

Facteurs déterminants

La plupart des petits exploitants n'ont pas les moyens d'acheter des tracteurs, et doivent donc en louer s'ils veulent mécaniser leurs activités.

La plateforme permet un accès transparent et fiable – ce qui est impossible avec les mécanismes de marché traditionnels. Les agricultrices utilisent de plus en plus ce service, car il les protège de la discrimination issue des normes sociales. Les jeunes agriculteurs l'utilisent également plus volontiers, étant généralement plus dynamiques et ouverts aux solutions innovantes; certains suivent en outre une formation d'opérateur de machines agricoles. La pandémie de covid 19 a accéléré la transformation numérique de l'agriculture et a favorisé l'essor de cette solution. L'utilisation accrue de drones est due au fait que les agriculteurs ont de plus en plus besoin de données foncières précises pour obtenir des financements et des crédits et souscrire des assurances.

Obstacles

L'augmentation du prix des carburants, qui rend le service inaccessible à certains agriculteurs; le manque d'accès au crédit et aux financements, pénalisant pour les opérateurs qui souhaitent acheter des machines pour les louer aux agriculteurs. Des infrastructures routières médiocres empêchent parfois de déplacer les machines pour proposer les services dans d'autres endroits.

Politiques bloquantes ou facilitatrices

Parallèlement aux investissements dans les infrastructures et les technologies numériques, les subventions et les incitations à produire des cultures de base ont encouragé la mécanisation.



Personne interrogée
Kamal Yakub

TUN YAT



Année de création
2017



Nombre actuel d'utilisateurs
Plus de 20 000



Zone d'activité
Myanmar



Secteurs ciblés
Principalement la production de riz, de haricot mungo, de sésame, d'arachide et de maïs

Services fournis

Des services de mécanisation dans la région du delta et les zones arides du Myanmar. Tun Yat gère sa propre flotte de tracteurs et sert d'intermédiaire entre les propriétaires de machines et les agriculteurs.

Clients et utilisateurs ciblés

Principalement les petits producteurs, mais aussi les exploitations de taille moyenne. Quelque 30 pour cent des clients sont des femmes, et entre 25 et 30 pour cent sont des jeunes de 30 ans ou moins.

Modèle économique et viabilité financière

Les recettes sont générées par les montants facturés pour le service, par acre ou par heure. Les marges les plus importantes sont réalisées sur les services proposés directement avec la flotte de l'entreprise. Les moins élevées sont celles des services de mise en relation. Tun Yat tire également des recettes de recherches menées en Asie du Sud-Est.

Facteurs déterminants

L'impossibilité pour les agriculteurs de posséder leurs propres machines; le manque de fiabilité des prestations de services liés aux machines; la pénétration accrue des appareils mobiles et des smartphones.

Obstacles

L'augmentation des prix des intrants et des carburants, et la possibilité pour les utilisateurs de se passer des services de Tun Yat une fois qu'ils ont été mis en relation les uns avec les autres; un manque de compétences numériques et une connexion médiocre à internet; le manque de confiance (dans les paiements par mobile, par exemple); le besoin d'accompagnement technologique et de renforcement des capacités.

Politiques bloquantes ou facilitatrices

Le Gouvernement du Myanmar s'est engagé à mettre en place des mesures dans le domaine numérique, mais le climat politique incertain décourage l'innovation et l'investissement. Par ailleurs, les mesures existantes en matière de transformation numérique et de données ciblent majoritairement la cybersécurité et la surveillance, ce qui peut également freiner l'utilisation.



Personne interrogée
Hujjat Nadarajah

URBANAGROW



Année de création
2019



Nombre actuel d'utilisateurs
Non connu



Zone d'activité
Chili



Secteur ciblé
Légumes feuilles

Services fournis

Des unités modulaires pour l'agriculture verticale en environnement hautement contrôlé. Les produits cibles sont principalement des légumes feuilles (salades ou basilic, par exemple). Les installations utilisent des sources lumineuses à diodes électroluminescentes et des capteurs pour contrôler la température et l'humidité, ainsi qu'un système de recyclage pour réduire la consommation d'eau. La production est adaptée aux besoins des clients.

Clients et utilisateurs ciblés

Tous les acteurs situés en fin de chaîne d'approvisionnement alimentaire, notamment les détaillants, les supermarchés, les restaurants, les consommateurs et parfois les administrations, qui souhaitent produire des légumes feuilles frais pour les vendre ou pour les consommer.

Modèle économique et viabilité financière

L'entreprise en est encore aux premiers stades, mais les unités seront bientôt commercialisées. Elle bénéficie en outre du soutien d'associés internationaux (institut Fraunhofer en Allemagne, par exemple). Elle prévoit de vendre des unités modulaires sous environnement contrôlé, avec un équipement personnalisé en fonction des besoins des clients (types de légumes et quantités à produire).

Facteurs déterminants

La croissance de la demande de produits frais, notamment dans les zones reculées où l'agriculture n'est pas possible en raison des conditions climatiques. Cette technologie répond également à la demande croissante de produits frais de haute qualité, sans danger pour la santé et durables sur le plan environnemental. Son adoption sera facilitée par l'expansion de la 5G, car une bonne connexion à internet est nécessaire.

Obstacles

La défiance de certains producteurs agricoles et consommateurs à l'égard de l'agriculture en milieu contrôlé. On note également un manque de sensibilisation au changement climatique et aux autres questions environnementales, ce qui limite la valeur ajoutée de ce service.

Politiques bloquantes ou facilitatrices

Les normes environnementales de plus en plus exigeantes dans l'agriculture favorisent l'adoption de cette technologie; cependant, le manque de clarté des règlements concernant l'utilisation des produits agrochimiques permet à la concurrence de proposer des produits alimentaires à des prix plus bas – mais de qualité inférieure.



Personnes interrogées
Maricruz Larrera et Eduardo Vásquez

ZLTO



Année de création
2013



Nombre actuel d'utilisateurs
13 000



Zone d'activité
Pays-Bas



Secteurs ciblés
Horticulture, élevage
(y compris laitier),
cultures arables

Services fournis

Une assistance technique et des services de conseil sur la transformation numérique et la gestion des données. Par ailleurs, en coopération avec l'agence néerlandaise pour les entreprises (RVO), ZLTO (Organisation agricole et horticole du sud) met les agriculteurs en relation avec les fournisseurs et appuie des processus d'innovation, principalement par ses activités liées à l'agriculture et à l'élevage de précision.

Clients et utilisateurs ciblés

Les membres de l'organisation. Les principales activités cibles sont l'horticulture, l'élevage porcin, la production laitière et les cultures arables.

Modèle économique et viabilité financière

Ne s'applique pas directement à ZLTO, étant donné qu'il ne s'agit pas d'un fournisseur de solutions.

Facteurs déterminants

Les jeunes agriculteurs, qui sont familiers avec les technologies de l'information et de la communication (TIC) et qui s'y intéressent. L'autre facteur

déterminant est le manque de main-d'œuvre non qualifiée, qui incite à se tourner vers la robotisation et l'automatisation, et la main-d'œuvre qualifiée abondante qui souhaite travailler avec les technologies numériques, et dispose des compétences nécessaires.

Obstacles

Tous les avantages liés aux investissements dans les machines et les technologies numériques ne sont pas bien saisis par les agriculteurs. On note des incertitudes en ce qui concerne le retour sur les investissements dans le nouveau matériel et la formation nécessaire pour apprendre à s'en servir.

Politiques bloquantes ou facilitatrices

Aucun obstacle à l'utilisation dû aux politiques n'a été perçu. ZLTO met en œuvre des projets de diffusion de données pour promouvoir l'agriculture de précision, l'automatisation et la robotique. L'Union européenne encourage également une politique de partages de données agricoles et envisage d'en faire un bien public.



Personnes interrogées

Peter Paree (ZLTO) et Folkwin Polemen (RVO)

ANNEXE 2

TABLEAUX STATISTIQUES

TABLEAU A2.1 NOMBRE DE TRACTEURS UTILISÉS PAR MILLIER D'HECTARES DE TERRES ARABLES (DERNIÈRE ANNÉE DISPONIBLE)

PAYS/TERRITOIRE	Année	Tracteurs (unités)	Terres arables (milliers d'ha)	Tracteurs par millier d'ha de terres arables
MONDE ENTIER				
AFRIQUE				
Afrique du Nord				
Algérie	2008	104 529	7 489	14,0
Égypte*	2009	110 304	2 884	38,2
Libye	2000	39 733	1 815	21,9
Maroc	1999	43 226	8 818	4,9
Sahara occidental	1975	11	2	5,5
Tunisie*	2008	42 783	2 835	15,1
Afrique subsaharienne				
Afrique australe				
Afrique du Sud	2004	63 200	13 300	4,8
Botswana	2008	3 371	279	12,1
Eswatini	2007	1 550	178	8,7
Lesotho	1995	2 000	320	6,3
Afrique centrale				
Angola	1971	8 108	2 900	2,8
Cameroun	1991	508	5 950	0,1
Congo	1974	647	526	1,2
République centrafricaine	1969	56	1 760	0,0
République démocratique du Congo	1971	1 062	6 470	0,2
Sao Tomé-et-Principe	1971	117	1	117,0
Tchad	1965	27	2 897	0,0
Afrique de l'Est				
Burundi	1992	170	930	0,2
Djibouti	2006	6	1	4,6
Érythrée	2000	463	560	0,8
Kenya	2002	12 844	5 091	2,5
Madagascar	2004	550	2 950	0,2
Malawi	1968	692	1 800	0,4
Maurice	1968	283	100	2,8
Mayotte	2003	14	7	1,9
Mozambique	1970	4 193	2 785	1,5
Ouganda	1977	2 076	4 023	0,5
République-Unie de Tanzanie	2002	21 207	8 600	2,5
Réunion	2005	2 941	35	84,0
Rwanda	2002	56	1 116	0,1

>>

TABLEAU A2.1 (suite)

PAYS/TERRITOIRE	Année	Tracteurs (unités)	Terres arables (milliers d'ha)	Tracteurs par millier d'ha de terres arables
Seychelles	1974	30	1	30,0
Somalie	2006	1 371	1 140	1,2
Zambie	1987	5 628	2 568	2,2
Zimbabwe	1997	22 496	3 500	6,4
Afrique de l'Ouest				
Ascension, Sainte-Hélène et Tristan da Cunha	1996	12	4	3,0
Bénin	1998	182	2 250	0,1
Burkina Faso	1995	1 933	3 380	0,6
Cabo Verde	2004	56	48	1,2
Côte d'Ivoire	2001	8 981	2 800	3,2
Gambie*	2009	100	428	0,2
Ghana	2005	1 807	4 076	0,4
Guinée	2000	5 388	2 149	2,5
Guinée-Bissau	1996	19	270	0,1
Mali	2007	1 300	5 808	0,2
Mauritanie	2006	390	400	1,0
Niger*	2006	375	14 137	0,0
Nigéria	2007	24 800	37 000	0,7
Sénégal	2004	645	2 987	0,2
Sierra Leone	1997	81	484	0,2
Togo*	2008	159	2 340	0,1
AMÉRIQUE				
Amérique du Nord				
Bermudes	1998	45	0	112,5
Canada	2006	733 182	39 283	18,7
États-Unis d'Amérique	2007	4 389 812	161 780	27,1
Amérique latine et Caraïbes				
Amérique centrale				
Belize	1985	940	43	21,9
Costa Rica	1973	5 432	283	19,2
El Salvador	1971	2 642	488	5,4
Guatemala	1970	3 150	1 100	2,9
Honduras	2000	5 200	1 068	4,9
Mexique	2007	238 830	23 519	10,2
Nicaragua	1997	2 700	1 750	1,5
Panama	2000	8 066	548	14,7
Amérique du Sud				
Argentine	2002	244 320	27 862	8,8
Bolivie (État plurinational de)	2000	6 000	3 144	1,9
Brésil	2006	788 053	48 914	16,1



ANNEXE 2

TABLEAU A2.1 (suite)

PAYS/TERRITOIRE	Année	Tracteurs (unités)	Terres arables (milliers d'ha)	Tracteurs par millier d'ha de terres arables
Chili	2007	53 915	1 262	42,7
Colombie	1997	21 000	2 539	8,3
Équateur	2000	14 652	1 616	9,1
Guyana	1977	3 401	422	8,1
Guyane française	2005	317	12	26,4
Paraguay	2008	25 823	3 757	6,9
Pérou	1995	13 191	3 740	3,5
Suriname*	2009	1 037	58	17,9
Uruguay	2008	36 465	1 826	20,0
Venezuela (République bolivarienne du)	1977	33 888	2 964	11,4
Caraïbes				
Antigua-et-Barbuda	1976	228	3	76,0
Bahamas	1996	98	6	16,3
Barbade	1989	577	16	36,1
Cuba	2007	72 602	3 573	20,3
Dominique	1968	54	7	7,7
Grenade	1999	12	1	12,0
Guadeloupe	2005	853	19	44,9
Haïti	1998	146	900	0,2
Îles Vierges américaines	2007	119	1	119,0
Îles Vierges britanniques	1987	3	3	1,0
Jamaïque	1970	1 745	145	12,0
Martinique	2005	873	10	87,3
Montserrat	1987	12	2	6,0
Porto Rico	2007	3 255	37	88,2
République dominicaine*	2009	51	800	0,1
Sainte-Lucie	2007	14	2	5,8
Saint-Kitts-et-Nevis*	2009	26	4	6,5
Saint-Vincent-et-les Grenadines	2003	112	2	56,0
Trinité-et-Tobago	2004	5 129	26	197,3
ASIE				
Asie centrale				
Kazakhstan	2007	40 228	28 641	1,4
Kirghizistan	2008	24 445	1 280	19,1
Tadjikistan	2008	15 951	741	21,5
Turkménistan	1993	52 304	1 586	33,0
Asie du Sud				
Afghanistan	2009	223	7 793	0,0
Bangladesh	2006	3 000	7 880	0,4

>>

TABLEAU A2.1 (suite)

PAYS/TERRITOIRE	Année	Tracteurs (unités)	Terres arables (milliers d'ha)	Tracteurs par millier d'ha de terres arables
Bhoutan	2008	136	100	1,4
Inde*	2003	2 812 200	159 799	17,6
Iran (République islamique d')	2007	308 422	16 869	18,3
Népal*	2008	37 872	2 220	17,1
Pakistan	2006	439 741	30 320	14,5
Sri Lanka	1982	13 976	857	16,3
Asie du Sud-Est				
Brunéi Darussalam	1983	72	3	24,0
Cambodge	2008	4 611	3 700	1,2
Indonésie	2002	4 097	20 081	0,2
Malaisie	1995	43 295	901	48,1
Myanmar*	2009	160 506	10 794	14,9
Philippines*	2002	1 528 053	4 935	309,6
République démocratique populaire lao	1981	664	780	0,9
Thaïlande	2002	697 956	15 389	45,4
Timor-Leste	1997	90	127	0,7
Viet Nam	2000	162 746	6 200	26,2
Asie occidentale				
Arabie saoudite	1998	9 792	3 637	2,7
Arménie*	2009	14 777	449	32,9
Azerbaïdjan	2009	21 542	1 874	11,5
Bahreïn*	2007	21	1	15,0
Chypre	2003	11 717	112	104,6
Émirats arabes unis	2000	380	60	6,3
Géorgie*	2007	40 100	463	86,6
Iraq	2001	72 775	4 300	16,9
Israël*	2009	21 591	304	71,0
Jordanie	2008	5 483	150	36,7
Koweït	2008	109	11	9,6
Liban	1999	8 256	129	64,0
Oman	2004	201	29	6,9
Palestine	2008	7 756	83	93,4
Qatar	2005	73	12	6,3
République arabe syrienne	2008	109 890	4 699	23,4
Türkiye*	2008	1 070 746	21 555	49,7
Yémen	2000	6 340	1 545	4,1
Asie orientale				
Chine*	2000	13 688 736	119 666	114,4
Chine (continentale)*	2009	21 024 788	121 385	173,2

>>

ANNEXE 2

TABLEAU A2.1 (suite)

PAYS/TERRITOIRE	Année	Tracteurs (unités)	Terres arables (milliers d'ha)	Tracteurs par millier d'ha de terres arables
Chine – RAS de Hong-Kong*	1996	4	6	0,7
Japon	2005	1 910 724	4 360	438,2
Mongolie	2008	3 232	1 197	2,7
Province chinoise de Taïwan	2009	47 004	595	79,0
République de Corée	2008	253 531	1 565	162,0
République populaire démocratique de Corée	1984	67 500	2 285	29,5
EUROPE				
Europe de l'Est				
Bélarus	2009	48 100	5 544	8,7
Bulgarie	2008	53 100	3 088	17,2
Fédération de Russie	2009	329 980	121 649	2,7
Hongrie*	2005	128 250	4 601	27,9
Pologne	2009	1 577 290	12 066	130,7
République de Moldova*	2009	35 984	1 817	19,8
Roumanie	2009	176 841	8 789	20,1
Slovaquie	2008	21 372	1 382	15,5
Tchéquie	2007	83 813	2 626	31,9
Ukraine*	2009	369 131	32 478	11,4
Europe de l'Ouest				
Allemagne*	2009	681 200	11 945	57,0
Autriche*	2005	432 177	1 381	313,0
Belgique	2005	95 010	843	112,7
France	2005	1 176 425	18 378	64,0
Liechtenstein	1990	446	4	111,5
Luxembourg*	2009	6 527	62	105,7
Pays-Bas	2005	144 600	1 111	130,2
Suisse*	2009	163 600	406	403,0
Europe du Nord				
Danemark	2005	113 402	2 332	48,6
Estonie	2006	33 744	559	60,4
Finlande	2005	175 232	2 237	78,4
Irlande	2005	174 800	1 184	147,6
Islande	2009	11 432	124	92,2
Lettonie	2007	59 562	1 188	50,1
Lituanie	2009	118 041	2 054	57,5
Norvège	2005	132 673	862	153,9
Royaume-Uni de Grande-Bretagne et d'Irlande du Nord	1989	509 780	6 702	76,1
Suède	2005	159 590	2 687	59,4



TABLEAU A2.1 (suite)

PAYS/TERRITOIRE	Année	Tracteurs (unités)	Terres arables (milliers d'ha)	Tracteurs par millier d'ha de terres arables
Europe du Sud				
Albanie*	2009	7 883	609	12,9
Andorre	2009	353	1	458,4
Bosnie-Herzégovine	1996	29 000	900	32,2
Croatie	2002	4 242	858	4,9
Espagne*	2009	1 320 599	12 497	105,7
Grèce	2006	259 613	2 584	100,5
Italie	2002	1 754 401	8 287	211,7
Macédoine du Nord	2007	53 606	431	124,4
Malte*	2002	2 012	9	223,6
Portugal	2005	176 394	1 305	135,1
Serbie	2008	5 844	2 661	2,2
Slovénie*	2005	108 461	176	616,3
OCÉANIE				
Australie et Nouvelle-Zélande				
Australie	1974	332 560	14 778	22,5
Nouvelle-Zélande	1986	81 441	2 585	31,5
Mélanésie				
Fidji	2008	5 983	169	35,4
Îles Salomon	1990	8	11	0,7
Nouvelle-Calédonie	2002	1 941	7	285,4
Papouasie-Nouvelle-Guinée	1997	1 160	197	5,9
Vanuatu	1971	35	15	2,3
Micronésie				
Guam*	2007	84	1	84,0
Îles Mariannes du Nord	2007	99	0	396,0
Kiribati	1975	14	2	7,0
Polynésie				
Îles Cook	1998	165	2	82,5
Nioué	1984	10	1	10,0
Polynésie française	1995	273	3	91,0
Samoa	2002	94	13	7,2
Samoa américaines	2003	36	4	9,3
Tonga	2004	243	15	16,2

NOTE: Les données recueillies correspondent à trois types de tracteurs (tracteurs à roues, tracteurs à chenilles et chenillards); pour les pays dont le nom est suivi d'un astérisque (*), un quatrième type de tracteurs (motoculteurs) est pris en compte à partir de 2000.

BIBLIOGRAPHIE

GLOSSAIRE

- 1 Klerkx, L., Jakku, E. et Labarthe, P.** 2019. A review of social science on digital agriculture, smart farming and agriculture 4.0: New contributions and a future research agenda. *NJAS – Wageningen Journal of Life Sciences*, 90-91: 100315 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1016/j.njas.2019.100315>).
- 2 Schroeder, K., Lampietti, J. et Elabed, G.** 2021. *What's cooking: Digital transformation of the agrifood system*. Washington, Banque mondiale (disponible à l'adresse suivante: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/35216>).
- 3 Birner, R., Daum, T. et Pray, C.** 2021. Who drives the digital revolution in agriculture? A review of supply-side trends, players and challenges. *Applied Economic Perspectives and Policy*, 43(4): 1260-1285 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1002/aapp.13145>).
- 4 Santos Valle, S. et Kienzle, J.** 2020. *Agriculture 4.0 – Robotique agricole et matériel automatisé au service d'une production agricole durable*. Gestion intégrée des cultures. Vol. 24. Rome, FAO (disponible à l'adresse suivante: <https://www.fao.org/3/cb2186fr/CB2186FR.pdf>).
- 5 FAO.** 2016. *Sustainable agricultural mechanization*. Note d'information. Rome (disponible à l'adresse suivante: www.fao.org/3/i6167e/i6167e.pdf).
- 6 FAO et CUA (Commission de l'Union africaine).** 2019. *La mécanisation agricole durable: Cadre stratégique pour l'Afrique*. Addis-Abeba (disponible à l'adresse suivante: <https://www.fao.org/3/CA1136FR/ca1136fr.pdf>).
- 7 FAO.** 2021. *La Situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture. Rendre les systèmes agroalimentaires plus résilients face aux chocs et aux situations de stress*. Rome (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.4060/cb4476fr>).
- 8 Lowenberg-DeBoer, J.** 2022. *Economics of adoption for digital automated technologies in agriculture*. Document de base établi aux fins de l'élaboration de *La Situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture 2022*. Document de travail de la FAO sur l'économie du développement agricole 22-10. Rome, FAO.
- 9 Ceccarelli, T., Chauhan, A., Rambaldi, G., Kumar, I., Cappello, C., Janssen, S. et McCampbell, M.** 2022. *Leveraging automation and digitalization for precision agriculture: Evidence from the case studies*. Document de base établi aux fins de l'élaboration de *La*

Situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture 2022. Étude technique de la FAO sur l'économie du développement agricole n° 24. Rome, FAO.

10 FAO. 2017. *Conservation agriculture*. Note d'information. Rome (disponible à l'adresse suivante: www.fao.org/3/17480en/17480EN.pdf).

11 International Society of Precision Agriculture (ISPA). 2021. Precision Ag Definition. Dans: ISPA [en ligne]. Monticello, Illinois (États-Unis). [Consulté le 20 décembre 2021]. www.ispag.org/about/definition.

12 Lowenberg-DeBoer, J., Huang, I.Y., Grigoriadis, V. et Blackmore, S. 2020. Economics of robots and automation in fieldcrop production. *Precision Agriculture*, 21(2): 278-299 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1007/s11119-019-09667-5>).

13 Rose, D. 2022. *Agricultural automation: the past, present and future of adoption. The State of Food and Agriculture 2022, background paper*. Document interne.

14 McCampbell, M. 2022. *Agricultural digitalization and automation in low- and middle-income countries: Evidence from ten case studies*. Document de base établi aux fins de l'élaboration de *La Situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture 2022*. Étude technique de la FAO sur l'économie du développement agricole n° 25. Rome, FAO.

CHAPITRE 1

1 ISPA. 2021. Precision Ag Definition. Dans: ISPA [en ligne]. Monticello, Illinois (États-Unis). [Consulté le 20 décembre 2021]. www.ispag.org/about/definition.

2 Mazoyer, M. et Roudart, L. 2006. *A history of world agriculture: From the Neolithic Age to the current crisis*. New York, NYU Press.

3 Pingali, P. 2007. Chapter 54 Agricultural mechanization: Adoption patterns and economic impact. Dans: R. Evenson et P. Pingali (dir. publ.). *Handbook of agricultural economics*, p. 2779-2805. Amsterdam, Elsevier (disponible à l'adresse suivante: [https://doi.org/10.1016/S1574-0072\(06\)03054-4](https://doi.org/10.1016/S1574-0072(06)03054-4)).

4 Hurt, R.D. 1982. *American farm tools: From hand power to steam power*. Sunflower University Press. Manhattan, Kansas (États-Unis).

5 Daum, T., Huffman, W. et Birner, R. 2018. *How to create conducive institutions to enable agricultural mechanization: A comparative historical study from the United States and Germany*. Economics Working Paper. Ames (États-Unis), Department of Economics, Iowa State University (disponible à l'adresse suivante: https://lib.dr.iastate.edu/econ_workingpapers/47).

6 Johnson, D.G. 2000. Population, food, and knowledge. *The American Economic Review*, 90(1): 1-14 (disponible à l'adresse suivante: www.jstor.org/stable/117278).

7 Michaels, G., Rauch, F. et Redding, S.J. 2012. Urbanization and structural transformation. *The Quarterly Journal of Economics*, 127(2): 535-586 (disponible à l'adresse suivante: www.jstor.org/stable/23251993).

8 Gollin, D., Parente, S. et Rogerson, R. 2002. The role of agriculture in development. *The American Economic Review*, 92(2): 160-164 (disponible à l'adresse suivante: www.jstor.org/stable/3083394).

9 Lewis, W.A. 1954. Economic development with unlimited supplies of labour. *The Manchester School*, 22(2): 139-191 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1111/j.1467-9957.1954.tb00021.x>).

10 USDA Economic Research Service. 2021. Agriculture and its related industries provide 10.3 percent of U.S. employment. Dans: *USDA* [en ligne]. Washington. [Consulté le 22 avril 2022]. www.ers.usda.gov/data-products/chart-gallery/gallery/chart-detail/?chartId=58282.

11 Lowenberg-DeBoer, J. et Erickson, B. 2019. Setting the record straight on precision agriculture adoption. *Agronomy Journal*, 111(4): 1552-1569 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.2134/agronj2018.12.0779>).

12 Kumar, P., Lorek, T., Olsson, T.C., Sackley, N., Schmalzer, S. et Laveaga, G.S. 2017. Roundtable: New Narratives of the Green Revolution. *Agricultural History*, 91(3): 397-422 (disponible à l'adresse suivante: https://www.academia.edu/36689104/Roundtable_New_Narratives_of_the_Green_Revolution_Agricultural_History_91_3_Summer_2017_pp_397_422).

13 Shiva, V. 1991. *The violence of the green revolution: Third World agriculture, ecology and politics*. Londres, Zed Books.

14 FAO. 2016. *Sustainable agricultural mechanization*. Note d'information. Rome (disponible à l'adresse suivante: www.fao.org/3/i6167e/i6167e.pdf).

15 Santos Valle, S. et Kienzle, J. 2020. *Agriculture 4.0 – Robotique agricole et matériel automatisé au service d'une production agricole durable*. Gestion intégrée de cultures. Vol.24. Rome, FAO (disponible à l'adresse suivante: <https://www.fao.org/3/cb2186fr/CB2186FR.pdf>).

16 Gan, H. et Lee, W.S. 2018. Development of a navigation system for a smart farm. *IFAC-PapersOnLine*, 51(17): 1-4 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.051>).

17 Lowenberg-DeBoer, J., Yuelu Huang, I., Grigoriadis, V. et Blackmore, S. 2020. Economics of robots and automation in field crop production. *Precision Agriculture*, 21(2): 278-299 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1007/s11119-019-09667-5>).

18 Trendov, N.M., Varas, S. et Zeng, M. 2019. *Digital technologies in agriculture and rural areas – Status report*. Rome, FAO (disponible à l'adresse suivante: www.fao.org/3/ca4985en/CA4985EN.pdf).

19 FAO. 2022. FAOSTAT: Indicateurs de l'emploi: Agriculture. Dans: *FAO* [en ligne]. Rome. [Consulté le 6 février 2022]. [https://www.fao.org/faostat/fr/#data/OEA](http://www.fao.org/faostat/fr/#data/OEA).

20 Charlton, D., Hill, A.E. et Taylor, E.J. 2022. *Automation and social impacts: winners and losers*. Document de base établi aux fins de l'élaboration de *La Situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture 2022*. Document de travail de la FAO sur l'économie du développement agricole 22-10. Rome, FAO.

21 Silva, J.V., Baudron, F., Reidsma, P. et Giller, K.E. 2019. Is labour a major determinant of yield gaps in sub-Saharan Africa? A study of cereal-based production systems in Southern Ethiopia. *Agricultural Systems*, 174: 39-51 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.04.009>).

22 Baudron, F., Misiko, M., Getnet, B., Nazare, R., Sariah, J. et Kaumbutho, P. 2019. A farm-level assessment of labor and mechanization in Eastern and Southern Africa. *Agronomy for Sustainable Development*, 39(2): 17 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0563-5>).

23 Diao, X., Cossar, F., Houssou, N. et Kolavalli, S. 2014. Mechanization in Ghana: Emerging demand, and the search for alternative supply models. *Food Policy*, 48: 168-181 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2014.05.013>).

BIBLIOGRAPHIE

- 24 Fuglie, K., Gautam, M., Goyal, A. et Maloney, W.F.** 2019. *Harvesting prosperity: Technology and productivity growth in agriculture*. Washington, Banque mondiale (disponible à l'adresse suivante: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/32350>).
- 25 Lowder, S.K., Sánchez, M.V. et Bertini, R.** 2019. *Farms, family farms, farmland distribution and farm labour: What do we know today?* Document de travail de la FAO sur l'économie du développement agricole n° 19-08. Rome, FAO (disponible à l'adresse suivante: www.fao.org/3/ca7036en/ca7036en.pdf).
- 26 Takeshima, H. et Vos, R.** 2022. *Agricultural mechanisation and child labour in developing countries*. Background Study. Rome, FAO (disponible à l'adresse suivante: www.fao.org/3/cb8550en/cb8550en.pdf).
- 27 Johnston, D., Stevano, S., Malapit, H.J., Hull, E. et Kadiyala, S.** 2018. Review: Time use as an explanation for the agri-nutrition disconnect: Evidence from rural areas in low and middle-income countries. *Food Policy*, 76: 8-18 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2017.12.011>).
- 28 Daum, T. et Birner, R.** 2021. The forgotten agriculture-nutrition link: farm technologies and human energy requirements. *Food Security* (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1007/s12571-021-01240-1>).
- 29 Ogwuike, P., Rodenburg, J., Diagne, A., Agboh-Noameshie, A.R. et Amovin-Assagba, E.** 2014. Weed management in upland rice in sub-Saharan Africa: impact on labor and crop productivity. *Food Security*, 6(3): 327-337 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1007/s12571-014-0351-7>).
- 30 Castro, Á., Pereira, J.M., Amiama, C. et Bueno, J.** 2015. Typologies of dairy farms with automatic milking system in northwest Spain and farmers' satisfaction. *Italian Journal of Animal Science*, 14(2): 3559 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.4081/ijas.2015.3559>).
- 31 Hansen, B.G. et Straete, E.P.** 2020. Dairy farmers' job satisfaction and the influence of automatic milking systems. *NJAS – Wageningen Journal of Life Sciences*, 92(1): 1-13 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1016/j.njas.2020.100328>).
- 32 Taylor, J.E. et Charlton, D.** 2018. *The farm labor problem: A global perspective*. Amsterdam, Elsevier Academic Press.
- 33 Daum, T. et Kirui, O.** 2021. Mechanization along the value chain. Dans: J. von Braun, A. Admassie, S. Hendriks, G. Tadesse et H. Baumüller (dir. publ.). *From potentials to reality: Transforming Africa's food production*. Peter Lang, Berne (Suisse).
- 34 Maucorps, A., Münch, A., Brkanovic, S., Schuh, B., Dwyer, J., Vigani, M., Khafagy, A. et al.** 2019. *Research for AGRI committee – The EU farming employment: current challenges and future prospects*. Étude et annexe. Dans: *Think Tank – European Parliament* [en ligne]. [Consulté le 17 février 2022]. [www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/IPOL_STU\(2019\)629209](http://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/IPOL_STU(2019)629209).
- 35 National Farmers' Union.** 2019. *The future of food 2040*. Stoneleigh (Royaume-Uni) (disponible à l'adresse suivante: www.nfuonline.com/archive?treeid=116020).
- 36 Charlton, D., Taylor, J.E., Vougioukas, S. et Rutledge, Z.** 2019. Can wages rise quickly enough to keep workers in the fields? *Choices*, 34(2): 1-7 (disponible à l'adresse suivante: www.choicesmagazine.org/choices-magazine/submitted-articles/can-wages-rise-quickly-enough-to-keep-workers-in-the-fields).
- 37 Ali, I., Nagalingam, S. et Gurd, B.** 2017. Building resilience in SMEs of perishable product supply chains: enablers, barriers and risks. *Production Planning & Control*, 28(15): 1236-1250 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1080/09537287.2017.1362487>).
- 38 Bourlakis, M., Maglaras, G., Aktas, E., Gallear, D. et Fotopoulos, C.** 2014. Firm size and sustainable performance in food supply chains: Insights from Greek SMEs. *International Journal of Production Economics*, 152: 112-130 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.12.029>).
- 39 Jones, K.E., Patel, N.G., Levy, M.A., Storeygard, A., Balk, D., Gittleman, J.L. et Daszak, P.** 2008. Global trends in emerging infectious diseases. *Nature*, 451: 990-993 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1038/nature06536>).
- 40 CMAD (Centre pour la mécanisation agricole durable) et CESAP (Commission économique et sociale pour l'Asie et le Pacifique).** 2020. *Mechanization solutions for improved livestock management and prevention et control of zoonotic diseases*. Beijing (disponible à l'adresse suivante: www.un-csam.org/sites/default/files/2021-01/ENG.pdf).
- 41 Ali, I. et Aboelmaged, M.G.S.** 2021. Implementation of supply chain 4.0 in the food and beverage industry: perceived drivers and barriers. *International Journal of Productivity and Performance Management*.

- 42 Daum, T.** 2021. Farm robots: ecological utopia or dystopia? *Trends in Ecology & Evolution*, 36(9): 774-777 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1016/j.tree.2021.06.002>).
- 43 Streed, A., Tomlinson, B., Kantar, M. et Raghavan, B.** 2021. How sustainable is the smart farm? Document présenté à l'occasion de LIMITS 2021, 14-15 juin 2021 (disponible à l'adresse suivante: <https://computingwithinlimits.org/2021/papers/limits21-streed.pdf>).
- 44 Schillings, J., Bennett, R. et Rose, D.C.** 2021. Exploring the potential of precision livestock farming technologies to help address farm animal welfare. *Frontiers in Animal Science*, 2: 639678 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.3389/fanim.2021.639678>).
- 45 Berckmans, D.** 2014. Precision livestock farming technologies for welfare management in intensive livestock systems. *Scientific and Technical Review – OIE*, 33(1): 189-196.
- 46 Werkheiser, I.** 2018. Precision livestock farming and farmers' duties to livestock. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, 31: 181-195 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1007/s10806-018-9720-0>).
- 47 Bos, J.M., Bovenkerk, B., Feindt, P.H. et van Dam, Y.K.** 2018. The quantified animal: Precision livestock farming and the ethical implications of objectification. *Food Ethics*, 2(1): 77-92 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1007/s41055-018-00029-x>).
- 48 Miles, C.** 2019. The combine will tell the truth: On precision agriculture and algorithmic rationality. *Big Data & Society*, 6(1): 2053951719849444.
- 49 Duncan, E., Glaros, A., Ross, D.Z. et Nost, E.** 2021. New but for whom? Discourses of innovation in precision agriculture. *Agriculture and Human Values*, 38: 1181-1199 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1007/s10460-021-10244-8>).
- 50 Wiseman, L., Sanderson, J., Zhang, A. et Jakku, E.** 2019. Farmers and their data: An examination of farmers' reluctance to share their data through the lens of the laws impacting smart farming. *NJAS – Wageningen Journal of Life Sciences*, 90-91: 100301 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1016/j.njas.2019.04.007>).
- 51 Murray, U., Gebremedhin, Z., Brychkova, G. et Spillane, C.** 2016. Smallholder farmers and climate smart agriculture: Technology and labor-productivity constraints amongst women smallholders in Malawi. *Gender, Technology and Development*, 20(2): 117-148 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1177/0971852416640639>).
- 52 CNUCED (Conférence des Nations Unies sur le commerce et le développement).** 2020. *Teaching Material on Trade and Gender Linkages: The Gender Impact of Technological Upgrading in Agriculture*. New York, Organisation des Nations Unies (disponible à l'adresse suivante: <https://unctad.org/system/files/official-document/ditc2020d1.pdf>).
- 53 FAO.** 2019. *Youth employment: Youth agri-food policy assistance*. Rome (disponible à l'adresse suivante: www.fao.org/3/ca3854en/ca3854en.pdf).
- 54 Manyika, J., Chui, M., Miremadi, M., Bughin, J., George, K., Willmott, P. et Dewhurst, M.** 2017. *A future that works: automation, employment, and productivity*. New York, McKinsey Global Institute (disponible à l'adresse suivante: www.mckinsey.com/~/media/mckinsey/featured%20insights/Digital%20Disruption/Harnessing%20automation%20for%20a%20future%20that%20works/MGI-A-future-that-works-Executive-summary.ashx).
- 55 Autor, D.H.** 2015. Why are there still so many jobs? The history and future of workplace automation. *Journal of Economic Perspectives*, 29(3): 3-30 (disponible à l'adresse suivante: www.aeaweb.org/articles?id=10.1257/jep.29.3.3).
- 56 OIT (Organisation internationale du Travail).** 2022. *Agriculture; plantations; autres secteurs ruraux. Dans: OIT [en ligne]*. Genève (Suisse). [Consulté le 14 février 2022]. www.ilo.org/global/industries-and-sectors/agriculture-plantations-other-rural-sectors/lang--fr/index.htm.
- 57 Christiaensen, L., Rutledge, Z. et Taylor, J.E.** 2021. Viewpoint: The future of work in agri-food. *Food Policy*, 99: 101963.
- 58 Daum, T. et Birner, R.** 2020. Agricultural mechanization in Africa: Myths, realities and an emerging research agenda. *Global Food Security*, 26: 100393 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100393>).
- 59 FAO et CUA.** 2019. *La mécanisation agricole durable: Cadre stratégique pour l'Afrique*. Addis-Abeba (disponible à l'adresse suivante: <https://www.fao.org/3/CA1136FR/ca1136fr.pdf>).
- 60 Clarke, C.** 2017. Farmers in Myanmar are using 3D printing to improve farming production. *Dans: 3D Printing Industry [en ligne]*. [Consulté le 24 juillet 2022]. <https://3dprintingindustry.com/?s=myanmar>.

- 61** Fielke, S.J., Botha, N., Reid, J., Gray, D., Blackett, P., Park, N. et Williams, T. 2018. Lessons for co-innovation in agricultural innovation systems: a multiple case study analysis and a conceptual model. *The Journal of Agricultural Education and Extension*, 24(1): 9-27 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1080/1389224X.2017.1394885>).
- 62** McCampbell, M. 2022. *Agricultural digitalization and automation in low- and middle-income countries: Evidence from ten case studies*. Document de base établi aux fins de l'élaboration de *La Situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture 2022*. Étude technique de la FAO sur l'économie du développement agricole n° 25. Rome, FAO.
- 63** Ceccarelli, T., Chauhan, A., Rambaldi, G., Kumar, I., Cappello, C., Janssen, S. et McCampbell, M. 2022. *Leveraging automation and digitalization for precision agriculture: Evidence from the case studies*. Document de base établi aux fins de l'élaboration de *La Situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture 2022*. Étude technique de la FAO sur l'économie du développement agricole n° 24. Rome, FAO.
- 64** Daum, T. 2022. *Agricultural mechanization and sustainable agri-food system transformation in the Global South*. Document de base établi aux fins de l'élaboration de *La Situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture 2022*. Document de travail de la FAO sur l'économie du développement agricole 22-11. Rome, FAO.
- 65** Lowenberg-DeBoer, J. 2022. *Economics of adoption for digital automated technologies in agriculture*. Document de base établi aux fins de l'élaboration de *La Situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture 2022*. Document de travail de la FAO sur l'économie du développement agricole 22-10. Rome, FAO.
- 66** Rose, D. 2022. *Agricultural automation: the past, present and future of adoption. The State of Food and Agriculture 2022, background paper*. Document interne.

CHAPITRE 2

- 1** McCampbell, M. 2022. *Agricultural digitalization and automation in low- and middle-income countries: Evidence from ten case studies*. Document de base établi aux fins de l'élaboration de *La Situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture 2022*. Étude technique de la FAO sur l'économie du développement agricole n° 25. Rome, FAO.

- 2** Ceccarelli, T., Chauhan, A., Rambaldi, G., Kumar, I., Cappello, C., Janssen, S. et McCampbell, M. 2022. *Leveraging automation and digitalization for precision agriculture: Evidence from the case studies*. Document de base établi aux fins de l'élaboration de *La Situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture 2022*. Étude technique de la FAO sur l'économie du développement agricole n° 24. Rome, FAO.
- 3** White, W.J. 2001. An unsung hero: the farm tractor's contribution to twentieth-century United States economic growth. *The Journal of Economic History*, 61(2): 493-496 (disponible à l'adresse suivante: https://EconPapers.repec.org/RePEc:cup:jechis:v:61:y:2001:i:02:p:493-496_23).
- 4** Binswanger, H. 1986. Agricultural mechanization: a comparative historical perspective. *The World Bank Research Observer*, 1(1): 27-56 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1093/wbro/1.1.27>).
- 5** Mrema, G., Soni, P. et Rolle, R.S. 2015. A Regional Strategy for Sustainable Agricultural Mechanization. Sustainable Mechanization across Agri-Food Chains in Asia and the Pacific region. RAP Publication n° 2014/24. Rome, FAO (disponible à l'adresse suivante: www.fao.org/documents/card/en/c/78c1b49fb5c2-43b5-abdf-e63bb6955f4f).
- 6** Diao, X., Takeshima, H. et Zhang, X. 2020. *An evolving paradigm of agricultural mechanization development: How much can Africa learn from Asia?* Washington, IFPRI (Institut international de recherche sur les politiques alimentaires) (disponible à l'adresse suivante: <https://elibrary.ifpri.org/digital/collection/p15738coll2/id/134095>).
- 7** Daum, T. et Birner, R. 2020. Agricultural mechanization in Africa: Myths, realities and an emerging research agenda. *Global Food Security*, 26: 100393 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100393>).
- 8** Kirui, O. 2019. *The agricultural mechanization in Africa: Micro-level analysis of state drivers and effects*. ZEF-Discussion Papers on Development Policy n° 272. Université de Bonn (disponible à l'adresse suivante: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3368103).
- 9** FAO. 2021. FAOSTAT: Discontinued archives and data series: Machinery. Dans: FAO [en ligne]. Rome. [Consulté le 1^{er} décembre 2021]. www.fao.org/faostat/en/#data/RM.

10 CEPALC (Commission économique pour l'Amérique latine et les Caraïbes), FAO et IICA (Institut interaméricain de coopération pour l'agriculture). 2017. *The outlook for agriculture and rural development in the Americas: A perspective on Latin America and the Caribbean 2017-2018*. San José, Costa Rica, IICA (disponible à l'adresse suivante: www.fao.org/3/I8048en/I8048EN.pdf).

11 Elverdin, P., Piñeiro, V. et Robles, M. 2018. *Agricultural mechanization in Latin America*. IFPRI-Discussion Papers n° 1740. Washington, IFPRI.

12 Cramb, R. et Thepent, V. 2020. Evolution of agricultural mechanization in Thailand. *Dans: X. Diao, H. Takeshima et X. Zhang (dir. publ.). An evolving paradigm of agricultural mechanization development: How much can Africa learn from Asia?* p. 165-201. Washington, IFPRI (disponible à l'adresse suivante: <https://ebrary.ifpri.org/utils/getfile/collection/p15738coll2/id/134091/filename/134311.pdf>).

13 Justice, S. et Biggs, S. 2020. The spread of smaller engines and markets in machinery services in rural areas of South Asia. *Journal of Rural Studies*, 73: 10-20 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2019.11.013>).

14 Belton, B., Win, M.T., Zhang, X. et Filipski, M. 2021. The rapid rise of agricultural mechanization in Myanmar. *Food Policy*, 101: 102095 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2021.102095>).

15 FAO et CUA. 2019. *La mécanisation agricole durable: Cadre stratégique pour l'Afrique*. Addis-Abeba (disponible à l'adresse suivante: <https://www.fao.org/3/CA1136FR/ca1136fr.pdf>).

16 Pingali, P. 2007. Chapitre 54 «Agricultural mechanization: Adoption patterns and economic impact». *Dans: R. Evenson et P. Pingali (dir. publ.). Handbook of agricultural economics*, p. 2779-2805. Amsterdam, Elsevier (disponible à l'adresse suivante: [https://doi.org/10.1016/S1574-0072\(06\)03054-4](https://doi.org/10.1016/S1574-0072(06)03054-4)).

17 Banque mondiale. 2022. Living Standards Measurement Study – Integrated Surveys on Agriculture (LSMS-ISA). *Dans: The World Bank* [en ligne]. Washington. [Consulté le 5 janvier 2022]. (disponible à l'adresse suivante: <https://www.worldbank.org/en/programs/lsmis/initiatives/lsmis-ISA>).

18 Abeyratne, F. et Takeshima, H. 2020. The evolution of agricultural mechanization in Sri Lanka. *Dans: X. Diao, H. Takeshima et X. Zhang (dir. publ.). An evolving paradigm of agricultural mechanization development: How much can Africa*

learn from Asia? p. 139-163. Washington, IFPRI (disponible à l'adresse suivante: https://doi.org/10.2499/9780896293809_04).

19 Ahmed, M. et Takeshima, H. 2020. Evolution of agricultural mechanization in Bangladesh: The case of tractors for land preparation. *Dans: X. Diao, H. Takeshima et X. Zhang (dir. publ.). An evolving paradigm of agricultural mechanization development: How much can Africa learn from Asia?* p. 235-261. Washington, IFPRI (disponible à l'adresse suivante: https://doi.org/10.2499/9780896293809_07).

20 Win, M.T., Belton, B. et Zhang, X. 2020. Myanmar's rapid agricultural mechanization: Demand and supply evidence. *Dans: X. Diao, H. Takeshima et X. Zhang (dir. publ.). An evolving paradigm of agricultural mechanization development: How much can Africa learn from Asia?* p. 263-284. Washington, IFPRI (disponible à l'adresse suivante: https://doi.org/10.2499/9780896293809_08).

21 Bhattacharai, M., Singh, G., Takeshima, H. et Shekhawat, R.S. 2020. Farm machinery use and the agricultural machinery industries in India. *Dans: X. Diao, H. Takeshima et X. Zhang (dir. publ.). An evolving paradigm of agricultural mechanization development: How much can Africa learn from Asia?* p. 97-138. Washington, IFPRI (disponible à l'adresse suivante: <https://ebrary.ifpri.org/digital/collection/p15738coll2/id/134090>).

22 Antle, J.M. et Ray, S. 2020. *Sustainable agricultural development: An economic perspective*. Palgrave Studies in Agricultural Economics and Food Policy. Cham, Springer International Publishing (disponible à l'adresse suivante: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-030-34599-0>).

23 Veimar da Silva, A., Michelle da Silva, C., Wagner, Soares Pessoa, W.R.L., Almeida Vaz, M., Matos de Oliveira, K. et Ribeiro dos Santos, F.S. 2018. Agricultural mechanization in small rural properties in the State of Piauí, Brazil. *African Journal of Agricultural Research*, 13(33): 1698-1707 (disponible à l'adresse suivante: <https://academicjournals.org/journal/AJAR/article-full-text-pdf/7E9E9CA58112>).

24 Mrema, G.C., Kahan, D.G. et Agyei-Holmes, A. 2020. Agricultural mechanization in Tanzania. *Dans: X. Diao, H. Takeshima et X. Zhang (dir. publ.). An evolving paradigm of agricultural mechanization development: How much can Africa learn from Asia?* p. 457-496. Washington, IFPRI (disponible à l'adresse suivante: https://doi.org/10.2499/9780896293809_14).

BIBLIOGRAPHIE

25 Takeshima, H. et Lawal, A. 2020. Evolution of agricultural mechanization in Nigeria. Dans: X. Diao, H. Takeshima et X. Zhang (dir. publ.). *An evolving paradigm of agricultural mechanization development: How much can Africa learn from Asia?* p. 423-456. Washington, IFPRI.

26 Herrero, M., Thornton, P.K., Mason-D'Croz, D., Palmer, J., Benton, T.G., Bodirsky, B.L., Bogard, J.R. et al. 2020. Innovation can accelerate the transition towards a sustainable food system. *Nature Food*, 1: 266-272 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1038/s43016-020-0074-1>).

27 Ehlers, M.-H., Finger, R., El Benni, N., Gocht, A., Sørensen, C.A.G., Gusset, M., Pfeifer et al. 2022. Scenarios for European agricultural policymaking in the era of digitalisation. *Agricultural Systems*, 196: 103318 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1016/j.aghs.2021.103318>).

28 Fleming, A., Jakku, E., Lim-Camacho, L., Taylor, B. et Thorburn, P. 2018. Is big data for big farming or for everyone? Perceptions in the Australian grains industry. *Agronomy for Sustainable Development*, 38: 24 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0501-y>).

29 GSMA (Global System for Mobile Communications). 2020. *The mobile economy 2020* disponible à l'adresse suivante: www.gsma.com/mobileeconomy/wp-content/uploads/2020/03/GSMA_MobileEconomy2020_Global.pdf.

30 Onukwue, A. 2022. Google's subsea cable for Africa is making its first landing in Togo. Dans: *Quartz Africa* [en ligne]. New York. [Consulté le 24 juillet 2022] <https://qz.com/africa/2143897/googles-equiano-cable-is-making-its-first-landing-in-togo>.

31 Steinke, J., Ortiz-Crespo, B., van Etten, J. et Müller, A. 2022. Participatory design of digital innovation in agricultural research-for-development: insights from practice. *Agricultural Systems*, 195: 103313 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1016/j.aghs.2021.103313>).

32 McCampbell, M. 2021. *More than what meets the eye: Factors and processes that shape the design and use of digital agricultural advisory and decision support in Africa*. Université de Wageningue, Pays-Bas (disponible à l'adresse suivante: <https://research.wur.nl/en/publications/388eb987-15f2-4fb0-b9c1-f0f6ff342e98>).

33 Tsan, M., Totapally, S., Hailu, M. et Addom, B. 2019. *The digitalisation of African agriculture report 2018-2019*. Wageningue (Pays-Bas). CTA (Centre technique de coopération agricole et

rurale) (disponible à l'adresse suivante: www.cta.int/en/digitalisation-agriculture-africa).

34 FAO et UIT (Union internationale des télécommunications). 2022. *Status of digital agriculture in 47 sub-Saharan African countries*. Rome (disponible à l'adresse suivante: www.fao.org/3/cb7943en/cb7943en.pdf).

35 Trendov, N.M., Varas, S. et Zeng, M. 2019. *Digital technologies in agriculture and rural areas – Status report*. Rome, FAO (disponible à l'adresse suivante: www.fao.org/3/ca4985en/CA4985EN.pdf).

36 Viet Nam News. 2021. Hà Nội aims to develop smart agriculture. Dans: *Viet Nam News* [en ligne]. Hanoï. [Consulté le 1^{er} mai 2022]. <https://vietnamnews.vn/economy/1082482/ha-noi-aims-to-develop-smart-agriculture.html>.

37 Musoni, M. 2020. Smart farming in Rwanda – How farmers can increase crop yields through an IoT-based irrigation system. Dans: *Digital Transformation Center* [en ligne]. Kigali. [Consulté le 1^{er} mai 2022]. <https://digicenter.rw/smart-farming-in-rwanda-with-an-iot-based-irrigation-system>.

38 GSMA. 2020. *Digital agriculture maps: 2020 state of the sector in low and middle-income countries*. Londres (disponible à l'adresse suivante: www.gsma.com/r/wp-content/uploads/2020/09/GSMA-Agritech-Digital-Agriculture-Maps.pdf).

39 FAO et CAAS (Académie chinoise des sciences agricoles). 2021. *Carbon neutral tea production in China – Three pilot case studies*. Rome, FAO (disponible à l'adresse suivante: www.fao.org/documents/card/en/c/cb4580en).

40 Nyaga, J.M., Onyango, C.M., Wetterlind, J. et Söderström, M. 2021. Precision agriculture research in sub-Saharan Africa countries: a systematic map. *Precision Agriculture*, 22: 1217-1236 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1007/s11119-020-09780-w>).

41 Onyango, C.M., Nyaga, J.M., Wetterlind, J., Söderström, M. et Piikki, K. 2021. Precision agriculture for resource use efficiency in smallholder farming systems in sub-Saharan Africa: A systematic review. *Sustainability*, 13(3): 1158 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.3390/su13031158>).

42 APNI (African Plant Nutrition Institute). 2020. Proceedings for the 1st African Conference on Precision Agriculture, Benguerir (Maroc), 8-10 décembre 2020. Dans: *APNI* (disponible à l'adresse suivante: www.apni.net/2021/03/18/new-publication-proceedings-for-1st-african-conference-on-precision-agriculture).

43 Witt, C. et Dobermann, A. 2002. A site-specific nutrient management approach for irrigated, lowland rice in Asia. *Better Crops International*, 16(1): 20-24 (disponible à l'adresse suivante: <http://www.ipni.net/publication/bci>).

44 Agrocares. 2022. Manage soil fertility: Informed fertilization decisions in the field. *Dans: Agrocares* [en ligne]. [Consulté le 24 juillet 2022]. www.agrocares.com/soilcares.

45 Lowenberg-DeBoer, J. et Erickson, B. 2019. Setting the record straight on precision agriculture adoption. *Agronomy Journal*, 111(4): 1552-1569 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.2134/agronj2018.12.0779>).

46 Van Beek, C. 2020. Adoption level is the most underestimated factor in fertiliser recommendations. *Dans: Agrocares* [en ligne]. [Consulté le 24 juillet 2022]. www.agrocares.com/wp-content/uploads/2020/10/whitepaper-christy-van-beek-1.pdf.

47 GoMicro. 2022. Phone QC. *Dans: GoMicro* [en ligne]. Singapour. [Consulté le 1^{er} mai 2022]. www.gomicro.co.

48 Lowenberg-DeBoer, J. 2022. *Economics of adoption for digital automated technologies in agriculture*. Document de base établi aux fins de l'élaboration de *La Situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture* 2022. Document de travail de la FAO sur l'économie du développement agricole 22-10. Rome, FAO.

49 UIT. 2020. *Measuring digital development: Facts and figures* 2020. Genève (Suisse), UIT (disponible à l'adresse suivante: www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Documents/facts/FactsFigures2020.pdf).

50 Hanton, J.P. et Leach, H.A. 1974. *Electronic livestock identification system*. US Patent 4,262,632. (disponible à l'adresse suivante: <https://patentimages.storage.googleapis.com/6c/49/f1/e746f5f7bca33e/US4262632.pdf>).

51 Brustein, J. 2014. GPS as we know it happened because of Ronald Reagan. *Dans: Bloomberg News* [en ligne]. [Consulté le 24 juillet 2022]. www.bloomberg.com/news/articles/2014-12-04/gps-as-we-know-it-happened-because-of-ronald-reagan.

52 Rip, M.R. et Hasik, J.M. 2002. *The precision revolution: GPS and the future of aerial warfare*. Annapolis, Maryland (États-Unis), Naval Institute Press.

53 Sheets, K.D. 2018. The Japanese impact on global drone policy and law: Why a laggard United States and other nations

should look to Japan in the context of drone usage. *Indiana Journal of Global Legal Studies*, 25(1): 513-537 (disponible à l'adresse suivante: www.repository.law.indiana.edu/ijgl/vol25/iss1/20).

54 Mulla, D. et Khosla, R. 2016. Historical evolution and recent advances in precision farming. *Dans: R. Lal et B.A. Stewart (dir. publ.). Soil-specific farming – Precision farming*. Boca Raton, Floride (États-Unis), CRC Press.

55 Lely. 2022. Our history. *Dans: Lely* [en ligne]. Maassluis (Pays-Bas). [Consulté le 1^{er} mars 2022]. www.lely.com/gb/about-lely/our-company/history.

56 Sharipov, D.R., Yakimov, O.A., Gainullina, M.K., Kashaeva, A.R. et Kamaldinov, I.N. 2021. Development of automatic milking systems and their classification. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 659: 012080 (disponible à l'adresse suivante: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/659/1/012080>).

57 Rural Retailer. 2002. Arro™ targets growing need for Steering Assist®. *Dans: Rural Retailer* [en ligne]. [Consulté le 24 juillet 2022]. www.ccmarketing.com/farmsupplier_com/pages/html1.asp.

58 Reusch, S. 1997. Entwicklung eines reflexionsoptischen Sensors zur Erfassung der Stickstoffversorgung landwirtschaftlicher Kulturpflanzen [Développement d'un capteur optique à réflexion pour enregistrer l'apport d'azote des cultures agricoles]. Thèse de doctorat. Arbeitskreis Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI [Groupe de travail de recherche et d'enseignement de la Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik de l'Association des ingénieurs allemands (VDI)].

59 Trimble. 2006. Trimble combines GPS guidance and rate control to automate agricultural spraying operations. *Dans: Trimble* [en ligne]. [Consulté le 24 juillet 2022]. [https://investor.trimble.com/news-releases/news-release-details/trimble-combines-gps-guidance-and-rate-control-automate](http://investor.trimble.com/news-releases/news-release-details/trimble-combines-gps-guidance-and-rate-control-automate).

60 Ag Leader. 2022. History timeline. *Dans: Ag Leader* [en ligne]. [Consulté le 24 juillet 2022]. www.agleader.com/our-history.

61 Ecorobotix. 2022. A bit of history. *Dans: Ecorobotix* [en ligne]. [Consulté le 1^{er} mars 2022]. [https://ecorobotix.com/en/a-bit-of-history](http://www.ecorobotix.com/en/a-bit-of-history).

- 62 Naïo Technologies.** 2022. Naïo Technologies, agricultural robotics pioneers. *Dans: Naïo Technologies* [en ligne]. [Consulté le 1^{er} mars 2022]. www.naio-technologies.com/en/naio-technologies/#:~:text=Founded%20in%202011%2C%20Na%C3%AF%20Technologies,use%20of%20chemical%20weed%20killers.
- 63 Claas.** 2022. Product history. The combine harvester. *Dans: Claas* [en ligne]. [Consulté le 1^{er} mars 2022]. www.claas.co.uk/company/history/products/combines/lexion.
- 64 Hands Free Hectare.** 2018. Timeline. *Dans: Hands Free Hectare* [en ligne]. [Consulté le 1^{er} mars 2022]. www.handsfreehectare.com/timeline.html.
- 65 Smart Ag.** 2018. Smart Ag unveils autocart driverless tractor technology at 2018 Farm Progress Show. *Dans: OEM Off-highway* [en ligne]. [Consulté le 1^{er} mars 2022]. www.oemoffhighway.com/trends/gps-automation/news/21020794/smart-ag-unveils-autocart-driverless-tractor-technology-at-2018-farm-progress-show.
- 66 John Deere.** 2022. John Deere reveals fully autonomous tractor at CES 2022. *Dans: John Deere* [en ligne]. [Consulté le 1^{er} mars 2022]. www.deere.com/en/news/all-news/autonomous-tractor-reveal.
- 67 Birner, R., Daum, T. et Pray, C.** 2021. Who drives the digital revolution in agriculture? A review of supply-side trends, players and challenges. *Applied Economic Perspectives and Policy*, 43(4): 1260-1285 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1002/aapp.13145>).
- 68 Knight, C.H.** 2020. Review: Sensor techniques in ruminants: more than fitness trackers. *Animal*, 14: s187-s195 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1017/S1751731119003276>).
- 69 Eastwood, C.R. et Renwick, A.** 2020. Innovation uncertainty impacts the adoption of smarter farming approaches. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4: 24 (disponible à l'adresse suivante: www.readcube.com/articles/10.3389%2Ffsufs.2020.00024).
- 70 Hansen, B.G.** 2015. Robotic milking-farmer experiences and adoption rate in Jæren, Norway. *Journal of Rural Studies*, 41: 109-117 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1016/j.rurstud.2015.08.004>).
- 71 Steeneveld, W., Tauer, L.W., Hogeveen, H. et Oude Lansink, A.G.J.M.** 2012. Comparing technical efficiency of farms with an automatic milking system and a conventional milking system. *Journal of Dairy Science*, 95(12): 7391-7398 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.3168/jds.2012-5482>).
- 72 Drach, U., Halachmi, I., Pnini, T., Izhaki, I. et Degani, A.** 2017. Automatic herding reduces labour and increases milking frequency in robotic milking. *Biosystems Engineering*, 155: 134-141.
- 73 Verified Market Research.** 2020. Global milking robots market size by type, by herd size, by geographic scope and forecast. *Dans: Verified Market Research* [en ligne]. [Consulté le 24 juillet 2022]. www.verifiedmarketresearch.com/product/milking-robots-market.
- 74 Markets and Markets.** 2018. Milking robots market by offering (hardware, software, service), milking robots system type (single-stall unit, multi-stall unit, automated milking rotary), herd size (below 100, between 100 and 1,000 and above 1,000), geography – Global forecast to 2023. *Dans: Markets and Markets* [en ligne]. [Consulté le 24 juillet 2022]. www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/milking-robots-market-170643611.html.
- 75 Rodenburg, J.** 2017. Robotic milking: Technology, farm design, and effects on work flow. *Journal of Dairy Science*, 100(9): 7729-7738 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11715>).
- 76 Rose, D.** 2022. *Agricultural automation: the past, present and future of adoption. The State of Food and Agriculture 2022, background paper*. Document interne.
- 77 Ordolff, D.** 2001. Introduction of electronics into milking technology. *Computers and Electronics in Agriculture*, 30: 125-149.
- 78 Banhazi, T.M., Lehr, H., Black, J.L., Crabtree, H., Schofield, P., Tscharke, M. et Berckmans, D.** 2012. Precision Livestock Farming: An international review of scientific and commercial aspects. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 5(3): 1-9.
- 79 Lowenberg-DeBoer, J.** 2018. The economics of precision agriculture. *Dans: J. Stafford (dir. publ.). Precision agriculture for sustainability*, p. 461-494. Londres, Burleigh Dodds Science Publishing (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1201/9781351114592>).
- 80 Colaço, A.F. et Bramley, R.G.V.** 2018. Do crop sensors promote improved nitrogen management in grain crops? *Field Crops Research*, 218: 126-140 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.01.007>).

- 81 Lachia, N., Pichon, L. et Tisseyre, B.** 2019. A collective framework to assess the adoption of precision agriculture in France: description and preliminary results after two years. Dans: J.V. Stafford (dir. publ.). *Precision agriculture '19*. p. 851-857 (disponible à l'adresse suivante: https://doi.org/10.3920/978-90-8686-888-9_105).
- 82 Lowenberg-DeBoer, J., Yuelu Huang, I., Grigoriadis, V. et Blackmore, S.** 2020. Economics of robots and automation in field crop production. *Precision Agriculture*, 21(2): 278-299 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1007/s11119-019-09667-5>).
- 83 Lowenberg-DeBoer, J., Behrendt, K., Ehlers, M.-H., Dillon, C., Gabriel, A., Huang, I.Y., Kumwenda, I. et al.** 2021. Lessons to be learned in adoption of autonomous equipment for field crops. *Applied Economic Perspectives and Policy*, 44(2): 848-864 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1002/aapp.13177>).
- 84 Elias, M., Lowenberg-DeBoer, J., Behrendt, K. et Franklin, K.** (À paraître). *Economically optimal farmer supervision of crop robots*.
- 85 Shockley, J., Dillon, C., Lowenberg-DeBoer, J. et Mark, T.** 2021. How will regulation influence commercial viability of autonomous equipment in US production agriculture? *Applied Economics Perspectives and Policy*, 44(2): 865-878 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1002/aapp.13178>).
- 86 Santos Valle, S. et Kienzle, J.** 2020. *Agriculture 4.0 – Robotique agricole et matériel automatisé au service d'une production agricole durable*. Gestion intégrée de cultures. Vol. 24. Rome, FAO (disponible à l'adresse suivante: <https://www.fao.org/3/cb2186fr/CB2186fr.pdf>).
- 87 Tarannum, N., Rhaman, Md.K., Khan, S.A. et Shakil, S.R.** 2015. A brief overview and systematic approach for using agricultural robot in developing countries. *Journal of Modern Science and Technology*, 3(1): 88-101 (disponible à l'adresse suivante: <https://zantworldpress.com/wp-content/uploads/2019/12/Paper-8.pdf>).
- 88 Reddy, N., Reddy, A.V., Pranavadiithya, S. et Kumar, J.** 2016. A critical review on agricultural robots. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 7(4): 183-188 (disponible à l'adresse suivante: https://iaeme.com/MasterAdmin/Journal_uploads/IJMET/VOLUME_7_ISSUE_4/IJMET_07_04_018.pdf).
- 89 Autor, D.H.** 2015. Why are there still so many jobs? The history and future of workplace automation. *Journal of Economic Perspectives*, 29(3): 3-30 (disponible à l'adresse suivante: www.aeaweb.org/articles?id=10.1257/jep.29.3.3).
- 90 Carvalho, F.K., Chechetto, R.G., Mota, A.A.B. et Antuniassi, U.R.** 2020. Challenges of aircraft and drone spray applications. *Outlooks on Pest Management*, 31(2): 83-88 (disponible à l'adresse suivante: http://dx.doi.org/10.1564/v31_apr_07).
- 91 Wang, C., Herbst, A., Zeng, A., Wongsuk, S., Qiao, B., Qi, P., Bonds, J. et al.** 2021. Assessment of spray deposition, drift and mass balance from unmanned aerial vehicle sprayer using an artificial vineyard. *Science of The Total Environment*, 777: 146181 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146181>).
- 92 Erickson, B. et Lowenberg-DeBoer, J.** 2021. 2021 Precision agriculture dealership survey confirms a data driven market for retailers. Dans: *Crop Life* [en ligne]. [Consulté le 24 juillet 2022]. www.croplife.com/precision/2021-precision-agriculture-dealership-survey-confirms-a-data-driven-market-for-retailers/#slide=87709-87729-3.
- 93 Kendall, H., Clark, B., Li, W., Jin, S., Jones, G.D., Chen, J., Taylor, J., Li, Z. et Frewer, Lynn, J.** 2022. Precision agriculture technology adoption: a qualitative study of small-scale commercial “family farms” located in the North China Plain. *Precision Agriculture*, 23: 319-351 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1007/s11119-021-09839-2>).
- 94 Kumar, G., Engle, C. et Tucker, C.** 2018. Factors driving aquaculture technology adoption. *Journal of the World Aquaculture Society*, 49(3): 447-476 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1111/jwas.12514>).
- 95 FAO.** 2020. *The State of World Fisheries and Aquaculture 2020. Sustainability in action*. Rome (disponible à l'adresse suivante: www.fao.org/documents/card/en/c/ca9229en).
- 96 Føre, M., Frank, K., Norton, T., Svendsen, E., Alfredsen, J.A., Dempster, T., Eguiraun, H. et al.** 2018. Precision fish farming: A new framework to improve production in aquaculture. *Biosystems Engineering*, 173: 176-193 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.10.014>).
- 97 Shrimpbox.** 2021. The Shrimpbox launch: The world's first robotic shrimp farm. Dans: *Atarraya* [en ligne]. Mexico. [Consulté le 24 juillet 2022]. <https://atarraya.ai/assets/pdf/ShrimpboxENG.pdf>.
- 98 Bergerman, M., Billingsley, J., Reid, J. et van Henten, E.** 2016. *Robotics in agriculture and forestry* [en ligne]. SpringerLink. [Consulté le 8 décembre 2021]. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-32552-1_56.

BIBLIOGRAPHIE

- 99 Nitoslawski, S.A., Wong-Stevens, K., Steenberg, J.W.N., Witherspoon, K., Nesbitt, L. et Konijnendijk van den Bosch, C.C.** 2021. The digital forest: Mapping a decade of knowledge on technological applications for forest ecosystems. *Earth's Future*, 9(8): e2021EF002123 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1029/2021EF002123>).
- 100 Boitsov, A., Vagizov, M., Istomin, E., Aksanova, A. et Pavlov, V.** 2021. Robotic systems in forestry. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 806: 012034.
- 101 Allott, J., O'Kelly, G. et Pendergraph, S.** 2020. Data: The next wave in forestry productivity. *Dans: McKinsey & Company [en ligne]*. [Consulté le 5 janvier 2022]. www.mckinsey.com/industries/paper-forest-products-and-packaging/our-insights/data-the-next-wave-in-forestry-productivity.
- 102 Hellström, T., Lärkeryd, P., Nordfjell, T. et Ringdahl, O.** 2009. Autonomous forest vehicles: Historic, envisioned, and state-of-the-art. *International Journal of Forest Engineering*, 20(1): 31-38 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1080/14942119.2009.10702573>).
- 103 Visser, R. et Obi, O.F.** 2021. Automation and robotics in forest harvesting operations: Identifying near-term opportunities. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 42(1): 13-24.
- 104 Parker, R., Bayne, K. et Clinton, P.W.** 2016. Robotics in forestry. *New Zealand Journal of Forestry*, 60(4): 8-14.
- 105 Finer, M. et Mamani, N.** 2020. MAAP #31: Power of free high-resolution satellite imagery from Norway Agreement. *Dans: Monitoring of the Amazon Andean Project [en ligne]*. [Consulté le 24 juin 2022]. www.maaproject.org/2021/norway-agreement.
- 106 Shamshiri, R., Kalantari, F., Ting, K.C., Thorp, K.R., Hameed, I.A., Weltzien, C., Ahmad, D. et Shad, Z.M.** 2018. Advances in greenhouse automation and controlled environment agriculture: A transition to plant factories and urban agriculture. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11: 1 (disponible à l'adresse suivante: <https://ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/3210>).
- 107 Mrema, G.C., Baker, D. et Kahan, D.** 2008. *Agricultural mechanization in sub-Saharan Africa: time for a new look*. Agricultural Management, Marketing and Finance Occasional Paper n° 22. Rome, FAO (disponible à l'adresse suivante: www.fao.org/3/i0219e/i0219e00.pdf).
- 108 Berhane, G., Dereje, M., Minten, B. et Tamru, S.** 2017. The rapid – but from a low base – uptake of agricultural mechanization in Ethiopia: Patterns, implications and challenges. ESSP Working Paper n° 105. Washington, IFPRI et Addis-Abeba, EDRI (disponible à l'adresse suivante: <http://ebrary.ifpri.org/cdm/ref/collection/p15738coll2/id/131146>).
- 109 Kansanga, M., Andersen, P., Kpienbaareh, D., Mason-Renton, S., Atuoye, K., Sano, Y., Antabe, R. et Luginaah, I.** 2019. Traditional agriculture in transition: examining the impacts of agricultural modernization on smallholder farming in Ghana under the new Green Revolution. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, 26(1): 11-24.
- 110 Keller, T., Sandin, M., Colombi, T., Horn, R. et Or, D.** 2019. Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. *Soil and Tillage Research*, 194: 104293 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104293>).
- 111 Wang, X., Yamauchi, F., Otsuka, K. et Huang, J.** 2016. Wage growth, landholding, and mechanization in Chinese agriculture. *World Development*, 86: 30-45 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2016.05.002>).
- 112 Yamauchi, F.** 2016. Rising real wages, mechanization and growing advantage of large farms: Evidence from Indonesia. *Food Policy*, 58(5): 62-69.
- 113 Daum, T., Adegbola, Y.P., Kamau, G., Kergna, A.O., Daudu, C., Zossou, R.C., Crinot, G.F. et al.** 2020. Perceived effects of farm tractors in four African countries, highlighted by participatory impact diagrams. *Agronomy for Sustainable Development*, 40: 47 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00651-2>).
- 114 Kansanga, M.M., Mkandawire, P., Kuuiire, V. et Luginaah, I.** 2020. Agricultural mechanization, environmental degradation, and gendered livelihood implications in northern Ghana. *Land Degradation and Development*, 31(11): 1422-1440 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1002/ldr.3490>).
- 115 Torero, M.** 2019. Robotics and AI in food security and innovation: Why they matter and how to harness their power. *Dans: J. von Braun, M.S. Archer, G.M. Reichberg et M. Sánchez Sorondo (dir. publ.). *Robotics, AI, and humanity: Science, ethics, and policy*, p. 99-107. Springer.*

CHAPITRE 3

- 1 Pingali, P.** 2007. Chapitre 54 «Agricultural mechanization: Adoption patterns and economic impact». Dans: R. Evenson et P. Pingali (dir. publ.). *Handbook of agricultural economics*, p. 2779-2805. Amsterdam, Elsevier (disponible à l'adresse suivante: [https://doi.org/10.1016/S1574-0072\(06\)03054-4](https://doi.org/10.1016/S1574-0072(06)03054-4)).
- 2 Bhattacharai, M., Singh, G., Takeshima, H. et Shekhawat, R.S.** 2020. Farm machinery use and the agricultural machinery industries in India. Dans: X. Diao, H. Takeshima et X. Zhang (dir. publ.). *An evolving paradigm of agricultural mechanization development: How much can Africa learn from Asia?* p. 97-138. Washington, IFPRI (disponible à l'adresse suivante: <https://ebrary.ifpri.org/digital/collection/p15738coll2/id/134090>).
- 3 Kirui, O.** 2019. *The agricultural mechanization in Africa: Micro-level analysis of state drivers and effects*. ZEF-Discussion Papers on Development Policy n° 272. Université de Bonn (disponible à l'adresse suivante: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3368103).
- 4 Berhane, G., Dereje, M., Minten, B. et Tamru, S.** 2017. The rapid – but from a low base – uptake of agricultural mechanization in Ethiopia: Patterns, implications and challenges. ESSP Working Paper n° 105. Washington, IFPRI et Addis-Ababa, EDRI (disponible à l'adresse suivante: <http://ebrary.ifpri.org/cdm/ref/collection/p15738coll2/id/131146>).
- 5 Houssou, N. et Chapoto, A.** 2014. *The changing landscape of agriculture in Ghana: Drivers of farm mechanization and its impacts on cropland expansion and intensification*. IFPRI Discussion Paper n° 1392. Washington, IFPRI (disponible à l'adresse suivante: <https://ebrary.ifpri.org/utils/getfile/collection/p15738coll2/id/128706/filename/128917.pdf>).
- 6 Adu-Baffour, F., Daum, T. et Birner, R.** 2019. Can small farms benefit from big companies' initiatives to promote mechanization in Africa? A case study from Zambia. *Food Policy*, 84: 133-145 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2019.03.007>).
- 7 Kansanga, M.M., Mkandawire, P., Kuuire, V. et Luginaah, I.** 2020. Agricultural mechanization, environmental degradation, and gendered livelihood implications in northern Ghana. *Land Degradation and Development*, 31(11): 1422-1440 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1002/ldr.3490>).

- 8 Ma, W., Renwick, A. et Grafton, Q.** 2018. Farm machinery use, off-farm employment and farm performance in China. *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, 62(2): 279-298 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1111/1467-8489.12249>).
- 9 Daum, T., Capezzzone, F. et Birner, R.** 2021. Using smartphone app collected data to explore the link between mechanization and intra-household allocation of time in Zambia. *Agriculture and Human Values*, 38: 411-429 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1007/s10460-020-10160-3>).
- 10 Haggblade, S., Hazell, P. et Reardon, T.** 2010. The rural non-farm economy: prospects for growth and poverty reduction. *World Development*, 38(10): 1429-1441 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2009.06.008>).
- 11 Christiaensen, L., Demery, L. et Kuhl, J.** 2011. The (evolving) role of agriculture in poverty reduction — An empirical perspective. *Journal of Development Economics*, 96(2): 239-254 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1016/j.jdeveco.2010.10.006>).
- 12 Salvatierra-Rojas, A., Nagle, M., Gummert, M., de Bruin, T. et Müller, T.** 2017. Development of an inflatable solar dryer for improved postharvest handling of paddy rice in humid climates. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 10(3): 269-282 (disponible à l'adresse suivante: <https://ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/2444>).
- 13 Elbehri, A. et Sadiddin, A.** 2016. Climate change adaptation solutions for the green sectors of selected zones in the MENA region. *Future of Food: Journal on Food, Agriculture and Society*, 4(3): 3954 (disponible à l'adresse suivante: www.thefutureoffoodjournal.com/index.php/FOFJ/article/view/79).
- 14 Jayne, T.S., Mather, D. et Mghenyi, E.** 2010. Principal challenges confronting smallholder agriculture in sub-Saharan Africa. *World Development*, 38(10): 1384-1398 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2010.06.002>).
- 15 Yahaya, R.** (À paraître). *Market analysis for agricultural mechanisation in Ethiopia*. Addis-Ababa, CIMMYT.
- 16 FAO.** 2022. *Technical support for sustainable agricultural mechanization of smallholder farms for enhancing agricultural productivity and production, and reducing drudgery of women and young farmers*. Projet de la FAO n° TCP/NEP/3703. Rome. Document interne.

BIBLIOGRAPHIE

- 17 FAO.** 2022. *Thinking about the future of food safety – A foresight report*. Rome (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.4060/cb8667en>).
- 18 Daum, T., Seidel, A., Getnet, B. et Birner, R.** 2022. *Animal traction, two-wheel tractors, or four-wheel tractors? A best-fit approach to guide farm mechanization in Africa*. Hohenheim Working Papers on Social and Institutional Change in Agricultural Development (disponible à l'adresse suivante: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4092687).
- 19 Diao, X., Takeshima, H. et Zhang, X.** 2020. *An evolving paradigm of agricultural mechanization development: How much can Africa learn from Asia?* Washington, IFPRI (disponible à l'adresse suivante: <https://elibrary.ifpri.org/digital/collection/p15738coll2/id/134095>).
- 20 Win, M.T., Belton, B. et Zhang, X.** 2020. Myanmar's rapid agricultural mechanization: Demand and supply evidence. Dans: X. Diao, H. Takeshima et X. Zhang (dir. publ.). *An evolving paradigm of agricultural mechanization development: How much can Africa learn from Asia?* p. 263-284. Washington, IFPRI (disponible à l'adresse suivante: https://doi.org/10.2499/9780896293809_08).
- 21 Baudron, F., Sims, B., Justice, S., Kahan, D.G., Rose, R., Mkomwa, S., Kaumbutho, P. et al.** 2015. Re-examining appropriate mechanization in Eastern and Southern Africa: two-wheel tractors, conservation agriculture, and private sector involvement. *Food Security*, 7: 889-904 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1007/s12571-015-0476-3>).
- 22 Kahan, D., Bymolt, R. et Zaal, F.** 2018. Thinking outside the plot: Insights on small-scale mechanisation from case studies in East Africa. *The Journal of Development Studies*, 54(11): 1939-1954 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1080/00220388.2017.1329525>).
- 23 Daum, T., Huffman, W. et Birner, R.** 2018. *How to create conducive institutions to enable agricultural mechanization: A comparative historical study from the United States and Germany*. Economics Working Paper. Ames (États-Unis), Department of Economics, Iowa State University (disponible à l'adresse suivante: https://lib.dr.iastate.edu/econ_workingpapers/47).
- 24 FAO.** 2019. *Mechanization services in rural communities. Enhancing the resilience of smallholder farmers and creating job opportunities*. Rome (disponible à l'adresse suivante: www.fao.org/3/ca7139en/ca7139en.pdf).
- 25 Alwang, J., Sabry, S., Shideed, K., Swelam, A. et Halila, H.** 2018. Economic and food security benefits associated with raised-bed wheat production in Egypt. *Food Security: The Science, Sociology and Economics of Food Production and Access to Food*, 10(3): 589-601 (disponible à l'adresse suivante: https://EconPapers.repec.org/RePEc:spr:ssefpa:v:10:y:2018:i:3:d:10.1007_s12571-018-0794-3).
- 26 Swelam, A.** 2016. *Raised-bed planting in Egypt: an affordable technology to rationalize water use and enhance water productivity*. Amman, ICARDA (Centre international de recherche agricole dans les zones arides) (disponible à l'adresse suivante: <https://hdl.handle.net/20.500.11766/5900>).
- 27 Sims, B. et Kienzle, J.** 2006. *Farm power and mechanization for small farms in sub-Saharan Africa*. Rapport technique sur le génie agricole et alimentaire n° 3. Rome, FAO (disponible à l'adresse suivante: www.fao.org/3/a0651e/a0651e.pdf).
- 28 Flores Rojas, M.** 2018. *Gender sensitive labour saving technology. Drum seeder: saving time, effort and money. A case study from the Lao People's Democratic Republic*. Bangkok, FAO (disponible à l'adresse suivante: www.fao.org/3/i9464en/i9464en.pdf).
- 29 Lowenberg-DeBoer, J.** 2022. *Economics of adoption for digital automated technologies in agriculture*. Document de base établi aux fins de l'élaboration de *La Situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture 2022*. Document de travail de la FAO sur l'économie du développement agricole 22-10. Rome, FAO.
- 30 McCampbell, M.** 2022. *Agricultural digitalization and automation in low- and middle-income countries: Evidence from ten case studies*. Document de base établi aux fins de l'élaboration de *La Situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture 2022*. Étude technique de la FAO sur l'économie du développement agricole n° 25. Rome, FAO.
- 31 Ceccarelli, T., Chauhan, A., Rambaldi, G., Kumar, I., Cappello, C., Janssen, S. et McCampbell, C.** 2022. *Leveraging automation and digitalization for precision agriculture: Evidence from the case studies*. Document de base établi aux fins de l'élaboration de *La Situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture 2022*. Étude technique de la FAO sur l'économie du développement agricole n° 24. Rome, FAO.
- 32 Eastwood, C.R. et Renwick, A.** 2020. Innovation uncertainty impacts the adoption of smarter farming approaches. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4: 24 (disponible à l'adresse suivante: www.readcube.com/articles/10.3389%2Ffsufs.2020.00024).

- 33 Hansen, B.G.** 2015. Robotic milking-farmer experiences and adoption rate in Jæren, Norway. *Journal of Rural Studies*, 41: 109-117 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2015.08.004>).
- 34 Steeneveld, W., Tauer, L.W., Hogeveen, H. et Oude Lansink, A.G.J.M.** 2012. Comparing technical efficiency of farms with an automatic milking system and a conventional milking system. *Journal of Dairy Science*, 95(12): 7391-7398 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.3168/jds.2012-5482>).
- 35 Drach, U., Halachmi, I., Pnini, T., Izhaki, I. et Degani, A.** 2017. Automatic herding reduces labour and increases milking frequency in robotic milking. *Biosystems Engineering*, 155: 134-141.
- 36 Lowenberg-DeBoer, J.** 1999. GPS based guidance systems for farmers. *Purdue Agricultural Economics Report*, p. 8-9. Université de Purdue (disponible à l'adresse suivante: <https://ag.purdue.edu/commercialag/home/paer-article/gps-based-guidance-systems-for-farmers>).
- 37 IoF.** 2020. *Internet of Food and Farm (IoF) 2020* (disponible à l'adresse suivante: www.valoritalia.it/wp-content/uploads/2019/08/IOF2020-Booklet-UseCases-2019-vDEF.pdf).
- 38 FAO et CUA.** 2019. *La mécanisation agricole durable: Cadre stratégique pour l'Afrique*. Addis-Abeba (disponible à l'adresse suivante: <https://www.fao.org/3/CA1136FR/ca1136fr.pdf>).
- 39 de Brauw, A. et Bulte, E.** 2021. *African Farmers, Value Chains and Agricultural Development: An Economic and Institutional Perspective*. Palgrave Studies in Agricultural Economics and Food Policy. Cham, Springer International Publishing (disponible à l'adresse suivante: <https://link.springer.com/10.1007/978-3-030-88693-6>).
- 40 Daum, T. et Birner, R.** 2017. The neglected governance challenges of agricultural mechanisation in Africa – insights from Ghana. *Food Security*, 9(5): 959-979 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1007/s12571-017-0716-9>).
- 41 Cramb, R. et Thepenth, V.** 2020. Evolution of agricultural mechanization in Thailand. Dans: X. Diao, H. Takeshima et X. Zhang (dir. publ.). *An evolving paradigm of agricultural mechanization development: How much can Africa learn from Asia?* p. 165-201. Washington, IFPRI (disponible à l'adresse suivante: <https://ebrary.ifpri.org/utils/getfile/collection/p15738coll2/id/134091/filename/134311.pdf>).
- 42 Justice, S. et Biggs, S.** 2020. The spread of smaller engines and markets in machinery services in rural areas of South Asia. *Journal of Rural Studies*, 73: 10-20 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2019.11.013>).
- 43 Feder, G., Just, R.E. et Zilberman, D.** 1985. Adoption of agricultural innovations in developing countries: A survey. *Economic Development and Cultural Change*, 33(2): 255-298 (disponible à l'adresse suivante: www.jstor.org/stable/1153228).
- 44 Binswanger, H. et Donovan, G.** 1987. *Agricultural mechanization: issues and options*. World Bank Policy Study. Washington, Banque mondiale.
- 45 Elverdin, P., Piñeiro, V. et Robles, M.** 2018. *Agricultural mechanization in Latin America*. IFPRI Discussion Paper n° 1740. IFPRI.
- 46 Takeshima, H.** 2016. *Market imperfections for tractor service provision in Nigeria: International perspectives and empirical evidence*. NSSP Working Paper n° 32. Washington, IFPRI (disponible à l'adresse suivante: <http://ebrary.ifpri.org/cdm/ref/collection/p15738coll2/id/130446>).
- 47 Diao, X., Cossar, F., Houssou, N. et Kolavalli, S.** 2014. Mechanization in Ghana: Emerging demand, and the search for alternative supply models. *Food Policy*, 48: 168-181 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2014.05.013>).
- 48 Takeshima, H. et Lawal, A.** 2020. Evolution of agricultural mechanization in Nigeria. Dans: X. Diao, H. Takeshima et X. Zhang (dir. publ.). *An evolving paradigm of agricultural mechanization development: How much can Africa learn from Asia?* p. 423-456. Washington, IFPRI.
- 49 Shockley, J., Dillon, C., Lowenberg-DeBoer, J. et Mark, T.** 2021. How will regulation influence commercial viability of autonomous equipment in US production agriculture? *Applied Economics Perspectives and Policy*, 44(2): 865-878 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1002/aepp.13178>).
- 50 Daum, T., Adegbola, Y.P., Kamau, G., Kergna, A.O., Daudu, C., Zossou, R.C., Crinot, G.F. et al.** 2020. Perceived effects of farm tractors in four African countries, highlighted by participatory impact diagrams. *Agronomy for Sustainable Development*, 40: 47 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00651-2>).

BIBLIOGRAPHIE

- 51 Daum, T. et Birner, R.** 2020. Agricultural mechanization in Africa: Myths, realities and an emerging research agenda. *Global Food Security*, 26: 100393 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100393>).
- 52 Kansanga, M., Andersen, P., Kpienbaareh, D., Mason-Renton, S., Atuoye, K., Sano, Y., Antabe, R. et Luginaah, I.** 2019. Traditional agriculture in transition: examining the impacts of agricultural modernization on smallholder farming in Ghana under the new Green Revolution. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, 26(1): 11-24.
- 53 Keller, T., Sandin, M., Colombi, T., Horn, R. et Or, D.** 2019. Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. *Soil and Tillage Research*, 194: 104293 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104293>).
- 54 Dahlin, A.S. et Rusinamhodzi, L.** 2019. Yield and labor relations of sustainable intensification options for smallholder farmers in sub-Saharan Africa. A meta-analysis. *Agronomy for Sustainable Development*, 39: 32 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0575-1>).
- 55 FAO.** 2021. *La Situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture. Rendre les systèmes agroalimentaires plus résilients face aux chocs et aux situations de stress*. Rome (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.4060/cb4476fr>).
- 56 Rose, D.** 2022. *Agricultural automation: the past, present and future of adoption. The State of Food and Agriculture 2022, background paper*. Document interne.
- 57 Labrière, N., Locatelli, B., Laumonier, Y., Freycon, V. et Bernoux, M.** 2015. Soil erosion in the humid tropics: A systematic quantitative review. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 203: 127-139 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.01.027>).
- 58 Giller, K.E., Witter, E., Corbeels, M. et Tittonell, P.** 2009. Conservation agriculture and smallholder farming in Africa: The heretics' view. *Field Crops Research*, 114(1): 23-34 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.06.017>).
- 59 CSAM.** 2022. Climate resilience practice. Dans: CSAM [en ligne]. Beijing. [Consulté le 24 juin 2022]. www.un-csam.org/KI-climate.
- 60 Winkler, B., Lemke, S., Ritter, J. et Lewandowski, I.** 2017. Integrated assessment of renewable energy potential: Approach and application in rural South Africa. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 24: 17-31 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1016/j.eist.2016.10.002>).
- 61 Lowenberg-DeBoer, J., Yuelu Huang, I., Grigoriadis, V. et Blackmore, S.** 2020. Economics of robots and automation in field crop production. *Precision Agriculture*, 21(2): 278-299 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1007/s11119-019-09667-5>).
- 62 Lowenberg-DeBoer, J.** 2019. Making Technology Pay on Your Farm. Future Farm Technology Expo. Birmingham (Royaume-Uni).
- 63 Shockley, J.M., Dillon, C.R. et Shearer, S.A.** 2019. An economic feasibility assessment of autonomous field machinery in grain crop production. *Precision Agriculture*, 20: 1068-1085 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1007/s11119-019-09638-w>).
- 64 Al-Amin, A.K.M.A., Lowenberg-DeBoer, J., Franklin, K. et Behrendt, K.** 2021. *Economic implications of field size for autonomous arable crop equipment*. Land, Farm and Agribusiness Management Department, Université Harper Adams, Newport (Royaume-Uni).
- 65 Baudron, F., Nazare, R. et Matangi, D.** 2019. The role of mechanization in transformation of smallholder agriculture in Southern Africa: Experience from Zimbabwe. Dans: R. Sikora, E. Terry, P. Vleket J. Chitja (dir. publ.). *Transforming agriculture in Southern Africa*, p. 152-159. Londres, Routledge (disponible à l'adresse suivante: www.taylorfrancis.com/chapters/oa-edit/10.4324/9780429401701-21/role-mechanization-transformation-smallholder-agriculture-southern-africa-fr%C3%A9d%C3%A9ric-baudron-raymond-nazare-dorcas-matangi).
- 66 Justice, S., Flores Rojas, M. et Basnyat, M.** 2022. *Empowering women farmers – A mechanization catalogue for practitioners*. Rome, FAO (disponible à l'adresse suivante: www.fao.org/3/cb8681en/cb8681en.pdf).
- 67 APNI.** 2020. Proceedings for the 1st African Conference on Precision Agriculture, Benguerir (Maroc), 8-10 décembre 2020. Dans: APNI (disponible à l'adresse suivante: www.apni.net/2021/03/18/new-publication-proceedings-for-1st-african-conference-on-precision-agriculture).
- 68 Onyango, C.M., Nyaga, J.M., Wetterlind, J., Söderström, M. et Piikki, K.** 2021. Precision agriculture for resource use efficiency in smallholder farming systems in sub-Saharan Africa: A systematic review. *Sustainability*, 13(3): 1158 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.3390/su13031158>).

- 69 Nyaga, J.M., Onyango, C.M., Wetterlind, J. et Söderström, M.** 2021. Precision agriculture research in sub-Saharan Africa countries: a systematic map. *Precision Agriculture*, 22: 1217-1236 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1007/s11119-020-09780-w>).
- 70 Pouya, M.B., Diebre, R., Rambaldi, G., Zomboudry, G., Barry, F., Sedogo, M. et Lombo, F.** 2020. Analyse comparative de l'agriculture de précision incluant l'utilisation de la technologie drone et de l'agriculture classique en matière de production de riz et de revenu des agriculteurs au Burkina Faso. Wageningue (Pays-Bas), CTA (disponible à l'adresse suivante: <https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/108460>).
- 71 Annor-Frempong, F. et Akaba, S.** 2020. Socio-economic impact and acceptance study of drone-applied pesticide on maize in Ghana. Wageningue (Pays-Bas), CTA (disponible à l'adresse suivante: <https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/108594>).
- 72 Niyitanga, F., Kazungu, J. et Mamy, I.M.** 2020. Willingness to pay and cost-benefit analyses for farmers acting on real-time, actionable UAS-based advice when growing wheat or potato in Gataraga sector, Musanze district, Rwanda. Wageningue (Pays-Bas), CTA (disponible à l'adresse suivante: <https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/108602>).
- 73 Santos Valle, S. et Kienzle, J.** 2020. Agriculture 4.0—Robotique agricole et matériel automatisé au service d'une production agricole durable. Gestion intégrée de cultures. Vol. 24. Rome, FAO (disponible à l'adresse suivante: <https://www.fao.org/3/cb2186fr/CB2186FR.pdf>).
- 74 Yawson, G. et Frimpong-Wiafe, B.** 2018. The socio-economic benefits and impact study on the application of drones, sensor technology and intelligent systems in commercial scale agricultural establishments in Africa. *International Journal of Agriculture and Economic Development*, 6(2): 18-36 (disponible à l'adresse suivante: www.academia.edu/40998630/The_Socio-Economic_Benefits_and_Impact_Study_on_the_Application_of_Drones_Sensor_Technology_and_Intelligent_Systems_in_Commercial-Scale_Agricultural_Establishment_In_Africa).
- 75 Ayamga, M., Tekinerdogan, B. et Kassahun, A.** 2021. Exploring the challenges posed by regulations for the use of drones in agriculture in the African context. *Land*, 10(2): 164 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.3390/land10020164>).
- 76 Carvalho, F.K., Chechetto, R.G., Mota, A.A.B. et Antuniassi, U.R.** 2020. Challenges of aircraft and drone spray applications. *Outlooks on Pest Management*, 31(2): 83-88 (disponible à l'adresse suivante: http://dx.doi.org/10.1564/v31_apr_07).
- 77 Sissoko, A.** 2020. «Malian architect fights climate change with digital greenhouse». Dans: *Reuters* [en ligne]. [Consulté le 23 juin 2022]. www.reuters.com/article/us-climate-change-mali-agriculture-idUSKBN20713N.
- 78 Elsäßer, R., Hänsel, G. et Feldt, T.** 2021. *Digitalizing the African livestock sector: Status quo and future trends for sustainable value chain development*. Bonn (Allemagne), GIZ (disponible à l'adresse suivante: www.giz.de/de/downloads/giz2021_en_Digitalizing%20the%20African%20livestock%20sector.pdf).
- 79 Okinda, B.** 2020. Pastoralists turn to apps to find grazing fields. Dans: *Nation* [en ligne]. [Consulté le 1^{er} juin 2022]. [https://nation.africa/kenya/healthy-nation/pastoralists-turn-to-apps-to-find-grazing-fields-12554](http://nation.africa/kenya/healthy-nation/pastoralists-turn-to-apps-to-find-grazing-fields-12554).
- 80 Daum, T., Villalba, R., Anidi, O., Mayienga, S.M., Gupta, S. et Birner, R.** 2021. Uber for tractors? Opportunities and challenges of digital tools for tractor hire in India and Nigeria. *World Development*, 144: 105480 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2021.105480>).
- 81 Tarannum, N., Rhaman, Md.K., Khan, S.A. et Shakil, S.R.** 2015. A brief overview and systematic approach for using agricultural robot in developing countries. *Journal of Modern Science and Technology*, 3(1): 88-101 (disponible à l'adresse suivante: [https://zantworldpress.com/wp-content/uploads/2019/12/Paper-8.pdf](http://zantworldpress.com/wp-content/uploads/2019/12/Paper-8.pdf)).
- 82 Reddy, N., Reddy, A.V., Pranavadihya, S. et Kumar, J.** 2016. A critical review on agricultural robots. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 7(4): 183-188 (disponible à l'adresse suivante: [https://iaeeme.com/MasterAdmin/Journal_uploads/IJMET/VOLUME_7_ISSUE_4/IJMET_07_04_018.pdf](http://iaeeme.com/MasterAdmin/Journal_uploads/IJMET/VOLUME_7_ISSUE_4/IJMET_07_04_018.pdf)).
- 83 Autor, D.H.** 2015. Why are there still so many jobs? The history and future of workplace automation. *Journal of Economic Perspectives*, 29(3): 3-30 (disponible à l'adresse suivante: www.aeaweb.org/articles?id=10.1257/jep.29.3.3).
- 84 Aune, J.B., Coulibaly, A. et Giller, K.E.** 2017. Precision farming for increased land and labour productivity in semi-arid West Africa. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 37: 16 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0424-z>).

- 85 Nouhoheflin, T., Coulibaly, J.Y., D'Alessandro, S., Aitchédji, C.C., Damisa, M., Baributsa, D. et Lowenberg-DeBoer, J.** 2017. Management lessons learned in supply chain development: the experience of PICS bags in West and Central Africa. *International Food and Agribusiness Management Review*, 20(3): 427-438 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.22434/IFAMR2016.0167>).
- 86 Micle, D.E., Deiac, F., Olar, A., Drența, R.F., Florean, C., Coman, I.G. et Arion, F.H.** 2021. Research on innovative business plan. Smart cattle farming using artificial intelligent robotic process automation. *Agriculture*, 11(5): 430 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.3390/agriculture11050430>).
- 87 Gorbunova, A.V., Kostin, V.E., Pashkevich, I.L., Rybanov, A.A., Savchits, A.V., Silaev, A.A., Silaeva, E.Y. et Judaev, Y.V.** 2020. Prospects and opportunities for the introduction of digital technologies into aquaculture governance system. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 422(1): 012125 (disponible à l'adresse suivante: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/422/1/012125>).
- 88 Saha, S., Hasan Rajib, R. et Kabir, S.** 2018. IoT-based automated fish farm aquaculture monitoring system. *2018 International Conference on Innovations in Science, Engineering and Technology (ICISET)*, p. 201-206.
- 89 Neethirajan, S. et Kemp, B.** 2021. Digital livestock farming. *Sensing and Bio-Sensing Research*, 32: 100408 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1016/j.sbsr.2021.100408>).
- 90 FAO, FIDA (Fonds international de développement agricole), OMS (Organisation mondiale de la Santé), PAM (Programme alimentaire mondial) et UNICEF (Fonds des Nations Unies pour l'enfance).** 2022. *L'État de la sécurité alimentaire et de la nutrition dans le monde 2022. Réorienter les politiques alimentaires et agricoles pour rendre l'alimentation saine plus abordable*. Rome, FAO (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.4060/cc0639fr>).
- 3 Charlton, D., Hill, A.E. et Taylor, E.J.** 2022. *Automation and social impacts: winners and losers*. Document de base établi aux fins de l'élaboration de *La Situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture 2022*. Document de travail de la FAO sur l'économie du développement agricole 22-09. Rome, FAO.
- 4 Morton, J.F.** 2007. The impact of climate change on smallholder and subsistence agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(50): 19680-19685 (disponible à l'adresse suivante: www.pnas.org/doi/pdf/10.1073/pnas.0701855104).
- 5 Davidova, S., Fredriksson, L., Gorton, M., Mishev, P. et Petrovici, D.** 2012. Subsistence farming, incomes, and agricultural livelihoods in the new Member States of the European Union. *Environment and Planning C: Government and Policy*, 30(2): 209-227.
- 6 Sibhatu, K.T., Krishna, V.V. et Qaim, M.** 2015. Production diversity and dietary diversity in smallholder farm households. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(34): 10657-10662 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1073/pnas.1510982112>).
- 7 Sibhatu, K.T. et Qaim, M.** 2017. Rural food security, subsistence agriculture, and seasonality. *PLOS ONE*, 12(10): e0186406 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0186406>).
- 8 Frelat, R., Lopez-Ridaura, S., Giller, K.E., Herrero, M., Douxchamps, S., Djurfeldt, A.A., Erenstein, O. et al.** 2016. Drivers of household food availability in sub-Saharan Africa based on big data from small farms. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(2): 458-463 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1073/pnas.1518384112>).
- 9 Hall, R., Scoones, I. et Tsikata, D.** 2017. Plantations, outgrowers and commercial farming in Africa: agricultural commercialisation and implications for agrarian change. *The Journal of Peasant Studies*, 44(3): 515-537 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1080/03066150.2016.1263187>).
- 10 Barnett, T.** 1996. Subsistence agriculture. Dans: T. Barnett, E. Blas et A. Whiteside (dir. publ.). *AIDS Brief for sectoral planners and managers*, p. 6-10. Genève(Suisse), OMS (disponible à l'adresse suivante: <https://corpora.tika.apache.org/base/docs/govdocs1/153/153175.pdf>).

CHAPITRE 4

- 1 FAO.** 2021. *Engaging with small and medium agrifood enterprises to guide policy making. A qualitative research methodological guide*. Rome (disponible à l'adresse suivante: www.fao.org/3/cb4179en/cb4179en.pdf).
- 2 FAO.** 2022. *Cross cutting theme on inclusivity. FAO Strategic Framework 2022-2025*. Rome (non publié).

- 11 Mendoza, E.E., Rigor, A.C., Mordido, C.C. et Marajas, A.A.** 1982. *Grain quality deterioration in on-farm level of operations*. Proceedings of 5th Annual Grains Postharvest Technology Workshop, Los Baños, 1982. Manille, Southeast Asia Cooperative Post-harvest Research and Development Programme.
- 12 Proctor, D.L.** 1994. *Grain storage techniques: Evolution and trends in developing countries*. Bulletin des services agricoles de la FAO n° 10. Rome, FAO.
- 13 de la Peña, C.** 2013. Thinking through the tomato harvester. Dans: *Boom California* [en ligne]. [Consulté le 25 juillet 2022]. <https://boomcalifornia.org/2013/06/24/thinking-through-the-tomato-harvester>.
- 14 Gazzola, P., Grechi, D., Martinelli, I. et Pezzetti, R.** 2022. The innovation of the cashierless store: a preliminary analysis in Italy. *Sustainability*, 14(4): 2034 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.3390/su14042034>).
- 15 Rudd, J.** 2019. Checking out productivity in grocery stores. *Beyond the Numbers: Productivity*, 8(15). (U.S. Bureau of Labor Statistics, décembre 2019) (disponible à l'adresse suivante: www.bls.gov/opub/btn/volume-8/checking-out-productivity-in-grocery-stores.htm).
- 16 Reinartz, W., Wiegand, N. et Imschloss, M.** 2019. The impact of digital transformation on the retailing value chain. *International Journal of Research in Marketing*, 36(3): 350-366 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1016/j.ijresmar.2018.12.002>).
- 17 Spruit, D. et Almenar, E.** 2021. First market study in e-commerce food packaging: Resources, performance, and trends. *Food Packaging and Shelf Life*, 29: 100698.
- 18 Zhang, Y. et Huang, L.** 2015. China's e-commerce development path and mode innovation of agricultural product based on business model canvas method. *WHICEB 2015 Proceedings*, 9 (disponible à l'adresse suivante: <https://aisel.aisnet.org/cgi/viewcontent.cgi?article=1076&context=whiceb2015>).
- 19 Zeng, Y., Jia, F., Wan, L. et Guo, H.** 2017. E-commerce in agri-food sector: a systematic literature review. *International Food and Agribusiness Management Review*, 20(4): 439-460.
- 20 Cai, Y., Lang, Y., Zheng, S. et Zhang, Y.** 2015. Research on the influence of e-commerce platform to agricultural logistics: An empirical analysis based on agricultural product marketing. *International Journal of Security and Its Applications*, 9(10): 287-296 (disponible à l'adresse suivante: http://article.nadiapub.com/IJSIA/vol9_no10/26.pdf).
- 21 FAO et ICRISAT (Institut international de recherche sur les cultures des zones tropicales semi-arides)**. 2022. *Digital agriculture in action: selected case studies from India*. Country Investment Highlights n° 17. Rome, FAO et ICRISAT (disponible à l'adresse suivante: www.fao.org/3/cc0017en/cc0017en.pdf).
- 22 FAO et Université de Zhejiang.** 2021. *Rural e-commerce development: experience from China*. Digital Agriculture Report. Rome, FAO (disponible à l'adresse suivante: www.fao.org/3/cb4960en/cb4960en.pdf).
- 23 FAO.** 2015. *Understanding decent rural employment*. Rome (disponible à l'adresse suivante: www.fao.org/3/bc270e/bc270e.pdf).
- 24 Takeshima, H. et Vos, R.** 2022. *Agricultural mechanisation and child labour in developing countries*. Background Study. Rome, FAO (disponible à l'adresse suivante: www.fao.org/3/cb8550en/cb8550en.pdf).
- 25 Deichmann, U., Goyal, A. et Mishra, D.** 2016. Will digital technologies transform agriculture in developing countries? Policy Research Working Paper n° 7669. Washington, Banque mondiale (disponible à l'adresse suivante: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/24507>).
- 26 Nakasone, E. et Torero, M.** 2016. A text message away: ICTs as a tool to improve food security. *Agricultural Economics*, 47: 49-59 (disponible à l'adresse suivante: https://mpra.ub.uni-muenchen.de/75854/1/MPRA_paper_75854.pdf).
- 27 Sekabira, H. et Qaim, M.** 2017. Can mobile phones improve gender equality and nutrition? Panel data evidence from farm households in Uganda. *Food Policy*, 73: 95-103.
- 28 Santos Valle, S. et Kienzle, J.** 2020. *Agriculture 4.0—Robotique agricole et matériel automatisé au service d'une production agricole durable*. Gestion intégrée de cultures. Vol. 24. Rome, FAO (disponible à l'adresse suivante: www.fao.org/3/cb2186fr/CB2186FR.pdf).
- 29 Bonacich, E. et De Lara, J.D.** 2009. *Economic crisis and the logistics industry: Financial insecurity for warehouse workers in the inland empire*. IRLE Working Paper n° 2009-13. UCLA, Los Angeles (États-Unis) (disponible à l'adresse suivante: <https://escholarship.org/uc/item/8rn2h9ch>).

BIBLIOGRAPHIE

30 Gittleman, M. et Monaco, K. 2020. Truck-driving jobs: Are they headed for rapid elimination? *ILR Review*, 73(1): 3-24.

31 England, P. 2010. The gender revolution: Uneven and stalled. *Gender and Society*, 24(2): 149-166.

32 Scott, A. et Davis-Sramek, B. 2021. *Driving in a man's world: Intra-occupational gender segregation in the trucking industry*. Working Paper (disponible à l'adresse suivante: www.researchgate.net/publication/349104605_Driving_in_a_Man%27s_World_Intra-occupational_Gender_Segregation_in_the_Trucking_Industry).

33 U.S. Bureau of Labor Statistics. 2022. Labor force statistics from the current population survey. Dans: *U.S. Bureau of Labor Statistics* [en ligne]. [Consulté le 18 mars 2022]. www.bls.gov/cps/cpsaat11.htm.

34 Rapsomanikis, G. 2015. *The economic lives of smallholder farmers: An analysis based on household data from nine countries*. Rome, FAO (disponible à l'adresse suivante: www.fao.org/3/i5251e/i5251e.pdf).

35 Adu-Baffour, F., Daum, T. et Birner, R. 2019. Can small farms benefit from big companies' initiatives to promote mechanization in Africa? A case study from Zambia. *Food Policy*, 84: 133-145 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2019.03.007>).

36 Ogutu, S.O., Ochieng, D.O. et Qaim, M. 2020. Supermarket contracts and smallholder farmers: Implications for income and multidimensional poverty. *Food Policy*, 95: 101940 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2020.101940>).

37 Chege, C.G.K., Andersson, C.I.M. et Qaim, M. 2015. Impacts of supermarkets on farm household nutrition in Kenya. *World Development*, 72: 394-407 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2015.03.016>).

38 Baudron, F., Misiko, M., Getnet, B., Nazare, R., Sariah, J. et Kaumbutho, P. 2019. A farm-level assessment of labor and mechanization in Eastern and Southern Africa. *Agronomy for Sustainable Development*, 39(2): 17 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0563-5>).

39 Guilhoto, J.J.M., Barros, A., Marjotta-Mastro, M. et Istake, M. 2002. *Mechanization process of the sugar cane harvest and its direct and indirect impact over the employment in Brazil*

and in its 5 macro regions

MPRA Paper n° 38070 (disponible à l'adresse suivante: https://mpra.ub.uni-muenchen.de/38070/1/MPRA_paper_38070.pdf).

40 Charlton, D. et Kostandini, G. 2021. Can technology compensate for a labor shortage? Effects of 287(g) immigration policies on the U.S. dairy industry. *American Journal of Agricultural Economics*, 103(1): 70-89 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1111/ajae.12125>).

41 Lowenberg-DeBoer, J., Yuelu Huang, I., Grigoriadis, V. et Blackmore, S. 2020. Economics of robots and automation in field crop production. *Precision Agriculture*, 21(2): 278-299 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1007/s11119-019-09667-5>).

42 Ortega, A.C., de Jesus, C.M. et Mouro, M. de C. 2009. Mecanização e emprego na cafeicultura do Cerrado Mineiro. *Revista Da ABET*, 8(2) (disponible à l'adresse suivante: <https://periodicos.ufpb.br/ojs2/index.php/abet/article/view/15268/8674>).

43 Posadas, B.C., Knight, P.R., Coker, R.Y., Coker, C.H., Langlois, S.A. et Fain, G. 2008. Socioeconomic impact of automation on horticulture production firms in the Northern Gulf of Mexico region. *HortTechnology*, 18(4): 697-704 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.18.4.697>).

44 Charlton, D. et Taylor, J.E. 2020. Rural school access and the agricultural transformation. *Agricultural Economics*, 51(5): 641-654 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1111/agec.12583>).

45 Taylor, J.E. et Charlton, D. 2018. *The farm labor problem: A global perspective*. Amsterdam, Elsevier Academic Press.

46 Lachia, N., Pichon, L. et Tisseyre, B. 2019. A collective framework to assess the adoption of precision agriculture in France: description and preliminary results after two years. Dans: J.V. Stafford (dir. publ.). *Precision agriculture '19*. p. 851-857 (disponible à l'adresse suivante: https://doi.org/10.3920/978-90-8686-888-9_105).

47 Lowenberg-DeBoer, J. 2022. *Economics of adoption for digital automated technologies in agriculture*. Document de base établi aux fins de l'élaboration de *La Situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture 2022*. Document de travail de la FAO sur l'économie du développement agricole 22-10. Rome, FAO.

- 48 Ma, M., Saitone, T.L., Volpe, R.J., Sexton, R.J. et Saksena, M.** 2019. Market concentration, market shares, and retail food prices: Evidence from the U.S. Women, Infants, and Children Program. *Applied Economic Perspectives and Policy*, 41(3): 542-562 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1093/aapp/ppy016>).
- 49 Torero, M.** 2019. Robotics and AI in food security and innovation: Why they matter and how to harness their power. Dans: J. von Braun, M.S. Archer, G.M. Reichberg et M. Sánchez Sorondo (dir. publ.). *Robotics, AI, and humanity: Science, ethics, and policy*, p. 99-107. Springer.
- 50 Banque mondiale.** 2020. *Poverty and shared prosperity 2020: Reversals of fortune*. Washington (disponible à l'adresse suivante: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/34496>).
- 51 FAO.** 2022. *Inclusion of persons with disabilities in FAO's work: Information Note*. Rome. (non publié).
- 52 Filipski, M., Aboudrare, A., Lybbert, T.J. et Taylor, J.E.** 2017. Spice price spikes: Simulating impacts of saffron price volatility in a gendered local economy-wide model. *World Development*, 91: 8499 (disponible à l'adresse suivante: https://arefiles.ucdavis.edu/uploads/filer_public/e3/9d/e39d6c38-56a6-4f56-8831-8947ef0648e2/2017_filipski_et_al_wd_spice_price_spikes.pdf).
- 53 Diirø, G.M., Fisher, M., Kassie, M., Muriithi, B.W. et Muricho, G.** 2021. How does adoption of labor saving agricultural technologies affect intrahousehold resource allocations? The case of push-pull technology in Western Kenya. *Food Policy*, 102: 102114 (disponible à l'adresse suivante: <http://oar.icrisat.org/11845/1/Impact%20of%20Push%20Pull%20Technology%20on%20Intra-Household%20Labour%20Allocation%20in%20Kenya.pdf>).
- 54 Ceccarelli, T., Chauhan, A., Rambaldi, G., Kumar, I., Cappello, C., Janssen, S. et McCampbell, M.** 2022. *Leveraging automation and digitalization for precision agriculture: Evidence from the case studies*. Document de base établi aux fins de l'élaboration de *La Situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture 2022*. Étude technique de la FAO sur l'économie du développement agricole n° 24. Rome, FAO.
- 55 Vemireddy, V. et Choudhary, A.** 2021. A systematic review of labor-saving technologies: Implications for women in agriculture. *Global Food Security*, 29: 100541.
- 56 GIZ (Agence allemande de coopération internationale).** 2020. *Gender-transformative change in practice: 6 case studies*. Agricultural Technical Vocational Education and Training for Women (ATVET4W). Pretoria (disponible à l'adresse suivante: www.giz.de/en/downloads/giz2020_en_GTC%20in%20Practice_6%20Case%20Studies_Interactive.pdf).
- 57 Majumder, J. et Shah, P.** 2017. Mapping the role of women in Indian agriculture. *Annals of Anthropological Practice*, 41(2): 46-54 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1111/napa.12112>).
- 58 Theis, S., Sultana, N. et Krupnik, T.J.** 2018. *Overcoming gender gaps in rural mechanization: Lessons from reaper-harvester service provision in Bangladesh*. GCAN Project Note 8. CSISA Research Note 9. Washington, IFPRI (disponible à l'adresse suivante: <http://ebrary.ifpri.org/cdm/ref/collection/p15738coll2/id/132358>).
- 59 Flores Rojas, M.** 2018. *Gender sensitive labour saving technology. Drum seeder: saving time, effort and money. A case study from the Lao People's Democratic Republic*. Bangkok, FAO (disponible à l'adresse suivante: www.fao.org/3/i9464en/i9464en.pdf).
- 60 FAO.** 2019. *Fostering the uptake of labour-saving technologies: How to develop effective strategies to benefit rural women*. Rome (disponible à l'adresse suivante: www.fao.org/3/CA2731EN/ca2731en.pdf).
- 61 Daum, T., Adegbola, P.Y., Adegbola, C., Daudu, C., Issa, F., Kamau, G., Kergna, A.O. et al.** 2022. Mechanization, digitalization, and rural youth – Stakeholder perceptions on three mega-topics for agricultural transformation in four African countries. *Global Food Security*, 32: 100616 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2022.100616>).
- 62 Kim, J.** 2019. Innovative technology in the agricultural sectors: Opportunities for green jobs or exacerbation of rural youth unemployment? *Proceedings of the Future of Work in Agriculture Conference*. Washington (disponible à l'adresse suivante: <https://farmlabor.ucdavis.edu/sites/g/files/dgvnsk5936/files/inline-files/Jeongha%20Kim%3B%20Ag%20Tech.pdf>).
- 63 Khanna, M.** 2021. Digital transformation of the agricultural sector: Pathways, drivers and policy implications. *Applied Economic Perspectives and Policy*, 43(4): 1221-1242 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1002/aapp.13103>).

CHAPITRE 5

- 1 Rose, D.C., Lyon, J., de Boon, A., Hanheide, M. et Pearson, S.** 2021. Responsible development of autonomous robotics in agriculture. *Nature Food*, 2: 306-309 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00287-9>).
- 2 Klerkx, L. et Rose, D.** 2020. Dealing with the game-changing technologies of Agriculture 4.0: How do we manage diversity and responsibility in food system transition pathways? *Global Food Security*, 24: 100347 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.100347>).
- 3 Ag-Incentives.** 2022. Dans: Ag-Incentives [en ligne]. [Consulté le 4 mai 2022]. <http://ag-incentives.org>.
- 4 FAO, FIDA, OMS, PAM et UNICEF.** 2022. *L'État de la sécurité alimentaire et de la nutrition dans le monde 2022. Réorienter les politiques alimentaires et agricoles pour rendre l'alimentation saine plus abordable*. Rome, FAO (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.4060/cc0639fr>).
- 5 Daum, T. et Birner, R.** 2017. The neglected governance challenges of agricultural mechanisation in Africa – insights from Ghana. *Food Security*, 9(5): 959-979 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1007/s12571-017-0716-9>).
- 6 Cramb, R. et Thepent, V.** 2020. Evolution of agricultural mechanization in Thailand. Dans: X. Diao, H. Takeshima et X. Zhang (dir. publ.). *An evolving paradigm of agricultural mechanization development: How much can Africa learn from Asia?* p. 165-201. Washington, IFPRI (disponible à l'adresse suivante: <https://ebrary.ifpri.org/utils/getfile/collection/p15738coll2/id/134091/filename/134311.pdf>).
- 7 Justice, S. et Biggs, S.** 2020. The spread of smaller engines and markets in machinery services in rural areas of South Asia. *Journal of Rural Studies*, 73: 10-20 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2019.11.013>).
- 8 IFC (Société financière internationale).** 2019. *The market opportunity for Productive Use Leveraging Solar Energy (PULSE) in sub-Saharan Africa*. Washington (disponible à l'adresse suivante: www.lightingglobal.org/wp-content/uploads/2019/09/PULSE-Report.pdf).
- 9 Rose, D.** 2022. *Agricultural automation: the past, present and future of adoption. The State of Food and Agriculture 2022, background paper*. Document interne.

10 Ministère des transports et des communications, Finlande.

2011. *Communications Market Act* (disponible à l'adresse suivante: www.finlex.fi/en/laki/kaannokset/2003/en20030393.pdf).

11 Commission européenne. 2020. *Facing the challenges of broadband deployment in rural and remote areas: A handbook for project promoters and policy makers* (disponible à l'adresse suivante: www.byanatsforum.se/wp-content/uploads/2020/05/Broadband-handbook-2020pdf.pdf).

12 Van Loon, J., Woltering, L., Krupnik, T.J., Baudron, F., Boa, M. et Govaerts, B. 2020. Scaling agricultural mechanization services in smallholder farming systems: Case studies from sub-Saharan Africa, South Asia, and Latin America. *Agricultural Systems*, 180: 102792 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1016/j.agbsy.2020.102792>).

13 Diao, X., Takeshima, H. et Zhang, X. 2020. *An evolving paradigm of agricultural mechanization development: How much can Africa learn from Asia?* Washington, IFPRI (disponible à l'adresse suivante: <https://ebrary.ifpri.org/digital/collection/p15738coll2/id/134095>).

14 Kwet, M. 2019. «Digital colonialism is threatening the Global South». Dans: *Aljazeera* [en ligne]. [Consulté le 25 juillet 2022] (disponible à l'adresse suivante: www.aljazeera.com/opinions/2019/3/13/digital-colonialism-is-threatening-the-global-south).

15 Ávila Pinto, R. 2018. Digital sovereignty or digital colonialism. *International Journal on Human Rights*, 15(27): 15-27 (disponible à l'adresse suivante: <https://sur.conectas.org/en/digital-sovereignty-or-digital-colonialism/>).

16 Union africaine. 2020. *The digital transformation strategy for Africa (2020-2030)*. Addis-Abeba (disponible à l'adresse suivante: <https://au.int/sites/default/files/documents/38507-doc-dts-english.pdf>).

17 Smart Africa. 2022. *AgriTech blueprint for Africa* (disponible à l'adresse suivante: <https://smart.africa/board/login/uploads/71613-continental-agritech-blueprint-eng.pdf>).

18 FAO et UIT. 2017. *E-agriculture strategy guide: A summary*. Bangkok (disponible à l'adresse suivante: www.fao.org/3/i6909e/i6909e.pdf).

- 19 Ströh de Martínez, C., Feddersen, M. et Speicher, A.** 2016. *Food security in sub-Saharan Africa: A fresh look on agricultural mechanisation. How adapted financial solutions can make a difference*. Studies n° 91. Bonn (Allemagne), Institut allemand pour le développement (disponible à l'adresse suivante: www.die-gdi.de/uploads/media/Study_91.pdf).
- 20 Bhattarai, M., Singh, G., Takeshima, H. et Shekhawat, R.S.** 2020. Farm machinery use and the agricultural machinery industries in India. Dans: X. Diao, H. Takeshima et X. Zhang (dir. publ.). *An evolving paradigm of agricultural mechanization development: How much can Africa learn from Asia?* p. 97-138. Washington, IFPRI (disponible à l'adresse suivante: <https://library.ifpri.org/digital/collection/p15738coll2/id/134090>).
- 21 FAO et CUA.** 2019. *La mécanisation agricole durable: Cadre stratégique pour l'Afrique*. Addis-Abeba (disponible à l'adresse suivante: <https://www.fao.org/3/CA1136FR/ca1136fr.pdf>).
- 22 Ceccarelli, T., Chauhan, A., Rambaldi, G., Kumar, I., Cappello, C., Janssen, S. et McCampbell, M.** 2022. *Leveraging automation and digitalization for precision agriculture: Evidence from the case studies*. Document de base établi aux fins de l'élaboration de *La Situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture 2022*. Étude technique de la FAO sur l'économie du développement agricole n° 24. Rome, FAO.
- 23 Win, M.T., Belton, B. et Zhang, X.** 2020. Myanmar's rapid agricultural mechanization: Demand and supply evidence. Dans: X. Diao, H. Takeshima et X. Zhang (dir. publ.). *An evolving paradigm of agricultural mechanization development: How much can Africa learn from Asia?* p. 263-284. Washington, IFPRI (disponible à l'adresse suivante: https://doi.org/10.2499/9780896293809_08).
- 24 Meyer, R.** 2011. *Subsidies as an instrument in agriculture finance: a review*. Washington, Banque mondiale (disponible à l'adresse suivante: <https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/12696/707300ESW0P1120ies0as0an0Instrument.pdf?sequence=1&isAllowed=y>).
- 25 Houssou, N., Diao, X., Cossar, F., Kolavalli, S., Jimah, K. et Aboagye, P.O.** 2013. Agricultural mechanization in Ghana: is specialization in agricultural mechanization a viable business model? American Journal of Agricultural Economics, 95(5): 1237-1244 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1093/ajae/aat026>).
- 26 Daum, T., Huffman, W. et Birner, R.** 2018. *How to create conducive institutions to enable agricultural mechanization: A comparative historical study from the United States and Germany*. Economics Working Paper. Ames (États-Unis), Department of Economics, Iowa State University (disponible à l'adresse suivante: https://lib.dr.iastate.edu/econ_workingpapers/47).
- 27 Grain Producers Australia (GPA), Tractor and Machinery Association (TMA), et Society of Precision Agriculture Australia (SPAA).** 2021. *Code of practice. Agricultural Mobile Field Machinery with Autonomous Functions in Australia* (disponible à l'adresse suivante: www.graincentral.com/wp-content/uploads/2021/08/Code-of-Practice.pdf).
- 28 Lowenberg-DeBoer, J., Behrendt, K., Ehlers, M.-H., Dillon, C., Gabriel, A., Huang, I.Y., Kumwenda, I. et al.** 2021. Lessons to be learned in adoption of autonomous equipment for field crops. *Applied Economic Perspectives and Policy*, 44(2): 848-864 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1002/aep.13177>).
- 29 Justice, S., Flores Rojas, M. et Basnyat, M.** 2022. *Empowering women farmers – A mechanization catalogue for practitioners*. Rome, FAO (disponible à l'adresse suivante: www.fao.org/3/cb8681en/cb8681en.pdf).
- 30 Flores Rojas, M.** 2018. *Gender sensitive labour saving technology. Drum seeder: saving time, effort and money. A case study from the Lao People's Democratic Republic*. Bangkok, FAO (disponible à l'adresse suivante: www.fao.org/3/i9464en/i9464en.pdf).
- 31 CSA (Comité de la sécurité alimentaire mondiale).** 2014. *Principes pour un investissement responsable dans l'agriculture et les systèmes alimentaires*. Rome (disponible à l'adresse suivante: <https://www.fao.org/3/au866f/au866f.pdf>).
- 32 Alves, B.J.R., Madari, B.E. et Boddey, R.M.** 2017. Integrated crop-livestock-forestry systems: prospects for a sustainable agricultural intensification. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 108: 1-4 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1007/s10705-017-9851-0>).
- 33 McCampbell, M.** 2022. *Agricultural digitalization and automation in low- and middle-income countries: Evidence from ten case studies*. Document de base établi aux fins de l'élaboration de *La Situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture 2022*. Étude technique de la FAO sur l'économie du développement agricole n° 25. Rome, FAO.

BIBLIOGRAPHIE

- 34 Northrup, D.L., Basso, B., Wang, M.Q., Morgan, C.L.S. et Benfey, P.N.** 2021. Novel technologies for emission reduction complement conservation agriculture to achieve negative emissions from row-crop production. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(28): e2022666118.
- 35 FAO.** 2020. L'agriculture de conservation. Dans: FAO [en ligne]. Rome. [Consulté le 1^{er} août 2022]. www.fao.org/conservation-agriculture/fr.
- 36 Jaleta, M., Baudron, F., Krivokapic-Skoko, B. et Erenstein, O.** 2019. Agricultural mechanization and reduced tillage: antagonism or synergy? *International Journal of Agricultural Sustainability*, 17(3): 219-230 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1080/14735903.2019.1613742>).
- 37 Giller, K.E., Witter, E., Corbeels, M. et Tittonell, P.** 2009. Conservation agriculture and smallholder farming in Africa: The heretics' view. *Field Crops Research*, 114(1): 23-34 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.06.017>).
- 38 Baudron, F., Nazare, R. et Matangi, D.** 2019. The role of mechanization in transformation of smallholder agriculture in Southern Africa: Experience from Zimbabwe. Dans: R. Sikora, E. Terry, P. Vleket J. Chitja (dir. publ.). *Transforming agriculture in Southern Africa*, p. 152-159. Londres, Routledge (disponible à l'adresse suivante: www.taylorfrancis.com/chapters/oa-edit/10.4324/9780429401701-21/role-mechanization-transformation-smallholder-agriculture-southern-africa-fr%C3%A9d%C3%A9ric-baudron-raymond-nazare-dorcas-matangi).
- 39 FAO.** 2022. Conduite responsable des entreprises dans le secteur agricole. Dans: FAO [en ligne]. Rome. [Consulté le 29 juin 2022]. www.fao.org/responsible-business-conduct-in-agriculture/fr.
- 40 Commission européenne.** 2022. *Une économie juste et durable: la Commission établit des règles relatives au respect des droits de l'homme et de l'environnement par les entreprises dans les chaînes de valeur mondiales*. Communiqué de presse. Bruxelles (disponible à l'adresse suivante: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/fr/ip_22_1145).
- 41 Torero, M.** 2019. Robotics and AI in food security and innovation: Why they matter and how to harness their power. Dans: J. von Braun, M.S. Archer, G.M. Reichberg et M. Sánchez Sorondo (dir. publ.). *Robotics, AI, and humanity: Science, ethics, and policy*, p. 99-107. Springer.
- 42 Adu-Baffour, F., Daum, T. et Birner, R.** 2019. Can small farms benefit from big companies' initiatives to promote mechanization in Africa? A case study from Zambia. *Food Policy*, 84: 133-145 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2019.03.007>).
- 43 Daum, T., Capezzone, F. et Birner, R.** 2021. Using smartphone app collected data to explore the link between mechanization and intra-household allocation of time in Zambia. *Agriculture and Human Values*, 38: 411-429 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.1007/s10460-020-10160-3>).
- 44 Sims, B., Hilmi, M. et Kienzle, J.** 2016. *La mécanisation agricole – Un intrant essentiel pour les petits exploitants d'Afrique subsaharienne*. Gestion intégrée des cultures. Vol. 23. Rome, FAO (disponible à l'adresse suivante: www.fao.org/3/i6044f/i6044f.pdf).
- 45 Tsan, M., Totapally, S., Hailu, M. et Addom, B.** 2019. *The digitalisation of African agriculture report 2018-2019*. Wageningue (Pays-Bas). CTA (disponible à l'adresse suivante: www.cta.int/en/digitalisation-agriculture-africa).
- 46 Trendov, N.M., Varas, S. et Zeng, M.** 2019. *Digital technologies in agriculture and rural areas – Status report*. Rome, FAO (disponible à l'adresse suivante: www.fao.org/3/ca4985en/CA4985EN.pdf).
- 47 Charlton, D., Hill, A.E. et Taylor, E.J.** 2022. *Automation and social impacts: winners and losers*. Document de base établi aux fins de l'élaboration de *La Situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture 2022*. Document de travail de la FAO sur l'économie du développement agricole 22-09. Rome, FAO.
- 48 Mapiye, O., Makombe, G., Molotsi, A., Dzama, K. et Mapiye, C.** 2021. Towards a revolutionized agricultural extension system for the sustainability of smallholder livestock production in developing countries: The potential role of ICTs. *Sustainability*, 13(11): 5868 (disponible à l'adresse suivante: <https://doi.org/10.3390/su13115868>).
- 49 Bhattacharyya, T., Wani, S.P. et Tiwary, P.** 2021. Empowerment of stakeholders for scaling-up: digital technologies for agricultural extension. Dans: S.P. Wani, K.V. Raju et T. Bhattacharyya (dir. publ.). *Scaling-up solutions for farmers*, p. 121-147. Cham, Springer International Publishing (disponible à l'adresse suivante: https://link.springer.com/10.1007/978-3-030-77935-1_3).

ANNEXE 1

1 McCampbell, M. 2022. *Agricultural digitalization and automation in low- and middle-income countries: Evidence from ten case studies*. Document de base établi aux fins de l'élaboration de *La Situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture 2022*. Étude technique de la FAO sur l'économie du développement agricole n° 25. Rome, FAO.

2 Ceccarelli, T., Chauhan, A., Rambaldi, G., Kumar, I., Cappello, C., Janssen, S. et McCampbell, M. 2022. *Leveraging automation and digitalization for precision agriculture: Evidence from the case studies*. Document de base établi aux fins de l'élaboration de *La Situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture 2022*. Étude technique de la FAO sur l'économie du développement agricole n° 24. Rome, FAO.



2022

LA SITUATION MONDIALE DE L'ALIMENTATION ET DE L'AGRICULTURE

L'AUTOMATISATION DE L'AGRICULTURE AU SERVICE DE LA TRANSFORMATION DES Systèmes agroalimentaires

Depuis le début du XX^e siècle, l'agriculture mondiale est influencée par l'automatisation. La mécanisation motorisée a apporté des avantages considérables en ce qu'elle a permis d'améliorer la productivité, de réduire la pénibilité et d'affecter plus efficacement la main-d'œuvre. Cependant, elle a aussi eu des conséquences négatives sur l'environnement. Plus récemment, des technologies numériques de nouvelle génération à l'appui de l'automatisation de l'agriculture ont fait leur apparition: elles sont en mesure de renforcer la productivité et la résilience, tout en permettant de remédier aux problèmes de durabilité environnementale que la mécanisation a posés par le passé.

La Situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture 2022 traite des facteurs qui sous-tendent l'automatisation de l'agriculture, notamment les technologies numériques plus récentes. En se fondant sur 27 études de cas, les auteurs du rapport étudient l'intérêt économique que présente l'adoption de technologies d'automatisation numérique dans différents systèmes de production agricole du monde. Ils mettent en évidence plusieurs obstacles empêchant une adoption inclusive de ces technologies, en particulier par les petits producteurs. Outre les contraintes financières, les principaux obstacles sont les faibles compétences numériques et le manque d'infrastructures, notamment en ce qui concerne la connectivité et l'accès à l'électricité. Sur la base de leur analyse, les auteurs suggèrent des politiques visant à faire en sorte que les groupes défavorisés des régions en développement puissent tirer parti de l'automatisation de l'agriculture et que cette automatisation contribue à des systèmes agroalimentaires durables et résilients.



ISBN 978-92-5-137017-9 ISSN 0251-1460



9 789251 370179
CB9479FR/1/12.22