



LES CAHIERS DU CLUB D'INGÉNIERIE PROSPECTIVE ENERGIE ET ENVIRONNEMENT

CLIP
NUMÉRO 19 ■ SEPTEMBRE 2009

Eau et biocarburants

IMPACTS SUR L'EAU DU DÉVELOPPEMENT DES
BIOCARBURANTS EN FRANCE À L'HORIZON 2030

Le Club d'Ingénierie Prospective Energie et Environnement

Liste des membres :

ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
 BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières
 CIRAD : Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
 CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique
 CSTB : Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
 CITEPA : Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique
 CEA : Commissariat à l'Energie Atomique
 EDF : Electricité de France
 GDF : Gaz de France
 GIE R.E. PSA RENAULT
 IFP : Institut Français du Pétrole
 INERIS : Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques
 INRA : Institut National de la Recherche Agronomique
 INRETS : Institut National de la Recherche sur les Transports et leur Sécurité
 ONF : Office National des Forêts
 SNCF : Société Nationale des Chemins de Fer Français
 SNET : Société Nationale d'Electricité et de Thermique
 Des responsables des ministères chargés de l'Environnement, de l'Industrie, de la Recherche, du Plan et du Logement font partie du Comité de Coordination et d'Orientation Scientifique

L'iddri assure l'animation du CLIP et l'édition des Cahiers du CLIP



N° 19 - Septembre 2009

Eau et biocarburants

IMPACTS SUR L'EAU DU DÉVELOPPEMENT DES BIOCARBURANTS EN FRANCE À L'HORIZON 2030

Auteurs :

Jean-François Bonnet (Laboratoire Trefle)
 Daphné Lorne (IFP)

Editorial	3
Synthèse	6
Introduction	8
Présentation des filières biocarburants	12
Filières de première génération	12
Filières de deuxième génération	14
Niveaux de production	14
Cultures et rendements de l'étude	15
Hypothèses et méthodologie pour la construction des scénarios	18
Echelles Nord / Sud et Bassins hydrographiques	19
Cultures dédiées aux biocarburants en 2030	21
Assolements 2006 et 2030	22
Quatre scénarios à l'horizon 2030	25
Scénario 1A	25
Scénario 1B	27
Scénario 2	30
Scénario 3	33
Impacts des scénarios sur les filières agricoles	36
Synthèse des caractéristiques des scénarios	38
Pression quantitative sur les ressources en eau	39
Cultures et ressource en eau	39
Méthode d'évaluation des bilans hydriques et critères de pression	40
Comparaison des scénarios	48
Besoins en eau des unités de production de biocarburants	51
Conclusions	52
Impact sur la qualité des ressources en eau : la pression azote	54
Cycle de l'azote	54
Méthode d'évaluation du bilan azote	59
Comparaison des scénarios	60
Conclusions	62
Impact sur la qualité des ressources en eau : la pression « phytosanitaire »	63
Eau et produits phytosanitaires	63
Méthode et choix des indicateurs phytosanitaires	64
Comparaison des scénarios	68
Conclusions	74
Conclusion générale	76
Glossaire	82
Annexes	85
Références bibliographiques	94
Notes	97
Numéros précédents des Cahiers du CLIP	98

Directeur de publication : Michel COLOMBIER

Rédaction : Marisa SIMONE

Maquette : Ivan PHARABOD - phiLabs

Contact : Marisa Simone - marisa.simone@iddri.org - T/+33 (0)1 45 49 76 66

Cette étude a été réalisée par Daphné Lorne (IFP) et Jean-François Bonnet (Laboratoire Trefle).

Elle a bénéficié du soutien financier de :

Agence de l'eau Adour-Garonne (contact : Martine Gaëckler)

Agence de l'eau Seine-Normandie (contact : Sonia Decker)

Total (contact : Véronique Hervouet)

Veolia Environnement (contact : Jacques Hayward)

Un comité de pilotage en a assuré l'encadrement :

Eva Bourdat (Ministère de l'Agriculture – SG - MAPS)

Michel Colombier (Iddri, directeur du CLIP)

Sonia Decker (Agence de l'eau Seine-Normandie)

Martine Gaëckler (Agence de l'eau Adour-Garonne)

Jacques Hayward (VEOLIA Environnement)

Véronique Hervouet (Total)

Hubert Kieken (Iddri)

Arnaud Mokrani (Agence de l'eau Seine-Normandie),

Jean-Luc Peyron (ECOFOR)

Anne Prieur-Vernat (IFP)

Alain Pindard (Ministère de l'Agriculture - DGPEI)

Cécile Querleu (VEOLIA Environnement)

Arthur Riedacker (INRA Ivry)

Andrea Seiler (Ministère de l'Agriculture)

Daphné Lorne et Jean-François Bonnet remercient vivement pour leur collaboration scientifique :

Essam Almansour (Trefle)

Stéphane Cadoux (INRA Mons)

Jean-Michel Carnus (INRA Pierrotin)

Philippe Debaeke (INRA Toulouse)

Bernard Seguin (INRA Avignon)

Pascal Denoroy (INRA Bordeaux)

Jean-Yves Fraysse (AFOCEL)

Eric Justes (INRA Toulouse)

Gilles Lemaire (INRA Lusignan)

Denis Loustau (INRA Bordeaux)

Julien Navaro (Trefle)

Editorial

Curieusement, le « monde de l'eau » demeure peu présent dans les débats parfois virulents qui accompagnent le développement des biocarburants en Europe, et en France notamment. Pourtant l'objectif communautaire de substituer une part croissante de nos importations pétrolières par des biocarburants, intervenant dans une période de remise à plat des politiques agricoles structurelles, est certainement de nature à bouleverser profondément les opportunités de débouchés pour le monde agricole et, partant, les grands équilibres de production et leur inscription territoriale. Alors que, parallèlement, se développent des politiques de protection des milieux visant à préserver la qualité et la durabilité des ressources en eau, de tels bouleversements doivent à l'évidence être mieux anticipés par les acteurs en charge de ces milieux, publics ou privés. Mais les outils sont rares qui leur permettent, au delà de l'échelle de la parcelle, de comprendre les impacts systémiques de ce développement attendu.

Ce premier exercice s'est donc donné pour double objectif de poser les jalons d'une méthode et de défricher un certain nombre de questions essentielles. La prospective proposée est construite au niveau du bassin hydrographique, qui s'est imposé comme échelle pertinente d'une analyse devant intégrer ressources aquatiques, systèmes cultureaux et conditions pédoclimatiques. Le travail présenté ici n'a pas vocation à couvrir le territoire national ; il se limite à deux bassins, représentant néanmoins plus de la moitié du potentiel de mise en culture, et illustrant deux contextes très différents. Dans ce cadre, les deux objectifs définis au départ par le CLIP ont été largement atteints.

L'exercice a ainsi permis de qualifier sur le fond les questions mises sur la table. L'idée n'était pas tant de mesurer précisément les impacts d'un scénario que de s'interroger sur la possibilité de définir des scénarios de développement des biocarburants significativement différenciés dans leurs conséquences sur les milieux. En d'autres termes, les critères relatifs à l'eau (quantité et qualité) font-ils émerger des typologies ou des hiérarchies de choix originales ? Les acteurs de l'eau doivent-ils alors prendre la parole dès la définition des politiques de développement, avec une lecture originale des opportunités et des risques, et partant des préférences dans les scénarios possibles ? La réponse suggérée par ce travail est certainement positive. Certes, les scénarios étudiés révèlent ici encore une dichotomie évidente entre première et seconde génération. Ils confirment sur ce point des messages en phase avec les évaluations énergétiques, et donc connus déjà : le développement trop rapide et trop ambitieux des biocarburants de première génération est, considérant le critère des impacts sur le milieu aquatique, une stratégie risquée qui amplifie les problèmes aujourd'hui rencontrés dans les deux bassins. Seule une utilisation accrue des sous-produits disponibles (scénario biogaz) aurait été en mesure d'atténuer cet impact, à production constante.

Du point de vue énergétique, il est reconnu que la rupture se fait entre première et seconde génération. Du point de vue de l'eau, l'étude révèle que la seconde génération est un atout potentiel, mais que la rupture véritable intervient au sein des options rendues possibles par ces nouvelles technologies, et dépend des priorités qui seront affichées et des choix qui en découleront. On constate en effet qu'un développement « tendanciel » de cultures (scénario 2) afin d'alimenter un appareil industriel de seconde génération permet déjà, selon les situations, de diminuer la pression qualitative sur la ressource, les impacts en termes quantitatifs étant plus équivoques. Dit autrement, consacrer un quart de la surface agricole aux biocarburants dans ce contexte n'est pas réellement alarmant, mais peut localement accroître les tensions existantes. L'important n'est pourtant pas là, et c'est le scénario 3 qui pose les vraies questions. Il montre comment, en acceptant certes une sensible diminution de la production totale, on peut faire le choix de développer des systèmes de culture limitant drastiquement les impacts sur le milieu aquatique puisqu'on respecte à l'échelle des bassins des critères correspondant aux objectifs aujourd'hui poursuivis sur les périmètres de protection des points de captage. Si ces tendances peuvent être confirmées par des études plus localisées, cela signifie que l'on disposerait de stratégies de redéploiement agricole et de protection des milieux offrant des débouchés économiques massifs. Nous ne proposons pas dans le cadre de cette étude d'évaluation économique comparée des deux scénarios, mais les éléments pour le faire sont rassemblés : certes le scénario 2 est plus productif, mais le scénario 3 est aussi beaucoup moins intensif en intrants. Toujours est-il que l'écart entre les deux serait à rapprocher de la valeur accordée à la protection des milieux, et aux coûts associés (traitement, santé, etc.).

En étant caricatural, le scénario 2 met en scène un développement des biocarburants qui limite les dégâts : peut-on encore s'en contenter ? Dans le scénario 3, le déploiement se fait sous condition d'amélioration des milieux aquatiques : c'est certainement une exigence réaliste pour envisager un avenir aux biocarburants.

Michel Colombier, Directeur du CLIP

Synthèse

La production française de biocarburants en 2006 occupe près de 800 000 ha, soit environ 2,8 % de la surface agricole et fournit 1,8 % de l'approvisionnement en carburants. Pour 2020, l'objectif de développement des filières carburants renouvelables, pour chacun des États membres de l'Union européenne, est fixé à un minimum de 10 % de la consommation nationale. L'ambition est notamment de contribuer à la réduction des émissions de gaz à effet de serre dans le secteur des transports, tout en préservant les ressources naturelles. Dans ce contexte, des enjeux environnementaux de nature diverse sont à prendre en compte pour anticiper et accompagner le développement de ces filières. La protection des ressources en eau compte parmi les principales préoccupations françaises, notamment lorsqu'il s'agit d'orienter l'activité agricole d'un territoire.

La présente étude a ainsi pour objectif de proposer une évaluation prospective des impacts potentiels sur l'eau de différents scénarios de production de biocarburants en France à l'horizon 2030. Quatre scénarios sont élaborés :

- S1A : 5 Mtep (millions de tonnes équivalent pétrole) de biocarburants liquides de première génération ;
 - S1B : 5 Mtep de biocarburants liquides et gazeux de première génération ;
 - S2 : 20 Mtep de biocarburants de deuxième génération ;
 - S3 : 14 Mtep de biocarburants de deuxième génération avec protection des ressources en eau.
- Chaque scénario se décline en termes de besoins en cultures et surfaces agricoles dédiées pour atteindre les niveaux de production de biocarburants requis. Le changement d'usage des sols est

défini nationalement, puis sur deux grands bassins hydrographiques : Adour-Garonne et Seine-Normandie. Une méthodologie d'évaluation à l'échelle des grands bassins est développée ici. Les évaluations des pressions sur l'eau comparent les effets induits par les conversions de sols en 2030 à la situation de 2006. Elles concernent les enjeux de la mobilisation des ressources en eau en termes quantitatifs (prélèvements, impacts sur le bilan hydrique des bassins) et qualitatifs (pollution par les nitrates et les pesticides).

Élaboration des scénarios

Les scénarios traduisent des choix de production agricole à l'horizon 2030 à partir d'hypothèses et de contraintes liées au déploiement des différentes filières de biocarburants.

Chaque scénario se base sur une production de biocarburants issue de cultures, ou de sous-produits de cultures, produites sur la surface agricole utile (SAU) actuelle. Les scénarios diffèrent par leur niveau de production, par les filières technologiques impliquées, et par le niveau de protection des ressources en eau. Pour construire les scénarios, la démarche identifie dans un premier temps des scénarios existants dans différentes études prospectives, dont des scénarios de réduction par quatre des émissions de gaz à effet de serre. Les besoins en cultures et surfaces agricoles sont ensuite définis à l'échelle nationale en distinguant deux grandes zones homogènes, le Nord et le Sud.

Les cultures 2030 sont soit des grandes cultures utilisées pour les filières de première génération (céréales, oléagineux...), soit des cultures énergétiques (lignocellulosiques, plantes entières) destinées à des filières de deuxième génération. Les surfaces agricoles 2006 converties regroupent

différentes terres à vocation non alimentaire pour l'Europe : surfaces en gel dans le cadre de la politique agricole commune (PAC), cultures à usage énergétique, surfaces agricoles non cultivées, cultures d'exportation hors Union européenne, une fraction des prairies permanentes et peupleraies, principalement. Des matrices de conversion des surfaces agricoles 2006-2030 sujettes aux évaluations sont alors établies pour les deux bassins hydrographiques d'étude, en cohérence avec les conversions sur les zones Nord et Sud.

À l'échelle du bassin Seine-Normandie, la surface agricole dédiée aux biocarburants passe de 343 000 ha en 2006 à respectivement 848 000, 624 000, 1 487 000 et 1 463 000 ha dans les quatre scénarios 2030. Ceux-ci mobilisent ainsi de 10 à 25 % de la SAU du bassin. En Adour-Garonne, la surface dédiée passe de 63 000 ha en 2006 à respectivement 442 000, 300 000, 1 163 000 et 1 083 000 ha dans les quatre scénarios 2030. Ces surfaces représentent entre 6 et 25 % de la SAU du bassin.

Évaluation des prélevements sur la ressource en eau et des pollutions par les nitrates et les pesticides

La méthodologie d'évaluation repose sur une approche de changement d'échelle, définissant des cultures-type représentatives des deux grands bassins retenus. Ces cultures-type intègrent à la fois des caractéristiques agronomiques simplifiées et des données de statistique agricole. Les informations sont produites à l'échelle des systèmes-type (la plante, la parcelle) en cohérence avec la grande échelle. Le recours à des modèles simplifiés traduisant les principaux facteurs agronomiques permet de donner une plus grande consistance à l'exploitation de ces données dans l'évaluation. Les effets sur l'eau induits par le réaménagement des surfaces agricoles, définis dans chacun des scénarios, sont mesurés à l'aide d'indicateurs de pression : par méthodes de bilan (en ce qui concerne le déficit hydrique, les prélevements en eau, les nitrates lessivés vers les nappes) ; et par l'adaptation à grande échelle d'indicateurs existants dans le cas des pesticides.

Les résultats obtenus forment quatre axes principaux :

- Les scénarios élaborés constituent à la fois un résultat (une vision du déploiement des biocarburants sur les surfaces agricoles à l'horizon 2030) et un moyen pour alimenter les évaluations.

Ces scénarios font l'objet d'une transcription, à l'échelle nationale et à l'échelle des bassins, en termes de sols agricoles initiaux (2006) et finaux (2030).

- Les pressions en quantité sont évaluées à partir des bilans hydriques de cultures obtenus par la construction des cultures-type et d'un modèle simple de bilan en eau. Pour chaque scénario, les différents termes du bilan (évapotranspiration, prélevements, déficit hydrique, drainage, etc.) déterminent des indicateurs de pression, évalués à l'échelle des bassins à l'aide des bilans de conversion des sols entre 2006 et 2030.
- L'évaluation des pressions en qualité « nitrates » repose sur l'évaluation des fuites d'azote et des concentrations de nitrates dans le drainage sous-racinaire. La méthode simple retenue, parmi celles qui ont été testées, exploite les bilans hydriques élaborés par la présente étude.
- L'évaluation des pressions en qualité « phytosanitaires » repose sur l'étude et l'adaptation d'indicateurs existants : intensité de traitement (IFT), potentiel de contamination des eaux de surface et souterraines (classement SIRIS-Pesticides).

Tendances à l'accroissement des pressions dans les scénarios 1A et 1B pour les principaux indicateurs (prélevements, nitrates, pesticides)

Les scénarios 1A et 1B reposent sur une agriculture alimentaire conventionnelle, approvisionnant des filières de première génération. Le choix des surfaces agricoles sur lesquelles se déploie cette agriculture évite la concurrence directe avec la production alimentaire vivrière. Le déploiement des scénarios 1A et 1B conduit à intensifier les pressions, selon des tendances nettes et relativement cohérentes. Le scénario 1A, en particulier, conduit pour tous les indicateurs à une intensification significative des pressions par rapport à 2006 : intensification des prélevements pour l'irrigation, accroissement des fuites d'azote, non-amélioration des pressions phytosanitaires. Le scénario 1B, qui conserve le même panorama agricole dominant que le scénario 1A, allège les pressions grâce à la moindre consommation de surfaces que permet la production de biogaz. Cette dernière provient de résidus de récolte, sur les deux bassins, et de cultures dédiées pérennes, en Seine-Normandie. Cela modère l'accroissement des pressions du scénario 1A, sans toutefois améliorer la situation 2006 : il

s'agit d'une amélioration relative. L'influence de la filière biogaz tempère l'accroissement des impacts liés à la mise en culture de sols initialement en jachères ou en prairies.

Un bilan contrasté pour les scénarios reposant sur des filières de seconde génération

Le scénario 2, décrivant un fort développement des cultures énergétiques, en conduite intensive, pour les technologies de seconde génération, intensifie certaines pressions (en quantité, avec un très net accroissement des prélèvements) et en allège d'autres (pression azote), tandis que la pression phytosanitaire évolue différemment d'un bassin à l'autre. On observe une intensification des pratiques et du risque d'exposition en Adour-Garonne, et une diminution de l'intensité des pratiques sans évolution du risque en Seine-Normandie. Ce sont les caractéristiques des cultures mises en œuvre et des substances impliquées qui expliquent ces différences entre les deux bassins.

Le scénario 3, dont l'objectif est d'améliorer la situation des ressources en eau sur le même volant de surfaces que le scénario 2, joue effectivement un rôle de protection efficace. L'amélioration du bilan hydrique est nette. L'amélioration de la pression nitrates existe mais est moins spectaculaire compte tenu des cultures principalement pérennes mises en jeu, généralement favorables sur ce point. Les pratiques phytosanitaires, par définition moins intensives (choix d'itinéraires techniques adaptés), induisent une nette diminution du risque d'exposition par rapport à 2006 et par rapport au scénario 2. On obtient de ce fait des résultats globalement concordants pour les différents critères de quantité, qualité nitrates et qualité pesticides, pour le scénario 3 tant en Adour-Garonne qu'en Seine-Normandie. Les tendances sont ainsi inverses du scénario 1A. Ainsi, le scénario 3 se distingue des autres en proposant une option politique en tant que telle : sur une surface dédiée significative mais réaliste, combiner l'objectif environnemental « énergie » avec celui de préservation des ressources en eau, en tirant pleinement parti des opportunités environnementales des cultures énergétiques. Ce rôle de protection des ressources en eau apparaît particulièrement intéressant pour les zones dans lesquelles on recherche des solutions d'amélioration des pressions agricoles.

Quelques enseignements de nature méthodologique

Cette étude sur l'évaluation d'impacts potentiels sur les ressources en eau apporte différents enseignements de nature méthodologique. En premier lieu, l'évaluation par système-type à l'échelle des bassins apparaît satisfaisante. L'approche met en œuvre une expertise et une validation des systèmes-type par les spécialistes. Le choix des deux bassins Adour-Garonne et Seine-Normandie est représentatif et diversifié : les deux bassins regroupent la moitié de la production nationale des grandes cultures, et leurs caractéristiques climatiques générales sont différentes et représentatives du Nord et du Sud de la France. L'adaptation d'outils existants (tels que SIRIS-Pesticides) s'est montrée opérationnelle à fins d'évaluation des scénarios. En second lieu, les améliorations et autres applications possibles apparaissent intéressantes : les essais d'évaluation sur sous-bassin, par la même approche moyenne, ont montré des résultats encourageants, quoique débordant du cadrage de l'étude. L'utilisation des méthodes proposées pour d'autres applications (pour des études de territoire notamment), semble pertinente à de grandes échelles de temps et d'espace : étude de grandes orientations d'aménagement, soutien au développement de filières... L'étude ouvre par ailleurs des questions plus larges et des perspectives d'amélioration dans l'esprit d'une réflexion prospective intégrant de nouveaux critères, des méthodes affinées, etc. Elle constitue un premier travail d'évaluation à grande échelle, mettant en évidence des impacts potentiels très divers et des marges de manœuvre dans les options de long terme. Elle permet en outre de préfigurer des préconisations pour les décideurs, compte tenu des tendances qui émergent de l'évaluation des scénarios. L'influence du développement des bioénergies sur la dégradation ou au contraire sur l'amélioration de l'état des ressources en eau semble pouvoir – et devoir – être réellement anticipée à l'échelle des grands bassins.

Introduction

Contexte

La présente étude propose une évaluation des implications sur les ressources en eau du déploiement de cultures destinées à la production de biocarburants en France à l'horizon 2030. Ce développement est décrit par des scénarios contrastés de production agricole dédiée, sur des surfaces identifiées comme convertibles aux productions de biomasse à des fins énergétiques.

Le contexte général de l'étude est marqué par deux décisions de la Commission européenne (CE) : d'une part, la décision d'incorporer une fraction significative de biocarburants dans l'approvisionnement énergétique des transports en 2020 et, d'autre part, la directive cadre sur l'eau (DCE), instaurant des objectifs de bon état écologique des eaux à échéances fixées.

Le cadre communautaire de promotion de l'usage des biocarburants, mis en place par l'Union européenne (UE), vise à réduire les émissions de gaz à effet de serre et à accroître la sécurité de l'approvisionnement en ressources pour la production d'énergie. La directive 2003/30/CE du 8 mai 2003 établit les bases de la promotion des carburants de substitution au sein de l'UE. Elle précise en particulier que « les États membres devraient veiller à ce qu'un pourcentage minimal de biocarburants et autres carburants renouvelables soit mis en vente sur leur marché, et fixer, à cet effet, des objectifs nationaux ». À l'échelle européenne, le taux d'incorporation est établi à 5,75 % PCI¹ (c'est-à-dire en énergie) en 2010, et à 10 % PCI en 2020. En France, le gouvernement a défini un horizon plus rapproché pour le taux national : 5,75 % de biocarburants dans les carburants routiers à l'horizon 2008 et 7 % en 2010. Le 7 juillet 2008, le comité ENVI² du Parlement européen a voté plusieurs amendements précisant les objectifs et les modes d'utilisation des biocarburants. Le Parlement propose notamment de fixer le taux d'incorporation de 8 à 10 % en 2020, dont 40 à 50 % devront provenir d'électricité ou d'hydrogène d'origine renouvelable, de biogaz, ou de carburants issus de la biomasse lignocellulosique et algale. Cet objectif devra être révisé en 2015 en fonction du bilan d'expérience de la politique des énergies renouvelables à cet horizon. D'autres amendements préconisent par ailleurs de prendre en compte un certain nombre de critères de durabilité — respect de la biodiversité, consommation des ressources naturelles (eau, sols), émissions de gaz à effet de serre, autres critères socio-économiques... — pour conditionner l'éligibilité des différentes filières biocarburants. Ces critères, actuellement en cours de définition, présentent encore des difficultés d'évaluation importantes et nécessitent des approches spécifiques. Au premier plan des impacts environnementaux insuffisamment connus figurent les impacts à caractère local et territorial. Les ressources en eau constituent les milieux naturels sans doute les plus directement concernés au titre des impacts locaux.

Le contexte réglementaire de l'eau est marqué, en France, par différents traits caractéristiques. L'organisation de la gestion de l'eau, depuis la loi sur l'eau de 1964, repose sur la gestion par grand bassin hydrographique, dans le cadre fixé par le législateur. Au nombre de six, ces grands bassins sont chacun dotés d'une institution politique, le Comité de bassin, statuant sur les orientations en matière de gestion de la ressource, et d'un organisme opérationnel, l'Agence de l'eau, en charge de l'application de la

politique. Cet organisme est le moteur d'un système de redistribution de redevances liées aux usages de l'eau pour des actions de bonne gestion et de dépollution des ressources. Plusieurs principes des lois françaises sur l'eau de 1964 et 1992 ont été repris par la DCE, datant de 2000, dont la gestion de l'eau par bassin (districts hydrographiques). La directive apporte un élément nouveau : l'objectif de résultat en matière de préservation de la ressource. La notion de masse d'eau, échelle unitaire d'appréciation de l'état des ressources en eau, est introduite par la directive, qui fixe un objectif de retour au « bon état écologique de l'eau » à échéance fixée. Compte tenu de la progression nécessaire dans la mise en place des améliorations, des échéances régulières ont été définies : 2015, 2021, 2027, etc. Dans le cadre de la transcription par les États membres des directives européennes, la loi sur l'eau et les milieux aquatiques (LEMA), votée en 2006, renforce le dispositif existant pour la protection de la ressource et instaure les objectifs de retour au bon état. Préalablement à la DCE, la directive européenne « nitrates » de 1991 avait fixé le cadre de maîtrise des pollutions azotées. La France a été à plusieurs reprises menacée d'amendes par les institutions européennes pour les retards pris dans la mise en œuvre de cet objectif, un nombre assez important de points de prélèvement pour l'eau potable (en Bretagne, notamment) captant une eau dépassant le seuil de concentration en nitrates dans l'eau potable (50 mg/l). La mise en œuvre de la directive « nitrates » a conduit à définir en France les « zones vulnérables », fortement impactées par la pollution azotée.

Dans ce cadre réglementaire et le contexte de remise en cause de la durabilité des filières biocarburants (bilans énergétiques, compétition avec l'alimentaire, impacts environnementaux), les besoins de connaissance pour éclairer la décision publique sont encore très grands. La présente étude constitue une contribution à la connaissance générale des impacts sur l'eau, et aux approches méthodologiques qu'il est nécessaire de mettre en œuvre pour appréhender les relations avec les ressources en eau du territoire.

Objectifs de l'étude

En admettant que la production de biocarburants est fixée à un certain niveau de production, quel pourra être l'impact sur les ressources en eau selon différents choix de développement (production agricole, technologie disponible pour la production des biocarburants) ? L'étude propose une évaluation principalement quantitative de scénarios prospectifs de développement des biocarburants. Elle repose sur des développements méthodologiques spécifiques d'évaluation environnementale des bioénergies, sous l'angle des pressions sur les ressources en eau en termes de quantité et de qualité. Elle traite la situation de deux grands bassins : Adour-Garonne et Seine-Normandie. Représentant à eux deux près de la moitié de la production agricole nationale, ils présentent en outre l'intérêt de montrer des situations climatiques assez diverses, caractéristiques du « Nord » et du « Sud » du pays. Les autres aspects environnementaux ne relèvent pas de la présente étude. Cela ne signifie pas que les critères « eau » doivent occulter les autres critères, mais qu'ils semblent devoir mériter un traitement à part entière. Les autres critères environnementaux (bilan énergie, bilan gaz à effet de serre) ne sont pas repris dans l'étude, qui vise essentiellement à comprendre le lien eau-biocarburants, et non à proposer un outil global d'évaluation. Ils sont néanmoins aisément accessibles à partir des bilans proposés.

Enfin, il est important de préciser que l'étude ne se situe pas dans un argumentaire spécifiquement « pour » ou « contre » la production de biocarburants : elle vise à produire une évaluation quantitative des enjeux et impacts sur l'eau associés à différents futurs possibles du déploiement de la production de biocarburants en France.

Démarche générale

La démarche adoptée repose dans un premier temps sur l'élaboration de scénarios contrastés de production agricole, figurant différentes voies de développement des filières technologiques. Puis, les approches d'évaluation des impacts potentiels sur l'eau sont définies et mises en œuvre pour les principaux critères retenus : quantité d'eau, qualité de l'eau du point de vue des nitrates, qualité de l'eau du point de vue des substances phytosanitaires. Ces approches font appel à un changement d'échelle simplifié entre l'échelle des grands bassins et celle des systèmes-type définis pour l'évalua-

tion. Il s'agit en pratique de définir des cultures-type dans un environnement agroclimatique donné, afin qu'elles soient représentatives de l'échelle des deux grands bassins. Ces cultures-type sont définies par une plante, un climat, un type de sol et une pratique culturelle. Elles sont présentes tout au long des évaluations. En interaction entre l'agronomie et « l'énergétique générale » appliquée aux objets de l'agronomie, cette approche a nécessité des croisements, validations et contacts interdisciplinaires.

Les scénarios prospectifs définissent des niveaux de production de biocarburants, pour lesquels les impacts sur l'eau seront ensuite évalués, sans avoir vocation à prédire l'organisation du paysage agricole d'un bassin, ni même l'organisation complète des filières biocarburants à l'horizon 2030. En effet, la prospective n'est pas la prévision mais la construction d'avenirs envisageables dans le but de mettre en lumière des tendances à long terme d'un secteur, et d'identifier des opportunités et défis émergents. Aucune rupture n'est ici envisagée concernant la demande globale en carburants et la surface agricole utile du pays. En effet, peu de scénarios prospectifs de référence incorporent de telles ruptures à l'horizon 2030. Par ailleurs, la consommation totale nationale de carburants routiers en 2030 est considérée comme identique à la consommation actuelle (soit 42 Mtep tous carburants confondus).

Les scénarios de production agricole décrits ici sont découplés de l'élaboration de scénarios de demande, et pourraient même concerner d'autres usages énergétiques de la biomasse. Ils ne présagent pas des éventuels échanges de biocarburants sur les marchés internationaux (éthanol brésilien par exemple) et d'exportation (contribution de la France et d'autres pays à une demande européenne). Définir des scénarios de production traduit cette réalité et permet de s'affranchir du choix d'hypothèses concernant le niveau et les modalités de l'approvisionnement national.

L'horizon 2030 a été retenu comme horizon prospectif de manière à écarter les phases de transitions et les ajustements correspondants envisageables à plus court terme. Les différentes technologies employées dans les scénarios peuvent raisonnablement être considérées comme matures à cet horizon.

L'évaluation de l'impact de la production de biocarburants 2030 est réalisée en comparaison avec un contexte agricole et énergétique correspondant à l'année 2006, afin que la situation de référence soit relativement proche et connue de tous. Chacun des scénarios est évalué à l'échelle de deux bassins hydrographiques français, aux contextes contrastés en terme de disponibilités en ressources naturelles (eau, sols, climat notamment) : le bassin Seine-Normandie et le bassin Adour-Garonne. L'étude ne prend pour l'instant pas en considération d'éventuelles modifications climatiques à l'horizon 2030. À partir de la méthode proposée, il est cependant aisément de reproduire l'exercice en utilisant de nouveaux jeux de données climatiques.

Le premier chapitre de ce cahier fournit quelques éléments de contexte sur les filières biocarburants en France, puis détaille les cultures et les rendements considérés dans l'étude. Le deuxième chapitre décrit la démarche de construction des scénarios, ainsi que leur déclinaison aux différents territoires d'étude (France, Nord/Sud, grands bassins), puis les quatre scénarios sont présentés dans le troisième chapitre. Le quatrième chapitre traite des impacts potentiels, en termes de quantité, sur les ressources en eau. Il décrit sommairement la méthode développée et présente une synthèse comparative des résultats par bassin (bilans hydriques et prélèvements en eau des nouvelles cultures). Le cinquième chapitre, construit de façon similaire au précédent, concerne l'évaluation des pollutions potentielles par les nitrates. Le sixième chapitre est consacré à l'étude des impacts potentiels liés à l'emploi des produits phytosanitaires ; il décrit les deux méthodes adaptées et compare également les résultats par scénario. En conclusion, les principaux résultats sont confrontés et accompagnés d'une série d'enseignements généraux et de perspectives ouvertes par l'étude.

Remarques préliminaires

Pour désigner les carburants issus de productions agricoles, les termes de biocarburants et d'agrocarburants sont tous deux usités. Selon les contextes, le premier présente l'inconvénient d'une possible confusion avec l'agriculture biologique (cet inconvénient n'existe pas en anglais, où le terme *biofuels* est le seul usité et où l'agriculture sans intrants de synthèse est nommée *organic*). Le second, quant à lui, est moins général et ne convient pas pour désigner les carburants issus de productions forestières ou de cultures aquatiques. Il a été retenu ici le terme de biocarburant, au sens le plus neutre, car c'est

celui qui est employé dans les documents officiels et les textes réglementaires. Dans le cadre de la présente étude, les deux termes pourraient être employés indifféremment.

En complément à ce cahier du CLIP, un rapport technique à destination des lecteurs souhaitant approfondir certains points de méthode ou avoir accès à des présentations plus détaillées des résultats par scénario et par bassin hydrographique, est également disponible. Les éléments détaillés ne figurant pas dans ce cahier font l'objet d'un renvoi vers le rapport technique signalé par l'annotation [RT].

Certaines cultures incluses dans les scénarios n'étant pas encore documentées, en particulier nombre de cultures énergétiques, il a été dans certains cas nécessaire d'avoir recours à des estimations pour déterminer les caractéristiques des cultures nécessaires aux évaluations. L'étude ne vise donc pas à se substituer aux études d'impact qui pourront se faire *a posteriori* une fois les cultures maîtrisées. La finalité de l'étude n'est pas de produire des évaluations agronomiques et environnementales détaillées des différentes cultures impliquées dans les scénarios. En ce sens, le travail recherche une certaine forme d'homogénéité dans le traitement des cultures concernées. Il ne requiert pas nécessairement les ensembles de données détaillées sur les différentes cultures, du type de celles qui sont actuellement en cours de production dans le cadre de grands programmes nationaux de recherche.

Il s'agit de développer une méthodologie d'évaluation à grande échelle dans un cadre prospectif, d'en situer les atouts et les limites, et de la mettre en œuvre dans son domaine de validité. La méthodologie générale peut s'appliquer à un domaine plus large que le seul champ de l'agronomie (en aval de la filière par exemple). Les modèles et outils utilisés sont par nature simplificateurs puisqu'ils reposent sur des valeurs moyennes des variables d'entrée. Lorsque les évaluations reposent sur des bilans quantitatifs, calculés à partir d'évaluations de flux relativement robustes, elles fournissent des résultats satisfaisants, tant que l'expression de l'hétérogénéité et des variabilités n'est pas recherchée. Les contrôles de cohérence des résultats, en particulier sur les rendements agricoles moyens obtenus pour les cultures alimentaires, montrent que cette approche fournit des résultats représentatifs de la situation à grande échelle.

Dans tout le document, il est fait référence à l'année 2030 comme le terme de l'évolution des scénarios. Il faut comprendre que, pour les scénarios 1A et 1B en particulier, cet horizon du scénario pourrait de façon équivalente être pris à 2015 ou 2020. En revanche, les scénarios 2 et 3, qui reposent sur le développement de technologies actuellement non commercialement accessibles, sont à envisager à l'horizon 2030.

Présentation des filières biocarburants

Ce chapitre fournit quelques éléments de contexte sur les filières biocarburants en France, ainsi que des détails sur les cultures considérées dans l'étude et la détermination de leurs rendements. Dans le langage courant, on appelle biocarburants des combustibles liquides ou gazeux utilisés pour alimenter des moteurs de véhicules et produits à partir de matières végétales ou animales, aussi appelées biomasse. Ils peuvent provenir de l'agriculture, de la sylviculture, de la transformation de produits animaux ou de la fraction biodégradable des déchets. On distingue les filières biocarburants issues de produits de récoltes agricoles (grains de blé, maïs, colza, etc.), dites de *première génération* (G1), des filières issues des composés lignocellulosiques, dites de *deuxième génération* (G2). Ces dernières sont en mesure de convertir en carburant divers types de biomasse non alimentaire tels que les rémanents forestiers, les pailles et autres résidus de récolte, ainsi que des espèces herbacées à ligneuses dédiées, cultivées en plante entière (triticale, miscanthus, switchgrass, taillis, etc.).

Filières de première génération

Il existe aujourd'hui deux grandes filières de biocarburants de première génération : l'éthanol, qui est utilisé dans des moteurs à essence, et les esters méthyliques d'huiles végétales (EMHV), destinés à un usage dans les moteurs diesel. L'éthanol est le biocarburant dont l'usage est le plus répandu dans le monde ; il a été produit à hauteur de 42 Mt en 2007, pour l'essentiel au Brésil et aux États-Unis. La production d'EMHV, réalisée pour l'essentiel en Europe, s'est élevée à environ 8,5 Mt en 2007³.

L'éthanol est produit à partir de deux grands types de cultures : les plantes sucrières (cannes à sucre, betteraves) et des plantes amylacées (blé, maïs). Ces différentes filières passent toutes par une étape de fermentation qui transforme les sucres en éthanol et une étape plus ou moins poussée de distillation qui sépare l'alcool de l'eau.

L'éthanol peut être utilisé pur, en mélange ou bien encore sous sa forme d'éther (ETBE), produit par réaction avec de l'isobutène issu des raffineries. L'usage de l'éthanol pur ou à très forte concentration (par exemple 85 % ou E85) nécessite une adaptation spécifique du véhicule. C'est sous forme de mélange à des teneurs relativement faibles de 5 à 10 %, ou sous forme d'ETBE à des teneurs d'environ 15 %, que l'éthanol est le plus utilisé dans les véhicules essence conventionnels.

Les EMHV sont produits à partir d'huiles végétales issues par exemple de colza, de tournesol, de soja ou même de palme. Dans le cas où l'huile provient du broyage de graines (colza, soja, tournesol), un résidu solide (le tourteau) est produit (1 à 1,5 t. de tourteau/t. d'huile) ; il est généralement réservé à l'alimentation animale. Inadaptées à l'utilisation directe dans les moteurs diesel modernes, les huiles végétales doivent être transformées par une opération de transestérification avec un alcool, aujourd'hui le méthanol, qui donne les esters méthyliques d'huiles végétales et de la glycérine (0,1 t de glycérine/t. d'EMHV). En France l'EMHV est commercialisé sous le nom de Diester.

Le biodiesel présente également des variantes, non considérées dans l'étude, comme l'EMHA, ester méthylique d'huiles animales, ou encore l'EEHV qui utilise pour la synthèse de l'ester

de l'éthanol à la place du méthanol qui est un produit issu de gaz naturel. Le produit final a des propriétés tout à fait équivalentes à celle de l'EMHV. Un diesel de synthèse peut également être produit à partir d'une opération d'hydrogénéation d'huile végétale. Ce procédé produit un gazole de très bonne qualité et permettant une certaine souplesse sur le type d'huile à utiliser. Il requiert cependant d'importantes quantités d'hydrogène.

Le biométhane carburant est issu de la récupération de biogaz de décharge ou de la production de biogaz par méthanisation de la biomasse

(digestion par des microorganismes en absence d'oxygène). Cette dernière, considérée dans l'étude, est également une technologie connue à l'heure actuelle en France. Elle concerne majoritairement le traitement de biomasses issues de déchets urbains, industriels et agricoles, comme les fumiers, lisiers et résidus de récolte, pour la production de chaleur et d'électricité. Certains pays, comme l'Allemagne, ont par ailleurs fait le choix de la culture dédiée à la production de biogaz, avec la culture de maïs notamment. La filière biométhane carburant est en France en cours de développement pour un usage sur flot-

Figure 1 – Filières éthanol de première génération

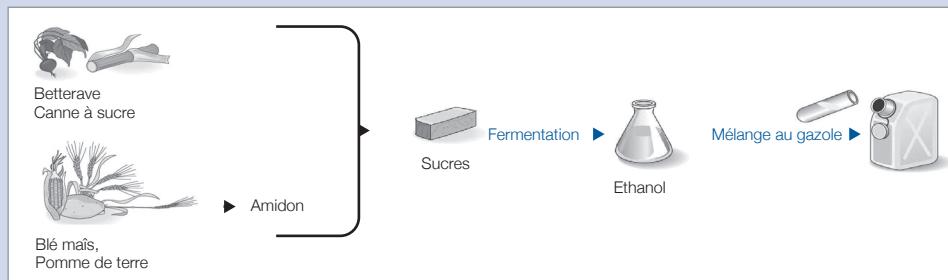
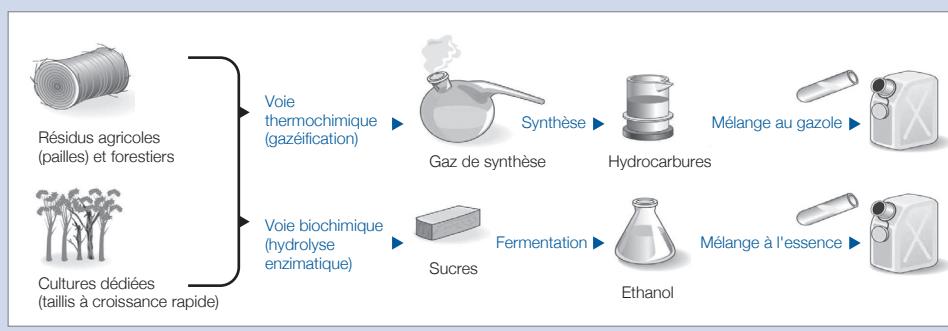


Figure 2 – Filières biodiesel de première génération



Figure 3 – Filières de deuxième génération



tes captives (bus, bennes à ordure, véhicules de sociétés, etc.).

Filières de deuxième génération

Parmi les biocarburants de deuxième génération, on distingue deux principales voies de conversion de la biomasse lignocellulosique en carburant, faisant l'objet d'efforts importants en termes de recherche et développement : une voie biochimique, qui par fermentation des sucres contenus dans la lignocellulose, produit de l'éthanol de même nature que le bioéthanol actuel, et se substituerait à l'essence ; une voie thermochimique, dont la technologie la plus avancée est la gazéification de la biomasse (voie indirecte).

La gazéification consiste en la production d'un gaz de synthèse suite à un prétraitement qui réduit la biomasse en particules sous forme sèche ou liquide (*slurry*). Le gaz peut ensuite être orienté vers la production de différents carburants. Le BtL (Biomass-to-Liquid) est une voie qui fait réagir le gaz de synthèse selon la synthèse Fischer-Tropsch. Elle permet la production de gazole de synthèse (ou Diesel-FT), pour une incorporation directe dans les moteurs diesel. Cette technologie est déjà démontrée à partir de charbon (CtL) ou de gaz naturel (GtL). Dans cette étude, la technologie BtL considérée est la voie autothermique, soit sans

apport exogène d'hydrogène, ni d'électricité. D'autres filières biocarburants à partir de gaz de synthèse sont en mesure de produire des biocarburants gazeux qui sont techniquement moins contraignants à obtenir, mais leur nature gazeuse en conditions atmosphériques implique d'autres contraintes d'utilisation (infrastructures de transport, flotte de véhicules dédiées, etc.). Elles ne sont pas considérées dans l'étude.

Niveaux de production

En France, en 2007, l'éthanol a été incorporé dans les carburants routiers à hauteur de 3,4 % PCI dans l'essence, et le biodiesel à hauteur de 3,65 % PCI, soit un taux d'incorporation global de 3,6 %, ou 1,84 millions de tonnes équivalent pétrole (Mtep). Les volumes de biométhane carburant sont considérés comme négligeables. La production locale de biodiesel et d'éthanol a représenté 78 % des volumes consommés en mobilisant 1,13 Mha de gel industriel et de surfaces bénéficiant de l'aide aux cultures énergétiques (ACE⁴).

Ainsi en France, seuls l'éthanol et le biodiesel de première génération (G1) sont actuellement commercialisés. Les filières comme l'éthanol lignocellulosique et le BtL (G2), considérées dans l'étude, sont au stade de l'implantation d'unités pilotes et pourraient être envisagées à l'échelle commerciale aux alentours de 2020.

Figure 4 –Surfaces de cultures destinées à la production de biocarburants en France en 2007 (hectares). Source : ONIGC

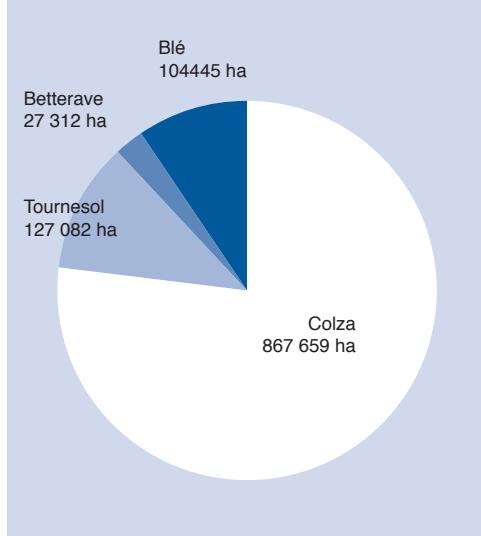
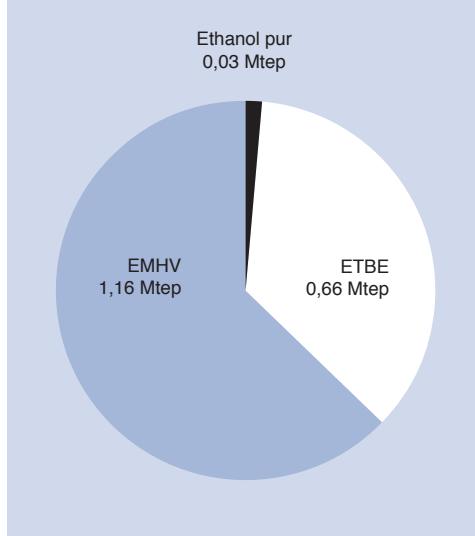


Figure 5 – Quantités de biocarburants mis à la consommation dans les carburants routiers en France en 2007 (millions de tep). Sources : Douanes, MAP



Cultures et rendements de l'étude

Les différents types de culture considérés dans l'étude sont :

- les cultures alimentaires conventionnelles (céréales, oléagineux, betteraves), intervenant en 2006 et en 2030 pour les deux premiers scénarios. Ces cultures annuelles sont semées et récoltées tous les ans, généralement dans le cadre de rotations culturales ;
- les résidus de récolte de ces cultures (pailles, tiges, etc.) constituent une ressource parfois significative (exploitée dans le scénario 1B) ;
- les cultures pérennes conventionnelles (espèces prairiales ou fourragères telles que la luzerne et la fétuque...), dotées d'un système racinaire permanent. Elles sont récoltées plusieurs fois par an ;
- les cultures énergétiques de type pérenne herbacée (miscanthus, switchgrass), domestiquées spécifiquement pour la production énergétique. Elles aussi dotées d'un système racinaire permanent, elles sont récoltées une fois par an et fournissent de fortes productivités de biomasse à l'hectare ;
- les cultures énergétiques de type ligneux (arbres feuillus : saule, peuplier, eucalyptus). Capables d'importants rejets après coupe, ces essences sont récoltées tous les trois (taillis à très courte rotation, TTCR) à sept ans (taillis à courte rotation, TCR) pendant une vingtaine d'années.

La définition des rendements moyens des cultures 2030 a été réalisée à dire d'experts. Les rendements des grandes cultures (blé, colza, maïs, etc.) destinées aux filières G1 ont été définis en fonction du taux d'évolution des rendements à attendre à cet horizon à partir des données de rendements 2006 mises à disposition par le Service de la statistique et de la prospective (SSP)⁵ du ministère de l'Agriculture et de la Pêche.

Les rendements moyens 2030 se présentent comme relativement optimistes en restant cohérents avec :

- la progression tendancielle des rendements observés ;
- les plus hauts rendements moyens départementaux observés ces dernières années sur les grands bassins de production de la culture (les départements de la Marne, de la Seine-Maritime et du Pas-de-Calais ont récemment affiché les meilleurs rendements moyens en blé (proches de 100 q/ha en 2004) ;
- l'absence d'effet du changement climatique sur les rendements en 2030.

Les rendements de conversion de ces cultures en carburant sont des valeurs actuelles moyennes par grandes familles de cultures, et sont considérées comme stables jusqu'à l'horizon d'étude.

Les rendements des cultures énergétiques lignocellulosiques, destinées aux filières G2, ont été définis à partir de fourchettes de rendements fournies par les experts expérimentateurs de l'INRA

Tableau 1 – Évolution des rendements des grandes cultures envisagée dans l'étude à horizon 2030

		Rendements moyens 2005 (tonne de produit récolté/ha)	Rendements moyens 2030 (tonne de produit récolté/ha)
Colza	nord	3,7	4
	sud	3,2	3,5
Tournesol	nord	2,9	-
	sud	2,3	2,8
Blé	nord	7,4	10
	sud	5,3	8
Maïs	nord	8,7	10
	sud	8,2	12
Betterave	nord	77,8	80
Luzerne	nord	10	12

Tableau 2 – Rendements de conversion des différentes filières biocarburants G1 (source : IFP)

	tep de carburant/ tonne de produit agricole
Rdt EMHV/oléagineux	0,37 tep/t
Rdt éthanol/céréales	0,22 tep/t
Rdt éthanol/betterave	0,05 tep/t
Rdt biogaz/luzerne	0,25 tep/t

et de l'Institut Arvalis, couplées à des éléments de contexte d'implantation dans les scénarios de l'étude (par exemple : type de sol, période de récolte, apport d'eau par irrigation etc.). Dans le tableau 3, les commentaires permettent d'argumenter le choix de la valeur de rendement retenue vis-à-vis de la fourchette à dire d'experts.

Le rendement de production de biocarburants de deuxième génération à partir de cultures énergétiques est exprimé en tep de carburant par tonne de biomasse sèche. Ce rendement est du même ordre de grandeur pour les filières éthanol

et BtL considérées dans l'étude. Une valeur de 0,16 tep/ tonne MS est retenue pour l'ensemble de la présente étude (IFP). Ainsi, compte tenu de la diversité des rendements agricoles des différentes cultures impliquées dans les scénarios, la productivité énergétique de carburant à l'hectare peut varier significativement d'une filière à l'autre. On observe cette variabilité en Seine-Normandie (figure 6), et plus encore en Adour-Garonne (figure 7), où les conditions climatiques associées à l'irrigation permettent d'obtenir les plus forts rendements.

Figure 6 - Production d'énergie à l'hectare pour les différentes cultures et filières biocarburants 2030 associées de la zone Nord (tep/ha)

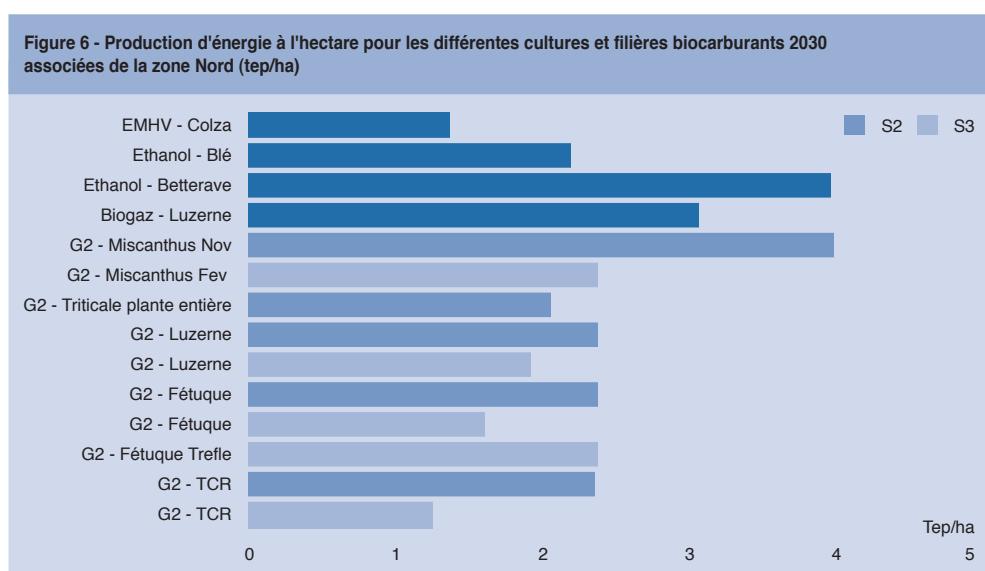


Figure 7 - Production d'énergie à l'hectare pour les différentes cultures et filières biocarburants 2030 associées de la zone Sud (tep/ha)

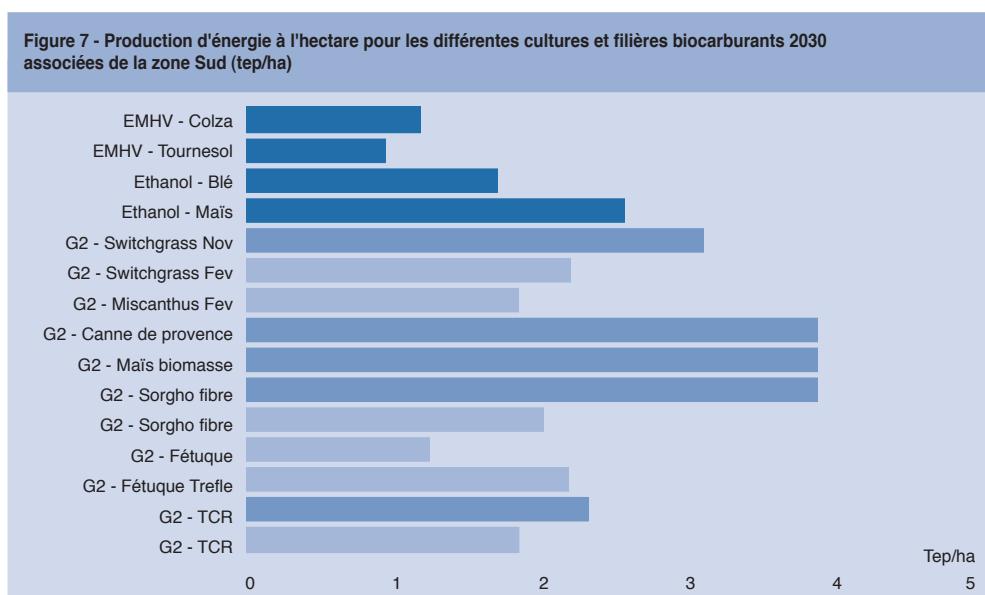


Tableau 3 - Rendements 2030 des cultures énergétiques lignocellulosiques considérées dans l'étude

Nord							Sud		
(t MS/ha)	Valeur retenue récolte	Fourchette experts	Commentaire	Valeur retenue récolte	Fourchette experts	Commentaire			
S2									
Miscanthus Nov	25	18 - 30	Valeur moyenne haute car valeur max. spécifique de conditions optimales rares		18 - 30				
Switchgrass Nov		15 - 25		20	15 - 30	Valeur moyenne basse car implantée sur terres pauvres et valeur max. spécifique de conditions optimales rares			
Canne de provence		10 - 25		25	10 - 20; 25	Meilleurs sols, progrès technologique sur conduite très technique			
Mais biomasse		10 - 25		25	10 - 20; 25	Meilleurs sols, progrès technologique sur conduite très technique			
Sorgho fibre		10 - 25		25	10 - 20; 25	Meilleurs sols, progrès technologique sur conduite très technique			
Triticale plante entière	13	8 - 18	Valeur moyenne car valeur max. spécifique des terres expérimentales de Mons		8 - 16				
Luzerne	15	12 - 15	Valeur max. maîtrisée		7 - 15				
Fétuque	15	10 - 15	Valeur max. maîtrisée		8 - 15				
TCR	15	8 - 15		15	8 - 15				
S3									
Miscanthus Fev	15	10 - 20	Valeur moyenne : sans irrigation avec rattrapage phyto	12	10 - 16	Valeur moyenne : sans irrigation avec rattrapage phyto			
Switchgrass Fev		10 - 18		14	10 - 16	Valeur moyenne : sans irrigation avec rattrapage phyto			
Sorgho fibre		10 - 25		13	10 - 20	Valeur moyenne basse : sans irrigation avec rattrapage phyto			
Luzerne	12	12 - 15	Valeur mini. sans irrigation ni phyto		7 - 15				
Fétuque	10	10 - 15	Valeur mini. sans irrigation ni phyto	8	8 - 15	Valeur mini. sans irrigation ni phyto			
Fétuque Trèfle	15			14					
TCR	8	8 - 15	Valeur mini. spécifique de l'essence choisie (Robinier)	12	8 - 15	Valeur mini. spécifique de l'essence choisie (Eucalyptus)			

Hypothèses et méthodologie pour la construction des scénarios

Ce chapitre présente les méthodes utilisées pour décliner les scénarios aux différentes échelles d'étude, et leur traduction en termes de demande en surfaces et productions agricoles aux différentes échelles d'espace (nationale, bassin) et de temps (2006 vs 2030).

Les principales études de référence ayant permis d'apporter des éléments de cadrage aux scénarios de la présente étude sont : les scénarios « Facteur 4 » mis au point lors de l'Atelier changement climatique de l'ENPC (F. Peruzzo *et al.*, 2006) ; les scénarios du rapport du groupe de travail sur la division par 4 des émissions de gaz à effet de serre en 2050 du ministère de l'Industrie et de l'Environnement (2006) ; les scénarios 2025 Agriculture et Environnement réalisés par le Groupe de la Bussière (X. Poux, 2005) ; les scénarios 2015 Agriculture et Territoire du groupe de prospective de la DATAR (2002) ; et, enfin, des éléments de la publication de l'ONIGC⁶ (2007) sur l'utilisation des terres en France pour la production de biocarburants en 2010.

La consultation de ces différents scénarios a eu pour but de définir des éléments de cadrage en termes de niveaux de production de biocarburant mais également en termes de contexte de production agricole et de choix des cultures envisageables à l'horizon 2030. Un premier scénario tendanciel s'est inspiré de travaux de l'ONIGC ainsi que de l'IFP⁷ définissant des scénarios de production de biocarburants de première génération devant permettre d'atteindre les objectifs d'incorporation fixés par le gouvernement à l'horizon 2010. Ces études ont notamment permis de définir le niveau de contribution des différentes filières biocarburants dans le mix de substitution ainsi que la part des différentes cultures énergétiques permettant de les produire.

À partir d'un objectif de définition de scénarios contrastés, certains scénarios « Facteur 4 » ont notamment permis la définition d'un scénario de fort développement des biocarburants fixant un niveau de production déterminé à partir d'une

Tableau 4 - Principaux éléments de définition des quatre scénarios retenus

	Production biocarburants sur SAU	Filières en jeu	Surfaces mobilisées	Ambiance de production agricole
Scénario 1A	5 Mtep*	Biodiesel Bioéthanol G1	2,6 Mha	Tendancielle
Scénario 1B	5 Mtep*	Biodiesel Bioéthanol G1 Biométhane	1,67 Mha	Tendancielle améliorant
Scénario 2	20 Mtep*	BtL Bioéthanol G2	6,9 Mha* (¼ SAU)	Productive (recherche des meilleurs rdt)
Scénario 3	~14 Mtep	BtL Bioéthanol G2	6,9 Mha* (¼ SAU)	Priorité environnementale

* Paramètres de calage des scénarios

surface agricole dédiée définie. Par ailleurs, dans les études de prospective agricole, la présence récurrente de scénarios de production agricole protectrice de l'environnement a amené à considérer la définition d'un scénario « priorité environnementale » visant le respect des ressources en eau.

Dans cette étude, chacun des scénarios se base sur une production de biocarburants issue de cultures (ou de sous-produits de cultures) produites sur la surface agricole utile (SAU) telle qu'elle est définie aujourd'hui. L'évaluation chiffrée de l'évolution de la SAU étant peu documentée dans les scénarios prospectifs, c'est le choix de la stabilisation de la surface 2006 qui a été retenu pour 2030 (27,6 Mha). Les surfaces forestières ne sont pas prises en compte. La construction des scénarios de production est consacrée aux seules surfaces agricoles et aux peupleraies (dont l'exploitation emploie des techniques proches des pratiques agricoles) de manière à faciliter le cadrage des scénarios en termes d'identification des surfaces disponibles. Cette hypothèse ne rend cependant pas impossible la mobilisation de ressources ligneuses cultivées sur terres agricoles (taillis à courte ou à très courte rotation tels que l'eucalyptus).

S'agissant de scénarios de production de biocarburants et non de demande, les importations possibles de biocarburants et/ou de biomasse ne sont pas prises en compte dans l'étude car seuls les risques d'impact sur les ressources en eau du territoire français sont évalués. Ils ne sont pour autant pas exclus de l'approvisionnement français en biocarburants pour répondre aux objectifs énergétiques européens. La demande en carburant n'est donc pas explicitement analysée. Toutefois, lorsque c'est utile à la présentation des scénarios, une proposition de demande en carburant vraisemblable est décrite [RT].

À partir des éléments de cadrage décrits précédemment et issus d'études existantes, quatre scénarios de production contrastés ont pu être définis à l'échelle nationale : les scénarios 1A et 1B, le scénario 2 et le scénario 3.

Les scénarios diffèrent par la définition de plusieurs critères de développement des filières biocarburants :

- le niveau de production globale des filières à l'échelle nationale : 5 Mtep pour les scénarios 1A et 1B, et 20 Mtep pour le scénario 2. Ce critère implique différents niveaux de mobilisation des terres agricoles ;

- les filières technologiques considérées : les scénarios 1A et 1B utilisent les technologies aujourd'hui commercialisées (dites de première génération ou G1) mettant en jeu des filières de production agricole bien connues, tandis que les scénarios 2 et 3 considèrent les filières de conversion de biomasse lignocellulosique dites de deuxième génération (G2), mobilisant en partie des cultures énergétiques dédiées dont les pratiques culturales sont en cours de développement ;

- le niveau d'exigence environnementale associé au choix des cultures ainsi qu'aux pratiques culturales considérées : le scénario 1A valorise des produits de récolte de grandes cultures (grains, tubercules) dédiées aux biocarburants tandis que le scénario 1B favorise en premier lieu la valorisation de résidus de cultures considérés en surplus ; le scénario 2 cherche à produire un maximum de biomasse à l'hectare sans restriction de moyens tandis que le scénario 3 impose des pratiques culturales préservant particulièrement les ressources en eau. L'ensemble des différents critères sont détaillés ultérieurement dans les parties descriptives des scénarios.

Echelles Nord / Sud et Bassins hydrographiques

La déclinaison des scénarios de production de biocarburants au niveau de la production agricole nécessite le passage des scénarios nationaux à des échelles géographiques inférieures. En effet, le choix des cultures et des niveaux de productivité pour chacun des scénarios est effectué en fonction de compatibilités pédoclimatiques des espèces végétales cultivées avec une zone géographique donnée. Un découpage Nord/Sud est apparu suffisant pour définir, pour chacun des scénarios, un jeu d'espèces végétales en mesure d'approvisionner les unités de production de biocarburants. Le découpage suit les frontières régionales présentées en figure 8.

La déclinaison des scénarios de production nationaux aux échelles Nord et Sud, à savoir la part relative de chaque filière, de chaque culture, le type de surfaces mobilisées etc. est spécifique à chacun des quatre scénarios. Celle-ci dépend des éléments de cadrage définissant les différents scénarios. La démarche suivie est détaillée au sein des chapitres consacrés à la description de chacun des quatre scénarios.

À l'issue de cette première déclinaison aux échelles Nord et Sud, chacun des scénarios dispose d'une liste de cultures à destination des biocarburants, de la surface occupée par chacune d'elles, et de leur contribution à la production de biocarburants dans chacune des deux zones.

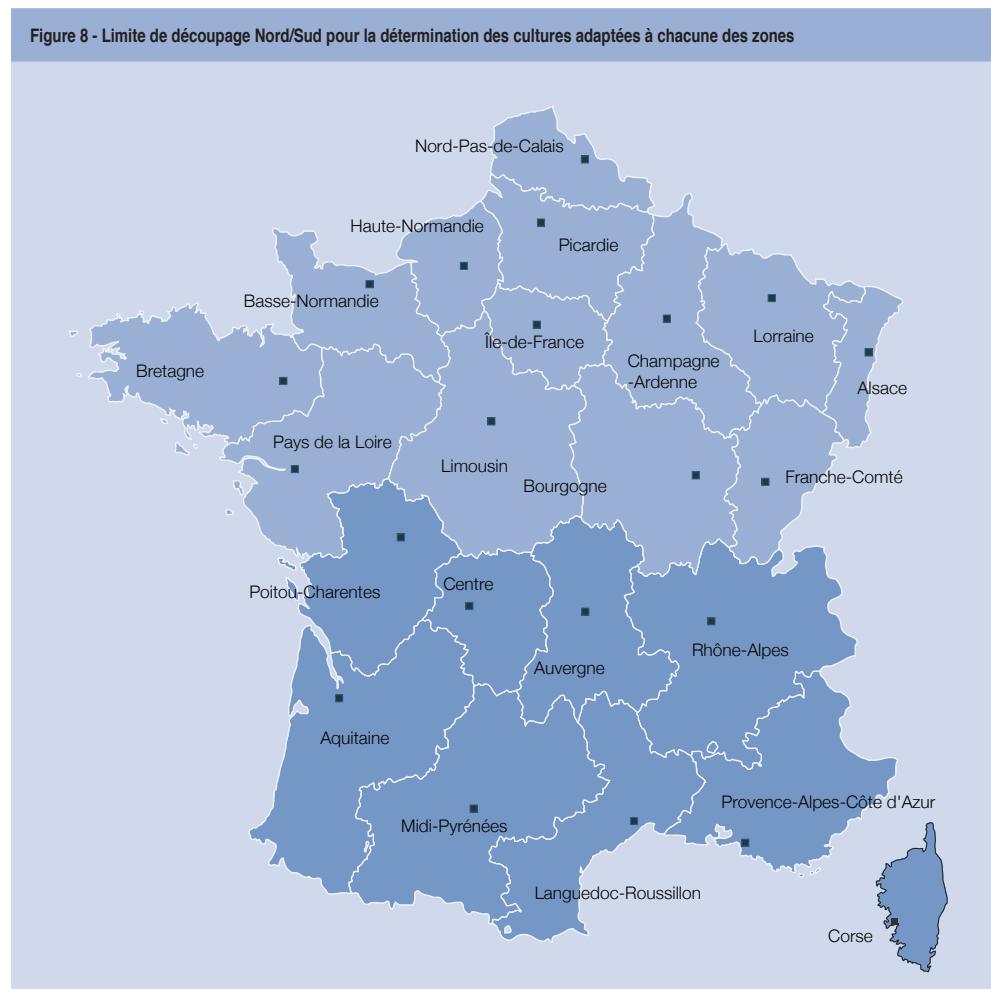
C'est à l'échelle des deux bassins hydrographiques que les effets sur les ressources en eau seront évalués. Le bassin Seine-Normandie est géographiquement réparti sur un territoire compris dans les frontières de la zone Nord ici définie. Le bassin Adour-Garonne s'étend sur un territoire compris dans les frontières de la zone Sud (figure 9).

Le découpage détaillé des frontières des bassins vis-à-vis des frontières départementales est illustré en annexe 1. Il convient cependant de noter

que dans le cas du bassin Adour-Garonne, les frontières définies pour l'étude diffèrent sensiblement des frontières réelles. Le bassin Adour-Garonne comprend ici les seuls départements des Régions Aquitaine et Midi-Pyrénées et les deux départements méridionaux de la Région Poitou-Charentes (Charente et Charente-Maritime). Les autres territoires d'Auvergne et du Limousin ne sont pas pris en compte car les sols agricoles sont considérés comme non mobilisables pour la culture des espèces considérées dans les scénarios de l'étude.

Si la contribution de chaque culture, dans le pool de cultures dédiées aux biocarburants en 2030, est définie spécifiquement par scénario, la nature des surfaces mobilisées en 2006 est définie selon un certain nombre d'hypothèses valables pour l'ensemble des scénarios.

Figure 8 - Limite de découpage Nord/Sud pour la détermination des cultures adaptées à chacune des zones



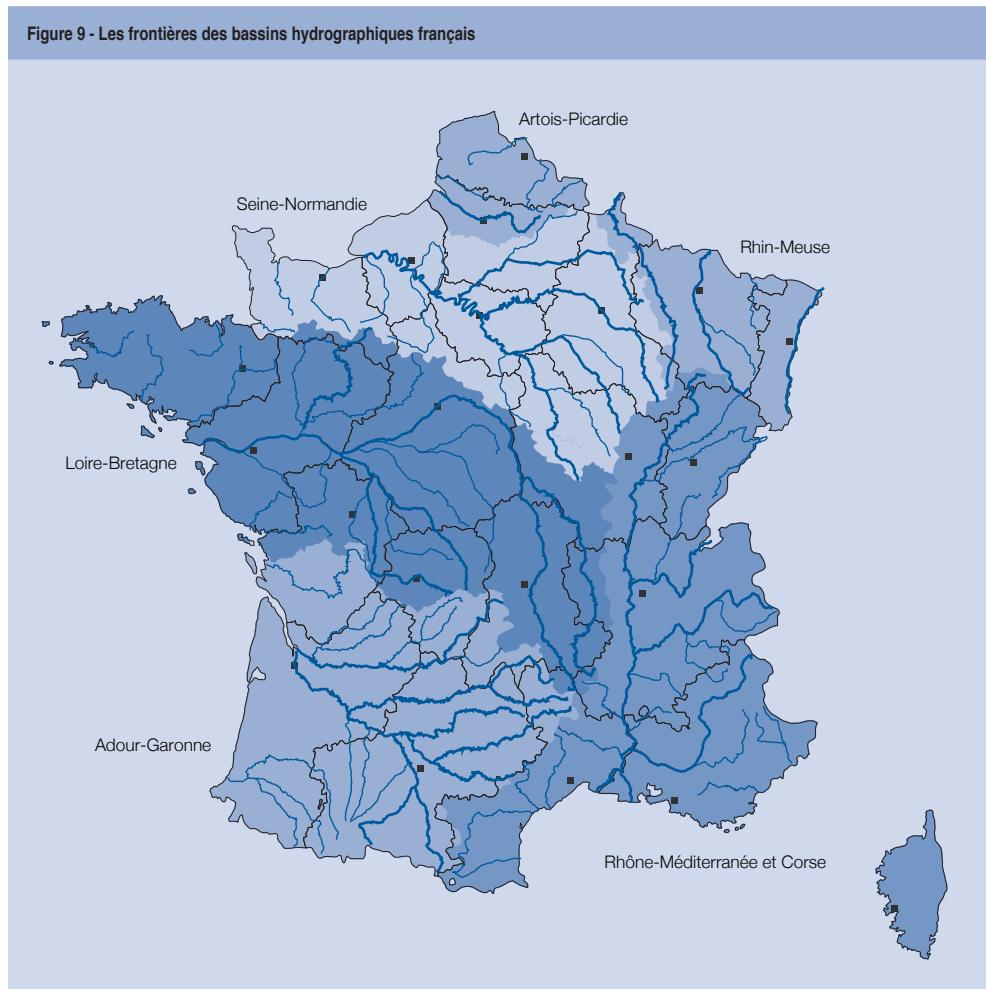
Cultures dédiées aux biocarburants en 2030

Pour atteindre le niveau de production défini dans chacun des scénarios (de 5 à 20 Mtep), il convient de définir un ensemble de surfaces mobilisées en 2030, ainsi que la répartition des différentes cultures dédiées sur ces surfaces mobilisées.

Le choix des différentes espèces dédiées à une filière de valorisation donnée est principalement conditionné par des compatibilités pédoclimatiques propres aux deux zones Nord et Sud. Des hypothèses spécifiques sont néanmoins nécessaires pour les cultures énergétiques existantes (filières de première génération) et les cultures énergétiques lignocellulosiques (filières de deuxième génération), qui ont la particularité de ne pas être actuellement intégrées aux systèmes de cultures existants.

Pour les scénarios mettant en œuvre des cultures dédiées aux biocarburants de première génération (scénarios 1A et 1B), le choix des espèces repose principalement sur les espèces mobilisées par les unités de transformation actuellement agréées jusqu'à l'horizon 2010 pour la production de biocarburants à incorporer dans le pool de carburants français. La liste et la localisation de ces unités de production de biocarburants agréées sont présentées en annexe 2. Lorsque la demande en biocarburants définie pour 2030 est supérieure à ces agréments 2010, le choix des espèces est orienté en fonction des spécificités du scénario : espèces les plus représentées sur le bassin considéré (scénario 1A) ou développement d'une nouvelle filière ne disposant pas d'agrément aujourd'hui (scénario 1B). Pour ces systèmes de cultures annuels en rotation, la proportion relative

Figure 9 - Les frontières des bassins hydrographiques français



des différentes espèces végétales sur les surfaces mobilisées pour la production de biocarburants en 2030 est estimée à partir de règles agronomiques de respect des rotations ou alors à partir des règles de cadrage spécifiques du scénario.

Pour les scénarios mettant en œuvre des cultures de type lignocellulosique dédiées aux biocarburants de deuxième génération (scénarios 2 et 3), le choix des espèces repose sur un panel de cultures actuellement identifiées comme étant, par nature, en mesure de produire d'importantes quantités de biomasse à l'hectare en un laps de temps relativement court, ou potentiellement adaptées à une mise en culture dans un contexte pédo-climatique français. Certaines espèces sont d'ores et déjà bien connues et valorisées dans d'autres types de filières (triticale, fétuque, etc.) ; d'autres espèces, encore peu domestiquées, sont à l'étude dans divers programmes de recherche nationaux et internationaux. Parmi ces dernières le choix se concentre alors dans un premier temps sur celles pour lesquelles on dispose à l'heure actuelle d'un minimum d'indications quant à leur comportement en système de culture biomasse. C'est ensuite le niveau de productivité requis et le niveau d'exigence environnemental du scénario qui permet d'orienter plus précisément le choix des espèces. Un scénario intensif (scénario 2) vise préférentiellement les cultures à plus forte productivité, tout en assurant un minimum de diversité dans la nature physiologique des espèces (annuelles, pluriannuelles, pérennes herbacées, pérennes ligneuses). Un scénario de priorité environnementale (scénario 3) s'oriente vers le choix de cultures par nature plus sobres en eau et en intrants (légumineuse, sorgho plutôt que maïs, etc.) et de cultures relativement rustiques qui minimisent les interventions sur parcelles (espèces pérennes plutôt qu'annuelles). La proportion relative d'une espèce vis-à-vis des autres peut être renforcée par son niveau de productivité dans le contexte du scénario et également selon une certaine facilité d'introduction dans les systèmes de cultures actuels.

Pour l'ensemble des scénarios, la répartition des différentes espèces à l'échelle du bassin se fait en général au prorata de la répartition définie à l'échelle Nord ou Sud correspondante. À titre illustratif, si le miscanthus occupe 64 % de la surface de gel nu considérée comme mobilisable sur la zone Nord (car considérée comme tel par les éléments de cadrage du scénario), il occupera également 64 % de cette surface de gel nu à l'échelle du bassin Seine-Normandie.

Assolements 2006 et 2030

La mise en place des assolements 2006 et 2030 pour chacun des scénarios à l'échelle nationale puis à l'échelle du bassin amène à considérer différents niveaux de surface nécessaires à la réalisation des évaluations *a posteriori*. Chacun des scénarios fait alors référence à différentes surfaces, imbriquées les unes dans les autres.

Les surfaces converties correspondent aux surfaces qui seront effectivement converties pour un usage énergétique à destination de la production de biocarburants en 2030. Les évaluations en termes de quantité et de qualité de l'eau (nitrates, pesticides) sont effectuées pour ce volant de surfaces. Les surfaces « converties 2006 » sont les mêmes surfaces avant conversion.

Les surfaces convertibles correspondent aux surfaces qui en 2006 sont, selon la définition des scénarios, réglementairement ou par principe de cadrage, convertibles pour un usage énergétique. Il s'agit le plus souvent des surfaces maximum que les contraintes agricoles ou la réglementation permettent de convertir. Selon leur nature, les surfaces converties peuvent dans certains cas correspondre en totalité aux surfaces convertibles (gels industriels, ACE), ou n'en représenter qu'une fraction (gel nu, prairie, terres agricoles non cultivées, etc.) en fonction des ajustements nécessaires à la demande en surfaces du scénario de production. Les évaluations ne s'appuient pas sur ces surfaces.

Les surfaces de référence correspondent, pour une culture donnée cultivée en 2006, à l'ensemble de la surface agricole consacrée à cette culture dans un scénario à l'échelle considérée. À titre d'exemple, la surface de référence de prairies permanentes est la surface totale de prairies permanentes en 2006 à l'échelle nationale ou pour un bassin donné. Les indicateurs « quantité » et « nitrates » sont également mesurés à l'échelle de ces surfaces de référence, afin de situer en termes relatifs le niveau de pression évalué pour les surfaces « converties ». Ces surfaces de référence peuvent, selon les scénarios, représenter une surface de l'ordre de la surface agricole utile totale du bassin étudié.

La surface agricole utile (SAU) correspond par définition à l'ensemble des surfaces agricoles de l'ensemble des exploitations d'un territoire, toutes natures de production confondues (grandes cultures, prairies, élevage, etc.). Cette surface est mentionnée pour situer la part des autres surfa-

ces vis-à-vis de la totalité des ressources agricoles que constitue la SAU totale du bassin.

L'évaluation des impacts sur les ressources en eau est réalisée en comparant une situation 2030 à la situation 2006, qui définit l'état initial.. Une fois déterminées les cultures dédiées et les volants d'implantation nécessaires, il convient de définir sur quels types de surfaces 2006 elles seront implantées.

Pour l'ensemble des scénarios, nous avons privilégié dans le choix des surfaces à mobiliser la non-concurrence avec les produits destinés à l'alimentation française et européenne.

Surfaces pour les scénarios 1A et 1B

En suivant une évolution tendancielle des assoulements agricoles français, il est dans un premier temps envisageable de mobiliser une partie des principales surfaces non valorisées, en déclin ou déjà utilisées pour la culture de végétaux à usage biocarburant (oléagineux, céréales, betterave sucrière), soit notamment de:

- continuer à exploiter les surfaces de gel industriel telles qu'elles existent en 2006, en considérant qu'elles sont, dans leur ensemble, à destination des filières biocarburants ;
- mobiliser les surfaces de gel non cultivé issues du gel PAC 2006 (jachère agronomique), dont on estime la part cultivable en grandes cultures (méthode d'estimation en annexe 3) ;
- conserver la surface ACE (surfaces bénéficiant des aides communautaires aux cultures énergétiques) telle qu'elle existe en 2006 ;
- conserver une tendance à la baisse des surfaces de prairies permanentes vers une mobilisation pour la production de bioénergie, tout en restant dans le cadre réglementaire de réduction des surfaces défini par la Commission européenne (voir annexe 3).

Ces scénarios de type tendanciel, qui mettent en jeu des filières de première génération, pourront nécessiter davantage de surfaces de grandes cultures pour atteindre le niveau de production fixé. Ils pourront alors mobiliser jusqu'à un tiers des exports extra-européens des principales céréales, de colza et de sucre (betterave) pour la production de ces mêmes cultures dédiée à un usage biocarburant. Les surfaces de céréales d'export étant relativement conséquentes, elles pourront également être converties pour y planter une culture de colza par exemple.

Le chiffrage détaillé des différents types de surfaces considérées comme mobilisables est présentées en annexe 3.

À l'échelle nationale, l'ensemble de ces surfaces représente les surfaces de référence dont une partie sera considérée comme convertible pour la production de biocarburants dans le cas des scénarios 1A et 1B. Les surfaces convertibles s'élèvent pour ces scénarios à 3 Mha, dont 2 Mha sur la moitié Nord et 1 Mha sur la moitié Sud.

Surfaces pour les scénarios 2 et 3

Pour les scénarios 2 et 3 mobilisant jusqu'à un quart de la surface agricole utile (6,9 Mha), au-delà des surfaces mobilisables pour les scénarios 1A et 1B, il est nécessaire de considérer des surfaces supplémentaires. Dans ces scénarios, le choix d'espèces globalement plus rustiques et, pour certaines, moins exigeantes vis-à-vis de la qualité des sols, permet la mobilisation de surfaces de plus faible valeur agronomique. Parmi celles-ci on compte notamment les surfaces de gel PAC non cultivé pouvant, dans ces scénarios, être mobilisées dans leur intégralité, ainsi que les friches, landes et autres surfaces agricoles non cultivées comme définies par la nomenclature Teruti-Lucas du Service de la statistique et de la prospective (SSP) du ministère de l'Agriculture. Ces scénarios sont par ailleurs amenés à considérer des cultures lignocellulosiques de type herbacées prairiales (fétueuse par exemple) qui peuvent être implantées sur prairie permanente sans en nécessiter le retourne. En plus des 10 % réglementaires, une part de prairie non retournée peut alors être mobilisée. D'autres types de cultures dédiées ligneuses de type taillis à courte rotation (TCR) sont également candidates et seront en premier lieu implantées sur terres de peupleraie, dont la moitié des surfaces seront réquisitionnées, ainsi que sur les surfaces de TCR d'eucalyptus existantes et en projet.

À l'échelle nationale, l'ensemble des surfaces convertibles des scénarios précédents ainsi que ces nouveaux types de surfaces supplémentaires représente un total de 9,5 Mha pour les scénarios nationaux 2 et 3.

Par ailleurs, pour certaines espèces dont le comportement est encore peu connu en système de culture classique, l'implantation peut être réalisée sur un sol portant initialement une espèce de caractéristiques similaires. Par exemple, le sorgho fibre peut être implanté sur des surfaces initialement cultivées en sorgho grain en 2006. D'autres types de surfaces peuvent ensuite être déterminés spécifiquement à partir des hypothèses de cadrage du scénario, en privilégiant par

exemple le choix de surfaces dont les ressources en eaux correspondantes sont particulièrement vulnérables dans le but d'obtenir un effet volontairement améliorant (scénario 3).

En définitive l'ensemble des surfaces convertibles des scénarios 2 et 3 peut s'échelonner entre 10 et 13 Mha selon les cas.

La nature des surfaces mobilisées en 2006 aux échelles Nord/Sud reste strictement la même aux échelles des bassins correspondants (les tableaux de conversion de sols 2006-2030 sont détaillés pour chacun des scénarios dans le rapport technique).

Matrices de conversion des sols

Une fois les différents assolements 2006 et 2030 définis pour chaque scénario à l'échelle des bassins hydrographiques, ceux-ci sont présentés sous forme de matrices de conversion (voir p. 25 et suiv.). Ces matrices rassemblent les surfaces converties, convertibles et de référence avec leur surface 2006 (en milliers d'hectares), ainsi que les surfaces converties en chacune des cultures dédiées 2030. Ces surfaces sont chacune présentées sur une ligne, les différentes cultures 2006 mobilisées étant présentées en colonnes. Ces dernières sont regroupées non pas par nature de sol (ACE, gel, etc.) mais en fonction du type de culture implantée (colza, prairie, sol nu etc.). Les différentes cultures de colza (énergétiques, d'export, non alimentaire) se retrouvent ainsi sous l'appellation « colza ».

Ces matrices, au-delà de fournir une représentation synthétique des scénarios, sont mises en œuvre pour le calcul de certains indicateurs de pression qui, initialement exprimés par unité de surface (exemple : les fuites de nitrate sous culture, en kg/ha), doivent ensuite être mesurés à l'échelle du bassin (en tonne par an).

Quatre scénarios à l'horizon 2030

Ce chapitre présente les quatre scénarios étudiés (leurs filières de production à l'échelle nationale, Nord et Sud, les surfaces agricoles mobilisées et la déclinaison à l'échelle des bassins). Des éléments de réflexion sur de potentiels effets directs et indirects de ces différents scénarios sur le pool énergétique et sur les autres secteurs agricoles sont également inclus en fin de chapitre.

Scénario 1A

5 Mtep de biocarburants liquides de première génération

Ce premier scénario considère une production nationale de 5 Mtep de biocarburants de première génération de type biodiesel et éthanol, tels qu'ils sont produits aujourd'hui. Une telle production permet de substituer environ 12 % des carburants fossiles consommés chaque année en France. Ce taux d'incorporation permet d'envisager par exemple une utilisation en monocarburation pour les flottes captives, ou encore une utilisation généralisée dans les transports routiers en mélange avec les carburants fossiles conventionnels.

Filières de production

À l'échelle nationale, compte tenu d'une demande de prépondérante en gazole dans les carburants routiers, la filière biodiesel est la filière à privilégié. Son développement reste cependant limité par la disponibilité en oléagineux convertibles en biodiesel (colza et tournesol). Une étude de l'ONIGC (2007) affiche un potentiel maximum de surface d'oléagineux en France entre 2,3 Mha (record historique) et 2,7 Mha (selon le CETIOM⁸). En considérant ici une production constante d'oléagineux à destination de l'export et de l'alimentaire (environ 1,3 Mha), la surface potentiellement éligible aux biocarburants est comprise entre 1 et 1,4 Mha. En fixant à un tiers la part du biodiesel dans la demande globale en biocarburant, on obtient un besoin de surface en

colza et tournesol qui se situe dans cette fourchette, soit 1,21 Mha.

► **Compte tenu des limitations agronomiques à la production d'oléagineux (rotations) et des surfaces disponibles, les 5 Mtep de biocarburants sont produits, à l'échelle nationale, pour un tiers à partir de biodiesel (colza et tournesol) et pour deux tiers à partir d'éthanol de céréales (blé et maïs) et de betterave sucrière.**

La liste des agréments de production distribués aux différentes unités d'éthanol et de biodiesel – soit 3,2 Mtep à horizon 2010 (voir annexe 2) –, permet de déterminer la part de chaque culture dédiée actuellement mobilisée sur chacune des zones Nord (colza, blé, betterave) et sur la zone Sud (colza, tournesol, maïs). Il n'y a cependant à ce jour qu'une unité d'éthanol agréée à horizon 2010 sur la moitié Sud. La création de nouvelles unités est alors supposée sur cette zone, avec une production d'éthanol provenant pour 45 % de blé tendre et pour 55 % de maïs, cette répartition reflétant la part des deux cultures dans l'assoulement actuel du Sud. Enfin, la part de biocarburants produite sur la moitié Nord et sur la moitié Sud est déterminée en fonction de la quantité d'agréments 2010 fixés sur chacune des deux zones. Dans ce scénario 1A, le Nord produit ainsi deux tiers des 5 Mtep nationaux et le Sud 1/3.

► **À l'échelle nationale, les 5 Mtep de biocarburants sont produits aux deux tiers sur la moitié Nord du pays et pour un tiers sur la moitié Sud**

Surfaces convertibles

S'agissant d'un scénario tendanciel, il convient de considérer que l'évolution des assoulements conserve la tendance actuelle. Les surfaces allouables aux biocarburants pour chacune des zones Nord et Sud correspondent strictement aux surfaces convertibles définies précédemment (voir p. 23), soit un total de 3 Mha dont 2 Mha dans le

Nord et 1 Mha dans le Sud. Néanmoins, à partir d'une production de carburants et d'une demande en ressources agricoles comme définies précédemment nationalement, le volant de surfaces à convertir pour la réalisation de ce scénario 1A national (tableau 16 p.38) s'avère être légèrement inférieur aux surfaces considérées comme convertibles (détails en annexe 3).

Le passage des surfaces convertibles aux surfaces converties est réalisé en priorisant le type de surface à mobiliser. Pour les deux zones, le scénario 1A mobilise prioritairement l'ensemble des surfaces en cultures énergétiques (gel industriel et ACE), l'ensemble du tiers des surfaces d'exportation hors UE mobilisable, ainsi que les 10 % de surfaces de prairie réglementairement

Figure 10 – Répartition des surfaces initiales, convertibles et converties du scénario 1A à l'échelle des bassins (Mha)

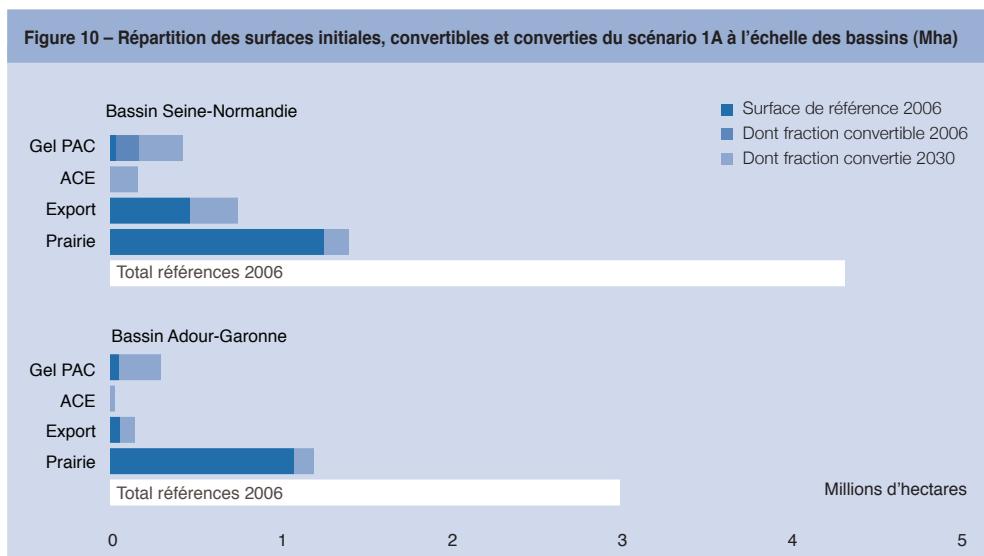


Tableau 5 – Scénario 1A : matrice de conversion des surfaces 2006 vers l'assoulement 2030 pour le bassin Seine-Normandie

Bilan surfaces		2006					SN1A
1000 ha	jachère nue	colza*	tournesol*	blé*	betterave*	prairie	Total
Référence 2006	284	577	43	1704	257	1391	4255
Convertibles 2006	255	298	1,8	223	77	139	993
colza 2030	80	298	1,8	104		35	519
blé 2030	27			118		70	215
betterave 2030	14				77	35	126
Converties 2030	121	298	2	223	77	139	859

Tableau 6 - Scénario 1A : matrice de conversion des surfaces 2006 vers l'assoulement 2030 pour le bassin Adour-Garonne

Bilan surfaces		2006					AG1A
1000 ha	jachère nue	colza*	tournesol*	blé*	maïs	prairie	Total
Référence 2006	278	79	314	466	609	1199	2945
Convertibles 2006	207	53	23	39	0,3	120	442
colza-tournesol 2030	56	53	23	10		32	174
blé 2030	66			12		38	116
maïs 2030	86			16	0	50	152
Converties 2030	207	53	23	39	0,3	120	442

* dont cultivés sur jachères industrielles, ACE et surfaces d'export

mobilisables. La zone Nord mobilise enfin 48 % des surfaces en gel nu considérées comme cultivables (surface d'ajustement), s'agissant du type de surface dont l'incertitude est la plus importante sur la part réellement disponible. La zone Sud mobilise quant à elle l'ensemble de ses surfaces de gel nu car elles sont significativement moins étendues sur ce bassin. Sur cette même zone, l'ensemble des surfaces considérées comme disponibles en 2006 se retrouvent alors converties en 2030.

Déclinaison à l'échelle des bassins

La nature des surfaces convertibles des bassins est strictement la même que pour les zones Nord et Sud. Celles-ci sont chiffrées à partir des statistiques départementales du ministère de l'Agriculture et de la Pêche. Concernant les surfaces d'export, les ports de Rouen, du Havre et de Caen pour le bassin Seine-Normandie, et les ports de La Rochelle et Bordeaux pour le bassin Adour-Garonne, exportent des volumes significatifs de céréales et oléagineux à destination des pays hors UE [RT].

À l'échelle des bassins, les surfaces convertibles pour la production de biocarburants reviennent dans ce scénario à près d'1 Mha pour le bassin Seine-Normandie et à environ 440 000 ha pour le bassin Adour-Garonne. D'après les règles de priorisation des surfaces à mobiliser définie nationalement pour les zones Nord et Sud, les bassins Seine-Normandie et Adour-Garonne convertissent respectivement 0,86 Mha, soit 14,5 % de la SAU du bassin, et 0,44 Mha soit 8,8 % de la SAU du bassin (figure 10 et détails en annexe 3).

En respectant la répartition de l'implantation des cultures dédiées 2030 sur les surfaces mobilisées en 2006 comme définie nationalement pour les zones Nord et Sud, les tableaux 5 et 6 indiquent les bilans de conversion des surfaces en comparant les surfaces effectivement converties aux surfaces considérées comme convertibles, vis-à-vis de l'ensemble de la surface initiale 2006 d'une culture donnée du bassin.

À partir de ces surfaces définies par culture 2030, les rendements de conversion des biocarburants peuvent être appliqués pour obtenir le volume de biocarburant produit à l'échelle du bassin (tableau 16 p.38).

► **Dans le scénario 1A, le bassin Seine-Normandie produit 1,74 Mtep de biocarburants, dont 0,97 Mtep d'éthanol et 0,77 Mtep de biodiesel,**

soit 54 % de la production de la moitié Nord et 35 % de la demande nationale.

► **Le bassin Adour-Garonne est en mesure de produire 0,73 Mtep de biocarburants dont 0,54 Mtep d'éthanol et 0,19 Mtep de biodiesel, soit 40 % de la production de la moitié Sud et 15 % de la demande nationale.**

En considérant que les unités existantes fonctionnent toutes à pleine capacité en 2030, ce scénario 5 Mtep nécessite la construction de 2 nouvelles unités d'éthanol (ex. betterave) sur le bassin Seine-Normandie et la construction de 4 nouvelles unités d'éthanol sur le bassin Adour-Garonne.

Scénario 1B

5 Mtep de biocarburants liquides et gazeux de première génération

À l'image du scénario 1A, cette variante a recours aux technologies aujourd'hui communes avec un contexte de production agricole conventionnelle. Le scénario 1B est caractérisé par le développement d'une filière biométhane carburant en plus des filières de première génération (biocarburants G1) présentées dans le scénario 1A. Par comparaison avec ce dernier, le scénario 1B intègre notamment une volonté d'amélioration des rendements des procédés par la valorisation de cultures en plante entière. Cette volonté implique le développement d'une filière biogaz agricole comprenant des étapes d'épuration/odorisation pour l'obtention d'un gaz de qualité carburant – une technologie dont les rendements énergétiques à l'hectare apparaissent supérieurs. Cette filière sous-tend une mobilisation moindre de grandes cultures alimentaires pour un usage biocarburants au profit de sous-produits de récolte en surplus et de cultures pérennes en plante entière. Cette utilisation introduit un critère environnemental, lequel distingue également le scénario 1B du scénario 1A, qui n'en comprend pas.

Filières de production

Dans ce scénario, les biocarburants de première génération (éthanol, biodiesel) sont limités aux agréments de production fixés par le gouvernement à l'horizon 2010. En 2010, 2,86 Mtep de biocarburants G1 sont produits par des unités françaises agréées – dont 2,17 Mtep de biodiesel et 0,69 Mtep d'éthanol (voir annexe 2).

Dans un contexte de stagnation de la production d'oléagineux pour l'alimentaire, les quantités

d'oléagineux nécessaires à l'agrément biodiesel apparaissent ici supérieures au potentiel annoncé par l'ONIGC et utilisé dans le scénario 1A. Une certaine part d'import de matière première est envisagée lors de l'attribution des agréments. Dans un souci de cohérence, il convient alors de limiter la production d'oléagineux français à destination du biodiesel au même niveau que le scénario précédent (1,21 Mha), qui s'inscrit dans la fourchette de potentiel maximum annoncé par l'ONIGC. La production de biodiesel du scénario 1B s'élève alors à 1,67 Mtep. Quant aux matières premières à destination de l'éthanol agréé, elles sont toutes issues de cultures récoltées sur le territoire français. La production d'éthanol du scénario 1B s'élève ainsi à 0,68 Mtep.

Le biométhane carburant d'origine agricole vient en complément de ces agréments de biocarburants de première génération jusqu'à atteindre 5 Mtep au total, soit une production de 2,64 Mtep de méthane (3060 Mm³), ou environ 5093 Mm³ de biogaz.

À noter qu'en pratique, qu'il soit produit à la ferme ou en collectif, le biogaz est issu de la méthanisation de charges de diverses natures. À la ferme, les résidus agricoles (fumiers, lisiers) sont valorisés en premier lieu, et couramment complétés par des déchets de coopératives, d'industries alimentaires ou autres déchets municipaux (en Allemagne, le biogaz à la ferme est principalement produit à partir de cultures dédiées). Ce scénario ne prend en considération que les cultures et résidus de culture dont la mobilisation peut potentiellement avoir un impact sur les ressources en eau.

Filières agricoles dédiées

Concernant l'éthanol et le biodiesel, compte tenu de la spécialité de chacune des unités, les agréments dictent la part des différentes matières premières à mobiliser, ainsi que leurs quantités.

Remarques :

- Une partie de la production d'éthanol est réalisée à partir d'alcool vinique en surplus. N'étant pas issue d'une culture dédiée, cette production d'éthanol agréée n'est pas prise en compte dans l'étude.
- Dans le cas particulier des matières premières du biodiesel, compte tenu que l'intégralité des matières premières n'est pas produite en France, il n'est pas déduit un tonnage d'oléagineux mais un pourcentage d'oléagineux Nord/Sud appliqué par la suite au potentiel limite de production française.

► **À l'échelle nationale, 2,8 Mt de biodiesel sont produites en France, dont 2,4 Mt issues de cultures oléagineuses, produites ou non en France. On**

note une demande de 65,7 % d'oléagineux pour le Nord (100 % de colza) et 34,2 % pour le Sud (dont 50 % de colza et 50 % de tournesol).

► **À l'échelle nationale, 1,09 Mt d'éthanol sont produits en France, dont 1,075 Mt à partir de produits de récolte de grandes cultures.**

La production de biométhane est, quant à elle, dictée dans un premier temps par le potentiel en pailles de blé et de maïs mobilisables. Dans le cas d'un surplus de surfaces convertibles après implantation des cultures pour éthanol et biodiesel, celles-ci sont alors mobilisées pour des cultures dédiées au biogaz.

Pour évaluer la part que les résidus de récolte peuvent représenter dans ce scénario de production de biogaz, une estimation des pailles de céréales mobilisables est réalisée pour les zones Nord et Sud⁹.

Dans la moitié Sud, les pailles de maïs seraient en mesure de produire 1,43 ktep de biogaz, et les pailles de blé tendre 96 ktep. À elles deux, elles permettent d'assurer 60 % de la production française de biométhane attendue dans ce scénario.

Dans la moitié Nord, les pailles de blé permettent la production de 590 ktep de biogaz. La mise en culture d'une production de luzerne dédiée à la production de biogaz sur près de 170 000 ha permettrait la production des 521 ktep de biogaz restant pour atteindre les 2,64 Mtep nationaux.

Remarque : en pratique, pour la production de biogaz, ces pailles seraient co-digérées en mélange avec d'autres types de déchets à taux d'humidité plus importants (lisier, effluents industriels, etc.) de manière à permettre un bon fonctionnement du méthaniseur. Dans la présente étude, seules sont considérées les ressources issues de cultures implantées sur la SAU du territoire considéré.

Surfaces convertibles

À l'image du scénario tendanciel 1A, les surfaces considérées comme convertibles sont de même nature et s'élèvent également à 3 Mha dont 2 Mha sur la zone Nord et 1 Mha sur la zone Sud. À partir d'une production de carburants et d'une demande en ressources agricoles comme définies précédemment nationalement, le volant de surfaces à convertir pour la réalisation de ce scénario 1B national (tableau 16 p.38) s'avère être inférieur aux surfaces considérées comme convertibles (détails en annexe 3).

Le passage des surfaces convertibles aux surfaces converties est réalisé en priorisant le type

de surfaces à mobiliser. Sur la moitié Nord, les surfaces de gel et d'ACE suffisent pour produire l'éthanol et le biodiesel attendus. Les surfaces de cultures d'export n'ont donc pas besoin d'être mobilisées. Le biogaz est quant à lui produit à partir de résidus de récolte non comptabilisés dans les surfaces mobilisées ainsi qu'à partir de luzerne qui occupe 4,3 % de la surface de prairie permanente. Sur la moitié Sud, les surfaces de cultures énergétiques n'étant pas suffisamment importantes, il est nécessaire de mobiliser une part des surfaces d'exports hors UE rendue disponible, soit 15 % des exports hors UE de la zone Sud, ou 5,6 % des exports nationaux vers les pays tiers. Dans ce scénario 1B, la prairie ne se retrouve ainsi pas mobilisée pour la production de grandes cultures mais pour uniquement la culture d'une espèce prairiale, la luzerne, sur la moitié Nord. Outre les avantages environnementaux de l'utilisation de résidus de récolte et de cultures pérennes vis-à-vis des grandes cultures annuelles, ce scénario requiert moins de surfaces pour une même production nationale de biocarburants que le scénario 1A.

► La réalisation du scénario 1B implique la mobilisation de 1,7 Mha de terres agricoles pour la production de l'éthanol, du biodiesel et du biométhane attendue en 2030. La zone Nord est alors ici en mesure de produire 56,5 % des 5 Mtep nationaux et la zone Sud 43,5 %.

Déclinaison à l'échelle des bassins

La carte de la localisation géographique des unités de conversion (voir annexe 2) peut difficilement dicter la localisation exacte des bassins d'approvisionnement en matières premières des usines du bassin hydrographique, compte tenu de très probables flux de produits agricoles hors des frontières de ce bassin. La détermination des surfaces agricoles dédiées aux biocarburants est alors réalisée à partir des mêmes types de terres considérées comme convertibles pour les zones Nord et Sud. Il s'agit également des mêmes types de surface que dans le scénario 1A.

À l'échelle des bassins, les surfaces convertibles pour la production de biocarburants reviennent dans ce scénario à près d'1 Mha pour le bassin Seine-Normandie et à environ 440 000 ha pour le bassin Adour-Garonne.

D'après les règles de priorisation des surfaces à mobiliser définie nationalement pour les zones Nord et Sud, le bassin Seine-Normandie mobilise l'ensemble des surfaces disponibles en gel nu et cultures énergétiques ainsi que 4,3 % de la prairie permanente sur les 10 % considérées comme disponibles. Cela représente alors un total de 0,63 Mha convertis, soit 10,8 % de la SAU du bassin. Le bassin Adour-Garonne mobilise l'ensemble des surfaces disponibles en gel nu et cultures énergétiques ainsi que 23 % des surfaces d'export hors UE (sur le tiers initialement rendu disponible). Par ailleurs, ce scénario ne nécessite

Figure 11 - Répartition des surfaces initiales, convertibles et converties du scénario 1B à l'échelle des bassins (Mha)

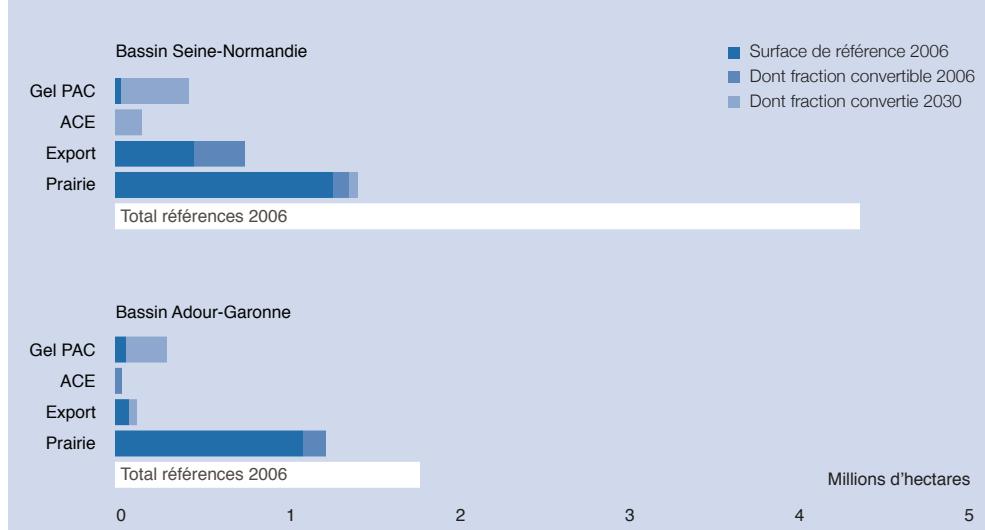


Tableau 7 - Scénario 1B : matrice de conversion des surfaces 2006 vers l'assoulement 2030 pour le bassin Seine-Normandie

2006							SN1B
Bilan surfaces	jachère nue	colza*	tournesol*	blé*	betterave*	prairie	Total
1000 ha							
Référence 2006	284	577	43	1704	257	1391	4255
Convertibles 2006	255	289	1,81	14	15	139	714
colza 2030	137	289	1,81				428
blé 2030	98			14			112
betterave 2030	19				15		34
luzerne 2030						61	61
Converties 2030	255	289	2	14	15	61	635

Tableau 8 - Scénario 1B : matrice de conversion des surfaces 2006 vers l'assoulement 2030 pour le bassin Adour-Garonne

2006						AG1B
Bilan surfaces	jachère nue	colza*	tournesol*	blé	maïs*	Total
1000 ha						
Référence 2006	278	79	314	466	609	1746
Convertibles 2006	207	53	23	17	0,33	300
colza 2030	79	53		0,5		133
tournesol 2030	99		23	16		138
blé 2030						0
maïs 2030	29				0,33	29
Converties 2030	207	53	23	17	0,33	300

* dont cultivés sur jachères industrielles, ACE et surfaces d'export

pas la mobilisation de surfaces de prairies. Cela représente alors un total de 0,3 Mha convertis, soit 6 % de la SAU du bassin.

En respectant la répartition de l'implantation des cultures dédiées 2030 sur les surfaces mobilisées en 2006 comme définie nationalement pour les zones Nord et Sud, les tableaux 7 et 8 indiquent les bilans de conversion des surfaces en comparant les surfaces effectivement converties aux surfaces considérées comme convertibles, vis-à-vis de l'ensemble de la surface initiale 2006 d'une culture donnée sur le bassin.

À partir de ces surfaces définies par culture 2030, les rendements de conversion des biocarburants peuvent être appliqués pour obtenir le volume de biocarburant produit à l'échelle du bassin (tableau 16 p.38).

► Dans le scénario 1B, le bassin Seine-Normandie produit 1,47 Mtep de biocarburants, dont 0,38 Mtep d'éthanol, 0,63 Mtep de biodiesel et 0,45 Mtep de biogaz, soit 52 % de la production de la moitié Nord et 30 % de la demande nationale.

► Le bassin Adour-Garonne est en mesure de produire 1,54 Mtep de biocarburants, dont 77 ktep

d'éthanol, 0,31 Mtep de biodiesel et 1,15 Mtep de biogaz, soit 71 % de la production de la moitié Sud et 31 % de la demande nationale

Scénario 2 20 Mtep de biocarburants de deuxième génération

Le scénario 2 traduit une forte augmentation de la production française de biocarburants, qui nécessite le recours aux filières de deuxième génération. Pour des raisons de simplicité d'interprétation des résultats, il est supposé qu'à l'horizon 2030, la production de biocarburants n'utilise que des procédés de deuxième génération permettant la production d'éthanol lignocellulosique et de gazole de synthèse par la voie BtL (Diesel-FT). On peut considérer que les unités de production de biocarburants de première génération sont soit converties dans le cas de l'éthanol, soit démantelées ou encore en production à partir de matières premières importées.

Dans ce cadre, le développement des filières de deuxième génération n'implique pas de profondes modifications des parcs automobiles.

L'éthanol lignocellulosique, au même titre que l'éthanol de première génération, se substitue à l'essence, tandis que le diesel-FT est incorporé dans les moteurs diesel classiques en substitution au gazole fossile. Les rendements des deux procédés sont ici considérés comme similaires (0,16 Mtep de carburant par tonne de biomasse sèche). Il n'y a donc pas lieu de définir précisément pour la construction du scénario la part de la production totale que l'on consacre à l'éthanol et la part consacrée au diesel-FT.

Inspiré d'un scénario Facteur 4, ce scénario 2 considère uniquement des cultures dédiées à la production de biocarburants implantées sur un quart de la SAU du territoire. Ce scénario a recours à une agriculture conventionnelle qui priviliege la productivité. La valorisation du potentiel bois énergie issu des produits et sous-produits forestiers (hors TTCR) est ici réservée à un usage énergétique hors carburants, comme l'électricité ou la chaleur.

Filières de production

Dans ce scénario productif le choix des cultures est fait parmi celles qui ont les meilleurs rendements en condition de culture conventionnelle (apport d'eau et d'intrants en réponse aux besoins de la plante) et parmi les trois catégories de cultures dédiées, à savoir par ordre de priorité : les cultures pérennes herbacées, les cultures annuelles en plante entière, les cultures ligneuses en taillis. Celles-ci sont déterminées et implantées sur les moitiés nord et sud du territoire en fonction de leur adaptation aux différents climats.

L'unique paramètre de cadrage du scénario est la

SAU française qui en 2030 reste similaire à la SAU 2006, soit 27,6 Mha, la part dédiée aux biocarburants s'élevant au quart de la SAU, soit 6,9 Mha. Les surfaces allouées se répartissent géographiquement sur les moitiés Nord et Sud du pays de manière proportionnelle à la répartition de la SAU sur ces mêmes zones, à savoir 60 % et 40 % respectivement. La surface dédiée aux biocarburants s'élève alors à 4,14 Mha pour la moitié Nord et 2,76 Mha pour la moitié Sud. Cependant, compte tenu d'un volant de surfaces de 6,9 Mha et des rendements matière obtenus selon les procédés connus aujourd'hui, la production de 22 Mtep de biocarburants à partir d'une telle diversité de cultures dédiées n'est rendue possible qu'avec des productivités à l'hectare qui relèvent du record, et peu réaliste en culture à grande échelle. Le tableau 9 propose alors une répartition des cultures candidates sur les volants de SAU allouées sur les zones Nord et Sud.

► En dédiant une part de SAU proportionnelle aux SAU actuelles dans les deux zones, ce panel de cultures permettrait de produire 20 Mtep de biocarburants, avec 53 % des biocarburants sur la moitié Nord et 47 % sur la moitié Sud.

Surfaces convertibles

Le premier volant de surfaces convertibles défini précédemment pour les scénarios 2 et 3 (voir p. 23) est ici considéré. Par ailleurs, les cultures annuelles comme le sorgho et le triticale sont implantées sur toutes les terres allouées à ces mêmes espèces en 2006, avec un complément sur terres de céréales dans le Nord et un complément sur

Tableau 9 – Surfaces et cultures mobilisées pour la réalisation du scénario 2

	Cultures	Production de biocarburants (en Mtep)	Production de biomasse sèche (en Mt m.s.)	Rendement (en t/ha)	Surface (en Mha)
NORD	Miscanthus	3,31	20,70	25	0,828
	Luzerne	1,49	9,32	15	0,621
	Fétuque élevée	1,49	9,32	15	0,621
	Triticale plante entière	2,58	16,15	13	1,242
	TTCR Peuplier (2 ans)	1,99	12,42	15	0,828
	Sous-total Nord	10,86	67,90		4,140
SUD	Switchgrass	2,65	16,56	20	0,83
	Canne de Provence	2,21	13,80	25	0,55
	Mais biomasse	1,66	10,35	25	0,41
	Sorgho fibre irrigué	1,66	10,35	25	0,41
	TTCR Eucalyptus	1,32	8,28	15	0,55
	Sous-total Sud	9,49	59,34		2,76
Total France		20,36	127,24		6,90

terres agricoles non cultivées (ou friches) dans le Sud. Ce dernier type de sol est par ailleurs utilisé comme surface d'ajustement pour les autres cultures lorsque nécessaire. Le maïs biomasse est quand à lui implanté sur terres initialement ensemencées en maïs en 2006, en veillant à ce qu'il ne dépasse pas la moitié de la surface initiale.

Concernant les surfaces d'ajustement ayant un usage commercial défini (prairie au delà des 10 % réglementaires, céréales) la part considérée comme convertible est arbitrairement arrêtée à la moitié de la surface totale de la zone considérée. La part réellement convertie correspond cependant à la surface manquante pour la réalisation du scénario après mobilisation des autres types de surface.

À partir d'une production de carburants et d'une demande en ressources agricoles comme définies nationalement, le volant de surfaces à convertir pour la réalisation de ce scénario 2 national s'avère être inférieur aux surfaces considérées comme convertibles (détails en annexe 3).

► **À l'échelle nationale, les surfaces convertibles pour la production de biocarburants reviennent dans ce scénario à 13 Mha, dont 7,6 Mha sur la moitié Nord et 5,4 Mha sur la moitié Sud.**

Déclinaison à l'échelle des bassins

Les surfaces allouées des bassins correspondent aux systèmes d'allocation Nord/Sud décrit précédemment. Sur l'ensemble des surfaces considérées comme convertibles sur la moitié Nord, le bassin Seine-Normandie en compte 37 %, soit 2,8 Mha. Les surfaces converties s'élèvent quant à elles à 1,48 Mha ; cette surface correspond bien au quart de la SAU actuelle du bassin. Sur l'ensemble des surfaces convertibles sur la moitié Sud, le bassin Adour-Garonne en compte 41 %, soit 1,4 Mha. Les surfaces converties s'élèvent quant à elles à 1,16 Mha ; cette surface correspond bien au quart de la SAU actuelle du bassin. En respectant la répartition de l'implantation des cultures dédiées 2030 sur les surfaces mobilisées en 2006 comme définie nationalement pour les zones Nord et Sud, les tableaux 10 et 11 indiquent les bilans de conversion des surfaces en comparant les surfaces effectivement converties aux surfaces considérées comme convertibles, vis-à-vis de l'ensemble de la surface initiale 2006 d'une culture donnée sur le bassin. À partir de ces surfaces définies par culture 2030, les rendements de conversion des biocarburants peuvent être appliqués pour obtenir le volume de biocarburant produit à l'échelle du bassin (tableau 16 p.38).

Figure 12 - Répartition des surfaces initiales, convertibles et converties du scénario 2 à l'échelle des bassins (Mha)

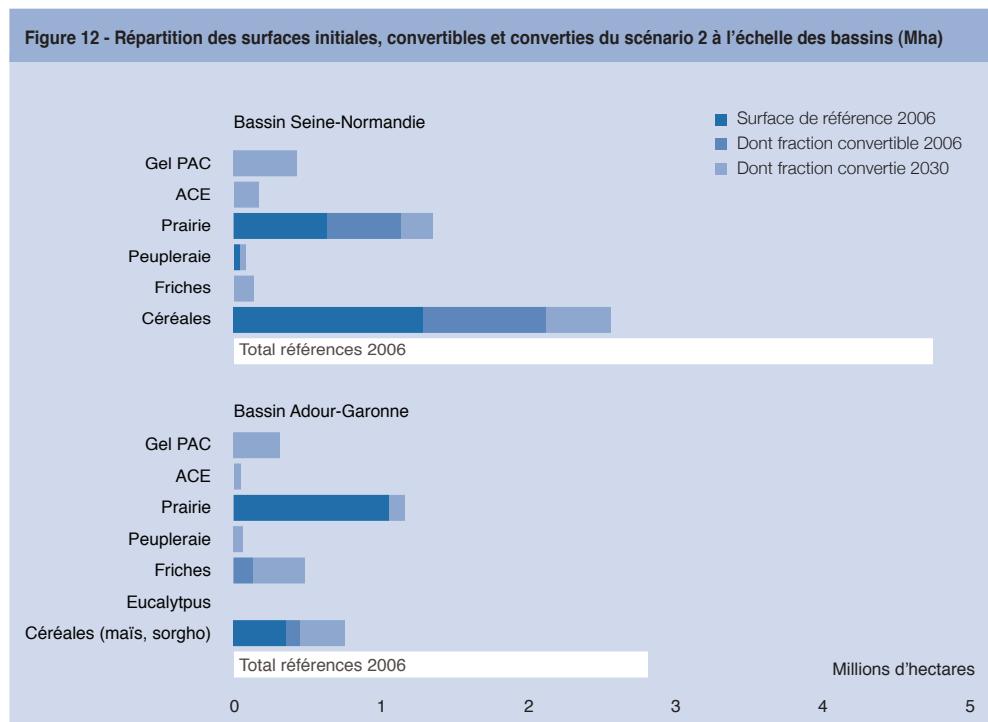


Tableau 10 - Scénario 2 : Matrice de conversion des surfaces 2006 vers l'assoulement 2030 pour le bassin Seine-Normandie

Bilan surfaces		2006				SN2
1000 ha	Sol nu (jachère + friches)	Cultures éner- gétiques	Prairie	Céréales	Peupleraie	Total
Référence 2006	421	343	1391	2622	69	4847
Convertibles 2006	421	320	765	1322	35	2862
Miscanthus 2030	182	153				335
Luzerne 2030		167	114			281
Féruque 2030	102		127			229
Triticale p.e. 2030				471		471
TTCR 2030	137				35	172
Converties 2030	421	320	241	471	35	1488

Tableau 11 - Scénario 2 : Matrice de conversion des surfaces 2006 vers l'assoulement 2030 pour le bassin Adour-Garonne

Bilan surfaces		2006						AG2
1000 ha	Sol nu (jachère + friches)	Cultures éner- gétiques	Prairie	Maïs	Sorgho	Eucalyptus	Peupleraie	Total
Référence 2006	781	64	1199	743	29	4	53	2873
Convertibles 2006	781	64	110	371	29	4	27	1386
Switchgrass 2030	380	25						404
Canne de P. 2030		39	110					149
Maïs biomasse 2030				287				287
Sorgho fibre 2030	109				29			138
TCR Eucalyptus 2030	155					4	27	186
Converties 2030	643	64	110	287	29	4	27	1164

* dont cultivés sur jachères industrielles, ACE et surfaces d'export

- Le bassin Seine-Normandie produit près de 4 Mtep de biocarburants de deuxième génération, soit 36 % de la production Nord et 20 % de la demande nationale du scénario.
- Le bassin Adour-Garonne produit un peu plus de 4 Mtep de biocarburant de deuxième génération, soit 42 % de la production sud et 20 % de la demande nationale.

choix de privilégier le respect de la ressource en eau. Il n'est pas fixé d'objectif de production nationale de biocarburants. Le choix des cultures et de pratiques culturales plus respectueuses des ressources en eau détermine les rendements atteignables et, par suite, la production globale de biocarburants induite sur le volant de surfaces retenu.

Les options de développement des biocarburants retenues dans ce scénario intègrent des objectifs d'amélioration environnementale vis-à-vis du scénario 2, orienté vers la production. Ces options peuvent se traduire dans un premier temps en termes de pratiques culturelles adaptées et, par conséquent, en termes de choix de cultures adaptées (comme par exemple : cultures sobres, cultures à moindre besoin en produits phytosanitaires, cultures à moindres fuites d'azote, cultures fixatrices d'azote ou améliorant le bilan azote, etc.).

Un cahier des charges des pratiques est alors défini selon les exigences les plus strictes sur des zones

Scénario 3

Biocarburants de deuxième génération avec préservation des ressources en eau

Le scénario 3 constitue la variante « préservation des ressources » du scénario 2 : il se base sur le développement de filières biocarburants de deuxième génération, en mobilisant la même surface agricole (un quart de la SAU) et en restant analogue au scénario Facteur 4 de référence. La particularité de ce scénario réside dans le

de protection prioritaires, à savoir les zones correspondant aux bassins d'alimentation de captage d'eau potable (BAC) et le long des cours d'eau. Dans ce scénario, les cultures dédiées aux biocarburants peuvent être implantées sur tout type de zone, à condition qu'elles répondent aux exigences de ce cahier des charges. Dans ce cadre, ces cultures dédiées peuvent faire partie des options envisageables pour l'amélioration de la ressource en eau des BAC et cours d'eau, lorsqu'elles y sont implantées.

D'une manière générale, l'amélioration de l'état des BAC et cours d'eau nécessite la forte réduction, voire l'absence, des fuites de fertilisants et de produits phytosanitaires chimiques vers les nappes. Par ailleurs la pratique de l'irrigation est tolérée uniquement en cas de nécessité vitale pour la culture, ou lorsque la ressource en eau n'est pas impactée. À partir de ces premiers éléments de cadrage, il est également possible d'intervenir sur un certain nombre de paramètres permettant *a priori* d'engendrer de moindres impacts sur l'eau, en comparaison avec l'objectif d'optimisation de la production de biomasse du scénario 2. Parmi ces mesures on peut noter :

- le choix de systèmes de cultures permettant des synergies inter-espèces ;
- le choix d'espèces végétales génétiquement plus sobres en intrants (par exemple, le maïs biomasse du scénario 2 est remplacé par du sorgho fibre dans le scénario 3) ;
- le choix de pratiques culturales plus sobres en intrants (par exemple, la récolte hivernale, plutôt qu'automnale, des cultures dédiées telles que le miscanthus et le switchgrass).

Ces différentes mesures sont davantage détaillées dans le rapport technique.

Filières de production

Le scénario 3, comme le scénario 2, a été construit à partir d'une surface disponible nationale fixe, des cultures et pratiques culturales déterminées précédemment, puis des rendements à l'hectare déterminés en conséquence à dire d'experts. De ces choix, dictés par la contrainte de préservation des ressources en eau admise pour ce scénario, découle une production de biocarburants de deuxième génération présentée dans le tableau 12.

► En dédiant une part de SAU proportionnelle aux SAU actuelles dans les deux zones, l'ensemble de ces cultures permet de produire 14,5 Mtep de biocarburants, avec 62 % des biocarburants sur la moitié Nord et 38 % sur la moitié Sud.

Surfaces convertibles

Comme pour le scénario 2, le premier volant de surfaces convertibles défini précédemment (voir p. 23) est ici considéré. Parmi les particularités de ce scénario, on trouve la mobilisation des surfaces en couverts environnementaux et notamment les bandes enherbées, qui sont implantées en espèces prairiales (telles que la fétuque élevée), puis fauchées pour l'utilisation du foin.

Par ailleurs, sur la moitié Nord, des surfaces de cultures annuelles (maïs fourrage et betterave) sont mobilisées en 2006 à hauteur d'un quart de leurs surfaces (car elles sont considérées en déclin) et viennent en complément des terres

Tableau 12 – Biocarburants produits à partir des cultures mobilisées pour la réalisation du scénario 3

Cultures		Production de biocarburants (en Mtep)	Production de biomasse sèche (en Mt m.s.)	Rendement (en t/ha)	Surface (en Mha)
NORD	Miscanthus	2,98	18,63	15	1,242
	Luzerne	1,19	7,45	12	0,621
	Fétuque	0,26	1,60	6	0,266
	Fétuque élevée - trèfle	3,83	23,95	15	1,597
	TCR robinier	0,53	3,31	8	0,414
	Sous-total Nord	8,79	54,94		4,140
SUD	Switchgrass	0,79	4,97	12	0,41
	Miscanthus	0,86	5,38	13	0,41
	Fétuque	0,11	0,72	6	0,12
	Fétuque élevée - trèfle	2,52	15,72	14	1,12
	Sorgho fibre	0,86	5,38	13	0,41
	TCR Eucalyptus	0,53	3,31	12	0,28
	Sous-total Sud	5,68	35,48		2,76
	Total France	14,47	90,42		6,90

agricoles non cultivées qui sont intégralement mobilisées sur cette zone. Le taux réglementaire de retournement de prairie est valorisé, avec une part supplémentaire pour l'implantation d'espèces prairiales en tant que surfaces d'ajustement pour parvenir aux 4,1 Mha à mobiliser.

Sur la zone Sud, les surfaces d'ajustement correspondent à une part des surfaces de maïs et des terres agricoles non cultivées (dont la part réellement cultivable est plus incertaine que sur la zone Nord). Concernant les surfaces d'ajustement ayant un usage commercial défini (prairie au delà des 10 % réglementaires, et maïs dans le sud), la part considérée comme convertible est arbitrairement arrêtée à la moitié de la surface totale de la zone considérée. La part réellement convertie correspond cependant à la surface manquante pour la réalisation du scénario après mobilisation des autres types de surface.

► **À l'échelle nationale, les surfaces convertibles pour la production de biocarburants reviennent dans ce scénario à 10,7 Mha, dont 5 Mha sur la moitié Nord et 5,7 Mha sur la moitié Sud.**

À partir d'une production de carburants et d'une demande en ressources agricoles comme définies précédemment nationalement, le volant de surfaces à convertir pour la réalisation de ce scénario 3 national (tableau 15) s'avère être inférieur aux surfaces considérées comme convertibles (détails en annexe 3).

Déclinaison à l'échelle des bassins

Les surfaces allouées des bassins correspondent aux systèmes d'allocation des moitiés Nord et Sud, comme décrit précédemment. Sur l'ensemble des surfaces considérées comme convertibles sur la moitié Nord, le bassin Seine-Normandie en compte 35 %, soit près de 1,8 Mha.

Les surfaces converties s'élèvent quant à elles à 1,46 Mha, cette surface correspondant bien au quart de la SAU actuelle du bassin. Sur l'ensemble des surfaces considérées comme disponibles sur la moitié Sud, le bassin Adour-Garonne en compte 34 %, soit 1,9 Mha. Les surfaces converties s'élèvent quant à elles à 1,1 Mha, cette surface correspondant bien au quart de la SAU actuelle du bassin.

Figure 13 - Répartition des surfaces initiales, convertibles et converties du scénario 3 à l'échelle des bassins (Mha)

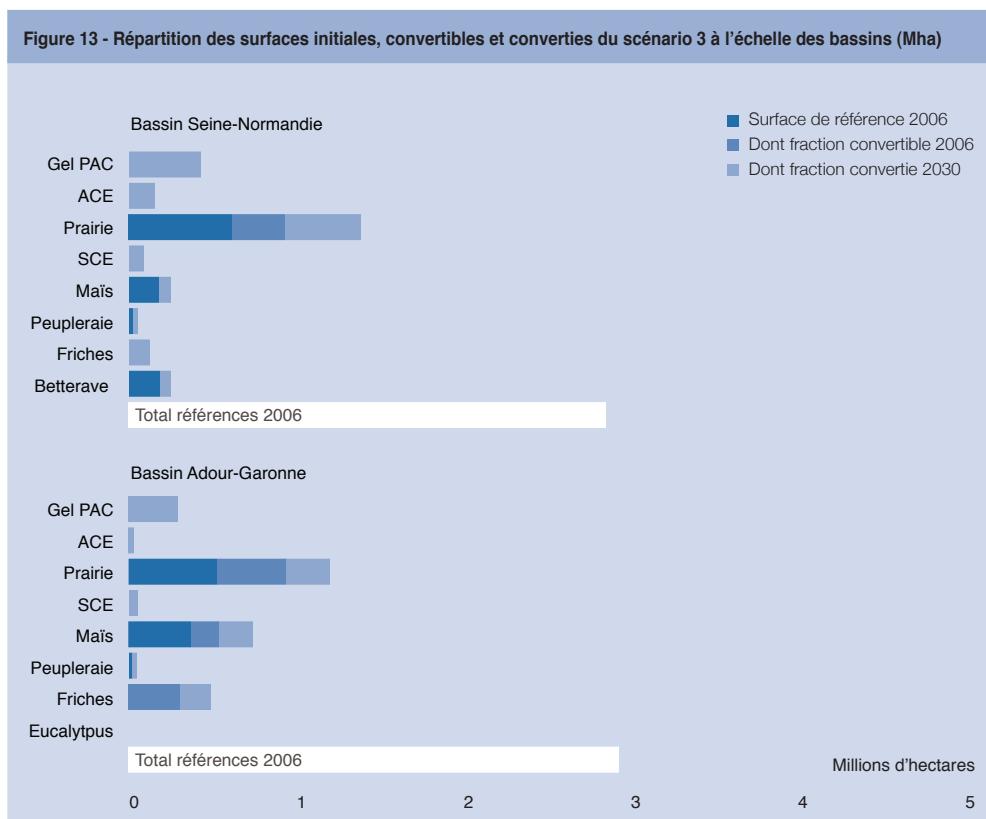


Tableau 13 - Scénario 3 : Matrice de conversion des surfaces 2006 vers l'assoulement 2030 pour le bassin Seine-Normandie

Bilan surfaces		2006						SN3
1000 ha	Sol nu (jachère + friches)	Cultures éner- gétiques	Prairie	Bandes enherbées	Maïs	Betterave	Peupleraie	Total
Référence 2006	421	343	1391	98	263	257	69	2842
Convertibles 2006	421	320	765	98	66	64	35	1769
Miscanthus 2030	284	191			18			493
Luzerne 2030		129	139					268
Fétuque SCE 2030				98				98
Fétuque - trèfle 2030	93		321		48			461
TCR robinier 2030	45					64	35	143
Converties 2030	421	320	460	98	66	64	35	1464

Tableau 14 - Scénario 3 : Matrice de conversion des surfaces 2006 vers l'assoulement 2030 pour le bassin Adour-Garonne

Bilan surfaces		2006						SN3
1000 ha	Sol nu (jachère + friches)	Cultures éner- gétiques	Prairie	Bandes enherbées	Maïs	Betterave	Peupleraie	Total
Référence 2006	781	64	1199	743	69	4	53	2913
Convertibles 2006	781	64	659	371	69	4	27	1975
Switchgrass 2030	132							132
Miscanthus 2030	265							265
Fétuque SCE 2030				69				69
Fétuque - Trèfle 2030			262					262
Sorgho fibre 2030		64		189				253
TCR Eucalyptus 2030	71					4	27	102
Converties 2030	469	64	262	189	69	4	27	1084

* dont cultivés sur jachères industrielles, ACE et surfaces d'export

En respectant la répartition de l'implantation des cultures dédiées 2030 sur les surfaces mobilisées en 2006 comme définie nationalement pour les zones Nord et Sud, les tableaux 13 et 14 indiquent les bilans de conversion des surfaces en comparant les surfaces effectivement converties aux surfaces considérées comme convertibles, vis-à-vis de l'ensemble de la surface initiale 2006 d'une culture donnée sur le bassin.

À partir de ces surfaces définies par culture 2030, les rendements de conversion des biocarburants peuvent être appliqués pour obtenir le volume de biocarburant produit à l'échelle du bassin (tableau 16 p.38).

► **Le bassin Seine-Normandie produit 3,1 Mtep de biocarburants de deuxième génération, soit 35 % de la production Nord et 22 % de la demande nationale.**

► **Le bassin Adour-Garonne produit 2,2 Mtep de biocarburant de deuxième génération, soit 38 % de la production Sud et 15 % de la demande nationale.**

Impacts des scénarios sur les filières agricoles

Impact sur les surfaces globales

À usages alimentaires constants, le scénario 1A de 5 Mtep implique :

- une augmentation de 49 % des surfaces de colza-tournesol, en restant dans la fourchette de surface potentielle maximum indiquée par l'ONIGC ;
- une augmentation de 7 % des surfaces de céréales et de 36 % des surfaces de betterave. Dans le cas des céréales, si l'augmentation des surfaces peut être une évolution possible, la conversion des surfaces d'export apparaît plus proba-

ble. Quant à la betterave sucrière, plutôt qu'une augmentation de surfaces, c'est la diminution des quotas d'export qui oriente les récoltes vers la demande supplémentaire pour l'éthanol.

Le scénario 1B montre quant à lui peu d'effet de changement d'usage des sols puisqu'en dehors des surfaces de gel nu mises en cultures, les cultures implantées en 2030 sont de même genre que les cultures mobilisées en 2006.

Pour les scénarios 2 et 3, la surface de peupleraie disponible aux débouchés actuels diminue de moitié. Ceci peut impliquer une diminution des débouchés à l'horizon 2030 au profit de la production d'énergie et/ou une intensification de l'exploitation en TTCR de manière à produire des quantités similaires de bois sur une surface moindre.

Pour le scénario 2, la disponibilité du maïs de la moitié Sud diminue de 38,6 %. L'utilisation du maïs grain français est à près de 70 % dédiée à l'exportation, dont plus de 99 % à destination des pays de l'UE (ONIGC). La baisse de la disponibilité en maïs peut alors se justifier en partie par la diminution des activités d'élevage (voir ci-contre) mais également par le développement de l'autosuffisance en maïs des pays importateurs.

Pour le scénario 3, des surfaces de betterave sont quant à elles réquisitionnées sur la moitié Nord à la suite des baisses des quotas d'exportation de sucre européens ainsi que du remplacement de la production d'éthanol à partir de betterave par de l'éthanol lignocellulosique.

Impacts sur l'export de matières premières et la production de co-produits

La mobilisation de surfaces de cultures d'export concerne principalement le scénario 1A et, dans une moindre mesure, le scénario 1B (zone Sud). Concernant les oléagineux, l'essentiel des exports se fait vers l'UE, l'impact global apparaît donc pour ces scénarios peu significatif. Parmi les céréales, le blé est le plus impacté avec une baisse de 13 % de l'export global. En réponse à un scénario où les principaux producteurs européens d'éthanol poursuivent le développement de la filière à partir de céréales, les pays de l'ex-URSS (Russie, Ukraine, Biélorussie...) se positionnent déjà comme pro-

ducteurs de céréales à fort potentiel à destination de l'Europe occidentale. Enfin, l'importante baisse de l'export de sucre de betterave reste cohérente avec les réglementations actuelles de régulation mondiale du marché du sucre qui, depuis la campagne 2006-2007, ont fortement réduit les quotas européens d'exportations de sucre.

En 2030, les scénarios maximisant la production d'EMHV impliquent que la France est autosuffisante en tourteaux de colza et peut éventuellement substituer une nouvelle part de tourteaux de soja par le surplus de tourteaux de colza.

Dans l'hypothèse où les drêches pourraient remplacer 20 % de la ration globale des animaux d'élevage, 2 Mt seraient valorisables dans ce sens, permettant une économie d'autant en céréales.

Impacts sur la filière élevage

Pour un scénario mobilisant les 10 % de surfaces de prairie réglementaires pour un usage biocarburant, l'activité d'élevage peut être soit diminuée, soit intensifiée. En considérant une baisse proportionnelle d'UGB (unité gros bétail), on observe une diminution de 1,63 millions d'UGB en France. On peut en déduire une baisse proportionnelle de la demande en céréales pour l'alimentation animale de 950 000 tonnes de céréales. En y ajoutant la substitution de 2 Mt de céréales de l'alimentation animale par les drêches d'éthanoleries, on compte alors 2,95 Mt de céréales en surplus. Ce surplus de céréales correspond à un peu plus de la totalité de la quantité de céréales qui n'est plus exportée hors UE en 2030 (2,8 Mt) du fait de l'orientation d'une partie de cet export vers les biocarburants. Si ces chiffres étaient confirmés, les surfaces de blé et de maïs éthanol initialement prises sur les surfaces d'export n'auraient plus d'impact sur l'export extra-européen de céréales, puisqu'un surplus de céréales équivalent observé par ailleurs pourrait jouer ce rôle compensateur. En considérant une intensification de l'activité d'élevage, le chargement global passerait de 1,46 UGB/ha en 2006 à 1,55 UGB/ha en 2030. Si un tel taux de chargement était réglementairement toléré, cela impliquerait une gestion des prairies plus intensive et/ou un recours plus important aux aliments concentrés.

Tableau 15 – Quantités et origine des co-produits générés

	Quantités de co-produits	Remarques
Production supplémentaire de tourteaux de colza (2006-2030)	619 192 tonnes	= imports de tourteaux 2005 + 153 192 tonnes de surplus à valoriser
Production supplémentaire de drêches de blé et de maïs	2 463 133 tonnes	remplacement d'une part des céréales de l'alimentation animale

Pour les scénarios 2 et 3, la prairie est mobilisée respectivement à 13 et 26 % de la surface nationale. Les paysages changent peu car ces prairies sont pour la plupart mobilisées pour la culture d'espèces prairiales dédiées ; l'activité d'élevage peut en être cependant impactée. L'hypothèse d'une baisse des effectifs d'animaux d'élevage

peut être préférentiellement retenue dans la mesure où elle est justifiée par ailleurs par la mobilisation de parts similaires de la production de céréales (triticale et autres céréales à paille dans le Nord, maïs fourrage et ensilage dans le Sud) qui ne serait plus vouée à un débouché en alimentation animale.

Synthèse des caractéristiques des scénarios

Tableau 16 – Récapitulatif des filières impliquées dans les différents scénarios pour chacun des deux bassins d'étude

Scénario 1A		Scénario 1B						
	Espèce (carburant)	Rendement de récolte (t/ha)	Surface convertie 2030 (ha)	Mtep de carburant	Espèce (usage)	Rendement de récolte (t/ha)	Surface convertie 2030	Mtep de carburant
Bassin Seine-Normandie	Colza (EMHV)	4	518 616	0,76	Colza (EMHV)	4	427 884	0,63
	Blé (Ethanol G1)	10	215 260	0,47	Blé (Ethanol G1)	10	112 364	0,25
	Betterave (Ethanol G1)	80	125 620	0,50	Betterave (Ethanol G1)	80	34 387	0,14
					Luzerne (biométhane)	12	60 559	0,18
					Paille blé (biométhane)*			0,27
Total		859 496	1,73			635 194		1,47
Bassin Adour-Garonne	Colza (EMHV)	3,5			Colza (EMHV)	3,5	132 589	0,17
	Tournesol (EMHV)	2,8	173 566	0,19	Tournesol (EMHV)	2,8	138 244	0,14
	Blé (Ethanol G1)	8	116 292	0,20	Maïs (Ethanol G1)	10	29 091	0,07
	Maïs (Ethanol G1)	10	152 278	0,33	Paille blé/maïs (biométhane)*	0,7/5		1,14
Total		442 137	0,72			299 924		1,52
Scénario 2		Scénario 3						
	Espèce (usage = filières G2)	Rendement de récolte (t/ha)	Surface convertie 2030	Mtep de carburant	Espèce (usage = filières G2)	Rendement de récolte (t/ha)	Surface convertie 2030	Mtep de carburant
Bassin Seine-Normandie	Triticale plante entière	13	471 083	0,98	Luzerne	12	267 898	0,51
	Luzerne	15	281 213	0,67	Fétuque élevée	6	98 412	0,16
	Fétuque élevée	15	228 602	0,55	Fétuque-Trèfle	15	460 891	1,1
	Miscanthus	25	334 794	1,34	Miscanthus	15	493 207	1,18
	TTCR Peuplier	15	171 987	0,41	TCR Robinier	8	143 422	0,18
Total		1487 679	3,95			1463 830		3,13
Bassin Adour-Garonne	Maïs biomasse	25			Sorgho fibre	13	253 143	0,52
	Sorgho fibre	25	287 077	1,15	Fétuque élevée	6	68 936	0,06
	Switchgrass	20	404 190	1,3	Fétuque-Trèfle	14	262 275	0,59
	Canne de Provence	25	149 054	0,59	Miscanthus	13	265 390	0,55
	TTCR Eucalyptus	15	185 513	0,44	Switchgrass	12	132 290	0,25
		1487 679			TCR Eucalyptus	12	101 660	0,19
Total		1163 928	4,03			1083 694		2,16

* rendement en paille = rendement de pailles disponibles technico-économiquement (voir annexe 5)

Pression quantitative sur les ressources en eau

Ce chapitre concerne l'évaluation des impacts potentiels en termes de quantité. Il utilise des bilans hydriques de culture transposés à l'échelle des bassins. Les principaux résultats sont présentés à la suite de la définition des points de méthode. Des résultats plus détaillés sont présentés dans le rapport technique. Les ressources en eau, à la différence des ressources énergétiques que l'on peut plus naturellement appréhender de façon globale, sont plus fortement liées à un contexte local et territorial : elles sont diverses, peu transportables, et toutes ne sont pas affectées de la même façon par les pollutions ou les prélevements. Étudier les pressions sur l'eau nécessite de tenir compte *a minima* du caractère principalement local et territorial de ces ressources. Ainsi, les évaluations ne font de sens que dans une certaine cohérence de sols, climats et cultures. Ici, cette cohérence est recherchée à l'échelle des grands bassins hydrographiques. Cela conduit, en même temps, à tenir compte de ce caractère local, et à chercher une lecture globale des évaluations. Ce double objectif n'est pas usuel dans le domaine des ressources en eau, de même que les spécificités des milieux aquatiques sont rarement incluses dans les évaluations énergétiques. Aussi, pour faciliter la compréhension des pressions sur l'eau, ce chapitre présente-t-il sommairement le rôle de l'eau dans la production végétale, et expose les principaux éléments de la méthode. Cette dernière repose sur la détermination de cultures type et sur le calcul des différents termes de leur bilan hydrique, afin d'évaluer la pression sur les ressources en eau des différents scénarios à l'échelle des bassins. Les résultats sont présentés et comparés pour les différents indicateurs disponibles. Sur les deux bassins, les résultats comparatifs des huit scénarios sont présentés et analysés, en retenant les trois indicateurs les plus pertinents : déficit hydrique, prélevements d'irrigation, drainage. Les prélevements d'eau pour le fonctionnement des unités sont également situés et comparés à ceux de l'irrigation.

Cultures et ressource en eau

Bilan hydrique des cultures. La croissance végétale nécessite de fortes quantités d'eau, puisées par les racines et perdues par transpiration par les feuilles. La production de matière est directement liée à la quantité d'eau évaporée, de sorte qu'il n'est pas possible de produire beaucoup sans eau disponible en quantité. C'est dans le sol (un à deux mètres en dessous de la surface) que la plante pompe l'eau par ses racines. Le bilan hydrique des cultures renvoie au bilan en eau du sol de la culture, le sol jouant le rôle de réservoir dans lequel la plante puise son alimentation en eau. L'eau intervient dans la production végétale principalement par le processus d'évapotranspiration (ET). L'évapotranspiration est la combinaison de deux processus : la transpiration de la plante et l'évaporation du sol. Le phénomène de transpiration s'explique notamment par la perte d'eau des feuilles par les orifices ouverts au CO₂ provenant de l'atmosphère. Bien que seule la transpiration soit liée à la production végétale, l'évapotranspiration dans son ensemble a souvent été considérée, par approximation, comme facteur de la production végétale. Les modèles de croissance végétale actuels (tels que le modèle STICS, développé par l'INRA) distinguent bien la transpiration de l'évaporation du sol, et modélisent finement son interaction avec la production végétale. L'approximation, encore utilisée dans des modèles de croissance simplifiée, reste cependant toujours valable pour des évaluations à des échelles suffisamment larges (c'est le cas du modèle CROPWAT développé par la FAO). L'écriture du bilan, comme tout bilan conservatif, revient à écrire que les flux d'eau entrants, diminués des flux d'eau sortants, donnent la variation de la quantité d'eau contenue dans le réservoir considéré.

Bilan hydrologique. À la différence du bilan hydrologique des agronomes, qui concerne le sol, le bilan hydrologique des hydrologues s'intéresse aux ressources en eau qui sont alimentées par les sols captant l'eau des précipitations. Les ressources en eau sont constituées soit de nappes souterraines soit de ressources de surface.

Parmi les nappes souterraines, on distingue deux types : les nappes phréatiques et les nappes captives. Les nappes phréatiques sont alimentées directement par la part des précipitations provenant du sol par infiltration. Leur réservoir étant constitué souvent d'une roche poreuse reposant sur une couche imperméable, les nappes phréatiques sont sensibles aux variations climatiques et saisonnières. Les nappes profondes, ou captives, sont quant à elles séparées des flux provenant du sol par une ou plusieurs couches imperméables. Ces réservoirs ne sont alimentés que dans des zones particulières dites « de recharge », où une partie de la nappe reçoit les apports de la pluie. Souvent assez bien protégées des pollutions et peu sensibles aux variations climatiques, ces nappes peuvent toutefois être menacées par une exploitation quantitativement trop intensive. Les ressources de surface, qu'il s'agisse de lacs ou de cours d'eau, sont alimentées en eau par le ruissellement des sols, d'une part, et, d'autre part, par les nappes phréatiques ou profondes avec lesquelles elles échangent. Par exemple, un cours d'eau pourra recevoir des apports d'eau provenant d'une nappe souterraine avec laquelle il échange, dite nappe d'accompagnement, qui constitue un réservoir d'eau important dans lequel les transferts se font plus lentement que dans la circulation du cours d'eau. Ainsi, les phénomènes affectant les nappes affectent également les ressources de surface, souvent avec des effets retard.

Systèmes d'irrigation. Destinés à compenser l'insuffisance d'eau des climats relativement secs, ou à sécuriser la production en réduisant les effets des variabilités saisonnières ou interannuelles, les équipements et infrastructures d'irrigation concernent :

- la création de ressources, par la mise en place de lacs réservoirs ou, à plus petite échelle, de retenues collinaires ;
- la captation et le transport de l'eau, faisant appel à des ouvrages privés ou collectifs de pompage en nappe, de captage en rivière et d'acheminement vers les zones de production agricole ;

• la distribution de l'eau sur la parcelle, au moyen de différentes techniques possibles. Les techniques utilisées sur les bassins de l'étude fonctionnent par aspersion :

- rampes ou pivots se déplaçant pour apporter l'eau au-dessus des cultures. Ces systèmes, qui constituent un investissement important immobilisé sur la parcelle, sont adaptés aux cultures fortement et systématiquement irriguées ;
- canons projetant l'eau sur une distance assez importante. En général, le canon est raccordé par la conduite souple à un enrouleur qui déplace automatiquement le canon aspergeur sur la parcelle. Ces systèmes sont adaptés à l'irrigation de complément ainsi qu'aux zones inaptes à la mise en place de rampes : parcelles morcelées, déclivités importantes, etc.

Méthode d'évaluation des bilans hydriques et critères de pression

La méthode utilisée a été développée pour les besoins de l'étude, dans une approche classique, au Laboratoire Trefle. Elle repose sur un principe de changement d'échelle par construction de systèmes moyens représentatifs de la grande échelle « bassin hydrographique » pour laquelle on cherche à obtenir les résultats de l'évaluation. En appliquant cette méthode dans un but opérationnel d'évaluation sur les deux bassins d'étude, il s'agit :

- d'identifier et de définir les cultures-type de chacune des espèces considérées dans les scénarios – une culture-type est définie par une espèce, un sol (caractérisé par sa réserve utile), une conduite sous un climat donné –, représentatives de la grande échelle.
- d'évaluer les différents termes du bilan hydrologique pour ces cultures-type (évaporation annuelle, évaporation d'étiage, prélèvement annuel, prélèvement d'étiage, drainage annuel, drainage hivernal). Ces termes sont exprimés, sous forme d'un flux par unité de surface, en mm/période ou en m³/ha/période.
- d'exprimer les termes du bilan hydrologique dans les bilans de conversion de surfaces. Ces bilans de conversion 2006-2030 sous forme de matrices sont obtenus à partir des scénarios biomasse (voir p. 23). Les termes de *flux surfaciques* (en m³/ha/période), multipliés par des surfaces (en hectares), donnent des flux annuels qui sont exprimés en Mm³/an sur toute la surface convertie du bassin.

Les résultats, dont la représentativité est améliorée par des itérations entre la grande échelle (données statistiques) et l'échelle des cultures-type (processus gouvernant le bilan hydrique), sont également affinés par validation.

Le changement d'échelle

Les évaluations à l'échelle des bassins ont été menées par une approche de changement d'échelle basée sur la construction de systèmes modèles moyens. Ce type d'approche paraît pertinent pour des évaluations globales à grande échelle. Il permet notamment de produire des images réalistes de la situation globale, par calage des paramètres des systèmes moyens, correspondant au degré de précision requis dans les évaluations de la présente étude.

Les cultures-type ont été spécifiquement définies pour être utilisées pour les évaluations des pressions sur l'eau en quantité dans des scénarios à grande échelle (grand bassin hydrographique) et à long terme (horizon 2030). De ce fait, leur utilisation pour d'autres évaluations devrait nécessiter une validation préalable. Les cultures sont définies selon un modèle simplifié, par coefficients cultureaux adaptés de la méthode CROPWAT (FAO), pour être représentatives d'une situation moyenne sur les bassins étudiés. Le modèle n'est pas utilisé à des fins prédictives, mais pour construire une

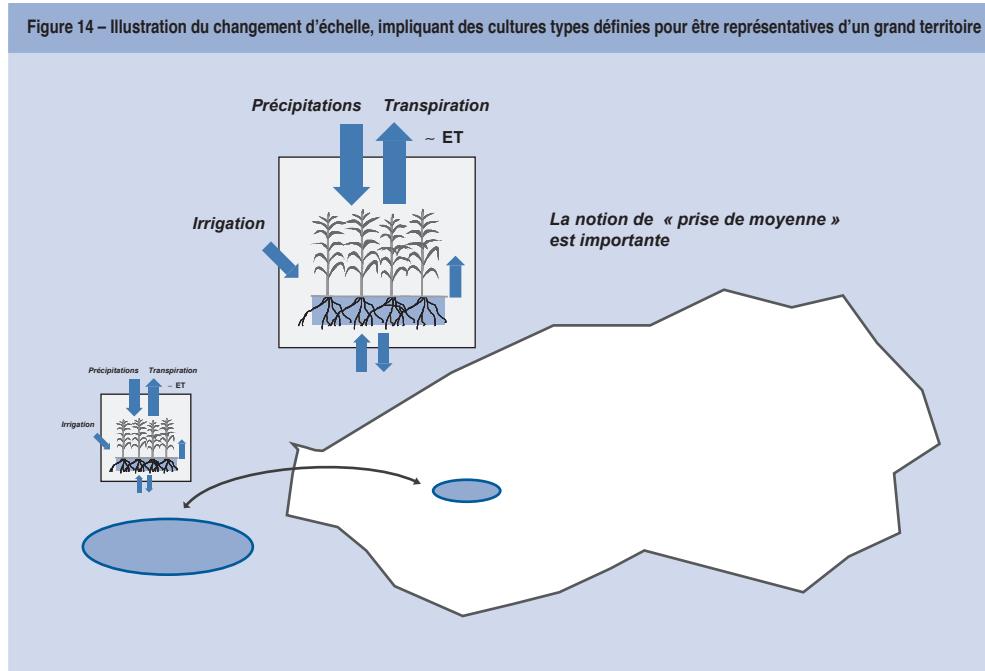
culture-type qui puisse être réaliste et représentative d'une situation à grande échelle. En particulier, différents modes de conduite de l'irrigation sont utilisables. On recourt au besoin au calage de certains paramètres (efficience d'utilisation de l'eau, doses d'irrigation, etc.) sur des valeurs existantes à grande échelle. Le calage à partir de données statistiques ou bibliographiques fournit certaines indications utiles sur la représentativité des cultures utilisées.

Les cultures-type

Une culture-type est définie, pour l'estimation des besoins en eau, par trois composantes :

- une plante, c'est-à-dire ici une espèce végétale générique. On distingue deux types de cultures : les cultures du Nord, et les cultures du Sud. Une même espèce végétale peut se retrouver sur les deux zones mais se distinguer par des niveaux de productivité différents ;
- un type de sol, ramené pour les besoins de l'évaluation en quantité d'eau à sa réserve facilement utilisable (RFU)¹⁰, exprimée en mm de lame d'eau. L'estimation des valeurs s'appuie sur les données INRA pour les deux bassins [RT] ;
- un mode de conduite de la culture (rendement, conduite d'irrigation, etc.). Le rendement, en particulier, peut être ajusté en cohérence avec les données statistiques disponibles.

Figure 14 – Illustration du changement d'échelle, impliquant des cultures types définies pour être représentatives d'un grand territoire



L'établissement du bilan hydrique

Le bilan hydrique est établi à partir de données climatiques moyennées pour les bassins considérés (Adour-Garonne, Seine-Normandie). Les besoins en eau des cultures, c'est-à-dire l'évapotranspiration de la culture, sont déterminés à partir de profils de coefficients culturaux adaptés, et de l'évapotranspiration de référence. Le bilan hydrique du sol est écrit de façon classique, par décades, en négligeant le ruissellement et les remontées capillaires. La production de matière sèche (m.s.) sur la saison est estimée par un coefficient d'efficience d'utilisation de l'eau moyen (EUE), spécifique à chaque culture.

Pour l'apport d'eau, plusieurs modes de conduite sont utilisés :

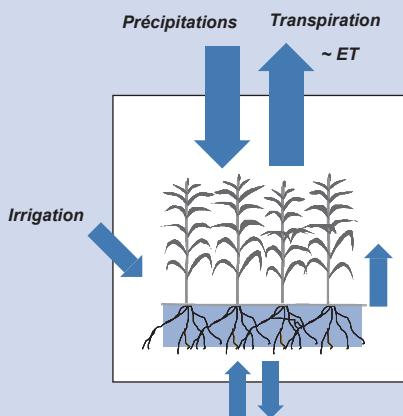
- pas d'irrigation ;
- irrigation à la demande ;
- irrigation systématique (apport d'une dose à dates fixes) ;
- des périodes sans irrigation peuvent être introduites, par exemple pour une conduite sans irrigation en période d'étiage.

Les prélèvements sont évalués à partir des apports d'eau, en tenant compte de l'efficience en eau des systèmes d'irrigation.

Les paramètres de calculs suivants sont pris en compte pour l'établissement des bilans hydriques :

Données climatiques. Les données climatiques utilisées (précipitations efficaces, évapotranspiration de référence) sont des données d'« année moyenne » définies dans la base CROPWAT. Cette méthode de calcul est simplificatrice et adaptée à la comparaison recherchée ; elle présente différentes limitations [RT]. Ces approximations sont acceptables si on considère que les cultures présentées sont conduites dans des conditions correctes de croissance, et que le modèle ne cherche pas à être prédictif mais descriptif. Elles sont en accord avec l'objectif de l'étude : comparer en base moyenne des situations fortement contrastées. Le résultat à ces échelles et avec ces objectifs n'est pas nécessairement moins fiable qu'avec d'autres méthodes, pour peu qu'il soit validé.

Figure 15 - Ecriture du bilan hydrique des sols cultivés



On observe le volume du stock

à deux instants : t et $t+\Delta t$

Période $\Delta t = 1 \text{ s}, 1 \text{ jour}, 10 \text{ jours}, 1 \text{ mois}, 1 \text{ an}, \dots$

Bilan hydrique de la réserve du sol

$$\underline{\text{Réserve utile}}(t+\Delta t) = \underline{\text{Réserve utile}}(t)$$

$$\begin{aligned} + & \text{Précipitations} + \text{Irrigation} + \text{Remontées capillaires} \\ - & \text{Evaporation (Sol+Plante)} - \text{Drainage} \end{aligned}$$

Description des sols (classes de sol par bassin).

Les sols représentatifs ont été redéfinis à partir de données INRA décrivant les surfaces par région en différentes classes de sol [RT]. Les sols-type sont en accord avec les distributions de classes de sols. Pour des questions de simplification, deux classes de sols-type ont été retenues pour l'évaluation des scénarios sur chacun des deux bassins : « moyennement profond » et « profond ».

Évaporation des cultures : profils des coefficients culturaux.

La méthode retenue est basée sur les coefficients culturaux (k_c) et l'évapotranspiration de référence (ET_{ref}). Le coefficient cultural est défini comme le multiplicateur, sans dimension, de l' ET_{ref} , définie comme étant l'évapotranspiration d'un gazon sous le climat considéré. Les avantages de cette méthode sont les suivants : simplicité et rusticité de la méthode, adéquation aux objectifs d'évaluation à grande échelle, lisibilité directe des profils, possibilité d'utiliser, par analogie, des profils approximatifs pour les nouvelles cultures encore incomplètement documentées.

Production de biomasse. La production de biomasse est estimée en relation avec l'ET, à partir d'un coefficient moyen d'efficience d'utilisation de l'eau (EUE). Cette approche globale, non prédictive, permet de situer une valeur moyenne de la productivité, considérée à l'échelle du bassin et en année moyenne, et de caler les caractéristiques et les profils de cultures.

Pratiques culturales et irrigation. En accord avec la constitution des scénarios, les pratiques culturales correspondent à une situation cohérente avec les productivités moyennes des cultures. Lorsqu'il y a irrigation, les doses sont déterminées en conformité avec la production de biomasse attendue et avec les pratiques couramment rapportées. Le choix du système d'irrigation dépend du type de la culture et de la nature des besoins en irrigation.

Les critères de pression quantitative

Le bilan permet d'exprimer différents indicateurs de pression en quantité sur les ressources en eau. On note en gras ceux qui désignent plus particulièrement des indicateurs de pression clés, et qui sont préférentiellement utilisés pour conclure sur l'impact quantitatif.

L'évaporation annuelle de la culture correspond au volume d'eau évaporé par le système « sol + plante » pendant la période de la culture.

L'évaporation annuelle totale correspond au volume d'eau évaporé par le système sol + plante pendant toute l'année.

Le déficit hydrique d'étiage désigne le manque d'eau structurel apparaissant à la période d'étiage. La période d'étiage est définie arbitrairement, pour les besoins de l'étude, comme identique sur les bassins Adour-Garonne et Seine-Normandie, soit la période allant du 30 juin au 1^{er} octobre. Le déficit hydrique d'étiage, compté positivement, est l'opposé du bilan hydrique d'étiage, qui est fréquemment négatif – si la durée de la période choisie pour l'étiage est correctement définie. Les améliorations recherchées sont des réductions du déficit hydrique d'étiage.

Le drainage annuel est le volume d'eau total alimentant les nappes phréatiques, lorsque les apports des précipitations atteignent des sols saturés en eau (réserve utile remplie à 100 %) et que l'excès d'eau alimente les nappes souterraines. Quantitativement avantageux en termes de recharge des nappes, le drainage est pénalisant lorsque l'eau drainée présente de fortes concentrations en nitrates (lessivage des nitrates formant les fuites d'azote des sols vers les nappes).

Le drainage hivernal (de novembre à février) correspond à la fraction du drainage intervenant en période hivernale, c'est-à-dire en particulier au moment où les cultures ne puisent pas d'azote dans le sol pour leur croissance. Cette période est généralement celle pour laquelle les fuites d'azote des cultures sont concentrées. Le niveau des fuites dépend toutefois fortement de la plante elle-même, selon le reliquat d'azote qu'elle laisse dans le sol, et de divers facteurs de variabilité.

Le prélèvement annuel est le volume d'eau prélevé annuellement pour l'irrigation, compte tenu des doses apportées et du rendement des installations d'irrigation (canons, pivots ou rampes).

Le prélèvement d'étiage¹¹ est la fraction des prélèvements effectués en période d'étiage pour l'irrigation. Ce critère présente une importance toute particulière pour l'état des ressources en eau à la période critique estivale, lorsque ce sont des ressources de surface ou de nappe phréatique qui sont mobilisées.

En pratique, le déficit hydrique d'étiage, les prélèvements annuels et les prélèvements d'étiage constituent les indicateurs les plus pertinents pour évaluer les impacts potentiels sur la quantité d'eau. Le drainage est également présenté ici. Il est à noter que l'évaporation elle-même pour-

rait constituer un indicateur utile, mais qu'elle entre bien évidemment dans la formation du déficit hydrique.

Profils de bilans hydriques des bassins

Les différents termes du bilan hydrique sont estimés pour chacune des cultures des scénarios. Il s'agit de simulations de cultures, reposant sur un modèle simplifié et non prédictif. Ces simulations utilisent des valeurs moyennes pour les caractéristiques des sols, des cultures et des climats. Elles permettent, notamment, de caler assez simplement les cultures étudiées en tenant compte des rendements attendus. De façon générale, les simulations permettent de retrouver les valeurs moyennes observées dans la production agricole actuelle, à l'échelle des bassins (statistiques régionales), ce qui constitue une assez bonne validation du modèle tant que les situations extrêmes ne sont pas à considérer¹².

Les profils de bilans hydriques ont été établis pour chacune des cultures des scénarios. Les productions de biomasse estimées servent au contrôle de la cohérence des résultats.

Il est à rappeler que pour les cultures énergétiques, les coefficients culturaux servant à l'évaluation des besoins en eau sont estimés, lorsqu'ils ne sont pas documentés, par analogie avec d'autres cultures existantes et par les informations dispon-

nibles sur la culture (dates de la croissance végétale, productivités atteintes, etc.)¹³.

La figure 17 présente un exemple du profil de bilan hydrique. On y note :

- la teneur en eau du sol, au début et à la fin de la décennie (courbes en noir et en gris). L'échelle est normalisée entre 0 et 100 % ;
- l'évapotranspiration (courbe en bleu clair) ;
- le bilan hydrique du sol (courbe en blanc), qui devient négatif (déficit hydrique) dès que l'évapotranspiration dépasse les précipitations (courbe en bleu foncé) ;
- les valeurs d'infiltration du drainage par décennie, lorsque le sol saturé reçoit des apports météorologiques supérieurs à l'évapotranspiration (barres bleu clair) ;
- les repères indiquant la réserve de survie (bleu pointillé) ;
- le repère indiquant la période d'étiage retenue pour l'étude (noir pointillé).

Les données de culture nécessaires pour l'évaluation à grande échelle sont produites et présentées dans des fiches culture [RT]. Les fiches cultures, produites à partir des bilans hydriques, regroupent :

- les résultats des simulations, représentés sous forme de profils temporels de bilans hydriques ;
- les valeurs de bilan obtenues en bilan annuel et à l'étiage ;
- les paramètres utilisés pour l'estimation.

**Figure 16 – Les termes du bilan hydrique obtenus pour différentes cultures type en Seine-Normandie
(En légende : Culture Seine-Normandie, réserve utile du sol en mm, « sec » ou dose d'irrigation apportée en mm)**

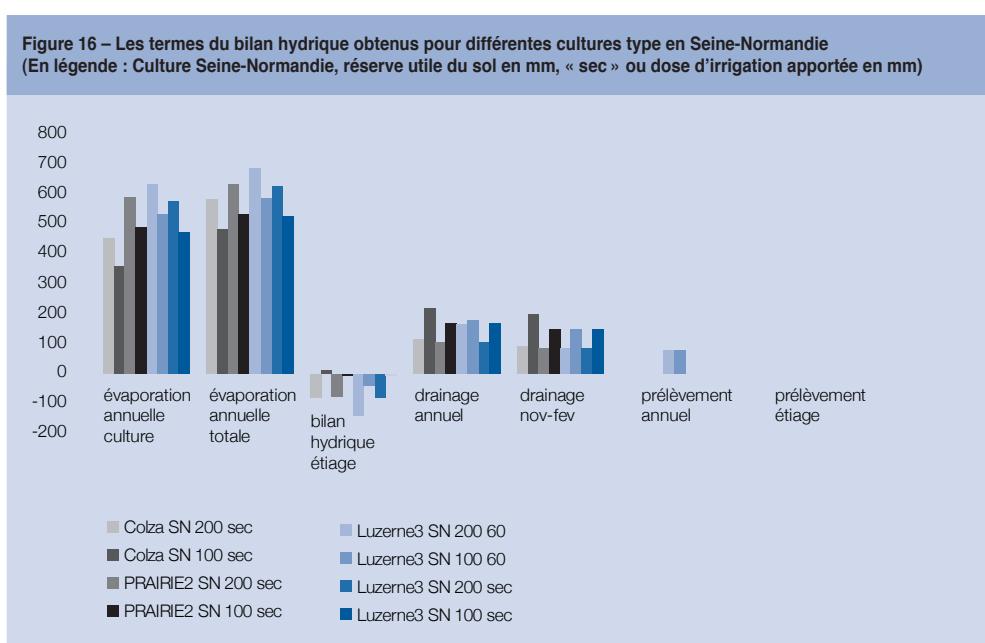
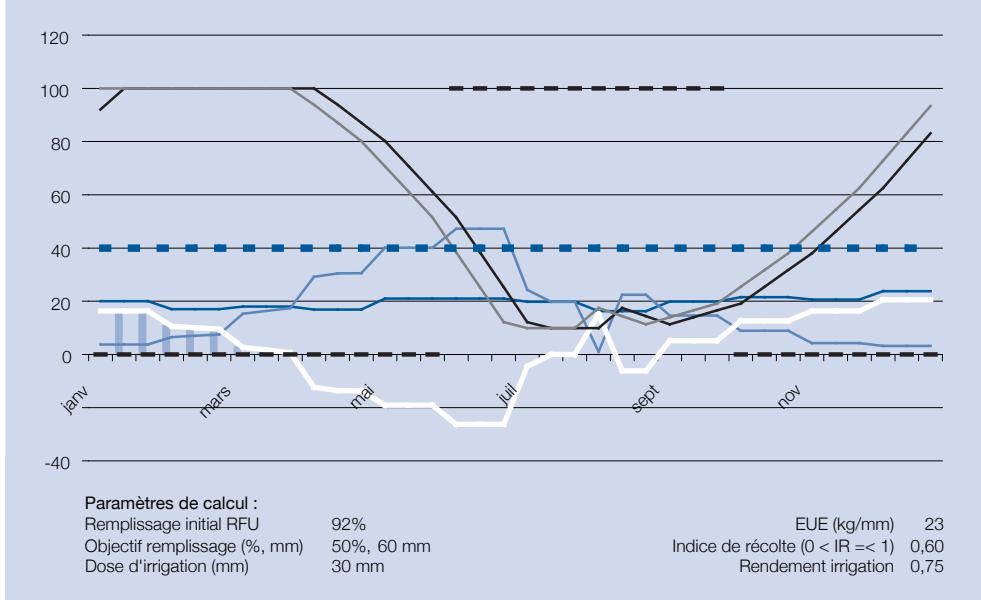


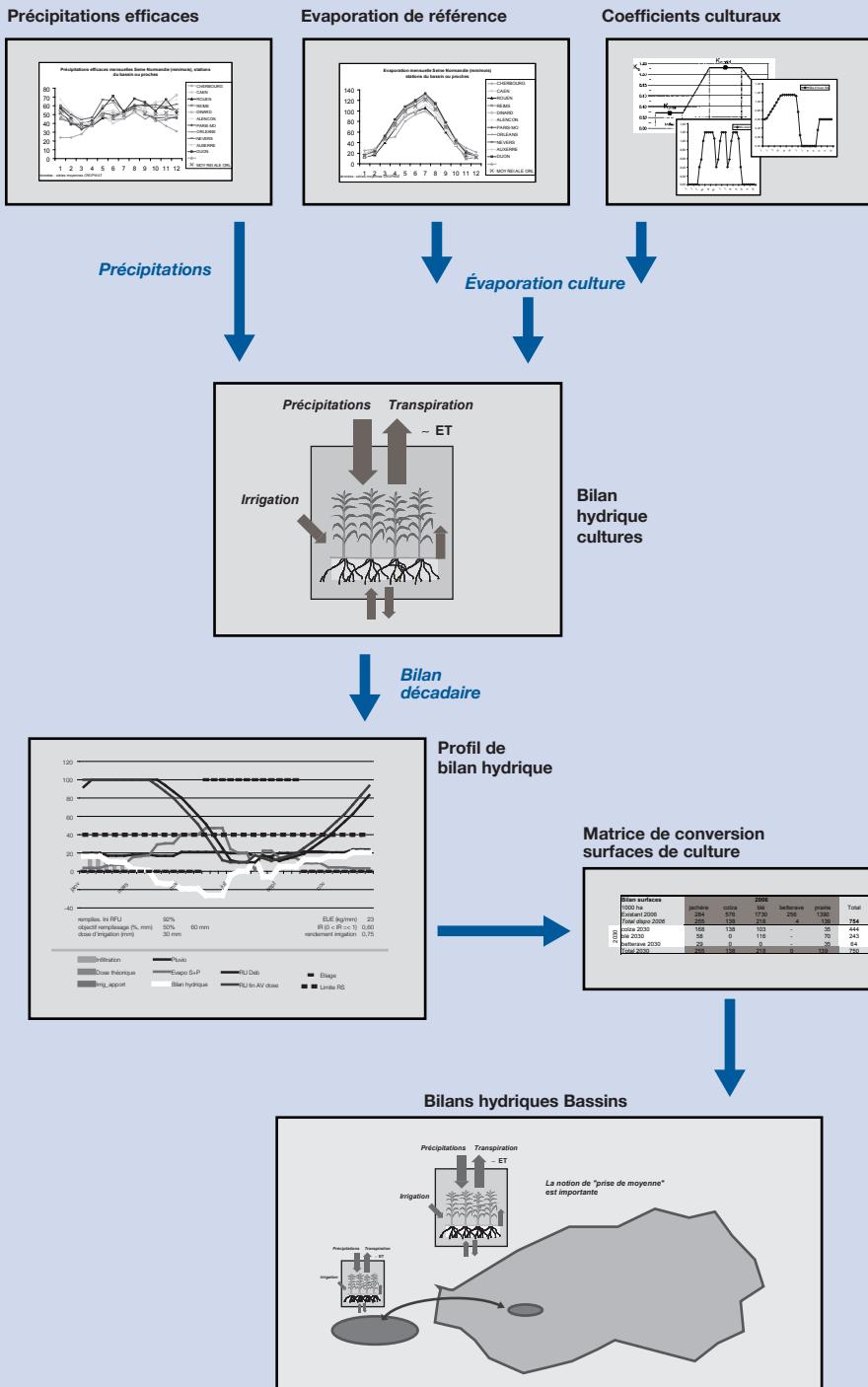
Figure 17 - Exemple de profil de bilan hydrique obtenu pour le blé d'hiver en Seine-Normandie



* Cette donnée ne concerne que les cultures irriguées. L'exemple choisi (blé hivernal) étant une culture pluviale, elle n'apparaît pas sur le graphique.

Production biomasse (t m.s.)	12,6
Récolte (t m.s.)	7,6
Réserve utile (RU, en mm)	200
Réserve facilement utilisable (RFU, en mm)	120
Evaporation culture (P+S) (mm)	547
Evaporation totale année (mm)	838
Apport d'irrigation (mm)	0
Prélèvement irrigation (mm)	0
Bilan hydrique étiage (mm)	-85
Prélèvement étiage (mm)	0
Drainage total (mm)	66
Drainage nov-fev (mm)	63
Précipitations efficaces (mm)	707
Evapotranspiration de référence (ET_{ref}) (mm)	785

Figure 18 – Illustration de la démarche d'évaluation des bilans hydriques



Les résultats sont présentés de façon détaillée pour chacun des huit scénarios entre 2006 et 2030 dans le rapport technique.

À titre d'exemple, les types de résultats obtenus pour le scénario 1A en Adour-Garonne sont présentés ici. Le scénario 1A se traduit par un fort accroissement des termes clés du bilan, susceptible de dégrader l'état des masses d'eau :

- prélèvements annuels et prélèvements à l'étiage : + 270 Mm³ (près de 30 % d'accroissement par rapport aux prélèvements sur les surfaces initiales en 2006) ;

- déficit hydrique d'étiage (auquel est lié le besoin d'irrigation) : + 240 Mm³ (soit un accroissement de + 12 % par rapport au déficit des surfaces initiales, et de 165 % par rapport à celui des surfaces convertibles) ;

- drainage hivernal : + 80 Mm³ (soit plus de 20 % de variation relative sur les surfaces converties).

L'évaporation annuelle des cultures se réduit en raison du remplacement de surfaces de prairies et de jachères en couvert végétal par des cultures d'hiver.

Tableau 17 –Bilan hydrique pour les surfaces de référence et les surfaces converties en 2006 et 2030, sur l'exemple du scénario Adour-Garonne 1A, et matrices de conversion associées

AG S1A (Mm ³ /an)	Initial Bassin 2006	Total converti 2006	Initial Bassin 2030	Variation relative 2030-2006	Total converti 2030	Variation relative 2030-2006	Total 2030-2006
Evaporation annuelle culture	14259	2127	14114	-1,0%	1981	-6,8%	-145
Evaporation annuelle totale	17138	2422	17284	0,9%	2568	6,0%	146
Déficit hydrique étiage	2048	146	2289	11,8%	387	165,3%	241
Drainage annuel	3781	516	3897	3,1%	633	22,5%	116
Drainage nov-fev	2738	516	3897	3,1%	520	19,4%	84
Prélèvement annuel	967	1	1245	28,7%	278	x500	277
Prélèvement étiage	967	1	1245	28,7%	278	x500	277

Bilan surfaces							2006	AG1A
1000 ha	jachère nue	colza*	tournesol*	blé*	maïs	prairie	Total	
Référence 2006	278	79	314	466	609	1199	2945	
Convertibles 2006	207	53	23	39	0,3	120	442	
colza-tournesol 2030	56	53	23	10		32	174	
blé 2030	66			12		38	116	
maïs 2030	86			16	0	50	152	
Converties 2030	207	53	23	39	0,3	120	442	

Déficit hydrique d'étiage							2006	AG 1A
(Mm ³ /an)	jachère nue	colza*	tournesol*	blé*	maïs	prairie	Total	
Initial Bassin 2006	109	43	263	-3	1 444	5	1861	
Converti 2006	81	29	19	0	1	1	130	
colza-tournesol 2030	-24	0	-20	6		-2	-41	
blé 2030	-60			0		-20	-79	
maïs 2030	158			38	0	110	306	
Définition (2030-2006)	74	0	-20	44	0	89	186	

* dont cultivés sur jachères industrielles, ACE et surfaces d'export

Comparaison des scénarios

Les huit scénarios de l'étude sont comparés entre eux, pour chacun des termes.

Bilan de conversion de surfaces

Les évaluations de bilans hydriques à l'échelle des bassins sont construites sur les matrices de conversion des surfaces. Les scénarios, exprimés sous forme de tableaux de conversion des surfaces entre 2006 et 2030, permettent ainsi de mettre en évidence le différentiel (2030 – 2006), culture par culture pour chaque bassin. Ce différentiel est utilisé pour exprimer les variations des différents postes du bilan hydrique (en Mm³) en fonction des surfaces mises en jeu et des valeurs unitaires des postes du bilan obtenues pour les différentes cultures (en mm).

Les variations sont exprimées, pour les différents critères, en volume (Mm³). Ces variations doivent être comparées à des états de référence, car les volumes seuls (ou les flux seuls) sont dans certains cas assez peu explicites. Parmi les types de surfaces définis, on se réfère à trois niveaux pour chacun des critères étudiés :

- la valeur brute obtenue pour les surfaces converties : il s'agit de la fraction des surfaces convertibles réellement convertie en surfaces biocarburants dans les scénarios ;
- la valeur brute obtenue pour les « surfaces de référence 2006 » (définies p. 22). On rappelle que, de façon approximative, les surfaces de référence, introduites pour situer l'ampleur des pressions en référence à l'agriculture des bassins, représentent une surface comprise entre un tiers et la moitié de la SAU des bassins ;
- les valeurs indicatives obtenues pour l'ensemble du bassin. Le tableau 18 indique les ordres de grandeur des principaux termes du bilan. Il rappelle les sur-

faces totales concernées (superficie du bassin, SAU totale) et présente une estimation en ordre de grandeur des principaux termes du bilan hydrique, la base de calcul étant ici une culture-type de prairie.

Évaporation de la culture

Ce terme n'est pas le plus opérationnel de ceux utilisés pour l'évaluation, les flux naturels étant de grande ampleur sur les bassins. Il permet toutefois de signaler si l'emprise d'un scénario est significative ou non sur les grands flux naturels. Les deux scénarios qui modifient le plus ce terme sont les scénarios S2 AG (+ 1000 Mm³/an entre 2006 et 2030) et S2 SN (+ 800 Mm³/an). En ordre de grandeur, l'évaporation totale des bassins peut s'accroître de près de 2 %. L'influence, en termes d'impacts, d'une telle variation de pression, n'est pas discutée ici. On note cependant que 2 % de modification d'un flux naturel à l'échelle de territoires équivalents à un sixième du territoire national représentent une variation non négligeable, sans qu'il soit possible de la traduire en termes d'impacts sur les ressources. Les autres indicateurs (prélèvements, drainage...) sont plus explicites.

Déficit hydrique d'étiage

La figure 19 compare les pressions pour les huit scénarios en termes de déficit hydrique d'étiage. Les résultats sont donnés en valeurs absolues pour les surfaces converties et pour les surfaces de référence, ainsi que, pour les seules surfaces converties, en valeurs relatives, c'est-à-dire rapportées à la quantité de carburant produite (en m³/tep).

Sur Adour-Garonne comme sur Seine-Normandie, le scénario S1A et le scénario S2 conduisent à augmenter de façon notable le déficit d'étiage, jusqu'à doubler la valeur 2006 pour les surfaces converties (S1A-AG, S2-AG). Mobilisant des surfaces très im-

Tableau 18 - Ordres de grandeur des principaux termes du bilan hydrique des sols, pour la surface totale et pour la SAU des bassins AG et SN (valeurs indicatives)

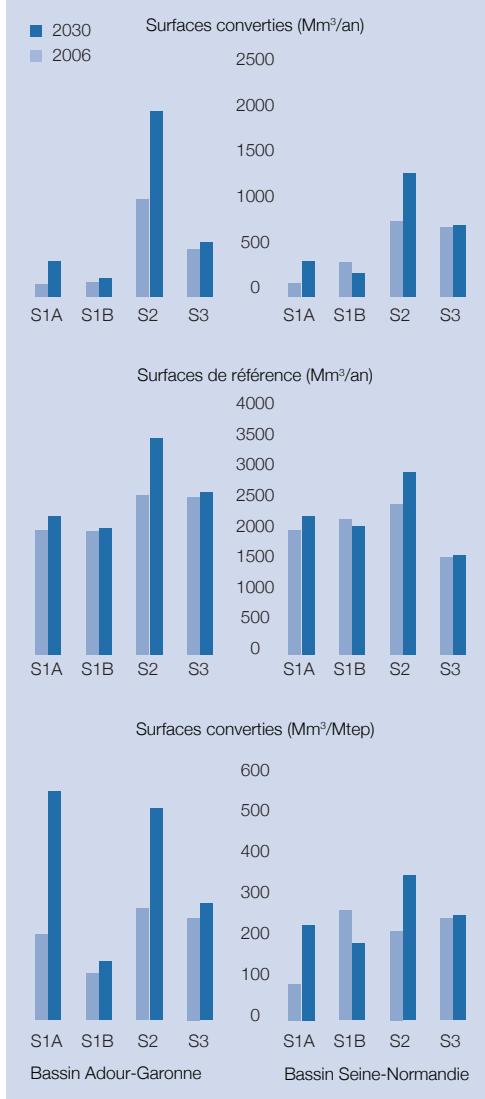
	Surface totale Bassin		SAU Bassin	
	Adour-Garonne	Seine-Normandie	Adour-Garonne	Seine-Normandie
Surface Bassin (Mha) ¹	11,60	9,70	4,96	5,92
Évapo. annuelle totale (Mm ³) ¹	60000	50000	30000	30000
Bilan hydrique étiage (Mm ³) ¹	-4500	-100	-2000	-50
Drainage annuel (Mm ³) ¹	15000	15000	6000	10000
Prélèvement annuel (Mm ³) ²			1000	160 (80 à 200)
Prélèvement étiage (Mm ³) ²			800	120 (hyp.75%)

1. Calcul estimatif sur la base d'un couvert de prairie

2. Selon les statistiques des agences de l'eau

portantes, le scénario 2 montre une influence significative en comparaison du déficit hydrique d'étiage des surfaces de référence, ces dernières étant par ailleurs assez comparables à la SAU des bassins. Sur Adour-Garonne, en particulier, l'accroissement du déficit représente près de 40 % de celui des surfaces de référence. Cela peut être attribué à l'utilisation de cultures à forte productivité, avec irrigation (il est à noter que les apports d'irrigation, augmentant l'eau évaporable par les cultures, ne sont pas comptés dans le calcul du déficit hydrique).

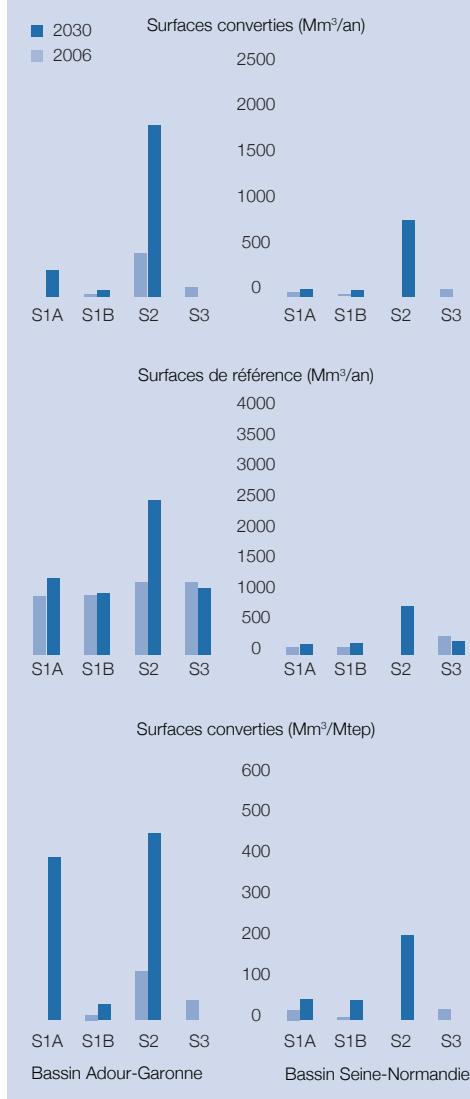
Figure 19 – Comparatif des 8 scénarios pour le déficit hydrique d'étiage, en valeurs absolues et rapportées à la quantité d'énergie produite



Prélèvements annuels et d'étiage

La figure 20 compare les prélèvements annuels (ou totaux) en valeurs absolues et en valeurs relatives, c'est-à-dire rapportées à la quantité de carburant produite (en M³/tep). Les scénarios S1B et S3 s'avèrent effectivement « améliorants » car ils résultent en de très faibles accroissements voire à des réductions des prélèvements (S3 en AG et en SN). En revanche, le scénario 2 repose sur une très forte intensification des prélèvements en AG (en valeurs arrondies, + 1200 Mm³/an, + 1000 Mm³/an

Figure 20 – Comparatif des 8 scénarios pour les prélèvements annuels, en valeurs absolues et rapportées à la quantité d'énergie produite



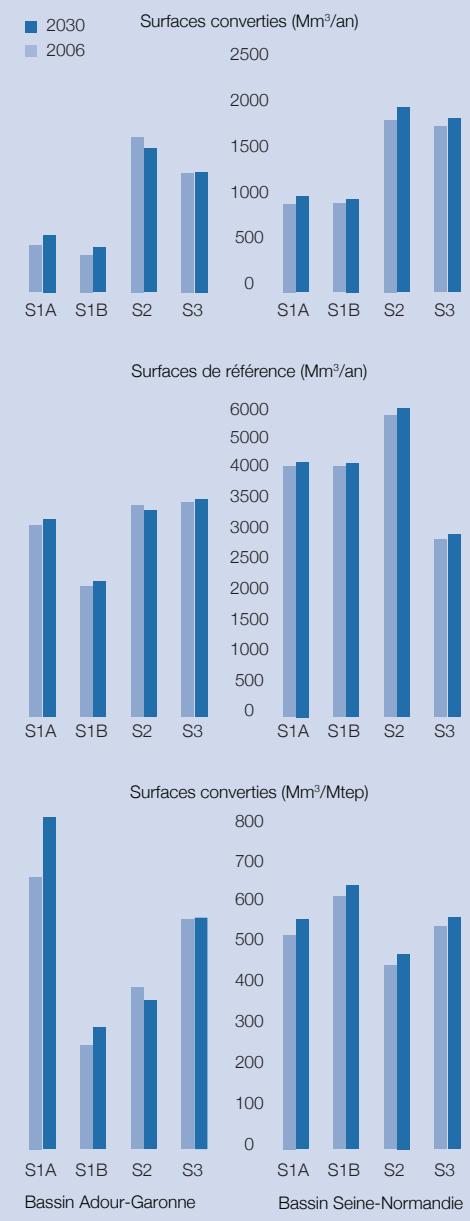
à l'étiage) et en SN (+ 800 Mm³/an, + 600 Mm³/an à l'étiage). On note que le S2 en SN ajoute 800 Mm³/an aux prélevements existants sur des surfaces comptées comme non irriguées (jachères, blé, prairies, ...). Cela représente l'équivalent de 6 à 8 fois les prélevements totaux du bassin. Les prélevements à l'étiage ont également été étudiés [RT]. Les résultats sont assez comparables pour les prélevements annuels et à l'étiage, car l'essentiel des prélevements a lieu pendant l'étiage. Le choix des cultures, et la définition des pratiques d'irrigation, expliquent cette proximité. En effet, les cultures mises en œuvre, lorsqu'elles sont irriguées, ont principalement des besoins estivaux. Les différences qui apparaissent, en particulier pour le scénario 2, mettant en œuvre des cultures pérennes, sont peu significatives.

Drainage annuel et drainage hivernal

La figure 21 compare les pressions en termes de drainage annuel entre 2006 et 2030 pour les surfaces de référence et les surfaces converties. Les variations relatives du drainage semblent peu significatives dans le cas des surfaces de référence (de + 1 % à + 3 % selon les scénarios), et plus notables pour les surfaces converties (de + 1 % à + 23 % selon les scénarios). Les scénarios 1A et 1B, qui déplacent des cultures annuelles sur des surfaces incluant des jachères, présentent le plus fort accroissement de pression, notamment sur Adour-Garonne (AG). On note en particulier que le scénario 1B, en AG, aggrave moins fortement le drainage hivernal qu'il n'aggrave le drainage annuel, alors que la situation est inverse pour Seine-Normandie (SN). Globalement, les scénarios font apparaître, toutes proportions gardées :

- un drainage « moyen à élevé » (de 43 à 131 Mm³/an) : en AG, c'est le cas des scénarios S1A (116 Mm³/an) et S1B ; en SN, les quatre scénarios présentent un écart du simple (S1B : 43 Mm³/an) au triple (S2 : 131 Mm³/an). Les caractéristiques climatiques de SN expliquent en partie ce résultat. Pour envisager l'influence sur les fuites d'azote, il y aura lieu de tenir compte des concentrations sous cultures, qui varient fortement selon les types de cultures (pérennes, annuelles), les espèces, les précédents culturaux, et présentent une sensibilité climatique interannuelle très forte.
- un drainage « faible » (S3 AG : 11 Mm³/an) ou négatif (S2 AG - 130 Mm³/an). Ces scénarios reposant massivement sur des cultures pérennes ont classiquement pour effet « d'assécher » la lame d'eau drainante, dans un climat à déficit hydrique plus fort qu'en SN. Qualitativement, ils devraient s'avérer

Figure 21 – Comparatif des 8 scénarios pour le drainage annuel, en valeurs absolues et rapportées à la quantité d'énergie produite



avantageux en termes de fuites d'azote, mais pas en termes de recharge des nappes.

Éléments de discussion

Les indicateurs de prélevement sont les plus significatifs pour la gestion des ressources, et les plus usuellement employés. Ils fournissent les résultats

les plus contrastés, puisque certains scénarios font appel fortement, ou non, à des cultures irriguées. L'augmentation de l'irrigation pour les scénarios intensifs peut être considérée comme très significative, tant en Adour-Garonne qu'en Seine-Normandie. Le déficit hydrique est un indicateur moins fréquemment utilisé, mais qui s'avère très discriminant. Il nécessitera, en dehors du cadre de l'étude, de pousser plus loin la réflexion sur les valeurs de référence, ainsi que sur la sensibilité des milieux à ses variations.

Il y aura lieu, pour améliorer l'analyse, de comparer les scénarios sous l'éclairage des volumes de biomasse et de carburant produit. Au premier ordre, on peut retenir que :

- les scénarios 1A, les moins productifs en volume de carburant, génèrent toutefois des accroissements de pressions significatives, du fait de la nature des cultures nécessaires aux filières de première génération ;
 - les scénarios 1B, intermédiaires entre le S1A et l'option améliorante, présentent de meilleures valeurs d'indicateurs, notamment pour les prélevements ;
 - les scénarios 2, très fortement productifs et intensifs, augmentent significativement les pressions, en particulier pour les prélevements d'irrigation ;
 - les scénarios 3 apparaissent significativement améliorants en Adour-Garonne et Seine-Normandie.
- Dans certains cas, la variation 2030 – 2006 conduit à améliorer l'existant 2006 (prélevements du S3 AG et SN, déficit hydrique du S1B AG).

Besoins en eau des unités de production de biocarburants

Les besoins en eau des unités de transformation peuvent être principalement liés à deux natures d'utilisation : l'eau de process, et l'eau de refroidissement. La première utilisation consiste en une incorporation à différents stades du process (dilution, lavage...), et peut le cas échéant être impliquée dans différents recyclages. La seconde

est rendue nécessaire pour l'évacuation de la chaleur résiduaire de certains process, notamment dans les technologies de deuxième génération. Ces besoins en eau requièrent une utilisation d'eau sur le site.

L'approvisionnement en eau du site, pour ces utilisations, repose sur des prélevements d'eau dans les ressources naturelles : il s'agit de l'eau prise dans le milieu naturel, qu'elle soit ou non retournée au milieu après utilisation. Le plus fréquemment, les sites industriels disposent de leurs ouvrages d'approvisionnement en eau, en particulier pour des débits élevés.

Le refroidissement peut s'opérer de deux façons :

- en circuit ouvert (RCO) : l'eau, prélevée dans un cours d'eau ou en littoral, récupère la chaleur excédentaire dans un échangeur et est restituée non loin du point de prélevement avec un échauffement pouvant aller de quelques degrés à une dizaine de degrés ;
- en circuit fermé (RCF) : l'eau en sortie d'échangeur est envoyée dans une tour de refroidissement évaporatif (réfrigérant atmosphérique humide), où une faible fraction du flux circulant dans le circuit de refroidissement s'évapore et évacue la chaleur vers l'atmosphère.

Prélevements annuels totaux

Les estimations de prélevement par scénario, d'après les valeurs indicatives du rapport technique, sont données dans le tableau 19, qui distingue les deux options extrêmes : circuit ouvert et circuit fermé. La première conduit à des prélevements importants en S1A et surtout S2 et S3.

Ces prélevements, que l'on peut comparer aux prélevements industriels totaux en France (environ 5 000 Mm³/an), ainsi qu'à ceux du refroidissement des centrales thermoélectriques (environ 15 000 Mm³/an), sont significatifs. Toutefois deux remarques tempèrent ce constat :

- L'eau de refroidissement est restituée aux cours d'eau, contrairement à l'eau d'irrigation. Ainsi, le besoin en eau de refroidissement est très peu

Tableau 19 - Prélevements annuels totaux (en Mm³) avec refroidissement en circuit ouvert et fermé

Mm ³ /an	S1A		S1B		S2		S3	
	Circuit fermé	Circuit ouvert						
France	35	435	15	180	255	6565	185	4750
Adour-Garonne	5	55	5	35	50	1315	30	715
Seine-Normandie	10	140	10	90	50	1315	40	1035

consommateur de ressource, tout au plus conduit-il à évaporer un peu plus d'eau que ne le ferait naturellement le cours d'eau. Il se traduit en revanche par une contrainte d'implantation des unités au voisinage de cours d'eau importants et présentant un débit moyen élevé, ou en littoral. Cette contrainte, qui s'ajoute à celle de la collecte de la biomasse, ne doit pas être négligée.

- Le recours au circuit fermé peut relâcher la contrainte d'implantation, quoique des cours d'eau de débit suffisant doivent encore être disponibles. Les coûts d'investissement devraient être plus élevés qu'en circuit ouvert, notamment sur les grandes unités de deuxième génération.

Prélèvements agricoles

La figure 22 compare pour les huit scénarios les prélèvements des unités à celles de la production agricole irriguée. Le refroidissement évaporatif conduit à des prélèvements relativement négligeables par rapport à ceux de l'irrigation. Il en va de même pour la consommation nette, ces deux types de prélèvement étant par nature destinés à l'évaporation ou l'évapotranspiration. Le refroidissement en circuit ouvert requiert des prélèvements dont l'ordre de grandeur est le même que celui de l'irrigation ; toutefois l'impact sur les ressources devrait être moindre compte tenu du retour de la quasi-totalité de l'eau au milieu naturel d'origine dans ce mode de refroidissement.

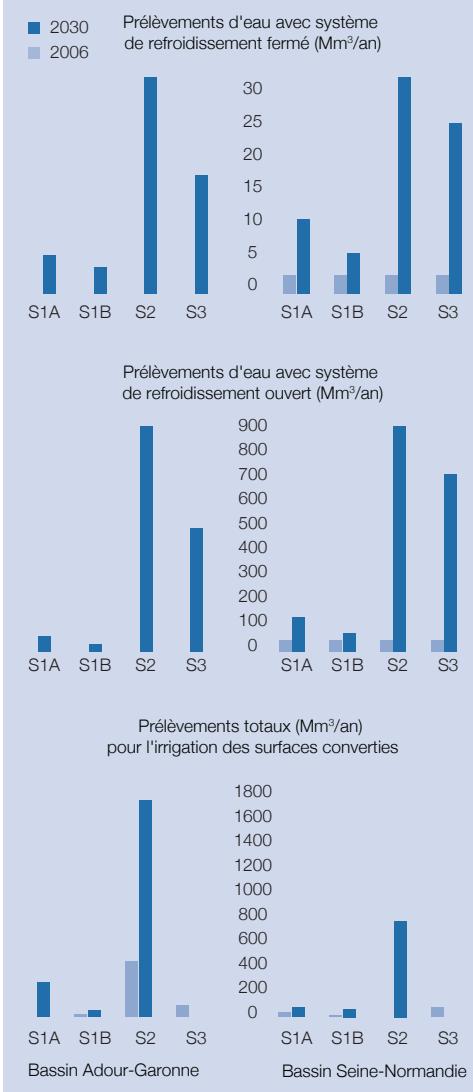
Conclusions

L'évaluation des pressions en quantité des quatre scénarios de l'étude sur les deux grands bassins, à partir d'une méthode spécifique, permet de comparer les scénarios assez clairement. Ces évaluations à grande échelle de chacun des termes du bilan hydrique des sols de culture semblent cohérentes. Les indicateurs les plus pertinents et les plus discriminants sont les prélèvements annuels et le déficit hydrique d'étiage – le second étant un des déterminants du premier. Les prélèvements d'étiage peuvent être liés au choix de la culture, mais aussi de sa conduite. À l'exception des scénarios améliorants, ils n'apparaissent guère différents des prélèvements annuels, du fait des modes de conduite de l'irrigation retenus dans les cultures des scénarios. L'évaporation totale semble constituer un indicateur intéressant, mais d'interprétation plus difficile.

S'attacher à comparer les situations Nord et Sud revient à comparer une situation à faible déficit hydrique structurel, généralement peu irriguée, à une situation à plus fort déficit hydrique structurel, généralement irriguée pour une partie importante des cultures :

- sur Seine-Normandie, l'agriculture actuelle (150 Mm³/an d'irrigation dans les années 2000) est structurellement peu dépendante de l'irrigation, à l'exception de cultures spécifiques (betterave) et de zones particulières (céréales de Beauce) ;

Figure 22 – Prélèvements en eau pour les unités en circuit fermé et en circuit ouvert en comparaison avec les prélèvements agricoles des scénarios



- sur Adour-Garonne, l'agriculture actuelle (1000 Mm³/an d'irrigation dans les années 2000) est structurellement liée à l'irrigation.

Du point de vue des indicateurs de déficit hydrique et d'irrigation, les différents scénarios donnent lieu à des évolutions sensiblement comparables en Seine-Normandie et en Adour-Garonne. Ce sont les niveaux de départ qui diffèrent significativement. Ainsi, à l'exception des plus forts accroissements (scénario 2), le critère de quantité d'eau reste moins significatif sur Seine-Normandie que sur Adour-Garonne.

Concernant l'indicateur « prélèvements », qui est le plus directement opérationnel, on observe à l'échelle des bassins les grandes tendances suivantes :

- les prélèvements s'accroissent de + 30 % à + 40 % pour les scénarios SN-1A, SN-1B et AG-1A ;
- ils restent sensiblement stables pour le scénario AG-1B ;
- ils augmentent massivement pour AG-2, passant de 1 200 à 2 500 Mm³/an et pour SN-2, passant de 0 à 800 Mm³/an,
- ils diminuent pour SN-3 (- 25 %) et pour AG-3 (- 8 %)

C'est indéniablement le scénario 2 qui dégrade le plus fortement l'indicateur « prélèvements », traduisant un très fort accroissement de la pression en quantité. Une part très importante des prélèvements se situant en période d'étiage, cet accroissement des prélèvements a tout lieu de conduire à une forte pression sur les ressources, en particulier les cours d'eau.

S'agissant des options améliorantes :

- Le scénario 1B, qui n'améliore pas la situation mais la dégrade moins que ne le fait le scénario 1A, constitue bien une amélioration du scénario 1A :
 - sur Adour-Garonne, les prélèvements annuels et les prélèvements d'étiage restent quasiment stables (+ 4 %, au lieu de + 29 % pour le AG-1A) ;
 - sur Seine-Normandie, même si les prélèvements annuels du SN-1B augmentent un peu plus qu'avec le SN-1A (+ 56 Mm³/an au lieu de + 39 Mm³/an), les prélèvements d'étiage s'accroissent beaucoup plus faiblement (+ 15 Mm³/an au lieu de + 39 Mm³/an), du fait de l'option d'irrigation choisie afin de soulager la période critique de l'étiage.
- Le scénario 3, quant à lui, améliore la situation 2006 à l'échelle du bassin (- 95 Mm³/an en Adour-Garonne ; - 78 Mm³/an en Seine-Nor-

mandie) et *a fortiori* améliore très nettement le scénario 2. Dans le scénario 3, le choix d'une priorité environnementale permet d'obtenir une amélioration générale de la situation des masses d'eau : ce scénario tire parti des avantages environnementaux que proposent les cultures énergétiques lorsqu'elles sont conduites selon des pratiques de préservation des ressources. Il apporte une amélioration dans l'absolu, contrairement au scénario 1B qui conserve une partie importante de pratiques conventionnelles et, de ce fait, n'améliore les résultats qu'en comparaison du scénario 1A.

Impact sur la qualité des ressources en eau : la pression azote

Les pressions en termes de qualité des ressources en eau, dues au développement des cultures pour les scénarios, portent sur deux aspects : la pression « nitrates », objet du présent chapitre, et la pression « phytosanitaires », traitée dans le chapitre suivant.

Les nitrates sont une des formes chimiques sous lesquels l'azote, nécessaire à la croissance des végétaux, est présent dans les sols. Le bilan azote des cultures est plus délicat à produire que le bilan hydrique. Pour l'évaluation, les valeurs de drainage précédemment obtenues pour les cultures-type ont été combinées avec les évaluations de fuites de nitrates à l'échelle des bassins. Sur les deux bassins, les résultats comparatifs des huit scénarios sont présentés et analysés, en retenant les deux indicateurs disponibles : fuite d'azote et concentration moyenne en nitrates dans le drainage. Les résultats pour ces premiers critères de qualité d'eau complètent ceux obtenus pour la quantité.

Cycle de l'azote

L'azote intervient dans la production végétale comme fertilisant, et comme constituant de la matière organique produite¹⁴. Comptant pour un sixième de la masse des protéines, il peut représenter 1 % à 2 % de la biomasse sèche produite. L'objet de la production agricole étant d'exporter une partie des productions hors des parcelles agricoles, il y a lieu de renouveler les apports d'azote des cultures, lorsque les apports naturels sont insuffisants. On s'intéresse alors au bilan des apports d'azote au sol et des exports d'azote du sol vers les plantes, les nappes et l'atmosphère. Les apports d'azote peuvent prendre différentes formes :

- par lessivage atmosphérique : les apports sont en général mineurs, mais non négligeables, par rapport aux besoins des espèces cultivées ;
- par fertilisation : les apports peuvent être minéraux (engrais de synthèse, réclamant une consommation d'énergie fossile), ou organiques (fumiers, lisiers, boues de stations d'épuration – autant de formes de retour à des parcelles agricoles des minéraux préalablement exportés lors de la récolte) ;
- par la fixation d'azote par des bactéries se développant en symbiose dans des nodosités racinaires – uniquement pour certaines espèces végétales annuelles, pérennes ou arborescentes, les légumineuses (pois, soja, luzerne, robinier, etc.) ; les apports contribuent alors très fortement voire totalement à la couverture des besoins.

D'un point de vue physiologique, la plupart des espèces végétales captent dans le sol des ions nitrate (NO_3^-) dans lesquels elles puisent tout ou partie de leur alimentation azotée. Ces derniers, qui sont la forme d'azote assimilable par la plante, constituent également la forme la plus mobile de l'azote dans le sol. Le lessivage des sols par les pluies ou l'irrigation excessive peut engendrer des fuites d'azote, quittant le sol en direction des nappes phréatiques, et source de pollution par les nitrates. Ces fuites d'azote seront d'autant plus importantes que :

- le flux de drainage est important ;
- la concentration en nitrates dans la lame d'eau drainante est élevée ;
- les caractéristiques du système racinaire de la plante sont telles qu'il ne reprend qu'une faible part de l'azote disponible dans le sol.

On pourra, par exemple, rencontrer ces conditions de pompage d'azote insuffisant lorsque :

- la structure et la composition du sol limite le développement racinaire, facilite le drainage, ou

encore a une faible capacité à retenir les éléments azotés ;

- le climat implique une faible croissance de la plante limitant ainsi ses besoins en éléments azotés et ses capacités à les capturer ;
- l'aptitude de la plante elle-même à développer, ou non, un système racinaire efficace pour le pompage d'azote (par exemple, le maïs est moins apte que le sorgho à développer, dans un même sol, un système racinaire efficace).

La façon dont l'azote est capté et assimilé par la plante est complexe. L'azote existe en effet sous plusieurs formes dans le sol (organique et minérales). L'azote organique, qui se trouve dans les plantes, les résidus des cultures précédentes ou les déchets en cours de décomposition dans le sol, ou encore dans les fertilisants organiques (lisiers, fumiers, boues de stations d'épuration urbaines), n'est pas accessible aux plantes pour leur croissance : il constitue un stock dont la minéralisation remet progressivement l'azote à disposition des plantes.

Cette minéralisation de l'azote organique par des bactéries du sol produit différents composés : nitrites, puis nitrates, qui constituent presque exclusivement la seule forme d'azote du sol assimilable. Elle se caractérise par des temps de minéralisation assez longs, dépendant de la composition du sol et de celle de la matière organique (par ex. le rapport carbone sur azote). Cela conduit à une mise à disposition progressive et différée des nitrates, pour les plantes ou pour le lessivage selon la période considérée.

Les apports d'azote minéral peuvent également provenir des engrains de synthèse, destinés à compléter les apports de la minéralisation. La fertilisation efficace et raisonnée des cultures nécessite l'établissement d'un bilan azote prévisionnel tenant compte du précédent culturel, de la nature du sol et de la production attendue de la culture. Les apports d'azote, minéraux, organiques ou organo-minéraux (formes d'azote minérales différentes des nitrates), peuvent être fractionnés. Ils doivent tenir compte du fait que :

- la minéralisation de l'azote du sol (issu du précédent culturel) est progressive et ne libère pas nécessairement l'azote dans le temps des besoins des plantes ;
- la mise à disposition de l'azote des fertilisants est elle aussi progressive (organo-minéraux) ;
- la culture considérée laissera elle-même un reliquat d'azote non nul : une situation contraire

serait caractéristique d'une sous-alimentation azotée de la plante, c'est-à-dire de conditions de croissance trop éloignées de l'optimum¹⁵.

La notion d'excédent d'azote doit être appréciée en connaissance de cette caractéristique. La présence d'un reliquat d'azote étant systématique dans la conduite des grandes cultures annuelles, il s'agira d'apprecier les fuites d'azote correspondantes en sachant que des mesures correctives peuvent, ou non, être mises en place (cultures intermédiaires pièges à nitrates ou CIPAN).

Particularités du bilan azote sur la parcelle

Pour décrire correctement les fuites d'azote des cultures-type, il est nécessaire d'établir des bilans azote agronomiques, exprimant les différents postes du bilan (minéralisation, émissions gazeuses, lessivage), afin :

- de prendre en compte la nature du sol (dans les bilans hydriques déjà établis, seule la profondeur du sol est prise en compte) ;
- d'exprimer le devenir du reliquat d'azote après récolte, pour les cultures annuelles, en fonction de la rotation culturelle. Ce reliquat peut varier fortement, selon que la culture est effectuée en succession, en rotation, ou en succession avec culture intermédiaire.

Deux différences notables sont ainsi à prendre en compte entre le bilan hydrique et le bilan azote :

- L'écriture du bilan azote pour une culture nécessite de connaître le précédent culturel et le reliquat d'azote de la culture précédente.

• Les différentes formes possibles de présence de l'azote n'ont pas la même mobilité et la même disponibilité pour les cultures, ni le même impact potentiel sur les ressources en eau. L'azote passe de formes non assimilables et non mobiles (c'est le cas de l'azote organique incorporé à la biomasse en décomposition) à la forme assimilable par minéralisation : ce sont les nitrates qui sont assimilables par les cultures. Ils sont également les plus mobiles, et de ce fait les plus susceptibles de migrer vers les nappes souterraines. Dans le sol, il faut prendre en compte des temps caractéristiques d'évolution entre les formes de l'azote, dont l'estimation requiert de connaître les caractéristiques du sol, la quantité initiale des différentes formes d'azote dans le sol, etc. Nécessitant beaucoup de connaissances agronomiques, ces estimations sont le fait de spécialistes.

Formation des fuites d'azote et gestion de l'interculture

Les fuites d'azote, formées principalement par le lessivage des nitrates en direction des nappes souterraines, dépendent directement :

- du flux de drainage (en m³/ha/période) ;
- de la concentration du drainage sous-racinaire (en mgN/l ou mgNO₃-/l).

Il y a lieu de distinguer, pour les plantes annuelles, deux périodes dans l'année :

- la saison de croissance, entre le semis (ou la levée) et la récolte ;
- l'interculture, qui désigne la période entre la récolte et le semis (ou la levée) de la culture suivante.

De façon générale, la concentration en nitrates sous culture, pendant la saison de croissance, est presque systématiquement supérieure à 50 mg/l pour la majorité des plantes annuelles cultivées (on peut sur cette période rencontrer des valeurs de 100-200 mg/l). L'apport des fertilisants et la minéralisation mettent en effet à disposition de la plante une quantité de nitrates importante pendant la saison. Toutefois, le plus fort de la saison de croissance intervenant généralement en période de déficit hydrique, ou de situation proche de l'équilibre hydrique, le drainage de l'eau sous culture est généralement modéré ou nul. De la sorte, les fuites d'azote sous culture peuvent être considérées comme faibles, à l'exception de situations pouvant générer un fort drainage sous culture (dans le cas d'une irrigation en excès par exemple).

C'est à l'interculture qu'ont lieu, dans la majorité des situations, l'essentiel des fuites d'azote. En effet, cette période est caractérisée par :

- un drainage important pendant l'hiver, une fois la réserve utile du sol reconstituée par les précipitations automnales et hivernales ;
- la minéralisation du reliquat d'azote dans le sol, qui peut être complète lorsque l'interculture est longue ;
- une absence de couvert végétal si le sol est laissé nu, se traduisant par un drainage élevé et une absorption nulle de l'azote minéralisé.

La maîtrise des fuites d'azote passe donc par :

- le recours aux rotations culturales, certaines plantes étant très aptes à reprendre une partie du reliquat d'autres plantes ;
- la mise en place, au titre des mesures agro-environnementales, de « cultures intermédiaires pièges à nitrates » (CIPAN). Il s'agit de mettre en place, pour l'interculture, un couvert végétal, souvent peu productif, dont l'effet est à la fois de réduire le drainage par rapport à un sol nu (la plante évapore de l'eau pour sa croissance), et de pomper une partie significative des nitrates disponibles dans le sol. La culture intermédiaire peut ainsi constituer un stockage temporaire de l'azote et le remettre, sous forme organique à minéraliser, en circulation pour la culture suivante, sachant bien que cet azote aurait été perdu par drainage en l'absence de cette pratique.

Bilans d'azote régionaux

On peut trouver une estimation des bilans d'azote nationaux et régionaux réalisés à partir d'enquêtes (apports d'azote), et de calculs conduits sur la base des statistiques de production agricole¹⁶. Cette méthode simplifiée permet de situer les ordres de grandeur des apports et des excédents d'azote. Elle n'a pas d'autre portée que de fournir des estimations en ordres de grandeur. Elle présente l'avantage, bien qu'étant approximative, de rassembler des informations à caractère statistique, à l'échelle des régions et du territoire national. Le solde du bilan ne traduit pas nécessairement les fuites d'azote vers les ressources en eau, car d'autres transferts peuvent être impliqués (échanges atmosphériques), mais il en fournit l'ordre de grandeur. Selon les années, le solde du bilan compte pour quelques centaines de milliers de tonnes d'azote en excédent.

Le tableau 20 indique pour différentes années le solde du bilan azote national. En tenant compte de la contribution des autres bassins, notamment ceux qui présentent des fortes applications de fertilisants organiques comme le bassin Loire-Bretagne, on peut considérer, pour les deux

Tableau 20 – Bilan azote national (en milliers de tonnes d'azote) réalisé par le SCEES à partir de statistiques agricoles

	1988	1990	1993	1995	1997
Engrais minéraux	2489	2621	2132	2243	2432
Engrais organiques	1318	1152	1278	1266	1240
Utilisation de l'azote par plantes	-3322	-3058	-3147	-3191	-3265
Solde du bilan	485	715	263	318	407

bassins Adour-Garonne (AG) et Seine-Normandie (SN), que l'excédent azoté devrait représenter de 100 000 à 300 000 tonnes d'azote (tN) par an. Des évaluations plus récentes (bilans IFEN) fournissent des valeurs d'excédent encore supérieures. Toutefois, il faut préciser que l'excédent azoté se traduit en fuites, mais aussi en émissions atmosphériques, et ne prend pas en compte la succession culturelle. Les résultats obtenus dans la présente étude, pour les scénarios en cultures agricoles conventionnelles, peuvent totaliser sur SN et sur AG jusqu'à 100 000 tN/an de fuites évaluées. Il est donc important de noter que l'ensemble des résultats de la présente évaluation constitue vraisemblablement une estimation basse des flux d'azote, restant dans les ordres de grandeur mais ne pouvant surestimer les fuites. Cette constatation est en cohérence avec les hypothèses et choix de calage des cultures-type de l'étude, qui visent à éviter les surestimations.

Méthode d'évaluation du bilan azote

Les aspects méthodologiques de l'étude ont porté sur l'approche des difficultés relatives au bilan de l'azote. En effet, l'écriture du bilan azote d'une culture-type pose plusieurs types de difficultés méthodologiques :

- la détermination du reliquat d'azote dans le sol dû au précédent cultural ;
- la sensibilité, plus forte que celle rencontrée pour le bilan hydrique, aux hétérogénéités (liées par exemple à la composition et à la profondeur du sol) et aux variabilités (variabilité interannuelle d'origine climatique par exemple) ;
- la présence de nouvelles cultures non documentées.

Plusieurs méthodes ont été envisagées dans l'étude : méthode rapide basée sur le drainage des cultures-type, méthode de bilan azote des cultures-type affinées, par simulation STICS en rotation (avec expertise INRA), etc.

La méthode retenue est celle qui combine les évaluations de drainage obtenues par les bilans hydriques de cultures-type avec des valeurs de concentration moyenne en nitrates dans le drainage. Ces dernières sont obtenues à dire d'expert et par recherche bibliographique. La figure 23 fournit quelques exemples de valeurs typiques de concentration de nitrates dans le drainage sous-racinaire, et montre bien les familles de cultures vis-à-vis des fuites d'azote. La figure 24 illustre l'ampleur des variations interannuelles possibles. Le rapport technique fournit davantage de précisions sur les valeurs disponibles et

Figure 23 - Estimation de la teneur en nitrates des eaux sous-racinaires sur le bassin du Grand Morin, pour l'année 1995 (d'après Sebilo et al., 2000 ; valeurs en mgN/l à multiplier par 4,33 pour obtenir l'équivalent NO₃)

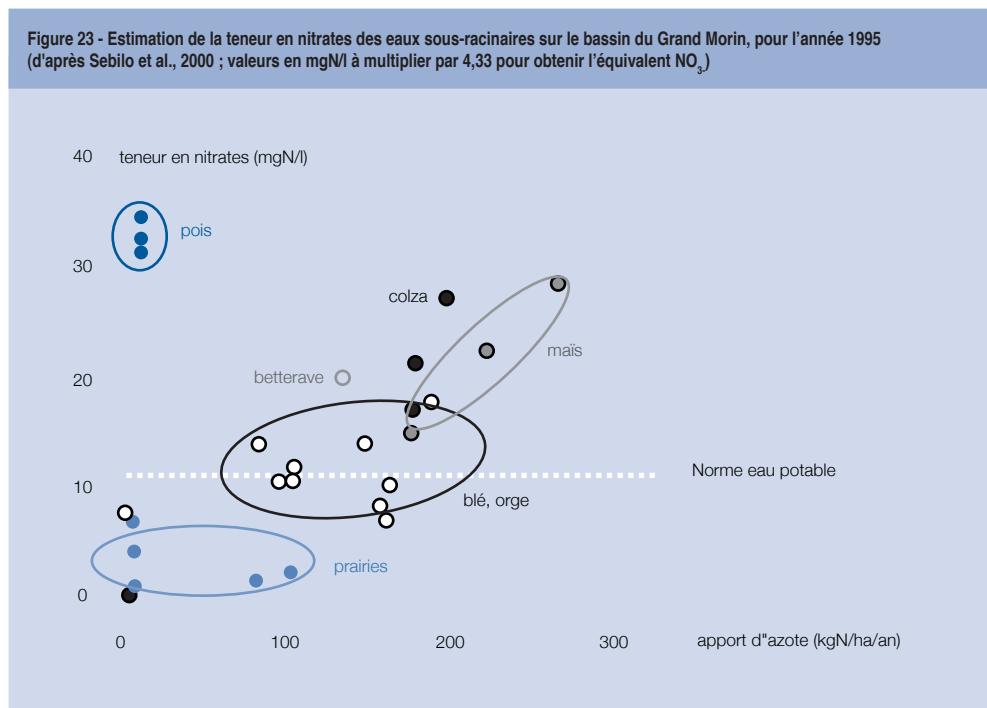
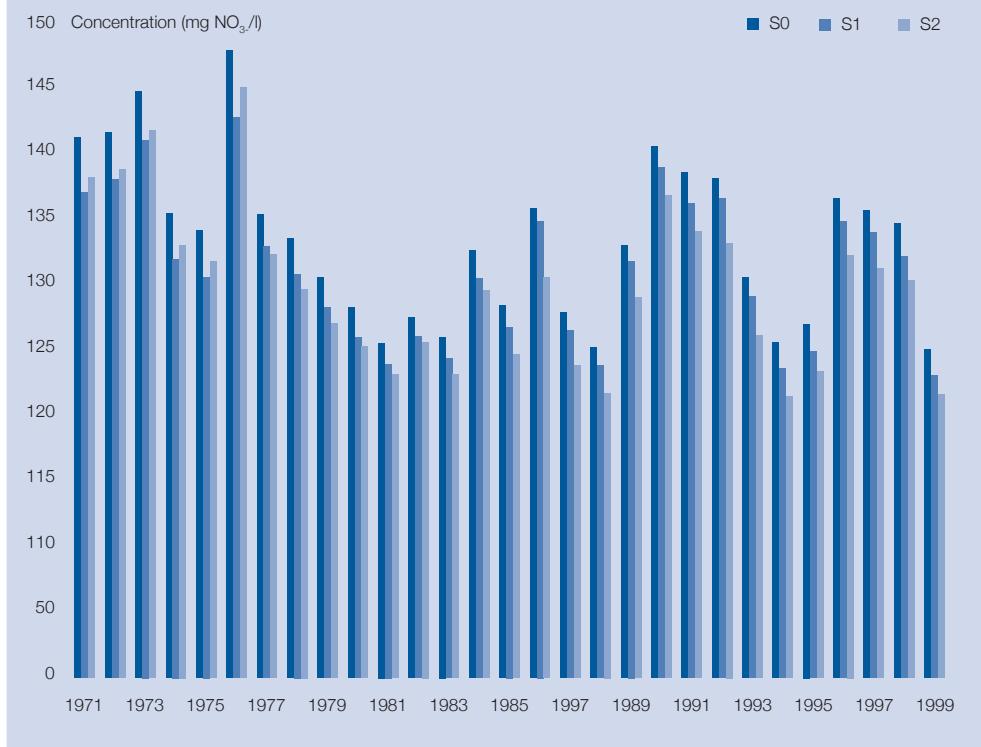


Figure 24 - Comparaison des concentrations sous-racinaires sur les zones cultivées du bassin de la Marne selon trois scénarios agronomiques (d'après Gomez et al., 2002)



sur celles retenues dans l'étude. L'influence de certains paramètres a fait l'objet d'une étude de sensibilité sommaire. La méthode de simulation de cultures-type en rotation avec STICS, nécessitant la définition de zonages plus fins des bassins étudiés, a été partiellement testée sur Adour-Garonne et a permis de fournir certaines valeurs de référence pour cette étude.

Analyse par scénario sur les grands bassins : exemple du scénario 1A en Seine-Normandie

Le scénario 1A sur Seine-Normandie conduit à un accroissement significatif des fuites d'azote, en termes de flux : environ + 8 300 tN/an, à comparer au flux des surfaces existantes (41 900 tN/an, + 20 %) et à celui des surfaces converties (10 500 tN/an, + 79 %). Le scénario 1A convertit en cultures une partie de sols à faibles fuites, mais aussi des surfaces de grandes cultures converties, avec les mêmes cultures, à la production d'énergie.

La concentration en nitrates dans le drainage sous-racinaire :

- augmente de 6 mg/l, et conduit la concentration moyenne des sols « existants » à atteindre le seuil de potabilité ;
- augmente de 27 mg/l, et conduit la concentration moyenne des sols « convertis » à dépasser nettement le seuil de potabilité.

Étant entendu que ces valeurs, après dilution par les lames drainantes d'autres surfaces sur les bassins, ne seront pas celles observées en réalité dans le milieu, on retient :

- un net dépassement de la valeur de référence de 50 mg/l pour les surfaces converties ;
- une contradiction forte avec les objectifs de la directive cadre sur l'eau (DCE).

Au niveau des conversions de sols, les contributions les plus significatives à l'accroissement sont la mise en culture annuelle conventionnelle des jachères et des prairies, d'une part, ainsi que, dans une moindre mesure, la conversion de blé 2006 en colza.

Tableau 21 – Fuite d'azote et concentration en nitrates du drainage sous-racinaire pour les surfaces de référence et les surfaces converties en 2006 et 2030, sur l'exemple du scénario Seine-Normandie 1A, et matrices de conversion associées

SN - S1A	Référence 2006	Référence 2030	Convertible 2006	Converti 2030
concentration nitrates (mg/l)	37,1	43,3	45,7	72,5
fuite azote (tN/an)	41 889	50 238	10 508	18 857
drainage annuel Mm ³	5 008	5 142	1 018	1 152
Surfaces (1000 ha)	4255	4255	859	859
Bilan surfaces				
		2006		
1000 ha	jachère nue	colza*	tournesol*	blé*
Référence 2006	284	577	43	1704
Convertibles 2006	255	298	1,8	223
	43%	52%	4%	13%
colza 2030	80	298	1,8	104
blé 2030	27			118
betterave 2030	14			77
Converties 2030	121	298	2	223
				77
				139
				859
Fuite N (tN/an)				
		2006		
1000 ha	jachère nue	colza*	tournesol*	blé*
Initial Bassin 2006	103	10 844	1 028	21 400
Converti 2006	44	5 599	43	2 796
colza 2030	2 778	0	20	651
blé 2030	511			0
Betterave 2030	595			0
(2030-2006)	3 884	0	20	651
				0
				1 155
				1 186
				1 453
				2 048
				3 795
				8 349

* dont cultivés sur jachères industrielles et ACE (blé/orge mélangés)

Comparaison des scénarios

L'indicateur de fuite d'azote globale renseigne sur le flux total d'azote quittant les sols agricoles en direction des ressources en eau (nappes phréatiques, ressources de surface). Il s'agit d'un indicateur quantitatif permettant des comparaisons globales de pression azote.

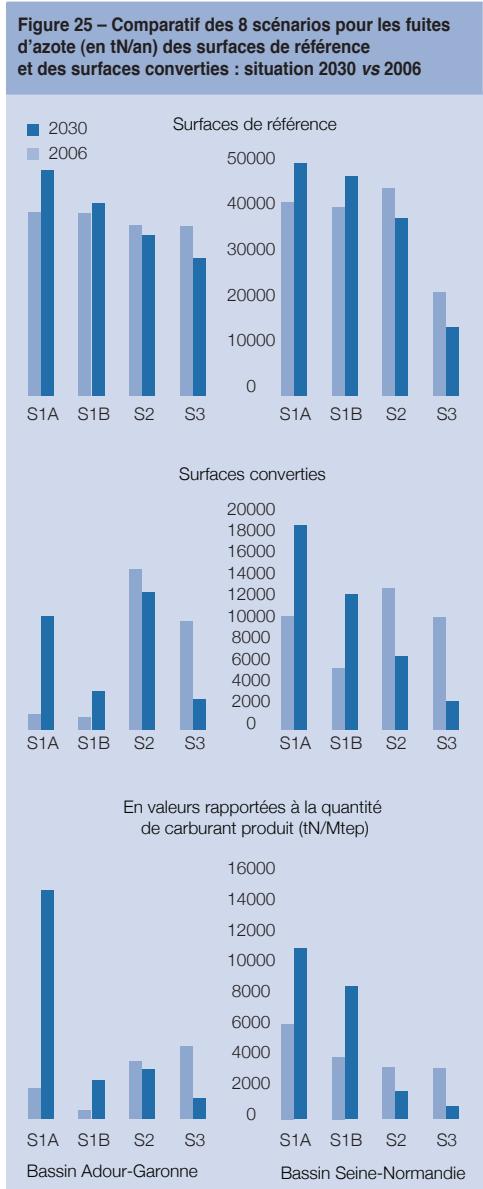
L'indicateur de concentration moyenne en nitrates dans le flux de drainage sous-racinaire apporte une information complémentaire : il permet de situer les tendances associées aux scénarios par rapport à la qualité des ressources, en termes de seuils de potabilité « nitrates ».

Fuite d'azote

Au niveau des surfaces de référence en cultures intervenant dans les scénarios, on note que (figure 25) :

- les scénarios S1A et S1B, tant pour Adour-Garonne (AG) que pour Seine-Normandie (SN), engendrent un accroissement des fuites d'azote voisin de 10 000 tN/an (à l'exception de AG-S1B pour lequel l'accroissement est moindre) en raison de la mise en cultures agricoles conventionnelles (colza, blé, betterave en SN ; colza, maïs en AG) de sols initialement en couvert à « faibles fuites » (prairies, jachères) ;
- à l'inverse, les scénarios S2 et S3, pour les deux bassins, présentent une réduction des fuites

d'azote d'une ampleur comparable à l'accroissement observé dans les scénarios 1A et 1B. Cela s'explique par la présence importante de cultures 2030 à moindres fuites d'azote (pérennes, cultures améliorantes), implantées sur des sols soit en prairies ou en jachères, soit en grandes cultures. On note la différence entre les scénarios AG et SN : - en AG, le scénario 3 donne une fuite plus faible que le S2, en partant de fuites initiales très voisines ; - en SN, le scénario 3 améliore une situation 2006 qui présente initialement relativement moins de



fuites que le S2, du fait de la présence importante de prairies dans les assolements 2006.

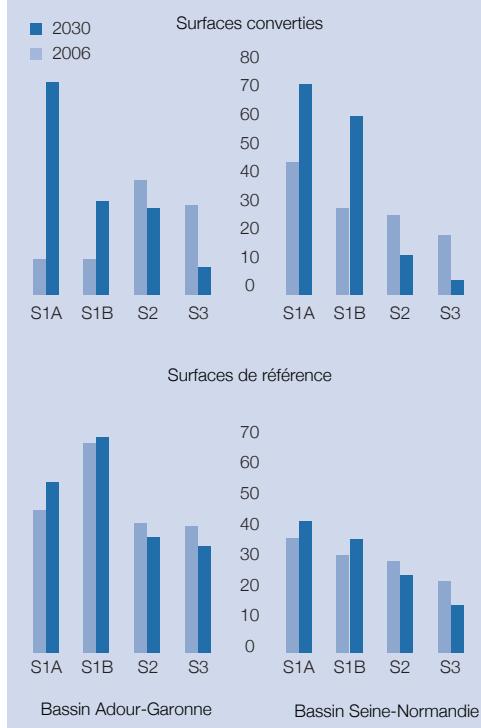
Au niveau des surfaces « converties », l'influence des conversions de sols est, naturellement, plus marquée que pour les surfaces de référence :

- les scénarios 1A et 1B présentent un très fort accroissement des fuites, d'autant plus que les surfaces 2006 comptent des jachères et prairies de façon significative. Cet accroissement est le plus marqué en AG. Par rapport au scénario 1A, le scénario 1B joue bien le rôle améliorant qu'il doit avoir par définition ; toutefois cette amélioration est relative, car il s'agit d'une moindre augmentation, mais non d'une réduction du flux global existant ;
- les scénarios 2 et 3 en AG apparaissent améliorants dans l'absolu : ils réduisent les fuites observées sur les assolements 2006. S3 conduit à des réductions plus spectaculaires que S2, ce qui s'explique bien par les choix de cultures : cultures pérennes, améliorantes et/ou en conduite « protection des ressources » (ex : cultures énergétiques avec récolte en février pour moins de fertilisation, etc.) ;
- sur SN, en considérant aussi bien les surfaces converties que l'ensemble des « surfaces initiales bassin », le S2 affiche une amélioration encore plus nette que le S2 AG car ce dernier comporte une part plus importante de cultures annuelles C4 sujettes aux fuites (maïs, sorgho fibre). S3 SN évite en 2030 des niveaux de fuite similaires au bassin AG, la progression vis-à-vis de S2 apparaît ainsi moins spectaculaire en SN à partir d'un S2 déjà performant.

Concentration en nitrates sous-racinaire

Cet indicateur permettant d'évaluer l'impact sur la potabilité en terme de nitrate et le seuil de potabilité étant fixé à 50 g/l sous forme nitrate (NO_3^-), une évolution qui conduirait à des valeurs très inférieures à ce seuil pourrait être jugée satisfaisante ; une évolution qui conduirait à des valeurs avoisinant ou dépassant ce seuil doit être étudiée précisément. La concentration en nitrates dans le drainage sous-racinaire ne donne cependant pas la valeur de la concentration à attendre dans les eaux souterraines en relation avec le flux drainant. En effet, les autres types d'occupation des sols (forêts, friches, etc.) présentent généralement de faibles voire très faibles flux d'azote. Au premier ordre, on peut considérer que les valeurs de concentration en nitrates à attendre dans les ressources en eau proviendront de la moyenne pondérée par les flux des contributions de chaque mode d'occupation des sols.

Figure 26 – Comparatif des 8 scénarios pour les concentrations en nitrates du drainage sous-racinaire (en mg/l) des surfaces converties et de référence



Ainsi, la ressource alimentée par un bassin versant (superficie ou souterraine) recevant le drainage de sols très majoritairement agricoles, pourra à terme présenter des teneurs en nitrates proches de celles du flux de drainage. À l'inverse, un bassin versant dont les sols sont occupés en cultures, forêts, friches, etc. présentera un effet de dilution du drainage agricole. Le massif des Landes d'Aquitaine est un bon exemple : 85 % de la surface est en forêt, et 12 % en grandes cultures. Les teneurs en nitrates observées dans les qualimètres et dans les analyses d'eau de consommation sont relativement faibles et bénéficient de cet effet de dilution.

En examinant en premier lieu les concentrations obtenues pour les surfaces converties (figure 26), on peut remarquer :

- les fortes concentrations sous-racinaires obtenues pour les scénarios 1A-AG, 1A-SN, et 1B-SN ;
- les forts accroissements entre 2006 et 2030 obtenus pour les scénarios 1A et 1B, AG et SN ;
- les réductions significatives pour S2 et S3 ;
- le caractère nettement améliorant du scénario 3 AG ;

• la relative proximité de résultats pour le scénario 2 et le scénario 3 sur SN : les différences entre les cultures 2030 apparaissent assez faibles. Cette observation est à mettre en balance avec celle des surfaces existantes.

Concernant les concentrations dans le drainage sous-racinaire pour les surfaces de référence (figure 26), on retrouve des évolutions comparables, mais de moindre ampleur puisque les scénarios concernent une fraction des surfaces de référence :

- pour les scénarios 1A et 1B, la concentration en nitrates dans le flux drainant s'accroît d'une dizaine de milligrammes par litre, conduisant à un dépassement de la valeur seuil pour AG ;
- pour les scénarios 1A et 1B sur SN, en raison d'une plus faible concentration générale du drainage 2006 des cultures concernées par le scénario, l'accroissement des concentrations est notable mais ne conduit pas à atteindre la valeur seuil. Ces plus faibles valeurs initiales sont notamment dues à la présence importante de prairies dans les surfaces initiales 2006 ;
- pour les scénarios 2 et 3 sur AG, les deux scénarios conduisent à abaisser la valeur de concentration, qui atteint dans les scénarios 2006 des valeurs relativement élevées ;
- pour les scénarios 2 et 3 sur SN, la concentration est abaissée en 2030, mais à partir de valeurs initiales 2006 plus faibles.

Synthèse

L'analyse des indicateurs permet de dégager quelques traits caractéristiques :

- les scénarios 1A et 1B, reposant sur une mise en grandes cultures de sols initialement en jachères ou en prairies, conduisent tous deux à accroître la pression azote ;
- le scénario S1B représente une amélioration en ce qu'il accroît moins fortement cette pression, soit parce qu'il met en place des cultures pérennes (SN), soit parce qu'il mobilise moins de surfaces et donc globalement moins de flux (AG) ;
- les scénarios S2 et S3, qui reposent sur le déploiement de cultures énergétiques dont une partie importante est pérenne, réduisent globalement la pression azote ;
- le scénario S3 apparaît bien comme une amélioration qui porte sur l'ensemble des surfaces de référence concernées par le scénario, sans que cette amélioration se démarque fortement de celle apportée par les cultures du scénario 2, sur des surfaces identiques ;

- lorsque les concentrations moyennes sous-racinaires sont inférieures à 50 mg/l, elles ne peuvent contribuer à dépasser ce seuil en l'absence d'autres contributions plus élevées. Mais toutes les évolutions allant dans le sens d'un accroissement vont à l'encontre de l'objectif de retour au bon état écologique des masses d'eau introduit par la DCE. Ces commentaires pour les pressions azote devront être comparés aux commentaires pour les pressions « pesticides ».

Conclusions

L'évaluation des pressions « nitrates », exploitant les données de bilan produites dans le chapitre précédent, apporte des informations nouvelles par rapport aux pressions en quantité. Bien que reposant sur des valeurs parfois indicatives, la méthode permet de comparer les pressions nitrates des quatre scénarios de l'étude sur les deux grands bassins. Les évaluations, dont on rappelle qu'elles devraient tendre à sous-estimer la réalité, semblent cohérentes, et permettent en tout cas de mesurer des variations significatives. Les indicateurs de fuite totale et de concentration moyenne du drainage apparaissent pertinents et discriminants.

Les flux apparaissent significativement modifiés dans les scénarios entre 2006 et 2030. Les concentrations moyennes du drainage apparaissent comme un indicateur discriminant et doté d'un seuil d'alerte, qui est la teneur en nitrates maximale réglementaire dans l'eau de consommation. Il convient de rappeler ici que les concentrations moyennes calculées sont un indicateur de pression et non de teneur en nitrates finale dans les ressources en eau.

Selon ces indicateurs, et compte tenu des observations déjà portées sur les pressions en quantité, il apparaît que :

- le scénario 1A, tant en Adour-Garonne qu'en Seine-Normandie, montre une nette tendance à la détérioration, dépassant les seuils d'alerte « concentration » ;
- le scénario 1B peut améliorer le 1A selon ces critères, ou du moins ne pas les dégrader, mais il ne permet pas d'améliorer la situation 2006 ;
- le scénario 2, à l'inverse des conclusions du critère de quantité, améliore la situation 2006, grâce à la part importante que prennent les cultures pérennes, même conduites intensivement, dans les scénarios ;
- le scénario 3 améliore nettement la situation

2006 dans l'absolu et atteint son objectif. Toutefois, en comparaison du scénario 2, l'amélioration relative, quoique présente, est plus discrète. Ces deux scénarios reposent tous deux sur des cultures assez comparables, ce qui explique que le comportement soit finalement assez proche. Les options environnementales montrent cependant leur efficacité dans les évaluations des scénarios proposés. Il pourrait s'agir, par exemple, de cibler les zones où ce type de conversion améliore nettement la situation, ou au contraire de chercher à généraliser les associations de cultures pérennes et de pratiques améliorantes sur les cultures annuelles.

C'est bien le scénario 1A qui dégrade fortement les indicateurs « nitrates », renforçant en cela les tendances sur la quantité. Cela conduit à considérer, tant du point de vue quantitatif que du point de vue « nitrates », l'opportunité des améliorations relatives apportées par le scénario 1B. Les options améliorantes, pour l'azote, apparaissent donc relativement intéressantes pour le scénario 1B en comparaison du scénario 1A, tandis que les améliorations du scénario 2 au scénario 3 sont bien moins significatives que pour les indicateurs « quantité ». Cependant, les améliorations pour le scénario 3 s'additionnent aux avantages précédents et renforcent l'efficacité de l'option environnementale de ce scénario, qui reste le seul à améliorer globalement les impacts de la situation agricole d'origine des bassins. L'implantation de cultures énergétiques est donc à considérer comme une option agricole intéressante pour relâcher la pression « nitrates » sur les ressources en eau, notamment dans les zones où ce paramètre est le plus sensible.

Impact sur la qualité des ressources en eau : la pression « phytosanitaire »

L'objet de ce chapitre est d'introduire la prise en compte des traitements phytosanitaires dans l'évaluation des scénarios. Ces derniers ont pour objectif de lutter contre les ravageurs des cultures, et de permettre notamment d'obtenir des rendements plus élevés et plus réguliers. Ils font appel à des substances très diverses, dont certaines présentent une toxicité élevée. Ces substances peuvent présenter des risques pour l'environnement (écotoxicité) et des risques pour la santé humaine (risques d'intoxication pour les manipulateurs). Il s'agit dans cette évaluation de caractériser les risques environnementaux. Cela nécessite des indicateurs simples capables de fournir des évaluations robustes, malgré le nombre et la variété des substances, de l'impact potentiel de chacune d'elles. Après avoir rappelé quelques caractéristiques des traitements phytosanitaires, ce chapitre présente deux indicateurs existants, l'indice de fréquence de traitement (IFT) et le classement SIRIS-Pesticides¹⁷, qui sont adaptés ici pour l'évaluation à grande échelle. Pour ces deux indicateurs, les résultats comparatifs des huit scénarios sont présentés et analysés sur les deux bassins. Ces résultats complètent l'analyse de qualité du chapitre précédent, et montrent des aspects spécifiques aux impacts potentiels « phytosanitaires ».

Eau et produits phytosanitaires

Le terme pesticide, dérivé du mot anglais *pest* (« ravageur »), désigne les substances ou les préparations utilisées pour la prévention, le contrôle ou l'élimination d'organismes jugés indésirables, qu'il s'agisse de plantes, d'animaux, de champignons ou de bactéries. Dans le langage courant le terme pesticide est généralement associé à un usage agricole de ces substances ; or il englobe également les usages domestiques, urbains, de voirie, etc.

Dans le domaine de l'agriculture, les pesticides sont appelés produits phytosanitaires (ou phytopharmaceutiques). Il en existe principalement trois catégories : les herbicides (pour lutter contre les mauvaises herbes), les fongicides (pour lutter contre les champignons) et les insecticides (pour lutter contre les insectes). D'autres produits existent ayant une action sur les rongeurs (rodenticides), ou encore sur les escargots et les limaces (molluscicides).

Un produit phytosanitaire peut être désigné par une substance chimique active, lorsque celle-ci a à elle seule une action phytosanitaire identifiée, ou par un produit commercial correspondant à une ou plusieurs substances actives et des adjutants de formulation, généralement confidentiels. Le produit commercial peut alors se trouver sous plusieurs formes : liquide, en poudre mouillable,

en granulés ou microencapsulé. On compte environ 520 matières actives homologuées entrant dans la composition de près de 3 000 spécialités commerciales utilisées en agriculture.

On parle de résidus de produits phytosanitaires, ou de résidus de biocides et plus généralement de résidus de pesticides, pour désigner une ou plusieurs substances présentes dans ou sur des végétaux ou produits d'origine végétale, des produits comestibles d'origine animale, ou ailleurs dans l'environnement, et constituant le reliquat de l'emploi d'un pesticide, y compris ses métabolites issus de la dégradation.

Les principaux effets de la pollution due à la contamination des eaux par les produits phytosanitaires sont de perturber la vie aquatique et de dégrader l'aptitude à constituer une ressource pour l'eau potable ou pour un autre usage. Pour minimiser de tels risques, leur vente et leur utilisation sont soumises à réglementations à l'échelle de l'Union européenne (UE). La population des substances étant en constante évolution, une liste de substances actives autorisées est régulièrement mise à jour¹⁸. Pour le cas français, un catalogue des produits phytosanitaires homologués en France est disponible dans la base de données e-phy du ministère de l'Agriculture et de la Pêche.

L'UE s'est également engagée dans un projet de réévaluation du risque lié aux substances chimiques entrant dans la composition des pesticides pour aboutir au retrait du marché de plus de 500 matières actives n'ayant pas été soutenues par les producteurs. Cette situation devrait faire disparaître du marché des produits à profils de risque notable. En France, le PIRRP 2006-2009 (Plan interministériel de réduction des risques liés aux pesticides) et le Plan ECOPHYTO 2018 visent à réduire de moitié l'usage des pesticides d'ici 10 ans, et à supprimer progressivement les molécules les plus dangereuses du marché.

Par ailleurs, des limites de qualité sont fixées dans les ressources en eau et dans l'eau au robinet du consommateur, à savoir : 2 µg/L pour chaque pesticide et 5 µg/L pour le total des substances mesurées dans les ressources en eau, et 0,10 µg/L pour chaque pesticide et 0,50 µg/L pour le total des substances mesurées au robinet du consommateur.

En 2006, des pesticides ont été détectés au moins une fois dans 90 % des points de mesure du réseau de connaissance générale de la qualité des cours d'eau (sur 1 097 points) et dans 57 % des

points dans le cas des eaux souterraines (sur 1 507 points)¹⁹. Cette même année, 10 % et 1 % des points du réseau général sont jugés de qualité « mauvaise » dans, respectivement, les eaux de surface et les eaux souterraines, avec un impact important sur les équilibres écologiques. Côté agricole, ces résidus de pesticides sont dus à une utilisation sur un nombre limité de cultures (céréales, maïs, colza et vigne principalement) qui occupent moins de 40 % de la surface agricole utile (SAU). Celles-ci consomment à elles seules près de 80 % des pesticides commercialisés chaque année en France²⁰ (2008). Les teneurs mesurées sont parfois très faibles et ont dans ce cas peu d'incidence sur la qualité des eaux. Cela traduit néanmoins une dispersion importante des pesticides et une présence généralisée dans les milieux aquatiques.

Cette dynamique rapide laisse à penser que la situation en termes de substances et de pratiques à disposition aura évolué à l'horizon 2030. De nouveaux effets pourraient se faire sentir, et les enjeux liés à l'usage des pesticides pourraient reposer sur des problématiques différentes. En dépit de l'intérêt de cette question, l'objectif de l'étude n'est pas de travailler sur les perspectives des impacts phytosanitaires à long terme, qui nécessiteraient une approche et un niveau d'information difficile à mettre en œuvre. Il s'agit d'envisager des situations futures à partir d'éléments connus de la situation actuelle. C'est pourquoi l'évaluation des pressions phytosanitaires sur l'eau repose ici sur des pratiques et substances connues à ce jour et conservées à l'horizon 2030.

Méthode et choix des indicateurs phytosanitaires

Les mécanismes de dispersion des pesticides dans les milieux sont très nombreux ; en milieux agricoles, ils dépendent principalement du couvert végétal, des caractéristiques du sol, du fonctionnement hydrologique, et donc des substrats géologiques et des conditions climatiques pendant et après l'application, et de la composition des produits épandus. Les bilans conservatifs, aboutissant par exemple à des calculs de concentrations en polluants dans les ressources en eau, restent très dépendants de ces mécanismes. Leur recours, à l'image des demandes en eau et des fuites d'azote, paraît difficile à mettre en œuvre aux échelles de travail de la présente étude.

L'objectif est de traduire la présence de substances polluantes ayant pour effet de dégrader la qualité de l'eau. Pour chacun des quatre scénarios précédemment définis, il s'agit d'évaluer un différentiel de pressions sur l'eau entre une situation caractérisée par un assolement en 2006 et une situation et son asselement en 2030 (soit avant et après développement des scénarios biocarburants). Cette évaluation est réalisée à travers la mesure de pressions sur l'eau de l'épandage de produits phytosanitaires pour ces deux asselements, à l'échelle de deux bassins hydrographiques. Il convient alors de déterminer un niveau de pollution phytosanitaire associé à une culture en croisant trois natures d'informations :

- les types de substances fréquemment utilisées ou recommandées pour la culture considérée ;
- les quantités ou nombre de doses de ces substances épandues sur une surface de culture donnée ;
- le niveau de risque de pollution associé à ces substances.

Le niveau de pollution mesuré est alors traduit à l'aide d'indicateurs. Il existe plus de 50 indicateurs d'évaluation des risques environnementaux liés à l'usage des produits phytosanitaires. Dans un contexte d'étude prospective où l'on cherche à mesurer des niveaux de pollution sur l'eau engendrés par des pratiques agricoles actuelles et de long terme, deux indicateurs ont été retenus : un indicateur de pression traduisant l'intensité des pratiques d'épandage, complété d'un indicateur de potentiel d'exposition aux substances polluantes des eaux de surface et souterraines.

Indicateur de pression polluante

Au niveau national, l'indice de fréquence de traitement (IFT) est un outil de suivi de l'évolution de l'utilisation des pesticides. C'est un indicateur simple correspondant au nombre de doses homologuées appliquées sur une parcelle pendant une campagne culturelle. Il reflète l'intensité d'utilisation des pesticides exercée sur la parcelle. La dose homologuée est définie comme la dose efficace d'application d'un produit sur une culture et pour un organisme cible donné. L'unité employée (nombre de doses homologuées par ha) permet d'agrégier des substances actives très différentes (c'est-à-dire possédant des doses efficaces d'application très différentes). Il prend en compte les quantités réellement appliquées au cours d'une campagne (et non des quantités vendues par exemple) et permet donc de tenir compte des traitements à dose réduite.

Le calcul de l'IFT à l'échelle d'un territoire nécessite donc deux types de données de base pour chaque culture :

- la dose homologuée des produits commerciaux utilisés. La base de données nationale Phy2X permet d'associer à chaque produit commercial sa dose homologuée ;
- les itinéraires techniques suivis par les exploitants agricoles concernant l'épandage des produits sur chacune des grandes cultures (dose appliquée, nombre de doses, part des surfaces traitées).

La source la plus complète correspond aux résultats des enquêtes « pratiques culturales » réalisées régionalement sur les principales grandes cultures (blé, orge, maïs, colza, tournesol, betterave, pois, pomme de terre) par le Service de la statistique et de la prospective (SSP) du ministère de l'Agriculture et de la Pêche et publiées par l'Agreste. À partir de ces données, des IFT moyens régionaux pour les principales grandes cultures ont été calculés par la DGPAAT²¹ du ministère de l'Agriculture et de la Pêche (voir annexe 6).

Une distinction peut être faite entre les IFT relatifs aux produits herbicides et ceux relatifs aux produits hors herbicides. Cette distinction se justifie par les moyens visant la réduction des usages, qui diffèrent d'une famille de produits à l'autre. En effet, la réduction du recours aux produits hors herbicides se joue d'abord à l'échelle de l'itinéraire technique, sur une campagne, alors que la réduction du recours aux herbicides implique des modifications plus profondes du système de production, touchant l'ensemble de la rotation, sur plusieurs années. .

C'est à partir de cette source que des IFT globaux sont calculés à l'échelle des surfaces mobilisées en 2006 (soit une majorité de grandes cultures), et à l'échelle des surfaces converties en grandes cultures pour les biocarburants des scénarios 1A et 1B en particulier. Ce sont alors les différents volants de surfaces allouées aux différentes grandes cultures qui font varier les valeurs d'IFT entre 2006 et 2030. Pour les scénarios 2 et 3, les IFT globaux 2030 sont définis à partir d'IFT des cultures lignocellulosiques calculés selon les données d'itinéraires techniques expérimentées à ce jour²² et définies à dire d'experts par des agronomes de l'INRA et de l'Institut du végétal ARVALIS. Ces IFT globaux 2030 sont alors comparés aux IFT globaux des surfaces mobilisées en 2006.

L'IFT apparaît pertinent pour un certain nombre de fonctionnalités, plus limité pour d'autres :

- l'indice traduit, aux échelles de l'étude, une différence de niveau d'intensité d'utilisation de produits phytosanitaires entre 2006 et 2030 ;
- c'est un indicateur assez facile à calculer ;
- l'agrégation à grande échelle est simple ;
- au delà de l'échelle de l'exploitation, les données de pratiques culturales, nécessaires au calcul de l'IFT, sont disponibles régionalement tous les 5 à 7 ans ;
- la quantité absolue de produit phytosanitaire n'est pas prise en compte (une dose homologuée de 10 g équivaut à une dose homologuée de 1 000 g). L'impact environnemental potentiel d'une dose homologuée est alors peu explicite ;
- l'indice ne tient compte ni de certaines caractéristiques spécifiques de chaque produit phytosanitaire (comme le comportement dans l'environnement, la solubilité, la volatilité, la toxicité pour les organismes non ciblés, l'éco-toxicité pour le milieu...), ni de la vulnérabilité propre à chaque milieu (liée à la pédologie ou à l'hydrogéologie). Il ne constitue donc pas un descripteur exhaustif du risque potentiel pour l'environnement (c'est-à-dire pour le milieu et pour les organismes non ciblés par le produit phytosanitaire utilisé).

Indicateur de risque de milieu

L'outil informatique SIRIS – Pesticides est issu d'une méthode mise au point dans les années 90²³. Il permet d'aboutir à un classement des substances actives des produits phytosanitaires susceptibles d'être trouvées dans les eaux souterraines et de surface et à surveiller en priorité. Les possibilités d'exposition aux pesticides sont établies à partir de cinq critères : un critère lié aux doses de différentes matières actives et aux surfaces épandues sur un territoire donné (critère d'usage), et quatre critères liés aux propriétés intrinsèques de mobilité et de dégradabilité des molécules.

Les caractéristiques intrinsèques de la substance active prises en compte dans l'outil sont :

- l'affinité pour le sol, représentée par un indicateur de mobilité : le coefficient de partage carbone organique-eau (l/kg), ou Koc (plus le coefficient Koc est élevé, moins la substance se trouve dissoute dans l'eau) ;
- la dégradabilité dans le sol, représentée par un indicateur de persistance dans le sol : le temps

de demi-vie dans le sol (ou DT50), soit le temps nécessaire pour que 50 % de la substance active dans le sol disparaisse (mesuré en jours) ;

- la solubilité dans l'eau (hydrosolubilité) : cet indicateur du potentiel d'entraînement par ruisseau est exprimé en mg/l, soit la quantité maximale de substance qui peut être dissoute dans l'eau à une température donnée ;
- la dégradabilité dans l'eau, représentée par un indicateur de stabilité dans l'eau : la vitesse d'hydrolyse, soit le temps nécessaire à la dégradation de 50 % de la substance active dans l'eau (mesuré en jours à un pH donné).

Ces cinq critères sont répartis en quatre classes, hiérarchisées comme indiqué dans le tableau ci-après.

Concernant l'usage des produits, cette étude prend en compte :

- les doses moyennes des principales matières actives épandues sur le bassin par culture ;
- la part de la surface totale de la culture sur laquelle elles ont été épandues.

Ces informations peuvent être en partie disponibles pour les grandes cultures (colza, blé, maïs, tournesol, betterave) à l'échelle régionale grâce aux enquêtes de pratiques culturales publiées par le SSP, et également grâce aux études ponctuelles réalisées par les services régionaux de la protection des végétaux (SRPV).

Concernant les cultures énergétiques dédiées non renseignées (scénarios 2 et 3, 2030) les données de pratiques culturales sont obtenues à dire d'experts [RT].

Le moteur de calcul SIRIS-Pesticides permet d'obtenir un classement des substances épandues en traduisant le potentiel d'exposition des eaux de surface et des eaux souterraines à chacune de ces substances. Le risque d'exposition maximal est détenu par la substance en haut de classement et est exprimé en pourcentage.

En complément de l'attribution d'un rang d'exposition, la méthode SIRIS prend également en compte les effets biologiques potentiellement engendrés par la présence de ces substances. Les effets biologiques sont appréciés à travers deux critères :

- la dose journalière admissible pour l'homme (DJA, en mg/kg de poids corporel/jour), qui détermine les effets toxicologiques ;

Tableau 22 - Hiérarchie des critères d'exposition pour les eaux superficielles et souterraines
 (d'après Groupe de travail « Listes prioritaires », 1995)

	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4
Eaux souterraines	Affinité pour le sol	Degradiabilité	Usage	Affinité pour l'eau
	Koc	Demi-vie au champ et hydrolyse	Dose et surface développée traitée	Quantité utilisée Solubilité
Eaux de surface	Usage	Affinité pour l'eau	Degradiabilité	Affinité pour le sol
	Dose et surface développée traitée	Quantité utilisée Solubilité	Demi-vie au champ et hydrolyse	Koc

- la concentration létale 50 (CL50, en mg/l), soit la dose de substance causant la mort de 50 % d'une population donnée de la faune et de la flore aquatiques (algues, daphnies et poissons), qui détermine les effets écotoxicologiques.

Compte tenu des valeurs de la DJA et de la CL50, chacune des substances classées par l'outil SIRIS se voit attribuer une classe de A à E selon son caractère plus ou moins毒ique. Des graphes de corrélation entre ces critères et le rang de chaque substance peuvent être établis ; les substances les plus préoccupantes sont celles dont les paramètres de toxicité et d'écotoxicité prennent des valeurs faibles et dont le rang calculé par SIRIS est élevé.

Limites de la méthode

Il convient de noter un certain nombre d'avertisements concernant l'interprétation et les limites des résultats SIRIS-Pesticides concernés par l'étude :

- Cet outil a été conçu pour les conditions trouvées en France métropolitaine.
- L'outil est basé sur une représentation très simplifiée des processus de transfert des pesticides vers les eaux. Il ne peut être utilisé pour réaliser des évaluations de risques dans un contexte spécifique (précision insuffisante pour permettre de caractériser précisément les expositions des populations et des écosystèmes)²⁴.
- Effet de seuil : une étude de sensibilité de la méthode montre que si la modalité attribuée à la classe 1 est erronée, le classement de la substance peut être faux, en théorie, jusqu'à 12 rangs. Une erreur faible sur le critère de la première

classe peut donc entraîner un surclassement ou un sous-classement significatif. Si la valeur du critère utilisé pour la classe 1 de ces substances est proche du seuil de modalité, il est conseillé de considérer les substances situées à moins de 12 rangs du seuil fixé dans l'établissement de la liste des pesticides à surveiller dans les eaux²⁵.

- Dans un bilan d'enquête auprès des utilisateurs-testeurs de l'outil SIRIS-Pesticides²⁶, il apparaît que sur 11 départements étudiés, près de 81 % des substances se retrouvent dans les rangs SIRIS normalisés de 60 à 70 % ont effectivement été détectées au moins une fois dans les eaux de surface (contre seulement un tiers des substances dans la fourchette de rangs inférieurs 50 à 60 %). En eaux souterraines, c'est dans la fourchette de rangs SIRIS 70 à 80 % qu'une part significative de substances (75 %) a effectivement été observée au moins une fois (contre seulement 29 % dans la fourchette de rangs inférieurs). Le nombre de substances comprises dans ces fourchettes de rangs SIRIS (et fourchettes supérieures) sera particulièrement relevé dans chacun des scénarios bassin 2006 et 2030.

- Dans ce même bilan d'enquête, un utilisateur de longue date de SIRIS souligne que les substances ayant une modalité « o » pour les quantités et pour les surfaces traitées²⁷ n'ont souvent pas lieu d'être intégrées dans des listes de suivi. Ces substances correspondent en général à des utilisations minoritaires et /ou à des applications très localisées. À l'échelle d'une région, leur suivi n'est pas pertinent (même s'il l'est à proximité du point d'application).

Comparaison des scénarios

Pour l'évaluation des situations 2006 de chacun des quatre scénarios et l'évaluation des surfaces converties en 2030 impliquant des grandes cultures (scénarios 1A et 1B), le calcul des IFT et les données relatives à l'usage des produits à renseigner dans SIRIS-Pesticides sont basés sur les pratiques d'épandage issues des enquêtes de pratiques culturales de 2006. Il est supposé ici que l'intensité des pratiques d'épandage recensées en 2006 est conservée en 2030 [RT].

Concernant les cultures non renseignées dans les enquêtes de pratiques culturales, et en particulier les cultures énergétiques actuellement au stade de culture en parcelles expérimentales, aucune substance phytosanitaire n'est aujourd'hui homologuée pour leur traitement. Il est alors considéré qu'en 2030 ce sont les pratiques actuellement suivies en parcelles expérimentales (réseau REGIX28) qui ont été retenues. D'autres pratiques à dire d'experts sont également retenues pour les cultures dédiées mieux connues (luzerne, triticale plante entière, maïs biomasse) qui nécessitent une adaptation des pratiques d'épandage dans le cadre d'une valorisation énergétique. Chacun des jeux de données obtenus à dire d'experts est défini de manière spécifique pour la moitié Nord, donc pour le bassin Seine-Normandie, et pour la moitié Sud, donc pour le bassin Adour-Garonne, les données étant considérées comme identiques d'une région à l'autre d'un même bassin. Le scénario 3 adapte quant à lui les pratiques d'épandage 2030 de façon à limiter tant que possible l'usage de substances chimiques. Ces nouveaux itinéraires techniques sont également définis à dire d'experts fondés sur des pratiques pouvant impliquer des pertes de productivité mais permettant de maintenir une certaine rentabilité économique de la culture.

Évaluation de la pression polluante

À partir des données d'IFT moyens régionaux obtenus par culture pour l'année 2006 (voir annexe 6), des IFT moyens aux échelles Nord/Sud et à l'échelle des bassins peuvent être calculés. Les IFT bassins (notés « IFT SN » et « IFT AG » dans les tableaux suivants) se retrouvent ainsi pondérés par les surfaces de chacune des cultures présentes sur les régions du bassin, calculées au prorata de la surface totale de la culture sur la région.

Le tableau 23 indique ainsi, par exemple, que l'IFT moyen des herbicides de la culture de la

betterave à l'échelle du bassin Seine-Normandie est égal à 2,07.

Ces IFT moyens à l'échelle d'un bassin et par culture sont ensuite convertis en IFT globaux pour les surfaces converties en 2006 puis pour les surfaces dédiées aux biocarburants en 2030 pour chacun des quatre scénarios, grâce aux tableaux de conversion de surfaces présentés précédemment (p. 26 et suiv.).

Les cultures énergétiques dédiées considérées dans les scénarios 2 et 3 n'étant actuellement pas intégrées aux systèmes de cultures actuels, il n'existe pas d'IFT moyens régionaux sur ces cultures. Les IFT « expérimentaux » obtenus pour ces cultures (voir annexe 6) ne présentent alors pas de variations régionales et sont pondérés par les surfaces leur étant allouées pour l'obtention d'IFT globaux 2030.

La figure 27 regroupe l'ensemble des valeurs d'IFT obtenues pour les surfaces converties par scénario et par bassin.

L'échelle des valeurs des IFT des herbicides apparaît moins élevée que celles des IFT hors herbicides car ces derniers regroupent un ensemble de produits d'usages différents (insecticides, fongicides, molluscicides, etc.) et impliquent donc un nombre de traitements plus important. Si l'usage des herbicides semble répandu de la même manière sur les deux bassins, l'usage des « hors herbicides » paraît moins important en Adour-Garonne.

D'une manière générale, les scénarios tendanciels 1A et 1B voient systématiquement leurs valeurs d'IFT augmenter entre 2006 et 2030. Néanmoins l'évolution de l'intensité des traitements est relativement faible car la nature des cultures, et donc les pratiques, ne changent pas significativement entre les deux périodes. Elle s'explique essentiellement par la conversion de surfaces de jachère et de surfaces de prairie non traitées en 2006 en surfaces de grandes cultures nécessitant des traitements en 2030. Il s'agit donc plus d'un élargissement du volant de surface traitée plutôt que d'une intensification des pratiques sur l'ensemble des parcelles. Le taux de progression de l'IFT apparaît nettement plus important sur le bassin Adour-Garonne car ces surfaces non traitées en 2006 représentent 74 % du volant de surfaces mobilisées du scénario 1A, contre 30 % sur le bassin Seine-Normandie.

Le scénario 1B aboutit à des valeurs d'IFT 2030 moins importantes car les surfaces mobilisées sont moindres du fait de la valorisation d'une part des résidus de récolte permettant sur le bassin Adour-Ga-

Tableau 23 - IFT moyens des cultures renseignées mobilisées en 2006 et en 2030 sur le bassin Seine-Normandie (SN)

Surfaces (ha)	BETTERAVE	BLE TENDRE	COLZA	TOURNESOL	Part située sur le bassin SN				
Alsace	6 270	39 050	4 520	780					
Basse-Normandie	7 250	195 200	41 250	900	5/6				
Bourgogne	7 326	316 000	158 400	35 300	1/2				
Bretagne	-	290 500	46 900	190					
Centre	21 228	700 250	304 750	81 070	1/6				
Champagne-Ardenne	82 241	395 400	171 260	14 490	7/8				
Franche-Comté	1 126	65 260	24 315	9 520					
Haute-Normandie	18 250	246 610	70 200	170	1				
Île de France	38 360	244 150	66 216	4 184	1				
Lorraine	120	222 150	131 765	2 065	1/6				
Nord-Pas-de-Calais	55 530	267 600	21 450	-					
Pays de la Loire	363	357 600	51 800	42 620					
Picardie	137 156	514 930	99 503	895	2/3				
Total Nord	375 220	3 854 700	1 192 329	192 184					
	H HH	H HH	H HH	H HH					
IFT Nord	2,06	2,13	1,44	3	1,74	4,56	1,64	0,37	
IFT SN	2,07	2,28	1,50	3,19	1,15	4,47	1,67	0,38	

Tableau 24 - IFT moyens des cultures renseignées mobilisées en 2006 et en 2030 sur le bassin Adour-Garonne (AG)

Surfaces (ha)	MAIS GRAIN	BLE TENDRE	COLZA	TOURNESOL	Part située sur le bassin AG				
Aquitaine	314 700	100 600	7 800	47 300	1				
Auvergne	33 280	104 900			1/5				
Languedoc-Roussillon	3 580	3 740		20 940	1/5				
Midi-Pyrénées	176 098	210 720	34 000	175 000	1				
PACA	3 625	4 705							
Charente + Charentes-Maritimes	103 280	154 270	36 775	91 890	1				
Rhône-Alpes	113 540	110 850							
Total Sud	644 823	535 515	41 800	243 240					
	H HH	H HH	H HH	H HH					
IFT Sud	1,72	0,93	1,40	1,87	0,86	1,85	1,50	0,58	
IFT AG	1,48	0,86	1,07	1,52	0,86	1,85	1,51	0,60	

H : Herbicides ; HH : Hors herbicides (fongicides, insecticides, autres)

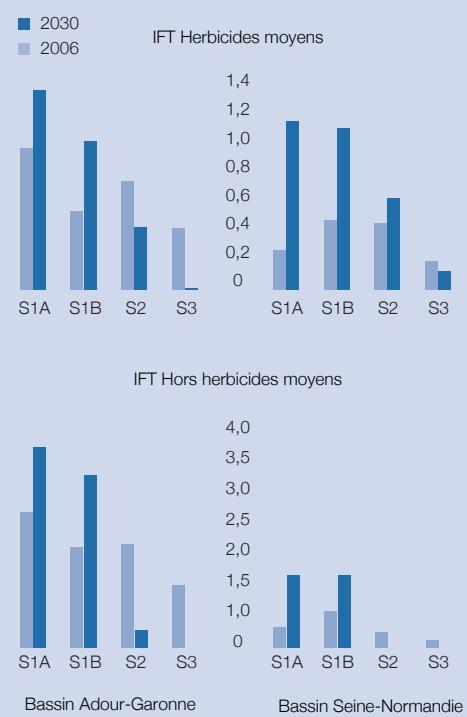
ronne de ne pas mobiliser de surfaces de prairie. S'il est difficile de conclure sur le caractère améliorant du scénario 1B vis-à-vis du 1A (compte tenu de volants de surfaces de traitement non identiques), il est possible de noter que sur Adour-Garonne, le scénario 1B part d'une situation 2006 plus intensive que le 1A (du fait de la non-mobilisation de prairies et donc d'une part de surfaces traitées de grandes cultures plus importante) et aboutit à une situation 2030 moins intensive que le 1A. Ce qui n'est pas le cas sur Seine-Normandie. Le scénario 1B AG apparaît ainsi plus efficace en termes de réduction de l'intensité des traitements.

Les scénarios impliquant le développement des filières de deuxième génération semblent voir la situation 2030 améliorée, à l'exception de l'usage des herbicides sur le bassin Adour-Garonne du scénario 2. Cette tendance améliorante s'explique essentiellement par l'utilisation de cultures énergétiques nécessitant d'une manière générale moins de traitements que les grandes cultures mobilisées en 2006. En effet, parmi les cultures 2030, les espèces pérennes ne nécessitent qu'un traitement herbicide les premières années (sur une implantation d'une durée d'environ 15 ans), et aucun autre type de traitement. Certaines espèces herbacées bien domestiquées (luzerne, fétuque) ne requièrent par ailleurs pas de traitement pour une valorisation énergétique, pour des raisons économiques et de bilan énergétique.

Si les IFT du scénario 2 sont moins élevés que dans les scénarios précédents, ils traduisent néanmoins la présence de traitements. Sur le bassin Seine-Normandie, la diminution des IFT herbicides entre 2006 et 2030 ne s'élève qu'à 42 % car le miscanthus et les TCR sont entre autres implantés sur des sols de gel nu et des terres agricoles non cultivées ne subissant pas de traitement en 2006. Sur Adour-Garonne, l'ensemble des cinq espèces retenues nécessite des actions de désherbage, en particulier le maïs biomasse et le sorgho fibre qui, en tant que cultures annuelles, requièrent des traitements annuels.

Si les valeurs des IFT moyens de ce scénario ne peuvent être directement mises en comparaison avec celles des précédents scénarios, on peut néanmoins noter une diminution significative des traitements hors herbicides. En outre, dans le cas le plus favorable, si les valeurs des IFT des scénarios 1A et 1B étaient ramenées à un volant de surfaces égal à celui du scénario 2 (1,46 Mha au lieu de 0,7 Mha), et en considérant que ce volant de surfaces supplémentaires n'était pas traité, les IFT

Figure 27 – Comparatif des 8 scénarios pour les IFT herbicides et hors herbicides moyens obtenus sur les surfaces converties



2030 1A et 1B resteraient toujours supérieurs aux IFT du scénario 2. On peut alors en conclure que quelque soit l'occupation des sols de ce volant de surfaces supplémentaires, le scénario 2 apparaît ici améliorant vis-à-vis des scénarios tendanciels. Pour le scénario 3, les IFT des surfaces converties en cultures dédiées aux biocarburants diminuent presque en totalité en 2030. Ce scénario de priorité environnementale utilise préférentiellement des techniques de traitements non chimiques comme le désherbage mécanique. Sur Seine-Normandie, un traitement chimique de rattrapage la deuxième année est nécessaire sur miscanthus pour limiter des pertes de productivité trop importantes ; trois des six espèces retenues sur Adour-Garonne nécessitent également ce traitement. Les cultures 2030 du scénario 3 ne requièrent pas de traitement hors herbicides. Ce scénario améliore donc nettement la situation 2006.

Par ailleurs, le volant de surfaces traitées étant identique au scénario précédent, les valeurs des IFT peuvent être comparées en absolu, ce qui a pour résultat d'obtenir un scénario 3 également nettement améliorant vis-à-vis du scénario 2.

Évaluation du potentiel de contamination pour le milieu

Les données concernant l'usage des substances recensées dans les enquêtes de pratiques culturelles régionales, et nécessaires à l'utilisation de l'outil SIRIS pour les grandes cultures, ne sont que partiellement mises à disposition à ce jour. Certaines Régions n'ont pas publié leurs résultats, d'autres de façon non exhaustive. Parmi les Régions en tout ou partie présentes sur les bassins hydrographiques étudiés, seules les Régions Bourgogne et Poitou-Charentes disposent de données complètes. En l'absence de données plus complètes pour la réalisation de l'étude, les données de ces deux Régions permettent d'échantillonner les résultats à l'échelle d'une Région considérée comme représentative de son bassin d'appartenance pour les scénarios mobilisant des grandes cultures.

En d'autres termes, les résultats SIRIS pour les scénarios 1A et 1B des bassins Seine-Normandie et Adour-Garonne correspondent aux résultats obtenus pour les échantillons régionaux Bourgogne et Poitou-Charentes respectivement²⁹. Il faut cependant noter qu'en Région Bourgogne, la culture de betterave, ayant été très peu pratiquée en 2006, n'a pas été l'objet d'une enquête de pratiques. En choisissant les départements de la Région Bourgogne inclus dans le bassin comme échantillon représentatif des données d'enquêtes de pratiques, on suppose que les surfaces de betterave mobilisées et mises en culture dans les scénarios se situent dans les autres Régions du bassin.

Pour les cultures des scénarios 2 et 3 en 2030, les pratiques sont définies par bassin et ne varient pas régionalement. Les résultats SIRIS peuvent donc être obtenus pour l'assolement biocarburants de l'ensemble du bassin en 2030. Les assollements 2006 de ces scénarios correspondent cependant en grande partie à des surfaces de grandes cultures. Les résultats SIRIS pour l'année 2006 correspondent donc aux résultats obtenus pour les échantillons régionaux représentatifs du bassin cités précédemment.

Classements SIRIS obtenus pour les assolements 2006 et 2030 de chacun des scénarios

Le moteur de calcul SIRIS-Pesticides permet d'obtenir un classement des substances épandues pour chaque assolement au niveau d'un bassin (ou par région échantillon de bassin) traduisant le potentiel d'exposition des eaux de surfaces et

des eaux souterraines à chacune de ces substances. Le risque d'exposition maximal est détenu par la substance en haut de classement et est exprimé en pourcentage. Un niveau de toxicité pour l'homme ainsi que pour la faune et la flore aquatiques est également précisé selon les caractéristiques des substances en haut de classement. L'objectif est ici de déterminer si le passage de l'assolement 2006 à l'assolement 2030 dédié aux biocarburants implique des modifications du risque d'exposition à travers le nombre de substances présentant un rang significativement élevé et de toxicité pour les écosystèmes³⁰.

Si l'intensité des traitements phytosanitaires traduite par les valeurs de l'IFT semblait pour l'ensemble des scénarios globalement plus élevée sur le bassin Seine-Normandie, les figures 28 et 29 indiquent que le nombre de substances utilisées est moins important. Cela souligne que l'usage de traitements pour les cultures considérées sur ce bassin est plus systématique que sur le bassin Adour-Garonne, où les traitements sont réalisés à des doses plus faibles ou de façon plus occasionnelle.

Les scénarios tendanciels 1A et 1B présentent des résultats de classement relativement mitigés d'un bassin à l'autre.

Le bassin Seine-Normandie affiche des classements 2030 très similaires aux situations 2006. Le niveau de risque maximum est inchangé. Les mêmes substances et mêmes doses sont utilisées sur les surfaces de type gel industriel, ACE, etc. Les surfaces supplémentaires de gel nu et de prairie n'impliquent donc pas d'accentuation du risque d'exposition des eaux de surface. La répartition des substances dans les différentes classes de risque est également similaire avec cependant un nombre légèrement plus élevé de substances présentant un risque supérieur à 30 % pour le scénario 1B du fait de la mise en culture d'une surface plus importante de gel nu.

Ces modifications de classement n'ont qu'un impact limité sur les risques d'écotoxicité et concernent essentiellement les substances à faible risque d'exposition.

Sur le bassin Adour-Garonne, malgré un nombre de substances légèrement plus faible en 2030, le risque maximum augmente et passe de 63 % en 2006 à 65 % en 2030 pour le scénario 1A, avec un nombre plus important de substances présentant un risque supérieur à 60 %. L'élargissement des surfaces de maïs et de tournesol

est principalement en cause, car ces deux espèces utilisent la substance herbicide située le plus haut dans le classement. Néanmoins le nombre global de substances à risque d'exposition élevé reste moins important pour le scénario 1B par rapport au 1A car la prairie n'est pas mobilisée et les surfaces de maïs sont moins importantes en 2030.

Le risque d'écotoxicité en eaux de surface reste globalement le même en 2006 et en 2030, à l'exception d'une accentuation de la toxicité pour la faune et la flore aquatiques due à l'augmentation du niveau de risque global d'une substance active traitant le tournesol (le flurochloridone, qui affiche une CL50 faible), en relation avec l'élargissement des surfaces d'implantation en 2030.

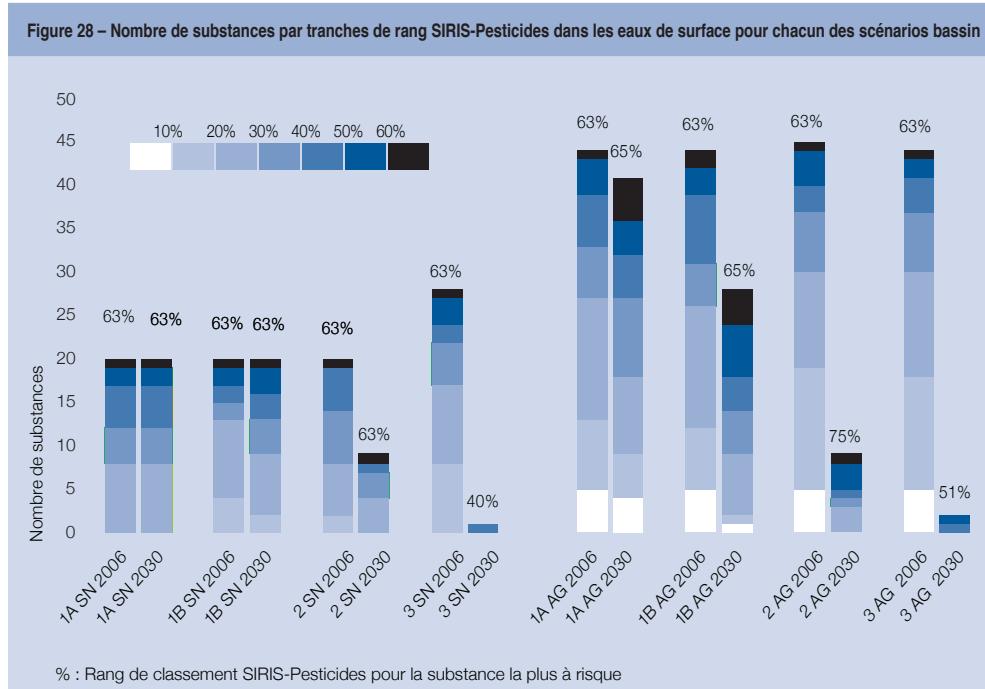
La nette réduction de l'utilisation des produits phytosanitaires observée au cours de l'analyse des IFT des scénarios 2 et 3 est ici confirmée avec une réduction significative du nombre de substances classées entre 2006 et 2030. Si le nombre de substances à rechercher est faible, le potentiel de contamination des eaux de surface du scénario 2 reste cependant identique en 2030 sur Seine-Normandie (63 %) et est très nettement amplifié sur Adour-Garonne (de 63 % en 2006 à 73 % en 2030). En effet, malgré des doses épandues nettement plus faibles et le nombre plus faible de substances,

les surfaces épandues sont bien plus importantes en 2030. Pour exemple, parmi les substances en haut du classement, des herbicides utilisés en Adour-Garonne sur switchgrass et canne de Provence en 2030 (près d'1 Mha sur le bassin) sont épandues en 2006 sur les seules surfaces de maïs converties (287 000 ha sur le bassin).

En outre, le risque d'écotoxicité se montre relativement plus faible en 2030, avec des substances à risque ayant un caractère toxique moindre.

Le scénario 3 2030 ne requiert que l'usage d'herbicides sur certaines cultures pérennes les premières années d'implantation. Les doses sont faibles sur la durée de vie de la culture mais sur une surface épandue relativement importante. Le niveau de risque maximum n'est donc pas nul mais régresse : de 63 % en 2006 à 40 % et 51 % en 2030 sur les bassins Seine-Normandie et Adour-Garonne respectivement. Sur ce dernier la plupart des substances à fort risque en 2006 ne sont plus utilisées en 2030, hormis le glyphosate dont la dose est diminuée de plus de 90 % pour les cultures pérennes de 2030. La situation en 2030 se montre ainsi nettement améliorante en termes de risque d'exposition par rapport à une situation 2006 de référence mobilisant des surfaces de grandes cultures nécessitant l'emploi d'une grande diversité de traitements.

Figure 28 – Nombre de substances par tranches de rang SIRIS-Pesticides dans les eaux de surface pour chacun des scénarios bassin



Le risque d'écotoxicité apparaît négligeable en Seine-Normandie, en comparaison avec un scénario 2006 qui présente des substances à risque d'exposition à caractère relativement toxique, notamment pour la faune et la flore aquatiques (avec des valeurs faibles pour les CL50). L'herbicide choisi pour le sorgho fibre présente néanmoins un caractère potentiellement toxique pour ce même écosystème en 2030.

En eaux souterraines, la tendance des évolutions du risque d'exposition entre 2006 et 2030 est similaire à celle des eaux de surface. Le niveau de risque maximum est cependant globalement moins élevé car les seuils de discrimination des critères de risque (voir tableau 22) sont plus contraignants pour les eaux souterraines.

Les scénarios tendanciels 1A et 1B montrent des eaux souterraines plus vulnérables que les eaux de surface (un plus grand nombre de substances ont un risque supérieur à 40 % en eaux souterraines qu'en eaux de surface). Les substances du blé semblent notamment plus représentées parmi les substances les plus à risque en eaux souterraines. Cependant on n'observe pas d'accentuation significative du risque entre 2006 et 2030.

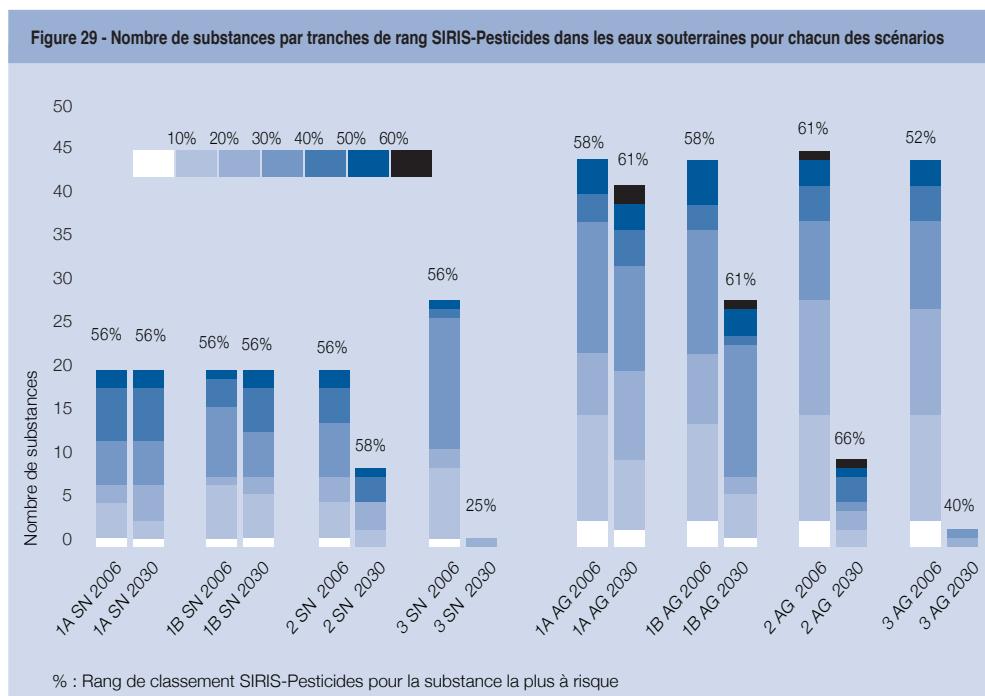
Le risque d'écotoxicité s'avère globalement inchangé entre 2006 et 2030. Cependant l'élar-

gisement des surfaces de maïs du scénario 1A 2030, qui entraîne en particulier l'épandage de l'acétochlore, augmente légèrement le niveau de toxicité pour la faune et la flore aquatiques des substances à plus fort risque d'exposition sur Adour-Garonne. Pour le scénario 1B, c'est l'augmentation des surfaces de tournesol (et l'usage de l'aclonifen) qui induit ce même effet.

Bien que le nombre de substances utilisées et leurs doses sont nettement inférieures en 2030, leurs caractéristiques de transfert dans le scénario 2 sont plus marquées et leurs surfaces épandues plus importantes. Le niveau de risque maximum augmente alors en 2030 mais dans une moindre mesure que dans les eaux de surface.

Le scénario 3 en Seine-Normandie présente un risque d'exposition en eaux souterraines de 25 % en 2030 du fait de l'utilisation d'une substance encore moins à risque qu'en eaux de surface (40 %). En Adour-Garonne, le risque maximum de transfert diminue et passe à 40 % en 2030. Le sorgho fibre reste le principal responsable de cette moindre amélioration en Adour-Garonne avec une substance utilisée particulièrement peu soluble dans l'eau. Le risque de toxicité des eaux souterraines se voit diminué en 2030 pour les deux scénarios.

Figure 29 - Nombre de substances par tranches de rang SIRIS-Pesticides dans les eaux souterraines pour chacun des scénarios



Remarques générales et bilan de l'analyse

De manière globale, les scénarios tendanciels et le scénario 2 présentent 1 à 5 substances à risque supérieur à la limite significative de 60 % en eaux de surface, et 1 substance de risque supérieur à la limite de 70 % en eaux souterraines sur le bassin Adour-Garonne uniquement. Le scénario 3 est systématiquement en dessous de ces seuils.

Par ailleurs, les scénarios 1A et 1B présentent des résultats similaires dans chacun des bassins. Les risques maximum de transfert vers les eaux de surface et souterraines sont identiques. Le caractère améliorant du scénario 1B se traduit en général par un nombre de substances à risque supérieur à 40 % moins important. Le risque global d'exposition des eaux est légèrement supérieur dans les scénarios du bassin Adour-Garonne. Cela est essentiellement dû au choix des cultures mobilisées et éventuellement au cas particulier de l'échantillon Bourgogne dont les résultats peuvent être sous estimés car il ne comprend pas la culture de betterave parmi ses cultures dédiées, tandis que la Région Poitou-Charentes dispose de l'ensemble des cultures dédiées définies sur sa zone (colza, blé, maïs).

L'écotoxicité varie relativement peu avec toutefois certaines substances du tournesol en haut de classement présentant des risques pour la faune et la flore aquatiques.

En Seine-Normandie, le scénario 2 montre des résultats SIRIS très similaires aux scénarios précédents. Le nombre de substances est significativement diminué mais les surfaces épandues sont supérieures et les caractéristiques de transfert plus marquées pour les eaux souterraines. En Adour-Garonne, le risque maximum s'avère aggravé à cause de traitements identiques sur les principales cultures pérennes de l'assoulement 2030 (switchgrass et canne de Provence) induisant d'importantes surfaces d'épandage pour une même substance. Par ailleurs le traitement considéré sur sorgho fibre requiert des substances peu efficaces (nécessitant de fortes doses) et est en cours d'amélioration.

Les classements SIRIS affichent nettement le caractère améliorant du scénario 3 sur les deux bassins, compte tenu d'un choix de système de cultures plus diversifié en espèces pérennes et privilégiant le recours au désherbage mécanique. La présence du sorgho en Adour-Garonne implique un niveau de risque supérieur, mais relativement peu significatif pour les eaux souterraines. Ce système d'évaluation montre l'importance de

la diversité dans le choix des espèces cultivées. Dans le cas du scénario 2, notamment, plus les cultures dédiées seront de nature physiologique différente, moins il y aura de risque d'utiliser des herbicides de même nature impliquant de larges surfaces d'épandage.

Conclusions

Les deux indicateurs de mesure de pression phytosanitaire retenus ici permettent de mesurer qualitativement le niveau d'intensité de pratique d'épandage, d'une part, et, d'autre part, le niveau de potentiel d'exposition des eaux aux substances chimiques. De nature fondamentalement différente, ces indicateurs peuvent difficilement être mis en relation de manière à définir un lien logique entre les effets mesurés par l'un et ceux mesurés par l'autre. En effet, un scénario présentant une intensification de l'épandage de produits phytosanitaires en 2030 n'implique pas d'emblée un risque plus important d'exposition des eaux aux substances épandues, ce risque étant dépendant de la dose appliquée mais également des caractéristiques intrinsèques des substances considérées, en particulier leur potentiel de contamination des milieux aquatiques. L'adaptation des indicateurs existants à la problématique d'évaluation de l'étude semble fournir des résultats intéressants et donner une mesure semi-quantitative. Elle nécessite un travail de définition des cultures-type actuelles et à l'horizon 2030, en matière de pratiques de traitement phytosanitaire. Ce travail s'appuie sur le recours à des statistiques de pratiques et sur les dires d'experts. Les données statistiques fournissent une bonne image des principales substances utilisées et renforcent la vraisemblance des hypothèses utilisées. Il est important de souligner, en termes de méthode, que :

- la nature des traitements employés dépend, pour certains produits, de phénomènes peu prévisibles (attaques de ravageurs imposant des traitements importants mais non récurrents), et, pour d'autres, d'applications systématiques (herbicides) ;
- du fait de la diversité des substances, des besoins d'application et de la grande étendue possible de leurs impacts, la détermination des pratiques type est difficile et peut introduire des biais dans l'évaluation ;
- l'évaluation est par ailleurs sensible au choix des cultures initiales dans les scénarios : le calcul d'un différentiel entre l'état initial et l'état à long

terme dépend significativement des hypothèses prises et des substances retenues ;

- dans la logique de l'étude qui consiste à raisonner sur des états moyens, cette approche apparaît cependant tout à fait utile. Au contraire des évaluations reposant sur des bilans de flux conservatifs et homogènes (eau, azote), pour lesquels les relations avec la plante et les transferts dans le milieu sont modélisables, il est à ce stade plus difficile de situer l'ampleur des incertitudes de la présente évaluation. C'est indéniablement une perspective de travail intéressante, à croiser avec les approches existantes de la problématique « phytosanitaires ».

En termes d'intensité de pratiques, l'analyse des IFT a montré que les scénarios tendanciels 1A et 1B étaient qualitativement aggravants, tandis que les scénarios déployant des cultures lignocellulosiques (scénarios 2 et 3) se montraient améliorants vis-à-vis de la situation 2006 compte tenu du relativement faible nombre de substances définies comme nécessaires au développement de ces cultures.

La mesure du risque d'exposition des eaux à ces substances épandues apporte une nuance à ce constat : le scénario 2 présente en effet un niveau de risque d'exposition aux substances épandues similaire à la situation 2006 du fait de l'importante part de surfaces traitées en 2030 parmi l'ensemble des surfaces mobilisées en 2006, et des caractéristiques particulièrement à risque des substances composant les produits phytosanitaires actuellement choisis pour ces cultures. Le développement de cultures lignocellulosiques ne permet pas ici une amélioration du niveau de risque.

Le scénario 3, par ses pratiques volontairement contraintes dans le but de préserver les ressources en eau, se montre dans chacun des cas améliorant vis-à-vis de la situation 2006 et des autres scénarios.

Il est important de rappeler, pour conclure, que les substances disponibles sont nombreuses, avec des degrés d'impact potentiels sur les ressources et écosystèmes diversifiés et des niveaux de risque très variables. Les populations de substances évoluent au rythme des inventions et des autorisations, mais aussi des interdictions des substances les plus dangereuses. Les substances utilisées actuellement ne préfigurent sans doute pas celles qui seront utilisées dans le long terme. Du fait de la pression réglementaire, les substances les plus dangereuses disparaîtront

des pratiques agricoles avant que cet horizon ne soit atteint. De nouvelles substances encore non connues à ce jour feront cependant leur apparition sur le marché. Si l'évaluation de la toxicité des substances actuellement utilisées peut paraître superflue dans un cadre de long terme, il permet cependant de mettre en évidence les cultures et filières énergétiques qui les impliquent le plus. Cela peut permettre de sensibiliser dès à présent les acteurs au développement de filières bioénergies plus durables.

Conclusion générale

Rappels sur le contexte et les objectifs de l'étude

L'évaluation prend en compte certaines spécificités des ressources en eau

La présente étude propose une évaluation des opportunités et des enjeux sur le long terme du déploiement des bioénergies en termes d'impacts environnementaux. Sa focalisation particulière sur les ressources en eau introduit des aspects nouveaux dans la problématique « bioénergies et environnement ». Pour interpréter les indicateurs qui sont définis, quelques connaissances de base sur le fonctionnement des ressources en eau, et sur leur relation à la production des cultures, sont utiles, et à ce titre rappelées tout au long du document. En effet, les ressources en eau présentent, comme on l'a vu, un caractère fortement local, de sorte que les évaluations nationales ou globales ne sont pas aussi directes que pour l'énergie ou les gaz à effet de serre. En particulier, les indicateurs « eau » sont pertinents à l'intérieur des limites géographiques des bassins hydrographiques. Le caractère prospectif à long terme de l'étude permet d'utiliser des approches simplifiées sur l'eau, qui sont appliquées aux différents scénarios élaborés dans ce travail. Ces scénarios contrastés en termes de type d'agriculture, de technologie et de priorité environnementale, proposent une vision des futurs possibles dans le développement des biocarburants. Leur évaluation à l'échelle des bassins Adour-Garonne et Seine-Normandie a permis de produire des résultats comparatifs, sur la base d'indicateurs quantifiés à cette échelle.

Le choix des deux grands bassins Adour-Garonne et Seine-Normandie s'avère pertinent pour l'étude et éclairant sur la situation nationale

Compte tenu de l'importance des deux bassins dans la production agricole et dans le potentiel bioénergétique, ces résultats sont éclairants pour la situation nationale même s'ils ne la recouvrent pas intégralement. Dans ce sens, les évaluations, même sans couvrir la totalité du territoire, peuvent être considérées comme représentatives du Nord et du Sud de la France. D'une part, la production agricole cumulée des deux bassins représente environ la moitié de celle du territoire national. D'autre part, leurs caractéristiques climatiques conditionnent des choix de cultures et de pratiques, de même que leurs impacts sur l'eau, sensiblement différents.

- En Seine-Normandie (SN), l'évapotranspiration étant relativement comparable aux apports des précipitations, les besoins d'irrigation sont globalement assez faibles. En revanche, le drainage peut être assez élevé, se traduisant par un lessivage d'azote important. Ainsi, les critères de pression en quantité pourront apparaître moins importants que les critères de pression nitrates.
- En Adour-Garonne (AG), l'évapotranspiration potentielle dépasse nettement les apports des précipitations, de sorte que les besoins d'irrigation s'avèrent importants pour les cultures de printemps et d'été. Le drainage étant en moyenne plus faible qu'en Seine-Normandie, la pression nitrates peut apparaître moins significative sur l'ensemble du bassin – ces remarques étant faites, les deux aspects de pression « en flux » sont toutefois à examiner sur les deux bassins.
- On note enfin que le découpage Nord/Sud apparaît satisfaisant pour l'étude, et que chaque bassin, compte tenu du type d'agriculture qu'il comporte, apparaît bien représentatif, pour la production de biocarburants, de la moitié du pays à laquelle il appartient.

Les tendances apparaissent relativement cohérentes mais les scénarios montrent des comportements marqués

Compte tenu des hypothèses constitutives des scénarios, les conversions de sols conduisent à des résultats relativement contrastés.

Les scénarios 1A et 1B montrent des tendances à l'accroissement des pressions pour les principaux indicateurs : prélèvements, nitrates, pesticides

- Le scénario 1A (S1A), basé sur une agriculture alimentaire conventionnelle et des technologies de première génération se déployant sur les surfaces disponibles, conduit pour tous les indicateurs à une intensification nette des pressions sur les surfaces converties, en référence à la situation 2006 :
 - intensification des prélèvements pour l'irrigation ;
 - accroissement des fuites d'azote ;
 - non-amélioration des pressions phytosanitaires.
- Le scénario 1B (S1B), qui conserve la même structure agricole, allège les pressions en recourant à une production de biogaz, soit par des cultures dédiées (SN), soit par la valorisation des résidus de cultures (AG). Cela conduit à amortir l'accroissement des pressions typique du S1A, sans toutefois inverser les tendances. L'introduction d'une filière biogaz conduit donc à réduire l'accroissement des impacts dus à la mise en culture de sols initialement en jachère ou en prairie, sans que cela n'améliore pour autant la situation initiale. En ce sens, le scénario n'est pas améliorant dans l'absolu, mais seulement relativement par rapport au S1A. Cette amélioration relative provient du recours plus abondant aux cultures dédiées de pérennes (SN), et de la moindre consommation de surfaces permise par la valorisation biogaz de résidus (SN et AG).

Le bilan est plus contrasté pour les filières de deuxième génération, entre l'option « productive » et l'option « protection des ressources »

- Le scénario 2 (S2), qui décrit un fort développement de la production de cultures énergétiques pour les technologies de seconde génération, conduit à intensifier certaines pressions (en quantité) et à en

Tableau 25 – Comparaison des évaluations des huit scénarios pour les différents types de pressions : quantité (prélèvement, déficit hydrique d'étiage), qualité « nitrates » (fuite, concentration), qualité « phytosanitaires » (pression, risque)

	Pression en quantité	Pression en qualité : nitrates	Pression en qualité : phytosanitaires
AG-1A	Prélèvement	Fuite	Pression
	Déficit	Concentration	Risque
SN-1A	Prélèvement	Fuite	Pression
	Déficit	Concentration	Risque
AG-1B	Prélèvement	Fuite	Pression
	Déficit	Concentration	Risque
SN-1B	Prélèvement	Prélèvement	Pression
	Déficit	Concentration	Risque
AG-2	Prélèvement	Fuite	Pression
	Déficit	Concentration	Risque
SN-2	Prélèvement	Fuite	Pression
	Déficit	Concentration	Risque
AG-3	Prélèvement	Fuite	Pression
	Déficit	Concentration	Risque
SN-3	Prélèvement	Fuite	Pression
	Déficit	Concentration	Risque
Légende	Dégénération	Stabilité	Amélioration

alléger d'autres (pression azote), tandis que la pression phytosanitaire évolue différemment d'un bassin à l'autre : intensification des pratiques en AG, sans accroissement net du risque d'exposition des masses d'eau. Ces différences sont dues aux cultures impliquées, en fonction du climat des bassins.

- Le scénario 3 (S3), dont l'objectif est d'améliorer la situation des ressources en eau sur le même volant de surfaces que le scénario 2, joue effectivement un rôle efficace dans ce sens :

- bilan hydrique : l'amélioration est nette ;
- pression azote : l'amélioration existe, mais est moins significative compte tenu des caractéristiques des cultures mises en jeu (les cultures pérennes et énergétiques sont souvent favorables sur ce point) ;
- pression phytosanitaire : les pratiques étant par définition moins intensives (choix d'itinéraires techniques adaptés), elles induisent une nette diminution du risque d'exposition par rapport à la situation 2006 ou par rapport au S2.

Les résultats posent la question de la comparaison et de la hiérarchisation des types de pression

Le comportement des scénarios apparaît relativement homogène en affichant une amélioration ou une dégradation pour l'ensemble des critères. Toutefois, plusieurs scénarios, selon les bassins, conduisent à des évolutions antagonistes. Il s'agit alors d'arbitrer en fonction des critères prioritaires et de la situation des bassins.

Les résultats sont globalement concordants pour les 3 pressions (quantité, nitrates, phytosanitaires), dans les scénarios suivants :

- AG-1A et SN-1A (dégradation)
- AG-1B (stabilité)
- AG-3 et SN-3 (amélioration)

Ils sont discordants dans les scénarios suivants :

- Le scénario SN-1B, pour lequel les prélèvements augmentent, mais l'étiage est soulagé, tandis que les autres indicateurs restent stables. L'objectif d'amélioration de ce scénario, qui est de mobiliser moins de cultures annuelles, est, en valeur absolue, atteint partiellement.
- Les scénarios AG-2 et SN-2, qui dégradent fortement les indicateurs quantitatifs, mais soulagent les indicateurs « nitrates » ainsi que la pression phytosanitaire. L'accroissement des prélèvements handicape cependant nettement ces scénarios, d'autant plus en Adour-Garonne où les prélèvements annuels et d'étiage sont déjà des critères importants. En Seine-Normandie toutefois, la très forte intensification des prélèvements pourrait également conduire à rendre ces critères importants. Il y a sans doute lieu, dans les deux cas, d'attacher de l'importance aux critères de quantité d'eau.

À l'examen des résultats, quelques orientations semblent pouvoir être préconisées

Des implications pour la gestion des ressources

En fonction des résultats présentés, il pourra sembler plus particulièrement judicieux au gestionnaire ou au décideur de :

- promouvoir, en prévision de modifications significatives de l'occupation des sols, une évaluation préalable des pressions et impacts, portant sur les cultures en elles-mêmes, mais aussi sur l'échelle des grands territoires ;
- généraliser le recours au type d'évaluation « opérationnelle » à grande échelle proposé ici, afin de dégrossir les orientations et d'orienter d'éventuelles études plus fines, pour la gestion d'un territoire ou d'un bassin ;
- rechercher une analyse coûts-bénéfices de la mise en place de nouvelles cultures, ou de scénarios d'évolution généraux notamment à l'aide du type d'outil proposé ici ;
- examiner les « options environnementales » (de type scénario 3 avec protection des ressources, ou scénario 1B avec contribution du biogaz) à l'aune des impératifs de restauration du bon état imposés par la DCE, en particulier compte tenu du temps de déploiement de nouvelles cultures/filières ;
- étudier où le déploiement privilégié de cultures à faible impact pourrait contribuer à améliorer la situation des ressources sans compromettre les conditions d'une activité agricole sur les zones considérées.

Les bioénergies apportent des opportunités environnementales qu'il faut concrétiser

Par ailleurs, les bioénergies apparaissent comme une opportunité de revoir certaines problématiques agricoles avec des solutions améliorantes, en veillant toutefois aux équilibres alimentaires et environnementaux.

L'étude des impacts environnementaux des biocarburants questionne doublement la situation agricole : (i) en quoi les cultures à vocation énergétique présentent-elles des caractéristiques différentes des cultures agricoles conventionnelles, (ii) en quoi le déploiement des cultures énergétiques affecte-t-il la situation des cultures en place ? La dernière question pose clairement celle des ressources de sols disponibles. Concernant les choix de culture, l'étude montre que certaines cultures plus spécifiquement utilisables pour l'énergie présentent potentiellement des avantages environnementaux indéniables, mais aussi que la façon de les conduire renforce ou au contraire réduit cet avantage potentiel.

L'étude à grande échelle, objet de ce travail, peut apporter un éclairage complémentaire sur l'étude des systèmes de culture et sur leur influence sur l'environnement. Les scénarios de plus fort développement des biocarburants réclament en effet des surfaces importantes. Ils font appel à des cultures nouvelles dont les itinéraires techniques sont en cours de développement. La relation avec la grande échelle n'est pas immédiate. À titre d'exemple, la mesure du risque de transfert d'un produit phytosanitaire utilisé sur une culture énergétique largement déployée sur un territoire peut aboutir à rendre l'une des substances de ce produit significativement impactante sur le risque global du territoire (comme l'illustre le scénario 2). Cette mesure permet alors de rendre un paramètre sensible alors qu'il pouvait, dans les conditions d'utilisation actuelle d'essais préalables à l'homologation, être défini comme correctement adéquat pour le traitement de la culture.

Quelques enseignements méthodologiques et pistes de développement

La méthodologie de l'étude paraît originale pour fournir des évaluations à grande échelle

La méthodologie mise en œuvre repose sur :

- une technique de changement d'échelle opérationnelle ;
- la définition de systèmes-type (cultures-type), élaborés *ad hoc* ;
- des méthodologies d'évaluation reposant sur des approches de bilan, pour la quantité d'eau et les nitrates, et sur l'adaptation d'indicateurs existants portés à grande échelle, pour les phytosanitaires.

Les résultats obtenus forment quatre axes principaux :

- les scénarios élaborés, qui constituent à la fois un résultat (une vision du déploiement des biocarburants sur les surfaces agricoles à l'horizon 2030) et un moyen pour alimenter les évaluations. Ces scénarios font l'objet d'une transcription, à l'échelle nationale et à l'échelle des bassins, en termes de sols agricoles initiaux (2006) et finaux (2030) ;
- l'évaluation des pressions en quantité, pour laquelle ont été construits les cultures-type et le modèle de bilan en eau permettant de déterminer les bilans hydriques de culture, puis d'évaluer les bilans de conversion des sols entre 2006 et 2030 pour chacun des paramètres, pour chaque scénario ;
- l'évaluation des pressions en qualité « azote », reposant elles aussi sur des bilans quantitatifs de flux d'azote. Ces évaluations ont fait l'objet de plusieurs essais de méthodes différentes, pour retenir une méthode robuste basée sur les bilans hydriques construits pour la présente étude ;
- l'évaluation des pressions en qualité « phytosanitaires », reposant sur l'étude et l'adaptation d'indicateurs existants pour la problématique, en termes de pression (IFT) et de risque (classement SIRIS-Pesticides).

Pour chacune des parties, l'évaluation des pressions sur l'eau s'est révélée assez fortement discriminante entre les scénarios, mettant en évidence les scénarios conduisant à des améliorations ou à des dégradations des ressources en eau en termes de quantité ou de qualité. Même lorsque le choix d'hypothèses peut conduire à vraisemblablement sous-estimer les valeurs de certains indicateurs (pression « nitrates »), la méthode paraît bien répondre aux attentes de l'évaluation.

Quelques enseignements méthodologiques et pistes d'amélioration peuvent être dégagés

Les apports méthodologiques pour l'évaluation environnementale concernent plusieurs points. La validité de l'évaluation par systèmes type à l'échelle des bassins apparaît satisfaisante. L'approche nécessite des validations et une expertise qui sont nécessaires pour discuter les valeurs obtenues et leur niveau de fiabilité/d'incertitude. Les potentialités d'outils ou d'indicateurs existants, appliqués à l'évaluation avant-après, sont également avérées : par exemple, SIRIS-Pesticides, conçu comme un outil de discrimination des substances à rechercher en priorité dans l'environnement, paraît bien adapté à l'évaluation des scénarios.

Les questions d'améliorations de méthode, sans que cette liste soit exhaustive, peuvent porter sur :

- l'affinement des évaluations des valeurs moyennes, par enrichissement des données utilisées (données exhaustives à l'échelle d'étude comme le bassin, simulations plus poussées...) ;
- l'enrichissement des scénarios « cultures » en incluant des surfaces non agricoles (forêts, terres marginales...) ;
- l'étude par sous-bassin permettrait d'obtenir des évaluations plus fines rendant mieux compte de l'hétérogénéité à grande échelle des bassins (cohérence agricole, priorités de gestion de l'eau, protection de zones vulnérables, etc.) ;
- le couplage de l'approche en systèmes type par sous-bassin à une approche cartographique détaillée, ainsi qu'à des simulations de cultures affinées, explicitant les relations avec les ressources, pourrait notamment permettre de localiser des zones prioritaires d'implantation de cultures à faible impact, dans un but d'amélioration de l'état des ressources en eau ;
- La conduite d'études de cas sur des sous-bassins à enjeu :
 - pour étudier ces territoires en tant que tels, y envisager les voies de développement et évaluer des alternatives possibles ;
 - pour apporter des enseignements contextualisés sur la relation pression – ressource. En effet, l'étude en pression ne peut produire de véritable évaluation sur l'impact qu'aura le développement des scénarios sur les ressources. Le recours à des études de cas constitue une façon d'aborder cette relation, dans un contexte bien défini et documenté.

L'étude constitue un premier travail d'évaluation à grande échelle, pour lequel d'autres applications pourront être recherchées

De nouveaux champs d'application peuvent viser, sans que cette liste soit exhaustive, à :

- mettre en œuvre une démarche similaire pour des problèmes de gestion territoriale des ressources (outils dévaluation rapide, aide à la décision...) ;
- aborder, en interaction avec l'agronomie, la problématique de la gestion des résidus agricoles (pailles, cannes, etc.) par une approche globale, mettant en balance les avantages et inconvénients, tant à grande échelle qu'à celles de l'exploitation et de la parcelle, pour la protection des ressources en eau (rôle dans la minéralisation de l'azote, caractéristiques du sol, gestion des digestats de biogaz...) ;
- étudier par une approche similaire les autres aspects environnementaux des bioénergies, non couverts par la présente étude. Les autres aspects – énergie, gaz à effet de serre, biodiversité etc. – ne sont pas évalués ici car la cible est bien la ressource en eau. Il est considéré que d'autres études, existantes ou en cours, peuvent renseigner sur ces questions. Outre le fait de compléter l'évaluation, un tel travail pourrait permettre de chercher à comparer et à hiérarchiser les critères « eau » et les autres critères.

La prise en compte des indicateurs « eau » apparaît indispensable à l'évaluation des filières bioénergies

Il paraît important de rappeler que cette étude rend compte d'une approche généraliste qui ne vise pas à se substituer aux travaux, plus fins et précis, des spécialistes des questions agronomiques et hydrologiques. Toutefois le cadre large du travail, lorsque les approches restent homogènes, permet de questionner les spécialistes et dans certains cas de contribuer à une meilleure prise en compte de l'échelle de gestion des décideurs. Le travail, reposant sur différentes hypothèses, reste perfectible,

mais il n'est pas nécessairement moins juste qu'un travail plus fin, à ces échelles, selon la richesse de la connaissance qui peut être considérée dans les systèmes type.

Les scénarios construits pour cette étude proposent différentes visions de l'avenir et montrent que, outre les niveaux de production de biocarburants, la façon de les produire mérite tout autant d'être étudiée et anticipée.

Parmi les éléments de conclusion à ce document, les critères « eau » sont bien des critères pouvant, parmi d'autres, départager les options de production de biocarburants. Ils apportent des éléments nouveaux qui complètent les indicateurs globaux désormais classiques d'évaluation environnementale en termes d'énergie et de gaz à effet de serre. Les choix de développement des bioénergies, tel qu'évalués dans ce travail, présentent des impacts potentiels marqués sur les ressources en eau. Pouvant être positifs ou négatifs, souhaités ou indésirables, ces impacts potentiels paraissent devoir être spécifiquement intégrés aux réflexions d'aménagement et de déploiement des bioénergies. Cette prise en compte est nécessaire aux grandes échelles de gestion traitées dans ce travail, mais aussi à des échelons intermédiaires, tant pour la dimension de l'aide à la décision en matière d'aménagement que pour la recherche d'une évaluation plus riche des pressions et des impacts sur l'eau. Dans le déploiement de filières bioénergies, outre les impacts globaux, les impacts sur l'eau ne sont, naturellement, pas les seuls à prendre en compte. Ils constituent, parmi d'autres critères, une avancée dans le développement de filières biomasse globalement plus durables.

Glossaire

• Aides aux cultures énergétiques (ACE)

Aide instaurée dans le cadre de la politique agricole commune (PAC) depuis la récolte 2004. D'un montant de 45 €/ha, cette aide concerne plus particulièrement les producteurs qui consacrent une partie de leurs surfaces hors jachère à des cultures destinées à la production de produits énergétiques, de chaleur ou d'électricité (biocarburants, combustible, électricité).

• B5

Biodiesel incorporé à 5 % dans le gazole – le B10 en contient 10 %, le B20, 20 %, etc. Le biodiesel est essentiellement produit à partir d'huiles végétales (de colza, tournesol, soja, palme...) transformées par une opération de transestérification avec un alcool. Cette opération permet d'obtenir du EMHV (si l'alcool utilisé est du méthanol) ou du EEHV (avec de l'éthanol).

• Biomasse

En écologie, matière formée par les organismes vivants (végétaux, animaux). Dans les usages énergétiques, la biomasse désigne l'ensemble des ressources énergétiques provenant des végétaux (cultures, résidus, déchets de transformation...), des déchets animaux (fumiers, lisiers, etc.) et, par extension, de la fraction fermentescible des ordures ménagères. Toutes ces ressources sont considérées comme étant renouvelables. Compte tenu de l'hétérogénéité de teneur en eau, la biomasse est souvent comptée en équivalent de matière sèche (MS).

• CIPAN (Culture intermédiaire piège à nitrates) :

Couvert végétal, souvent peu productif, dont l'effet est à la fois de réduire le drainage par rapport à un sol nu (la plante évapore de l'eau pour sa croissance), et de pomper une partie significative des nitrates disponibles dans le sol. La culture intermédiaire peut ainsi constituer un stockage temporaire de l'azote et le remettre, sous forme organique à minéraliser, en circulation pour la culture suivante, sachant bien que cet azote aurait été perdu par drainage en l'absence de cette pratique.

• Culture C₃,C₄

La majorité des plantes cultivées, et les arbres, produisent la matière par photosynthèse selon

la voie métabolique dite C₃, dans laquelle sont formées à partir du CO₂ des molécules intermédiaires à 3 atomes de carbone. Certaines plantes d'origine tropicale, telles que le maïs, le sorgho, la canne à sucre, etc. ont une voie métabolique dite C₄, faisant intervenir des composés intermédiaires à 4 atomes de carbone. Une particularité importante des plantes en C₄ est de présenter une meilleure efficience d'utilisation de l'eau que les C₃.

• Culture lignocellulosique

Culture dans laquelle la biomasse récoltée est principalement formée de lignine et de cellulose, par opposition aux cultures alimentaires qui peuvent produire des composés à forte valeur nutritive (amidon, sucres, lipides, protéines). Il s'agit d'espèces de prairie, d'espèces spécifiquement cultivées pour la bioénergie (miscanthus, switchgrass...), d'espèces d'arbres exploitées en taillis de très courte rotation (TTCR), en taillis de courte rotation (TCR) ou en exploitation forestière classique (bois de feu).

• Culture pérenne

Culture dont le système racinaire reste présent pendant plusieurs années, par opposition aux cultures annuelles qui sont semées tous les ans. Il s'agit généralement de plantes non alimentaires : plantes de prairie ou cultures spécifiques (miscanthus, switchgrass...). Les cultures pérennes présentent l'avantage d'une saison de croissance plus longue et d'une meilleure capacité à capter l'eau et les nutriments du sol. Ces cultures présentent généralement un drainage et des fuites de nitrates plus faibles que les cultures annuelles.

• Directive cadre sur l'eau (DCE)

Directive adoptée en 2000 par la Commission européenne dont l'objectif générale est d'atteindre le bon état des différents milieux aquatiques sur tout le territoire européen.

• Drainage

En agronomie, transfert d'eau provenant du sol en direction des ressources en eau (nappe souterraine, cours d'eau par l'intermédiaire de nappes ou de fossés drainants). Le drainage intervient lorsque de l'eau est apportée en excédent dans un sol saturé en eau (par les précipi-

tations notamment). L'existence du drainage permet de recharger les nappes souterraines. Lorsqu'il contribue à lessiver les sols agricoles en nitrates ou pesticides, il peut transférer de la pollution vers les ressources en eau. On retient sept classes de drainage, déterminées selon la vitesse de leur écoulement, selon le Service canadien d'information sur les terres et les eaux.

- **E5, E10, E85**

Éthanol incorporé à 5, 10 ou 85 % dans l'essence. L'éthanol est produit à partir de deux grands types de cultures : les plantes sucrières (cannes à sucre, betteraves) et des plantes amylacées (blé, maïs). Il peut être utilisé pur, en mélange ou sous sa forme d'éther (ETBE), produit par réaction avec de l'isobutène issu des raffineries.

- **Etiage**

En hydrologie, l'étiage correspond statistiquement (sur plusieurs années) à la période de l'année où le débit d'un cours d'eau atteint son point le plus bas (basses eaux). Cette valeur est annuelle. Il intervient pendant une période de tarissement et est dû à une sécheresse forte et prolongée qui peut être fortement aggravée par des températures élevées favorisant l'évaporation, et par les pompages agricoles à fin d'irrigation.

- **Gel nu**

Les surfaces en gel nu ne sont pas couvertes en cultures, qu'il s'agisse de cultures alimentaires ou de cultures énergétiques. Lorsque la même parcelle reste en gel nu suffisamment longtemps, la végétation herbacée se développe naturellement, de sorte que ces surfaces peuvent être comparées à des prairies faiblement productives.

- **Indice de fréquence de traitement (IFT)**

Indicateur traduisant l'intensité des pratiques en matière d'application de produits phytosanitaires. Formé, pour une substance et pour une année, par le rapport entre la quantité appliquée à l'hectare et la dose homologuée à l'hectare, il traduit le nombre de traitements appliqués à la culture. Pour les principales grandes cultures, on constate fréquemment des valeurs d'IFT entre 2 et 4. Pour les vignes et vergers, propices à la prolifération de maladies, l'IFT dépasse fréquemment 10.

- **Jachère**

Terre arable laissée sans culture pour que la terre se repose, normalement pour toute la durée de la campagne. Elle se distingue donc

des cultures dérobées, qui sont cultivées sans produire de récolte pendant la campagne. Elle participe à l'assolement, à la différence de la superficie agricole non utilisée qui reste inculte pendant au moins cinq années consécutives. Les jachères peuvent être : des terrains nus, sans aucune culture ; des terres portant une végétation naturelle spontanée pouvant être utilisée comme aliments pour animaux ou enfouie sur place ; des terres ensemencées exclusivement pour la production d'engrais verts (jachère verte). (Source : Décision de la Commission 83/461/CEE).

- **Peupleraies ou peupleraies en plein**

Plantations régulières de peupliers (pouvant être associées à des productions agricoles). Le peuplement est de plus de 10 m de largeur issu de plantations où le peuplier se trouve à l'état pur ou nettement prépondérant (plus de 5/10 du couvert relatif), de superficie égale ou supérieure à 0,05 ha. Sont englobés les boqueteaux et cordons. Les peupliers d'alignement sont exclus (nomenclature Teruti-Lucas).

- **Réserve utile (RU)**

Tout sol possède une certaine capacité de rétention de l'eau apportée par les précipitations ou l'irrigation. La réserve utile du sol désigne la part de cette réserve qui est utilisable par la plante, compte tenu de la capacité du système racinaire de la culture à prélever l'eau du sol. Une fraction de la RU est facilement utilisable par la culture : il s'agit de la réserve facilement utilisable (RFU). Si la RFU est éprouvée par l'évaporation de la culture, les plantes se trouvent en stress hydrique et leur développement peut s'en trouver affecté.

- **Rotation culturelle**

On parle de rotation culturelle lorsque dans un système de culture, des cultures se suivent dans un certain ordre sur la même parcelle, la même succession de cultures se reproduisant dans le temps en cycles réguliers. On peut ainsi avoir des rotations biennales, triennales, quadriennale... Le choix des cultures se fait en fonction des besoins et des objectifs de l'agriculteur mais aussi en tenant compte des pratiques culturelles, telles que travail du sol, contrôle des mauvaises herbes, contrôle du contenu en éléments fertilisants du sol etc.

- **Surface agricole utile (SAU)**

Ensemble des surfaces agricoles d'un territoire (canton, département, région, État...). La SAU comprend différents compartiments, notamment les terres arables, principalement ex-

ploitées pour les grandes cultures, les cultures permanentes (vignes, vergers...), les prairies et surfaces toujours en herbe, les peupleraies, les terres non cultivées considérées comme agricoles, etc. Elle exclut le couvert forestier proprement dit.

- **Système d'intégration des risques par interaction des scores (SIRIS)**

Méthode d'évaluation de la contamination potentielle des ressources en eau (eaux de surface, eaux souterraines) par une substance donnée, tenant compte de la toxicité intrinsèque de la substance, de son aptitude à migrer vers les ressources en eau, de sa vitesse de dégradation dans l'environnement, et de l'ampleur des surfaces traitées. Utilisé pour cibler les substances à rechercher en priorité dans l'environnement par les moyens de suivi, l'outil SIRIS fournit un classement, ou score, exprimé sous forme de pourcentage. Au-delà de 60 %, le score traduit une contamination potentielle significative.

- **Territoire agricole non cultivé**

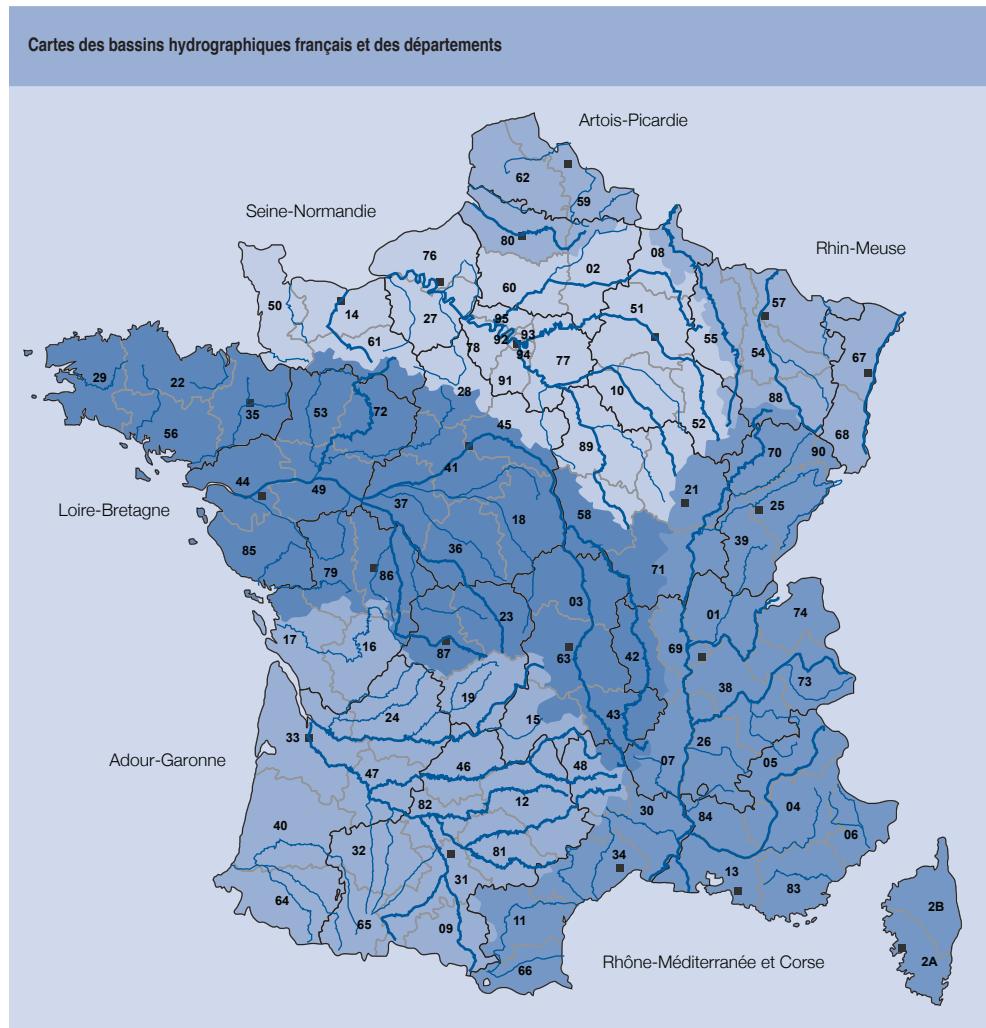
Ce poste comprend les landes non productives, friches, terres incultes, landes non pacagées, exploitations abandonnées, cultures permanentes abandonnées, les chemins d'exploitation non stabilisés. Les friches (ou superficies agricoles utilisables, mais non utilisées) sont des terres non comprises dans l'assoulement depuis plus d'une campagne agricole. Elles correspondent à des superficies autrefois cultivées, qui ne sont plus du tout exploitées mais dont la remise en culture pourrait être réalisée avec des moyens normalement disponibles sur une exploitation (nomenclature Teruti-Lucas).

- **Tonne équivalent pétrole (tep)**

Unité calorifique mesurant l'équivalent énergétique conventionnel d'une tonne de pétrole, c'est-à-dire 42 GJ (soit environ 10 Gcal). Elle permet de comparer entre elles des formes d'énergie différentes, avec comme référence le pétrole, qui est le combustible le plus utilisé.

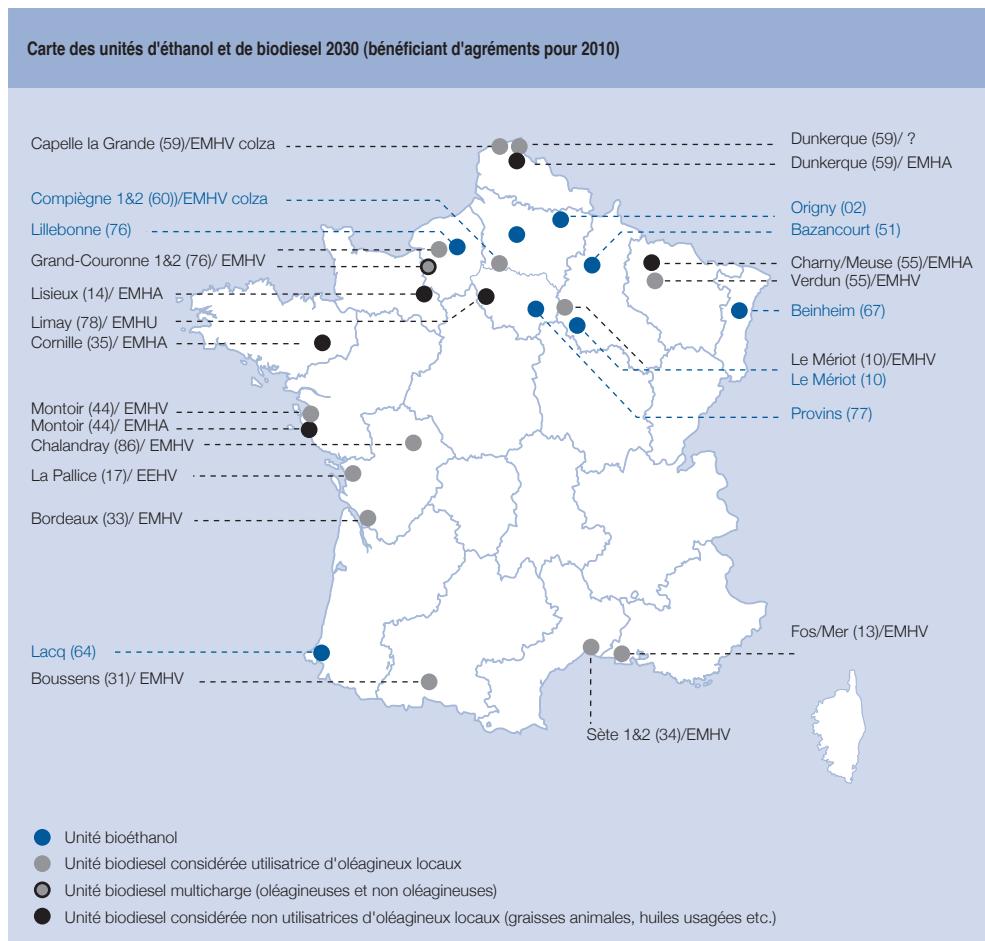
Annexes

Annexe 1 Carte des bassins hydrographiques français et des départements



Annexe 2

Liste et localisation des unités de production de biocarburants agréées en France et bénéficiant du système de défiscalisation en vigueur



Liste des unités de bioéthanol agréées et leurs agréments 2010

Zone	Produit	Société	Localisation	Matières premières	Agrément 2010 (t)
Nord	Bioéthanol pour ETBE	Nord ETBE	Mardyck (59)	Blé, betterave	37 000
	Bioéthanol pour ETBE	Ouest ETBE	Gonfreville (76)	Blé, betterave	31 000
	Bioéthanol	Cristal Union	Arcis-sur-Aube (10)	Betterave	23 000
	Bioéthanol	St Louis Sucre	Epeville (80)	Betterave	40 000
	Bioéthanol	SVI	Saint-Emilie (80)	Betterave	12 000
	Bioéthanol	SDT	Toury (28)	Betterave	12 000
	Bioéthanol	Téréos	Bucy-le-Long (02)	Betterave	6 000
	Bioéthanol	Téréos	Morains (51)	Betterave	3 000
	Bioéthanol	Téréos	Artenay (45)	Betterave	12 000
	Bioéthanol	Téréos	Lillers (62)	Betterave	18 000
	Bioéthanol	SA Vallée du Loing	Soupes (77)	Betterave	3 000
	Bioéthanol	Téréos (BENP)	Lillebonne (76)	Blé	160 000
Sud	Bioéthanol	Brie Champagne Ethanol	Provins (77)	Blé	5 000
	Bioéthanol	Roquette	Beinheim (67)	Blé	95 000
	Bioéthanol	Amylum Sedalcol SNC	Mesnil St Nicaise (80)	Blé	3 000
	Bioéthanol	Soufflet	Le Mériot (10)	Blé	80 000
	Bioéthanol	Cristal Union	Bazancourt (51)	Blé, betterave	168 000
	Bioéthanol	Cristal Union	Betheniville (51)	Blé, betterave	21 000
	Bioéthanol	Téréos	Origny (02)	Blé, betterave	70 000
	Sous-total Nord				799 000
	Bioéthanol pour ETBE	Lyondell	Fos sur Mer (13)	Blé, betterave	111 000
	Bioéthanol pour ETBE	Total	Feyzin (69)	Blé, betterave	45 000
Sous-total Sud	Bioéthanol	Cristal Union	St Gilles du Gard (30)	Alcool vinique	17 000
	Bioéthanol	Abengoa Bioenergy	Bassin de Lacq (64)	Maïs	120 000
	Sous-total Sud				293 000
TOTAL					1 092 000

Liste des unités de biodiesel françaises agréées et leurs agréments 2010

Zone	Produit	Société	Localisation	Matières premières	Agrément 2010 (t)
Nord	NC	Total	Dunkerque (59)	NC	100 000
	EMHV1	Novaol (INEOS)	Verdun (55)	Colza	210 000
	EMHV	Diester Ind	Grand-Couronne 1 (76)	Colza	260 000
	EMHV	Diester Ind	Grand-Couronne 2 (76)	Colza	206 000
	EMHV	Diester Ind	Compiègne 1 (60)	Colza	149 000
	EMHV	Diester Ind/	Compiègne 2 (60)	Colza	68 000
	EMHV	Diester Ind	Coudekerque (59)	Colza	229 000
	EMHV	Diester Ind	Montoir/St-Nazaire (44)	Colza	223 000
	EMHV	Diester Ind	Le Mériot (10)	Colza	236 000
	EMHA2	Airas 4 (Saria)	Montoir (44)	Graisses animales	30 000
	EMHA	Progilor Bougart	Charny sur Meuse (55)	Graisses animales	35 000
	EMHA	Daudruy Van Cauwenbergh	Dunkerque (59)	Graisses animales	91 000
Sous-total Nord	EMHA	Bionerval SARIA Industries	Lisieux (14)	Graisses animales	38 000
	EMHA	SCA pétrole et dérivés	Cornille (35)	Graisses animales	55 000
	EMHU4	Veolia Environnement (SARP Industrie)	Limay (78)	Huiles végétales recyclées	45 000
	Sous-total Nord				1 975 000
	EMHV	Centre Ouest céréales	Chalandray (86)	Colza, tournesol	60 000
Sud	EMHV	Diester Ind	Boussens (31)	Colza, tournesol	38 000
	EMHV	Diester Ind	Bordeaux/Bassens (33)	Colza (20%), tournesol (80%)	226 000
	EMHV	Diester Ind	Sète 1 (34)	Colza (70%), tournesol (30%)	214 000
	EMHV	Diester Ind	Sète 2 (34)	Colza (70%), tournesol (30%)	125 000
	EMHV	Biocar (La Compagnie du Vent)	Fos sur Mer (13)	Colza, tournesol	100 000
	EEHV3	SICA Atlantique et Valagro	La Rochelle (17)	Colza, tournesol	60 000
Sous-total Sud					823 000
TOTAL					2 798 000

1 EMHV : Ester Méthylique d'Huile Végétale - 2 EMHA : Ester méthylique d'Huile Animale - 3 EEHV : Ester Ethylique d'Huile Végétale

4 EMHU : Ester méthylique d'Huiles Usagées - NC : non communiqué

Annexe 3

Nature et étendue des surfaces à mobiliser pour l'implantation des cultures dédiées 2030 aux différentes échelles d'étude

Scénario 1A					
Mha	SAU	Surfaces totales 2006	Surfaces convertibles 2006	Surfaces converties 2030	
France	Gel PAC	1,5	1,4	1,1	
	ACE	0,4	0,4	0,4	
	Export	1,5	0,5	0,5	
	Prairie	9,0	0,7	0,7	
	Total	27,5	12,4	3,0	2,7
Bassin Seine-Normandie	Gel PAC	0,43	0,40	0,26	
	ACE	0,17	0,17	0,17	
	Export	0,75	0,28	0,28	
	Prairie	1,39	0,14	0,14	
	Total	5,9	2,74	0,98	0,85
Bassin Adour-Garonne	Gel PAC	0,30	0,23	0,23	
	ACE	0,04	0,04	0,04	
	Export	0,13	0,05	0,05	
	Prairie	1,20	0,12	0,12	
	Total	4,9	1,67	0,44	0,44
Scénario 1B					
Mha	SAU	Surfaces totales 2006	Surfaces convertibles 2006	Surfaces converties 2030	
France	Gel PAC	1,5	1,4	1,1	
	ACE	0,4	0,4	0,4	
	Export	1,5	0,5	0,1	
	Prairie	9,0	0,7	0,2	
	Total	27,5	12,4	3,0	1,7
Bassin Seine-Normandie	Gel PAC	0,43	0,40	0,40	
	ACE	0,17	0,17	0,17	
	Export	0,75	0,28	-	
	Prairie	1,39	0,14	0,06	
	Total	5,90	2,74	0,98	0,62
Bassin Adour-Garonne	Gel PAC	0,30	0,23	0,23	
	ACE	0,04	0,04	0,04	
	Export	0,13	0,05	0,03	
	Prairie	1,20	0,12	-	
	Total	4,9	1,67	0,44	0,30

Scénario 2					
Mha	SAU	Surfaces totales 2006	Surfaces convertibles 2006	Surfaces converties 2030	
France	Gel PAC	1,59	1,59	1,59	
	ACE	0,39	0,39	0,39	
	Prairie	9,00	4,95	1,18	
	Peupleraie	0,23	0,11	0,11	
	Friches	2,41	2,41	1,95	
	Eucalyptus (sud)	0,00	0,00	0,00	
	Céréales	7,50	3,86	1,71	
	Total	27,5	21,1	6,9	
Bassin Seine-Normandie	Gel PAC	0,44	0,44	0,44	
	ACE	0,17	0,17	0,17	
	Prairie	1,39	0,76	0,24	
	Peupleraie	0,07	0,03	0,03	
	Friches	0,14	0,14	0,14	
	Céréales	2,62	1,32	0,47	
	Total	5,9	4,82	1,49	
Bassin Adour-Garonne	Gel PAC	0,30	0,30	0,30	
	ACE	0,04	0,04	0,04	
	Prairie	1,20	0,12	0,11	
	Peupleraie	0,05	0,03	0,03	
	Friches	0,50	0,50	0,37	
	Eucalyptus (sud)	0,00	0,00	0,00	
	Céréales (maïs, sorgho)	0,77	0,40	0,32	
	Total	4,9	2,87	1,40	1,16
Scénario 3					
Mha	SAU	Surfaces totales 2006	Surfaces convertibles 2006	Surfaces converties 2030	
France	Gel PAC	1,59	1,59	1,59	
	ACE	0,39	0,39	0,39	
	Prairie	9,00	4,95	2,40	
	Peupleraie	0,23	0,11	0,11	
	Friches	2,41	2,41	1,38	
	SCE	0,39	0,39	0,39	
	Maïs	2,17	0,81	0,55	
	Betterave (nord)	0,75	0,09	0,09	
Bassin Seine-Normandie	Total	27,5	16,9	6,9	
	Gel PAC	0,44	0,44	0,44	
	ACE	0,17	0,17	0,17	
	Prairie	1,39	0,76	0,46	
	SCE	0,10	0,10	0,10	
	Maïs	0,26	0,07	0,07	
	Peupleraie	0,07	0,03	0,03	
	Friches	0,14	0,14	0,14	
Bassin Adour-Garonne	Betterave (nord)	0,26	0,06	0,06	
	Total	5,9	2,82	1,46	
	Gel PAC	0,30	0,30	0,30	
	ACE	0,04	0,04	0,04	
	Prairie	1,20	0,66	0,26	
	SCE	0,07	0,07	0,07	
	Maïs	0,74	0,37	0,19	
	Peupleraie	0,05	0,03	0,03	
	Friches	0,50	0,50	0,19	
	Eucalyptus	0,004	0,004	0,004	
	Total	4,9	2,91	1,97	1,08

Annexe 4

Tableaux comparatifs des huit scénarios pour les bilans hydriques et les nitrates

Déficit hydrique étage	Initial Bassin 2006 (Mm³/an)	Initial Bassin 2030 (Mm³/an)	Converti 2006 (Mm³/an)	Converti 2030 (Mm³/an)	Total 2030-2006 relatif/initial (Mm³/an)	Total 2030-2006 relatif/initial (%)	Total 2030-2006 relatif/converti (%)
AG	S1A-AG	2048	2289	146	387	241	12%
	S1B-AG	2042	2086	166	209	43	2%
	S2-AG	2611	3555	1056	2000	944	36%
	S3-AG	2596	2673	514	591	77	3%
SN	S1A-SN	2048	2289	146	387	241	12%
	S1B-SN	2227	2116	378	267	-111	-5%
	S2-SN	2481	2997	824	1340	516	21%
	S3-SN	1608	1633	749	774	25	2%
Prélèvements totaux	Initial Bassin 2006 (Mm³/an)	Initial Bassin 2030 (Mm³/an)	Converti 2006 (Mm³/an)	Converti 2030 (Mm³/an)	Total 2030-2006 relatif/initial (Mm³/an)	Total 2030-2006 relatif/initial (%)	Total 2030-2006 relatif/converti (%)
	S1A-AG	967	1245	1	278	277	29%
	S1B-AG	967	1004	14	51	37	4%
	S2-AG	1180	2506	456	1782	1326	112%
	S3-AG	1180	1085	95	0	-95	-8%
SN	S1A-SN	137	176	41	80	39	28%
	S1B-SN	137	193	8	64	56	41%
	S2-SN	0	793	0	793	793	
	S3-SN	312	234	78	0	-78	-25%
Drainage annuel	Initial Bassin 2006 (Mm³/an)	Initial Bassin 2030 (Mm³/an)	Converti 2006 (Mm³/an)	Converti 2030 (Mm³/an)	Total 2030-2006 relatif/initial (Mm³/an)	Total 2030-2006 relatif/initial (%)	Total 2030-2006 relatif/converti (%)
	S1A-AG	3781	3897	516	633	116	3%
	S1B-AG	2585	2657	415	486	71	3%
	S2-AG	4195	4064	1713	1582	-131	-3%
	S3-AG	4246	4256	1314	1325	11	0%
SN	S1A-SN	4935	5012	977	1054	77	2%
	S1B-SN	4935	4981	979	1024	45	1%
	S2-SN	5926	6061	1908	2043	134	2%
	S3-SN	3525	3606	1828	1909	81	2%
Fuite d'azote sous racinaire	Initial Bassin 2006 (mg/l)	Initial Bassin 2030 (mg/l)	Converti 2006 (mg/l)	Converti 2030 (mg/l)	Total 2030-2006 relatif/initial (N/an)	Total 2030-2006 relatif/initial (%)	Total 2030-2006 relatif/converti (%)
	S1A-AG	39895	48840	1462	10407	8944	22%
	S1B-AG	39647	42039	1159	3550	2392	6%
	S2-AG	37026	34806	14789	12569	-2220	-6%
	S3-AG	36822	29625	9955	2758	-7197	-20%
SN	S1A-SN	41889	50218	10508	18837	8329	20%
	S1B-SN	40706	47468	5724	12486	6762	17%
	S2-SN	44839	38548	13042	6751	-6291	-14%
	S3-SN	22770	15043	10312	2585	-7727	-34%
Concentration du drainage sous racinaire (nitrates mg/l)	Initial Bassin 2006 (mg/l)	Initial Bassin 2030 (mg/l)	Converti 2006 (mg/l)	Converti 2030 (mg/l)			
	S1A-AG	47	56	13	73		
	S1B-AG	68	70	12	32		
	S2-AG	42	38	39	30		
	S3-AG	41	35	31	10		
SN	S1A-SN	37	43	46	72		
	S1B-SN	32	37	30	61		
	S2-SN	30	25	28	14		
	S3-SN	23	15	21	5		

Annexe 5

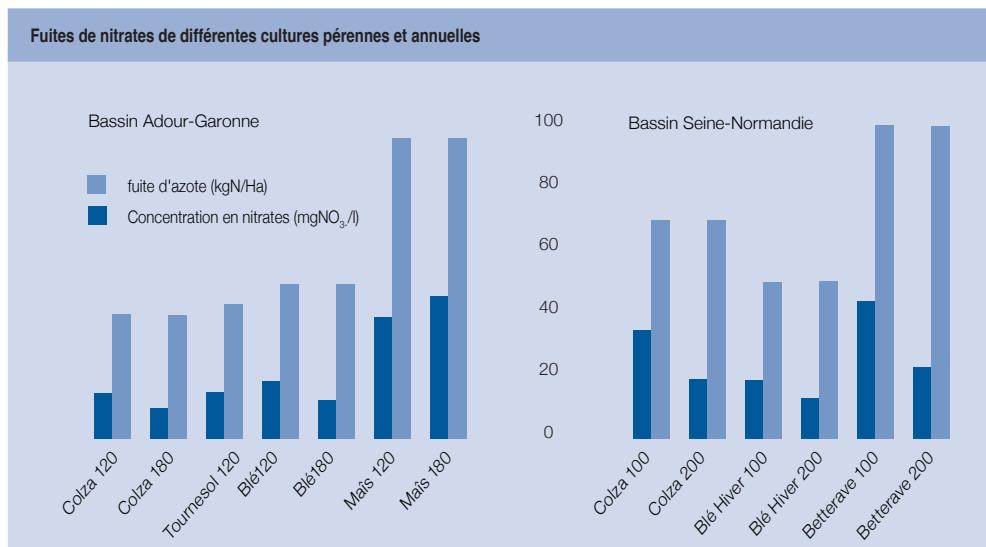
Fuites d'azote retenues pour les évaluations des scénarios

Valeurs des fuites d'azote retenues scénario par scénario (exemples)

Les valeurs de fuites sont établies à partir du drainage simulé par les bilans hydriques de cultures type, croisé avec une valeur de concentration moyenne en nitrates dans le flux de drainage. La fuite obtenue est validée et éventuellement calée pour se situer dans une plage de valeurs vraisemblable. De façon générale, les fuites retenues sont dans des valeurs basses, de façon à ne pas surestimer les flux d'azote. Le modèle fonctionnant par différence entre les cultures initiales et les cultures finales a pour effet d'amoindrir les erreurs attribuables au calage des valeurs de fuite. Le calcul des concentrations moyennes en nitrates dans les scénarios est sensible aux valeurs de concentrations retenues, mais l'écart 2030 – 2006 étant quant à lui nettement moins sensible, les possibles erreurs se compensant partiellement.

Les valeurs retenues pour les scénarios AG-S1A et AG-S1B sont assez classiques. La valeur retenue pour le colza, plutôt dans une fourchette basse, s'approche de celle obtenue par les simulations STICS réalisées par Eric Justes. Les fuites les plus importantes sont obtenues pour le maïs.

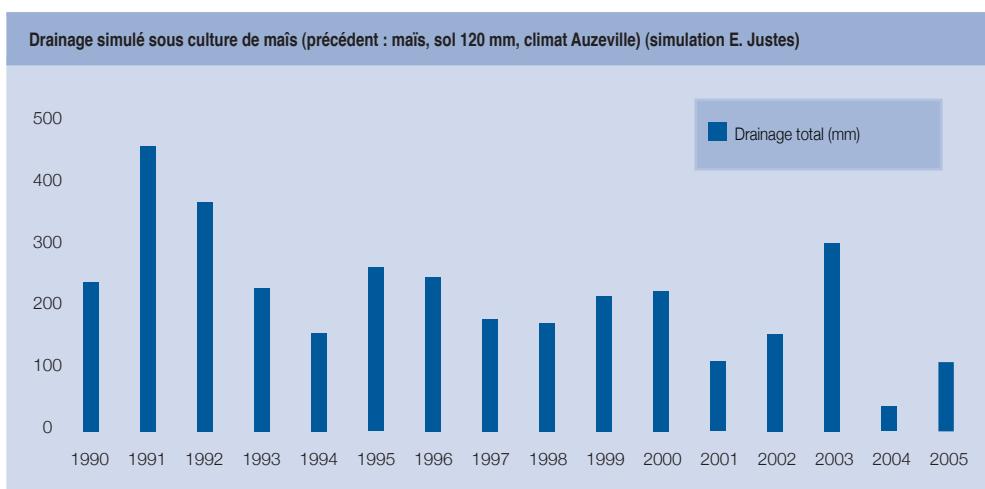
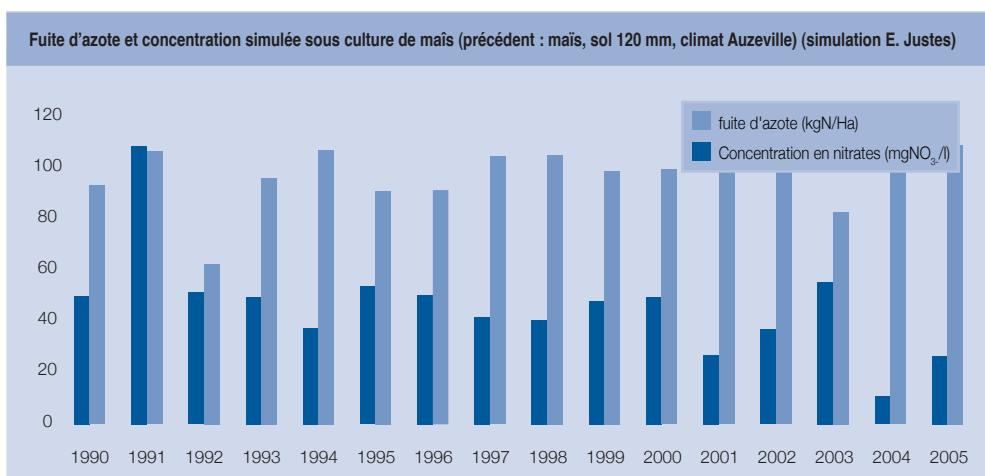
Les valeurs retenues pour les scénarios SN-S1A et SN-S1B sont assez classiques. La valeur retenue pour le colza reprend en valeur « basse » les données indicatives de Sebilo et al. (2000). Les fuites les plus importantes sont obtenues pour la betterave et le colza sur sol peu profond. Pour le blé d'hiver, la fuite retenue est une valeur relativement basse compte tenu du drainage et de la concentration moyenne.



Exemples de résultats de simulations STICS pour deux zones d'Adour-Garonne : Côteaux de Gascogne, Béarn-Chalosse

Les figures ci-dessous présentent les résultats d'une simulation STICS réalisée par Eric Justes (INRA Toulouse) pour les besoins de l'étude : maïs en succession, sur sol de coteaux (RU = 120 mm), climat Auzerville (Toulouse) de 1990 à 2005 ; reliquat du précédent initialisé à 75 kgN/ha.

Les résultats montrent une variabilité importante des fuites, des concentrations et du drainage. En éliminant les extrêmes, pour les fuites d'azote, on remarque toutefois une certaine stabilité des valeurs obtenues, drainage et concentrations pouvant dans certains cas varier en sens inverse.



Annexe 6

IFT moyens par culture régionaux et nationaux

Tableau des IFT moyens des grandes cultures par catégorie de produits :
H : Herbicides ; HH : Hors Herbicides

	BETTERAVE		BLE TENDRE		COLZA		TOURNESOL		MAIS GRAIN	
	H	HH	H	HH	H	HH	H	HH	H	HH
Alsace	**	**	1,10	1,58	**	**	**	**	1,59	0,64
Aquitaine	**	**	1,02	1,10	**	**	1,53	0,79	1,46	0,89
Auvergne	**	**	1,31	1,27	**	**	**	**	1,51	0,67
Basse Normandie	**	**	1,25	2,92	**	**	**	**	*	*
Bourgogne	**	**	1,50	2,86	2,01	5,07	**	**	1,62	0,65
Bretagne	**	**	1,27	2,21	**	**	**	**	1,35	0,23
Centre	**	**	1,40	2,39	1,65	3,99	1,67	0,38	1,59	0,60
Champagne Ardenne	1,80	2,60	1,51	3,38	1,81	4,37	**	**	1,35	0,32
Franche Comté	**	**	1,47	2,52	1,13	4,46	**	**	1,28	0,63
Haute Normandie	**	**	1,55	3,27	1,39	4,46	**	**	*	*
Île de France	2,23	2,20	1,44	3,35	1,46	4,55	**	**	1,32	1,13
Languedoc Roussillon	**	**	**	**	**	**	1,44	0,16	**	**
Lorraine	**	**	1,51	1,99	2,16	4,15	**	**	*	*
Midi Pyrénées	**	**	1,04	1,27	**	**	1,41	0,68	1,41	0,85
Nord Pas de Calais	1,91	1,59	1,51	3,90	**	**	**	**	1,48	0,08
PACA	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
Pays de la Loire	**	**	1,22	2,07	**	**	1,56	0,35	1,59	0,37
Picardie	2,22	2,05	1,63	3,53	1,52	4,37	**	**	1,35	0,51
Poitou Charentes	**	**	1,15	2,15	1,83	3,96	1,68	0,37	1,68	0,78
Rhône Alpes	**	**	1,02	1,45	**	**	**	**	1,59	0,59
France entière	2,06	2,13	1,38	2,64	1,75	4,31	1,56	0,50	1,50	0,65

Source : d'après Enquête « Pratiques Culturales 2006 » - Traitement DGPAAT, Ministère de l'Agriculture et de la Pêche

* échantillon non représentatif (<30 exploitations)

** cultures non renseignées dans la région

Tableau des IFT moyens des cultures lignocellulosiques

Miscanthus	Sorgho fibre		Canne de Provence	Mais biomasse	Switchgrass	Triticale H	Triticale HH	TCR
S2	S3	S2	S3	S2	S2	S3	S2	S2
0,43	0,03	1,50	0,50	0,20	1,50	0,17	0,07	1,00

Source : calculs d'après dire d'experts sur les pratiques d'épandage type expérimentées sur ces cultures (INRA, Arvalis)

Références bibliographiques

- ADEME/ITCF, *Cultures ligno-cellulosiques et herbacées pour la production de biomasse à usages non alimentaire*, Étude Agrice 1998
- Agreste, *Enquête sur les pratiques culturales en 2006 : Méthodologie*, Chiffres et Données Agriculture n° 200, 2008
- Amigues J.P., Debaeke P., Itier B., Lemaire G., Seguin B., Tardieu F., Thomas A. (éditeurs), 2006, *Sécheresse et agriculture. Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau*, Expertise scientifique collective, Rapport, INRA (France)
- Arregui L., Quemada M., *Drainage and nitrate leaching in a crop rotation under different N-fertilizer strategies: application of capacitance probes*, Plant Soil, octobre 2006, vol. 288, p. 57-69
- Aubertot J.N., Barbier J.M., Carpentier A., Gril J.J., Guichard L., Lucas P., Savary S., Savini I., Voltz M. (éditeurs), 2005, *Pesticides, agriculture et environnement. Réduire l'utilisation des pesticides et limiter leurs impacts environnementaux*, Expertise scientifique collective, Rapport, INRA/Cemagref (France)
- Basso B., Ritchie J.T., *Impact of compost, manure and inorganic fertilizer on nitrate leaching and yield for a 6-year maize-alfalfa rotation in Michigan*, Agriculture, Ecosystems and Environment, vol. 108, 2005, p. 329–334
- Bonnet J.F., 1998, *Les apports solaires implicites dans les activités humaines*, Thèse de doctorat, ENSAM, 395 p.
- Cadoux S., Vandendriessche V., Machet J.M., Mary B., Beaudoin N., Lemaire G., Gosse G., 2007, *Potential yield and main limiting factors of Miscanthus giganteus in France. Identification of the needs for further research*, INRA Estrées-Mons/INRA UEPF
- CAPAX Environmental Services, Short Rotation Wood, <http://www.shortrotationwood.eu>
- Chambre d'agriculture de la Marne, Fiches de conduite culturelle du sorgho fibre, du miscanthus et du switchgrass, août 2007
- Chapelle C., *Bilan agricole de l'azote. Détérioration entre 1995 et 1997*. Agreste-Primeur, n° 53, mars 1999
- Chapelle C., *Des nitrates agricoles à l'ouest et dans les plaines céréalières*, Agreste-Primeur, n° 123, avril 2003
- Cheverry C., Gascuel-Odoux C., *Les Français et leurs sols : essai de prospective à l'horizon 2030*, Courrier de l'environnement de l'INRA, octobre 2002, n° 47, p. 5-14
- Christian D.G., Poulton P.R., Riche A.B., Yates N.E., Todd A.D., *The recovery over several seasons of 15N-labelled fertilizer applied to Miscanthus giganteus ranging from 1 to 3 years old*, Biomass and Bioenergy, vol. 30, n° 2, février 2006, p. 125–133
- Christian D.G., Riche A.B., *Nitrate leaching losses under Miscanthus grass planted on a silty clay loam soil*, Soil use and management, Vol. 14, n° 3, septembre 1998, p. 131-135
- Comifer, Groupe Azote, 2002, *Lessivage des nitrates en systèmes de cultures annuelles. Diagnostic du risque et propositions de gestion de l'interculture*
- Comité professionnel du pétrole (CPDP), *Pétrole 2006. Éléments statistiques*
- DATAR, Groupe de prospective « Agriculture et territoires », 2002, *Agriculture et territoires : quatre scénarios pour 2015*
- Ercoli L., Mariotti M., Masoni A., Bonari E., 1999, *Effect of irrigation and nitrogen fertilization on biomass yield and efficiency of energy use in crop production of Miscanthus*, Field Crops Research, vol. 63, n° 1, 1999, p. 3-11
- Eulenstein F., Werner A., Willms M., Juszczak R., Schindlwein S.L., Chojnicki, B.H., Olejnik J., *Model based scenario studies to optimize the regional nitrogen balance and reduce leaching of nitrate and sulphate of an agriculturally used water catchment*, Nutrient Cycling in Agroecosystems, vol. 82, n° 1, septembre 2008, p. 33-49
- European Commission, Directorate-General for Agriculture, 2006, *Prospects for agricultural markets and income in the European Union 2006-2013*
- Fair Programme, 2000, *Giant reed (Arundo donax L) network improvement of productivity and biomass quality* (<http://ec.europa.eu/research/agro/fair/en/gr2028.html>)
- FCBA, Chambre d'agriculture du Languedoc-Roussillon, Enerbio, 2007, *Espèces ligneuses pour la production de biomasse, fiches descriptives du Peuplier, de l'Eucalyptus et du Robinier faux-acacia*

- Fernandez J., Curt M.D., Aguado P.L., 2006, *Industrial applications of Cynara cardunculus L. for energy and other uses*, Industrial Crops and Products, vol. 24, n° 3, novembre 2006, p. 222-229
- Gomez E., Ledoux E., Mary B., *Modélisation de la contamination nitrique des masses d'eau souterraine par les nitrates d'origine agricole*, Rapport PIREN-Seine 2002
- Goossens X., Bonnet J.-F., *Analyse des implications énergétiques de l'irrigation*, 20e Conférence européenne de la CIID, Workshop « Technologies et méthodes modernes d'irrigation : recherche, développement et essais », Montpellier, 17-19 Septembre, 28 p., 2003
- Gruenewald H., Brandt B.K.V., Schneider B.U., Bens O., Kendzia G., Hüttl R.F., 2005, *Agroforestry systems for the production of woody biomass for energy transformation purposes*, Ecological Engineering, Vol. 29, n° 4, 1er Avril 2007, p. 319-328
- Han Lee K., Jose S., 2004, *Nitrate leaching in cottonwood and loblolly pine biomass plantations along a nitrogen fertilization gradient*, Agriculture, Ecosystems and Environment, vol. 105, n° 4, 2005, p. 615–623
- Hydratec/BIPE/GERPA, 2007, *Élaboration de scénarii d'évolution des besoins en eau à comparer à la disponibilité de la ressource en eaux superficielles dans le bassin Seine-Normandie. Horizon 2015 et 2025*, Rapport final 2007 commandité par l'Agence de l'Eau Seine-Normandie, <http://www.eau-seine-normandie.fr/index.php?id=5308>
- Jenkinson D.S., *The impact of humans on the nitrogen cycle, with focus on temperate arable agriculture*, Plant and Soil, vol. 228, n° 1, 2001, p. 3–15
- Jørgensen U., 2001, *Combined production of biomass for energy and clean drinking water - A miscanthus demonstration project on the 'Renewable Energy Island' Samsø*
- JRC/IES, 2006, *Sustainable Bioenergy Cropping Systems for the Mediterranean*, Workshop EEA project, 2.4.2 Renewable energy (2006)
- Justes E., 2008, *Intérêts et limites des cultures intermédiaires pièges à nitrates (CIPAN) pour réduire les fuites d'azote nitrique dans les systèmes de grande culture*, Communication à la DIREN de Midi-Pyrénées, 2 juillet 2008
- Justes E., Mary B., Nicolardot B., *Comparing the effectiveness of radish cover crop, oilseed rape volunteers and oilseed rape residues incorporation for reducing nitrate leaching*, Nutrient Cycling in Agroecosystems, vol. 55, n° 3, 1999, p. 207-220
- Le Gall A.C., 2007, Bilan de l'enquête auprès des utilisateurs-testeurs de l'outil SIRIS-Pesticides, Unité de modélisation et d'analyse économique, INERIS
- Leplus A. (Aile/Projet européen Life Environnement Wilwater), *Les taillis de saule à très courtes rotations en Bretagne*, 4e rencontres de la biomasse, Gembloux, 7 novembre 2007, « Quelles ressources pour les biocombustibles de demain ? »
- ONIGC, 2006, *Gel industriel et cultures énergétiques. Bilan 2005/2006 et Perspectives 2006/2007*, Les cahiers de l'ONIGC
- Liedgens M., Frossard E., Richner W., *Interactions of maize and Italian ryegrass in a living mulch system: Nitrogen and water dynamics*, Plant and Soil, vol. 259, 2004, p. 243–258
- Lorne D., 2006, *La valorisation énergétique de la biomasse : quels potentiels à l'échelle du monde, de l'Europe et de la France ?*, Rapport de recherche interne IFP
- Machet J.M., Laurent F., Chapot, J.Y., Doré, T., Dutroux, A., 1997, *Maîtrise de l'azote dans les intercultures et les jachères*, in *Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes*, Les Colloques de l'INRA, n° 83
- Marsac S. (Arvalis - Institut du végétal), *Biomasse agricole : critères de choix et enjeux*
- Meynard J.M., Justes E., Machet J.M., Recous S., 1997, *Fertilisation azotée des cultures annuelles de plein champ*, in *Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes*, Les Colloques de l'INRA, n° 83
- Ministère de l'écologie, du développement et de l'aménagement durable, DGEMP-DIREM, 22 octobre 2007, Liste des unités de production de biocarburants ayant reçu un agrément après appel d'offre communautaire
- Ministères de l'Industrie et de l'Environnement, août 2006, Rapport du groupe de travail « Division par 4 des émissions de gaz à effet de serre de la France à l'horizon 2050 »
- Muller J.C., 1995, cité par Justes et al. (1999), *Contribution de la lysimétrie aux connaissances récentes en agronomie : historique, représentativité des lysimètres et fonctionnement du sol en place. Paysage lysimétrique français*, Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France, n° 81, p. 11–33
- Observatoire des résidus de pesticides (ORP), Site administré par l'afssset, <http://www.observatoire-pesticides.gouv.fr/>
- ONIGC, octobre 2007, *Biocarburants 2010 : quelle utilisation des terres en France ?*
- Papanastasis V.P. Platis P. D., Dini-Papanastasi O., 1998, *Effects of age and frequency of cutting on productivity of Mediterranean deciduous fodder tree and shrub planta-*

- tions, Forest ecology and management, 1998, vol. 110, nos 1-3, p. 283-292 (22 ref.)
- Peruzzo F., Pébayle E., Mouroux M., mars 2006, Exercice de comparaison de 4 scénarios « Facteur 4 » (scénario NégaWatt, scénario Enerdata, scénario P.Radanne, scénario H.Prévet), Atelier Changement climatique de l'ENPC
 - Peyron J.L., *Ressources forestières et usages du bois : quelques scénarios simples pour le 21e siècle, Recherches en économie forestière en France, Perspectives pour les sciences économiques et sociales*, 18-19 octobre 2006, Paris
 - Pingault N. (Ministère de l'Agriculture et de la Pêche), *Indicateurs de développement, de suivi et d'analyse des politiques agroenvironnementales. Améliorer la qualité de l'eau : Un indicateur pour favoriser une utilisation durable des produits phytosanitaires*, Atelier OCDE, 19-21 mars 2007, Washington
 - Poux X. (AScA), *Agriculture et Environnement, 4 scénarios à 2025*, Un exercice de prospective du Groupe de la Bussière
 - Projet européen *Switchgrass as an Alternative Energy Crop*, Rapport final, mars 2003, <http://www.switchgrass.nl/index.htm>
 - Projet européen *Life Environnement Wilwater 2004-2007*, Synthèse des résultats, http://www.aile.asso.fr/valorisation-de-la-biomasse/wilwater/tcr-diffusion-des-resultats/life04envfr320_resumeprojetwilwater.pdf
 - Rahil M.H., Antonopoulos V.Z., *Simulating soil water flow and nitrogen dynamics in a sunflower field irrigated with reclaimed wastewater*, Agricultural Water Management, vol. 92, n° 3, 16 septembre 2007, p. 142-150
 - Ruelle P., Mailhol J.C., Quinones H., Granier J., *Using NIWASAVE to simulate impacts of irrigation heterogeneity on yield and nitrate leaching when using a travelling rain gun system in a shallow soil context in Charente (France)*, Agricultural Water Management, vol. 63, n° 1, 29 novembre 2003, p. 15-35
 - Salameh Al-Jamal M., Sammis T.W., Jones T., *Nitrogen and chloride concentration in deep soil cores related to fertilization*, Agricultural Water Management, vol. 34, n° 1, juillet 1997, p. 1-16
 - Savini I., Cristofini B., *Des scénarios d'avenir pour la forêt, l'industrie du bois et leurs liaisons au territoire*, Les Dossiers de l'environnement de l'INRA, n° 20, p. 294-303
 - Savouré M.L., Besnard A., Marsac S., *Synthèse des expérimentations du réseau REGIX 2006, cultures énergétiques agricoles*, livrable L32 du PNRB REGIX
 - Sebilo M., Billen G., Grably M., Bleuse N., Bardoux G., Mariotti A., *Caractérisation et quantification du processus de dénitrification riparienne à l'échelle d'un bassin versant : Cas du Grand Morin*, Rapport pour le PIREN-Seine 2000
 - Stout W.L., Fale S.L., Muller L.D., Schnabel R.R., Weaver S.R., *Water quality implications of nitrate leaching from intensively grazed pasture swards in the northeast US*, Agriculture, Ecosystems and Environment, vol. 77, n° 3, février 2000, p. 203-210
 - Straëbler M., Le Gall A., *Luzerne, sorgho et betterave : trois cultures fourragères sécurisantes en conditions sèches ou froides*, Fourrages, n°156, 1998, p. 573-587
 - Tiefenbacher H., *Short rotation forestry in Austria*, Bioresource Technology, vol. 35, n° 1, p. 33-40 (11 ref.)
 - Van Beek C.L., Brouwer L. Oenema O., *The use of farmgate balances and soil surface balances as estimator for nitrogen leaching to surface water*, Nutrient Cycling in Agroecosystems, vol. 67, 2003, p. 233-244
 - Vandendriessche V., octobre 2007, *Étude des facteurs de rendement d'une espèce dédiée aux bioénergies : Découverte des déterminants agronomiques de Miscanthus X giganteus. Étude des essais de Grignon et Lusignan*, Mémoire de fin d'étude ISA (Lille) et INRA (Estrées-Mons)
 - Verdier J.L., 2006, *Le sorgho tolère le stress hydrique, mais valorise aussi l'irrigation*, Infos techniques Arvalis Institut du végétal, Dossier : Sorgho - Bilan de campagne 2005.
 - Warrant G. (ValBiom), *Miscanthus, aspects cultureaux*, 4e rencontres de la biomasse, Gembloux, 7 novembre 2007,
« Quelles ressources pour les biocombustibles de demain ? »

Notes

- 1 PCI : pouvoir calorifique inférieur (énergie thermique libérée par la réaction de combustion d'un kilogramme de combustible sous forme de chaleur sensible)
- 2 Comité ENVI : Comité sur l'environnement, la santé publique et la sécurité alimentaire
- 3 Source : FO Licht's.
- 4 ACE : aide aux cultures énergétiques. Depuis la récolte 2004, cette aide de 45 €/ha est instaurée dans le cadre de la PAC. Elle concerne plus particulièrement les producteurs qui consacrent une partie de leurs surfaces hors jachère à des cultures destinées à la production de produits énergétiques, de chaleur ou d'électricité (biocarburants, combustible, électricité).
- 5 Anciennement Service central des études et des enquêtes statistiques (SCEES)
- 6 ONIGC : Office national interprofessionnel des grandes cultures
- 7 D. Lorne, étude interne IFP, 2006
- 8 CETIOM : Centre technique interprofessionnel des oléagineux métropolitains
- 9 Les détails des calculs sont fournis dans le rapport technique.
- 10 La réserve utile du sol n'est pas une notion intrinsèque au sol, car elle dépend à la fois des caractéristiques du sol et du type de plante, en particulier pour l'aptitude de son système racinaire à mobiliser l'eau du sol. Les notions de réserve utile du sol (RU) et de réserve facilement utilisable (RFU) résultent de nombreux paramètres caractéristiques du sol et de la plante qu'il n'est pas utile d'expliquer ici. L'important est que les valeurs retenues de RU et RFU soient bien représentatives de la situation générale des bassins.
- 11 Le prélèvement hydrique d'étiage est détaillé dans le rapport technique.
- 12 Pour quelques cultures, peu nombreuses, des écarts apparaissent entre la production de biomasse simulée et celle retenue dans les scénarios. Ce point est étudié dans le rapport technique. Ces écarts ne remettent pas en cause les évaluations présentées ici.
- 13 Dans le cadre de programmes nationaux de recherche (expérimentations REGIX), des travaux sont en cours sur la détermination des coefficients cultureaux (kc) des cultures énergétiques. Les résultats ne sont pas disponibles au moment de la sortie du présent rapport.
- 14 On rappelle que l'azote, élément noté N, est présent dans la nature sous diverses formes : formes gazeuses, dont l'azote atmosphérique (N₂) ; ions solubles dans l'eau, dont les nitrates (NO₃⁻) ; composant de molécules chimiques complexes constitutantes de la biomasse, etc.
- 15 E. Justes, INRA Toulouse, communication personnelle
- 16 Chapelle, 1997 ; Chapelle, 2003
- 17 SIRIS : Système d'intégration des risques par interaction des scores
- 18 Annexe 1 de la directive 91/414/CE
- 19 Selon les données du Service de l'observation et des statistiques du MEEDDAT (SOeS, 2008)
- 20 Selon l'Observatoire des résidus de pesticides (ORP)
- 21 DGPAAT : Direction générale des politiques agricole, agroalimentaire et des territoires
- 22 Ces données sont synthétisées en annexe du rapport technique et les IFT correspondants sont détaillés en annexe 6.
- 23 Jouany et Dabène, 1994 ; Groupe de travail « Listes prioritaires », 1995 ; Comité de liaison Eau - Produits parasites, 2001. L'outil SIRIS-Pesticides est disponible en ligne depuis février 2007 : <http://dev-siris.ineris.fr/>
- 24 Le Gall 2007.
- 25 ibid.
- 26 ibid.
- 27 Ces cases sont laissées en blanc dans les tableaux de classement renseignés dans le rapport technique.
- 28 Réseau expérimental REGIX : réseau expérimental mis en place début 2006 alliant petites parcelles et conditions de vraie grandeur, construit du nord au sud en s'appuyant sur les réseaux existants des partenaires du projet ANR REGIX. Ces expérimentations permettent de modéliser la croissance en biomasse d'espèces peu documentées et d'adapter les itinéraires techniques et sylvicoles à l'utilisation énergétique, ce qui pourrait se traduire par leur introduction dans les systèmes de culture.
- 29 Les pratiques d'épandage sont précisées dans le rapport technique.
- 30 Les résultats détaillés par scénario et par bassin sont disponibles dans le rapport technique.

Numéros précédents des Cahiers du CLIP

N°1 - Octobre 1993 - ☑

- Le moteur à explosion : exercice de prospective mondiale des transports routiers
- L'autocondamnation : un exercice de prospective mondiale à long terme pour l'automobile
- Capture et stockage du gaz carbonique produit par les activités industrielles

N°2 - Mai 1994 - ☑

- Les enjeux environnementaux de la pénétration du véhicule électrique en Europe
- Etude comparative des émissions de polluants associées à l'utilisation de carburants de substitution
- Emissions de gaz à effet de serre : de la production d'hydrogène à son utilisation en tant que carburant automobile

N°3 - Octobre 1994 - ☑

- Le bois-énergie en France : évaluation prospective du potentiel mobilisable à l'horizon 2015 et ses conséquences sur l'environnement

N°4 - Juin 1995 - ☑

- Etude de faisabilité d'une centrale solaire en Tunisie
- Impact environnemental d'une désulfuration poussée des gazoles

N°5 - Juillet 1996 - ☑

- Déchets-Energie-Environnement : étude prospective du potentiel de déchets mobilisables à des fins énergétiques en France à l'horizon 2020

N°6 - Septembre 1996 - ☑

- Le bois-électricité : Perspectives de développement de la production d'électricité à base de bois en France à l'horizon 2015
- Pollution des sols : Contamination des sols par les rejets d'hydrocarbures : analyse du marché de la réhabilitation

N°7 - Janvier 1997 - ☑ ☐

- MDE-L'éclairage en France : diffusion des technologies efficientes de maîtrise de la demande d'électricité dans le secteur de l'éclairage en France

N°8 - Janvier 1998 - anglais/français - ☑ ☐

- Le bois-énergie en Europe : évaluation du potentiel mobilisable à l'horizon 2020, impacts sur l'environnement global et conditions socioéconomiques de sa mobilisation.

N°9 - Décembre 1998 - ☑ ☐

- Automobile et développement durable : bilan environnement-matières premières 1975-2050
- Automobile et gaz naturel : scénarios prospectifs et impact sur l'environnement

N°10 - Septembre 1999 - ☑

- Biomasse et électricité
- Géothermie des roches fracturées

N°11 - Décembre 1999 - ☑ ☐

- Le froid domestique : étiquetage et efficacité énergétique

N°12 - Mars 2001 - ☑ ☐

- Parc automobile et effet de serre : agir sur le parc automobile pour réduire l'effet de serre

N°13 - Avril 2001 - ☑ ☐

- Habitat et développement durable : bilan retrospectif et prospectif
- Le véhicule électrique à l'horizon 2050 : introduction du véhicule électrique dans le parc français des véhicules particuliers à l'horizon 2050

N°14 - Octobre 2001 - ☑ ☐

- Transports à l'horizon 2030 : Le secteur des transports en France à l'horizon 2030 selon le scénario «Etat protecteur de l'environnement» du Commissariat Général du Plan

N°15 - Janvier 2004 - ☑ ☐

- Cogénération et émissions de CO₂ : Impact de la pénétration de la cogénération décentralisée de faible puissance sur les émissions de CO₂ en France

N°16 - Septembre 2004 - ☑ ☐

- Habitat et développement durable : les perspectives offertes par le solaire thermique
- Emissions de particules : étude prospective sur les émissions de particules primaires en France à l'horizon 2030

N°17 - Septembre 2005 - ☑ ☐

- Évaluation du potentiel de capture et de stockage géologique du CO₂ dans le monde
- Les réductions potentielles d'émissions de CO₂ par des plantations forestières sur des terres agricoles dans le monde à l'horizon 2050

N°18 - Janvier 2007 - ☑ ☐

- Pompes à chaleur et habitat. Prospective des consommations d'énergie et des émissions de CO₂ dans l'habitat : les gisements offerts par les pompes à chaleur

☒ Version imprimée disponible - ☑ Format électronique (Acrobat pdf) disponible sur le site www.iddri.org - ☒ Epuisé

Pour toute demande d'exemplaire ou renseignement, veuillez contacter Marisa Simone (Iddri) : marisa.simone@iddri.org

