

Mise à jour 02/08/2019

Christian Baron & Mathieu Castets

# **Petit manuel d'utilisation pratique et de réflexions :**



Photo : Elodie Vintrou (thèse Cirad)

**SARRA-O :**  
**Un outil pour l'analyse de la Résilience des  
Agricultures aux Risques Climatiques**

Contact : [Christian.baron@cirad.fr](mailto:Christian.baron@cirad.fr)      Tél : 33 (0)4 67 54 87 2

## Table des matières

Table des matières	2
I. Avertissement	3
II. Présentation générale	4
A. Objectifs, contraintes et environnements	5
B. Le modèle de culture spatialisé SARRA-O	7
C. Le logiciel SARRA-O	8
III. Gestion globale des données	10
A. Données climatiques et paramètres	10
B. Définition de l'aire géographique de simulations	11
C. Définition des variables simulées en sortie	12
D. Lancement et sauvegarde des scénarios de simulations	13
IV. Les différents modes de fonctionnement du modèle	14
A. Mode diagnostic	15
B. Mode prévision	16
C. Mode analyse et amélioration	19
V. Diagnostics	20
A. Date de semis	20
B. Indice de stress hydrique de la culture	22
VI. Prévisions des rendements	22
VII. Analyses et Améliorations	24
A. Stratégies de semis : des espèces & des variétés vs un environnement	24
B. Capter la variabilité des rendements : simuler le rendement réel ?	25
C. Analyse des écarts de rendements : The Yield Gap !	26
D. Du rendement à la production	27
E. Cartes thématiques et scénarios de simulations	27
F. Et bien plus encore...	28
VIII. Quelques références bibliographiques	30
IX. Annexe description des variables	32
A. Paramètres plantes (cultures)	32
B. Paramètres sols	35
C. Paramètres pratiques culturales	36

*Mots Clefs : Modèle de culture spatialisé, système d'alerte précoce, services climatiques, prédiction des rendements, simple, robuste, didactique, performant*

## I. Avertissement

Le logiciel SARRA-O est gratuit, sous condition de licence, n'autorisant pas son utilisation dans un contexte commercial. Il utilise des données gratuites et en accès libre. Il est compatible avec les différents systèmes d'exploitation : Windows, Unix/Linux ou Mac. Il peut être utilisé sur un simple ordinateur de bureau.

Gérer le spatial et le temporel ainsi que les changements d'échelles est complexe tant au niveau informatique qu'au niveau scientifique : cet outil propose une synthèse des travaux effectués dans ces domaines appliqués à l'agriculture.

Cette version de logiciel est utilisable par tous, y compris des non spécialistes de l'agronomie et de l'agriculture ou encore de la géomatique ou de la climatologie. SARRA-O fait appel pour effectuer ses simulations à ces trois domaines précédemment cités.

Les sorties sous forme de cartes (fichiers raster, au format TIF) et/ou de fichier texte sont faciles à traiter, notamment par des logiciels libres. La gestion des différentes sources de données d'entrées qu'elles soient sous forme de fichiers textes, de cartes rasters ou vecteurs est automatisée : caractéristiques des sols, caractéristiques des plantes, cartes thématiques et/ou séries temporelles provenant de données satellites.

Toutes les options proposées découlent des travaux, études et expérimentations conduites ou réalisées avec le modèle de culture spatialisé SARRA-O et sa version ponctuelle précédente SARRA-H. Lancer ce logiciel ne requiert, de la part des utilisateurs, que de comprendre les choix des options de simulations en regard des attendus pour les objectifs d'analyse ou de services qu'il souhaite en obtenir ou diffuser. Concernant les performances il n'y a besoin que d'un simple ordinateur de bureau : une année de simulations ne nécessite que quelques minutes pour un pays, et de 7 à 15 mn selon l'ordinateur, pour presque l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest défini ici par 600 000 pixels (ie. 600 000 simulations annuelles).

Ce qui a été à la base du développement des différentes versions du modèle SARRA c'est : la simplicité, la robustesse et la performance. Pour les versions des logiciels diffusés, le développement de l'interface utilisateurs s'est basé sur sa facilité d'utilisation et une approche didactique.



## II. Présentation générale

SARRA-O est un modèle de culture spatialisé, qui peut utiliser différentes sources de données géo-référencées qu'elles soient de type raster ou vecteur. Il est capable de gérer des données à différentes échelles temporelles ou spatiales. Les satellites, les données satellites ainsi que leur traitement ont suivi une très grande évolution cette dernière décennie se traduisant notamment par une meilleure diffusion et surtout de plus en plus de données traitées en accès libre et gratuit. Les données météorologiques ou climatiques sont une des sources principales des données d'entrées du modèle, différents modèles climatiques ont été développés à partir de différentes sources de données issues des satellites, tels que les RFE pour la pluie (RainFall Estimation). Ces données estimées sont facilement accessibles à tous à une résolution spatiale (quelques mètres à km) et temporelle (infra journalière à décadaire) plus adaptées aux besoins de la simulation des processus de croissance des plantes et du suivi de l'état des cultures en cours de saison. De plus, selon les modèles et systèmes mis en place, elles sont aussi disponibles en temps semi-réel : le délai de traitement et de diffusion de ces données va de la journée à quelques jours selon les modalités de traitements. On a donc une possibilité d'accès presque instantané à ces données qui permettent de représenter un grand territoire de manière identique, homogène et répétitive. Ce second aspect étant fondamental pour la mise en place de suivi de l'état des cultures en cours de campagne et donc des systèmes d'alertes précoce (SAP).

SARRA-O est la version spatialisée de SARRA-H qui est un modèle de culture à l'échelle de la parcelle cultivée. Les dynamiques de croissances des plantes sont définies par des équations simples permettant de simuler les processus clefs (process based model). Pour plus d'informations vous pouvez consulter les sites : <http://sarra-h.teledetection.fr>

ou encore

<https://www.cirad.fr/actualites/toutes-les-actualites/articles/2013/science/sarra-h-suivre-les-cultures-pour-mieux-anticiper-les-risques>.

Le modèle SARRA-H a été développé pour reproduire au mieux les situations observées dans des environnements très variables et notamment dans des situations de fortes contraintes de stress hydriques. Pour obtenir cela, le modèle SARRA-H a été calibré et vérifié, dans des situations en milieux contrôlés (stations d'expérimentations, pour plusieurs espèces et variétés (mil, maïs, sorgho, riz, soja...), dans différentes régions agro-climatiques, notamment en Afrique mais aussi dans d'autres continents (Asie, Europe, Amérique). De plus, il a été vérifié en milieu paysan à partir d'enquêtes et/ou mesures en plein champ (Kouressy et al. 2007; Traoré et al. 2011 ; Projets AMMA, SIGMA...).

SARRA-O reprend donc l'ensemble des capacités de simulations de SARRA-H dont il est une transcription sur un autre environnement de développement informatique, la plateforme de modélisation Ocelet (Degenne et Lo Seen, 2016 ; Degenne et al. 2009). Cette plateforme permet une gestion optimisée et automatisée des grands ensembles de données spatialisées : séries temporelles d'images rasters, cartes thématiques raster ou vecteur.

SARRA-H&O simulent trois grands processus :

- 1) le bilan hydrique,
- 2) le bilan carboné,
- 3) l'évolution des phases phénologiques de la plante (cultivar) incluant la photosensibilité.

Pour cela ils utilisent en données d'entrées (de forçage) :

- la pluie
- la température minimum et maximum
- le rayonnement global

- la demande d'évapotranspiration atmosphérique

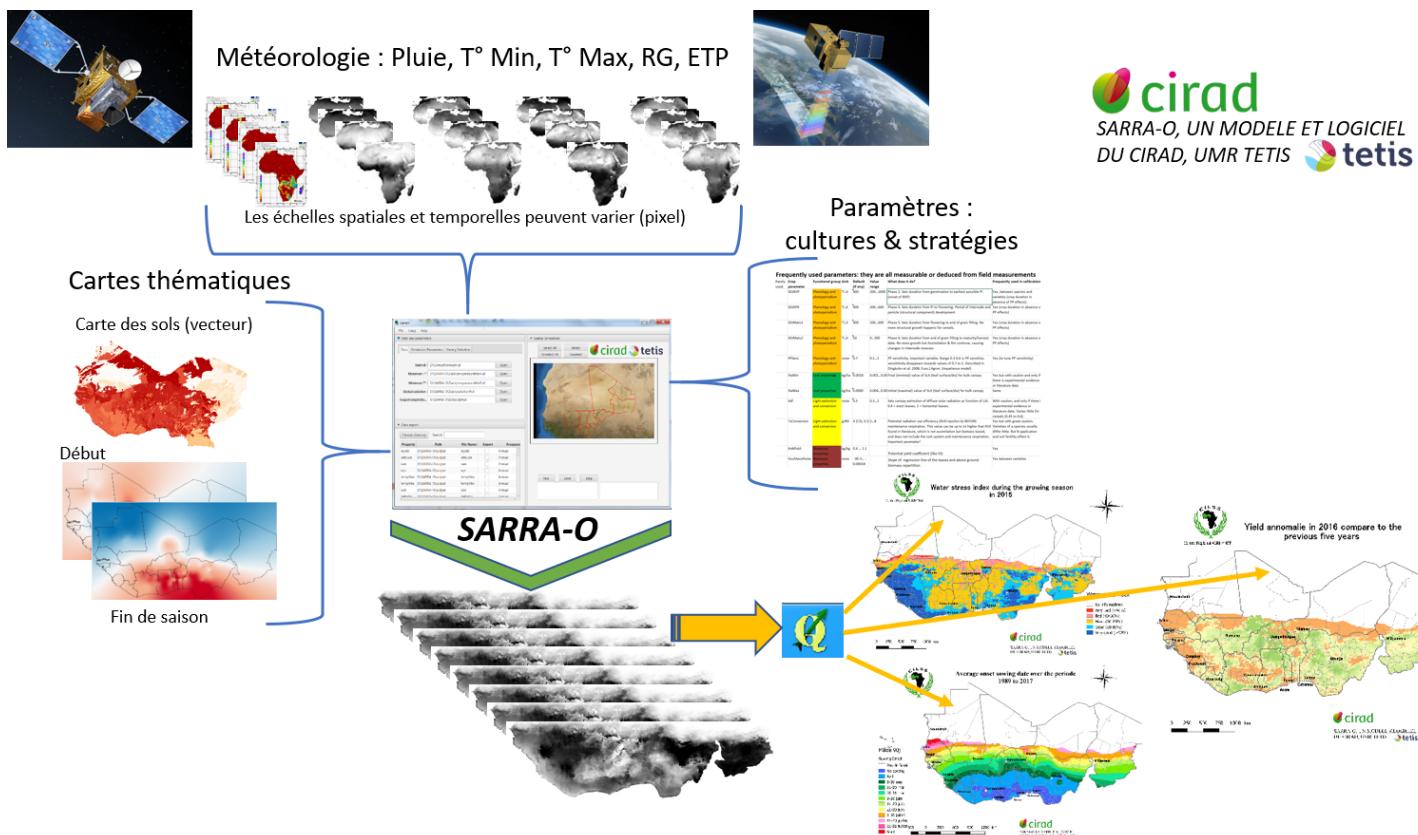
Ils simulent les dynamiques de croissances de différentes plantes (cultivars) :

- céréales : mil, sorgho, maïs, riz, blé
- légumineuse : soja
- malvacées : cotonnier

Enfin, les processus développés au sein des modèles permettent de prendre en compte les grandes pratiques culturales : choix de cultivars, stratégie de semis (simulation des dates de semis), niveau global technique et de fertilisation, stratégie d'irrigation (simulation de scénarios d'irrigation).

L'ensemble de ces fonctionnalités a permis d'effectuer un grand nombre d'études d'impacts et d'analyses de risques allant de la parcelle à la région portant sur la variabilité du climat, le changement climatique, les différentes stratégies de pratiques paysannes et/ou d'adaptation de cultivar à l'environnement et le système d'alertes précoce (SAP)...

### Chaine de traitement SARRA-O :



### A. Objectifs, contraintes et environnements

L'interface du logiciel SARRA-O actuellement proposée est plus particulièrement dédiée à son utilisation dans le cadre de diffusion de services climatiques en cours de campagne agricole et à son utilisation au sein d'un système d'alertes précoce pour la sécurité alimentaire (SAP). Dans la préface du document "Crop Yield Forecasting : Methodological and Institutional Aspects" de la FAO (2016), les propriétés idéales des modèles de culture, telles que la fiabilité, l'objectivité, la cohérence avec les connaissances scientifiques et la simplicité, ont été reformulées en un certain nombre de critères qui devraient être pris en compte lors de l'évaluation du rendement des cultures et de prévision de production : i) temps semi-réel ; ii) capacité

prédictive du modèle et sensibilité aux événements extrêmes et iii) simplicité de la structure des modèles et des données requises. Ces critères ont à leur tour imposé des contraintes à la conception du modèle SARRA-O et de son interface notamment pour son utilisation spécifique dans le système d'alertes précoce.

Une des contraintes majeures pour la simulation, en temps semi-réel du SAP, est la nécessité de collecter les données concernant les précipitations, la température, le rayonnement global et l'ETP à partir d'un réseau de stations au sol suffisamment denses et bien réparties, surtout quand ce réseau est majoritairement constitué de stations non connectées, manuelles ou automatiques. Cette procédure de centralisation prend beaucoup de temps et souffre souvent, en cours de saison, d'un manque aléatoire et important de données, en particulier en ce qui concerne les précipitations, qui sont les données d'entrée les plus sensibles pour la modélisation des cultures dans des conditions limitées en eau.

En se basant sur une longue expérience et partenariats dans différents pays tropicaux, notamment Africains, nous avons développé et adapté l'interface en partenariat avec l'AGRHYMET<sup>1</sup> en fonction des besoins, demandes et retours d'expériences. Le logiciel a ainsi été testé et amélioré et surtout utilisé en situation réelle de suivi de campagne dans le cadre du SAP développé par l'AGRHYMET. Dans le contexte de l'Afrique de l'Ouest, l'AGRHYMET, ainsi que plusieurs centres météorologiques, sont équipés d'une liaison satellite permettant de recevoir en temps semi-réel les estimations de précipitations quotidiennes dérivées du satellite Météosat : TAMSAT (Maidment et al., 2016), de résolution spatiale de 3,7 km et au pas de temps journalier. Les autres données météorologiques, températures, rayonnement global et ETP, utilisées par le modèle, sont également disponibles en temps semi-réel à une résolution spatiale de 16 km et un pas de temps de 10 jours. Elles sont dérivées de données satellite ou résultent des ré-analyses du ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) et enfin pour la série historique de l'ensemble de données ERA-interim (Berrisford et al., 2011). L'interface de SARRA-O permet donc la gestion de séries temporelles de ces données et de gérer ces différentes résolutions spatiales et temporelles afin d'effectuer des simulations sur les territoires, pays ou régions choisis. Si la version actuelle de l'interface est réduite à ces deux sources de données, le modèle peut gérer bien d'autres sources de données climatiques issues de données satellites ou encore de modèles climatiques (globaux ou régionaux). Ce partenariat avec l'AGRHYMET, a permis de tester et analyser les résultats du modèle SARRA-O en situation réelle, depuis 2016. Ces résultats sont diffusés par l'AGRHYMET dans des bulletins mensuels ou des flash info (Cf. Bulletin de suivi de la campagne agropastorale en Afrique de l'Ouest ; Août 2018 : <http://agrhymet.cilss.int/index.php/bulletins/>).

L'exemple du SAP mis en place en Afrique de l'Ouest est intéressant car il met en évidence deux niveaux d'analyses et de services : d'une part régionale et d'autre part à l'échelle administrative et/ou nationale. Ces différents modes de traitements ont été pris en compte dans le développement de l'interface utilisateur. Pour le SAP, développé par l'AGRHYMET, un premier niveau d'analyse et de diffusion s'effectue sur l'ensemble de la région (CEDEAO<sup>2</sup>). De plus des groupes de travail multidisciplinaires nationaux (GTP : Groupes de Travail Pluridisciplinaires) ont été mis en place dans les pays membres du CILSS<sup>3</sup> pour travailler étroitement et régulièrement avec l'AGRHYMET afin de diffuser des informations plus spécifiques aux pays auprès des décideurs. Le même modèle de culture doit donc pouvoir fonctionner à l'AGRHYMET et dans les différents pays (GTP...) afin de fournir des informations (indicateurs) régionales et nationales cohérentes et complémentaires. Les conditions locales dans les différents pays en termes d'environnement, de largeur de bande Internet et de ressources informatiques sont également très variables, de sorte que les difficultés de mise en œuvre ne doivent pas être ignorées.

La qualité d'un modèle est aussi dans son niveau de performance et l'environnement d'utilisation. Pour ces raisons, les simulations de modèles à l'échelle régionale et/ou nationale pour une saison entière doivent être réalisables dans un délai raisonnable à l'aide d'un ordinateur de bureau ou portable à configuration

<sup>1</sup> Centre Régional AGRHYMET, Niamey, Niger ; mandats sécurité alimentaire, production et ressource naturelles pour les pays du CILSS et de la CEDEAO en Afrique de l'Ouest (définitions page suivante)

<sup>2</sup> CEDEAO : Communauté Economique des Etats de l'Afrique de l'Ouest

<sup>3</sup> CILSS : Communauté Internationale de Lutte contre la Sécheresse au Sahel

standard sous système d'exploitation Windows, Linux, Mac : une simulation d'une année entière sur les pays de la CEDEAO et du CILSS (600 000 pixels) varie de 7 à 15 mn selon l'ordinateur. Ces performances sont non négligeables lorsque l'on souhaite étudier tout un ensemble de situations contrastées, tester la pertinence des sorties (indices) du modèle ou encore celles du système mis en place et des services proposés. Il est ainsi aisément de générer notamment des cartes animées permettant d'observer spatialement les dynamiques de variables de sorties du modèle : ex. les dynamiques spatiales de la biomasse en chaque pixel de la zone simulée pendant la saison de croissance, ces dynamiques pouvant aussi faire l'objet d'une comparaison inter annuelle (Castets et al, 2016 ; <https://www.cirad.fr/actualites/toutes-les-actualites/articles/2019/science/modele-sarra-o>).

## B. Le modèle de culture spatialisé SARRA-O

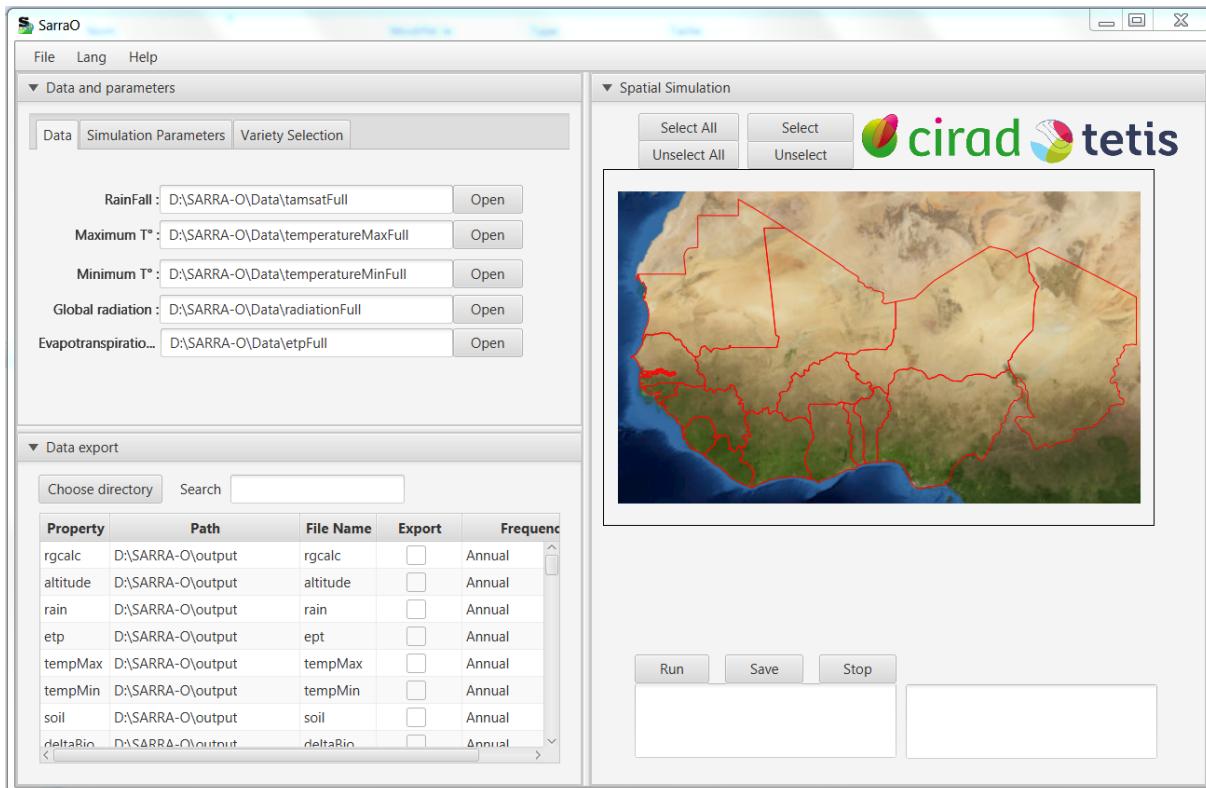
Un modèle de culture est dit spatialement explicite lorsqu'il est capable d'exécuter des simulations de culture sur une grande superficie dans une diversité de situations présentes dans cette région. Les données d'entrée et de sortie des modèles prennent généralement la forme de cartes vectorielles (par exemple, types de sols, rendement potentiel agrégé au niveau administratif) ou d'images rasters (par exemple, estimations des précipitations par satellite, carte des indices de stress hydrique, rendements...). SARRA-O, le modèle de culture spatialisé présenté ici, conserve les mêmes processus de culture que son prédecesseur SARRA-H simulant les processus à l'échelle de la parcelle :

- Le bilan hydrique est simulé en prenant en compte les besoins en eau des plantes et l'eau disponible dans le sol. Cela permet d'estimer la transpiration réelle des plantes en regard de sa demande. Le sol est divisé en deux compartiments : une couche superficielle de 20 cm et une couche plus profonde jusqu'au front d'humectation. La couche superficielle permet de calculer l'évaporation du sol.
- Le bilan carboné simule l'interception du rayonnement par les feuilles et la conversion de cette énergie en biomasse (en sucre d'amidon), qui est répartie dans les différents compartiments de la plante (racine, feuille, tige, puis grains) et aussi consommée par le processus de respiration de maintenance de la plante.
- La répartition de la biomasse en racines, tiges, feuilles et grains est sous contrôle de la phénologie de la plante définie en plusieurs phases phénologiques : émergence, phase végétative, phase reproductive, phase de remplissage des grains, phase de dessiccation (phase de séchage des grains avant la maturité physiologique). La durée de ces phases est simulée à partir de la température moyenne du jour (degrés jours), excepté pour certains cultivars photopériodiques de mil ou de sorgho. Dans ce cas leur phase photopériodique s'insère entre la phase végétative et la phase reproductive et est rapportée à un processus lié à la durée du jour (long ou court).

Le modèle simule donc la production de la biomasse qui est limitée par l'eau et le rayonnement, en utilisant des données climatiques d'entrée telles que les précipitations, la température, le rayonnement global et l'évapotranspiration. Il tient également compte de grandes pratiques agricoles dont la stratégie de semis (ou date si connue), la densité des semis, la stratégie d'irrigation (ou doses et calendrier d'irrigation), les choix du cultivar et le niveau global d'intensification. Sur un territoire, il est difficile d'avoir une information détaillée des pratiques et/ou paquet technique, de leur diversité et répartition. Nous avons donc préféré, pour capter et simuler cette diversité, définir des niveaux globaux d'intensification qui englobent tout un ensemble de situations/contraintes : qualité des semences, travail du sol, gestion des mauvaises herbes, niveau de fertilité (sol, apports...). Quatre niveaux d'intensification ont été retenus reflétant des situations : très mauvaises (I1), mauvaises (I2), bonnes (I3), très bonnes (I4). Ces niveaux influent sur la quantité de biomasse produite chaque jour et donc *in fine* sur le rendement atteignable par la culture.

### C. Le logiciel SARRA-O

Le modèle de culture a été développé et testé dans des conditions quasi opérationnelles au sein de la plateforme de modélisation Ocelet (OMP). Pour une utilisation opérationnelle courante, nous avons développé une interface utilisateur simple et personnalisée afin de permettre aux utilisateurs de produire facilement un large ensemble de simulations prédefinies. L'interface a été développée en langage Java. L'interface se connecte à un fichier exécutable (.jar) qui contient SARRA-O. La figure ci-dessous montre l'interface qui se compose de quatre volets pour gérer : i) la zone d'étude de simulation, ii) les scénarios de simulations, iii) les variables de sortie, et iv) le lancement des simulations avec une fenêtre indiquant l'avancement des simulations. Une présentation succincte- est donnée ici, elle est détaillée dans le chapitre suivant.



- Zone d'étude de simulations : dans cet exemple la zone d'étude par défaut correspond aux simulations réalisées à l'AGRHYMET couvrant les 17 pays de l'espace CILSS/CEDEAO. Le même logiciel est également disponible pour chacun des pays de la CEDEAO, ou tout autre pays (p. 24, Fig. 12), afin d'effectuer des simulations dans leur pays et/ou régions administratives. Scénarios de simulations :
  - Données d'entrée météorologiques : les séries chronologiques des estimations des précipitations, de la température, du rayonnement global et de l'évapotranspiration sont sous forme d'images rasters qui sont stockées dans des répertoires distincts auxquels le modèle peut avoir accès. Les images raster sont au format GeoTIFF (.tiff) avec des pixels codés en valeurs réelles respectant les unités suivantes : mm (pluie), °C (Temp.), W.m<sup>-2</sup> (Rayonnement Global) et mm (Evapotranspiration). Les images des précipitations sont lues à chaque pas de temps quotidien, tandis que les autres données météorologiques sont lues tous les dix jours.
  - Paramètres de simulations : 1) début et fin de simulations, 2) stratégie de semis, 3) période de simulations.
  - Variétés sélectionnées : cette première version d'interface permet de simuler des variétés types de trois espèces (mil, sorgho et maïs), avec deux longueurs de cycles (90 et 120 j), du photopériodisme selon le cultivar et 4 niveaux globaux d'intensification (I1 à I4).
- Variables de sortie : chacune de ces variables peut être suivie à différentes fréquences (quotidienne, hebdomadaire, mensuelle) et sauvegardée sous forme d'images GeoTIFF dans le répertoire

sélectionné. Ces couches d'information peuvent ensuite être utilisées pour générer des cartes d'indices (indice de satisfaction en eau des cultures par exemple) ou d'anomalies de rendement. Ces cartes facilement et rapidement produites permettent une diffusion rapide comme par exemple dans les bulletins mensuels de l'AGRHYMET. Pour leur mise en forme cartographique, nous conseillons l'utilisation d'un logiciel libre et gratuit, QGIS (Quantum GIS), pour lequel nous proposons, lors des formations, une rapide prise en main ainsi qu'une série de format de légendes, logos... ciblés sur les sorties proposées par le logiciel...

Principaux paramètres d'entrées du modèle :

Type de données	Format	Résolution	Source	Pas de temps
Pays	Fichier shape			NA <sup>4</sup>
Type de sol	Raster	3.7 km	FAO	NA
Début de la saison	Raster	3.7 km	AGRHYMET	NA
Fin de la saison	Raster	3.7 km	AGRHYMET	NA
Pluie	Raster	3.7 km	TAMSAT	journalier
Température min	Raster	28 km	ECMWF	10 jours
Température max	Raster	28 km	ECMWF	10 jours
Evapotranspiration potentielle	Raster	28 km	ECMWF	10 jours
Radiation Globale	Raster	28 km	ECMWF	10 jours

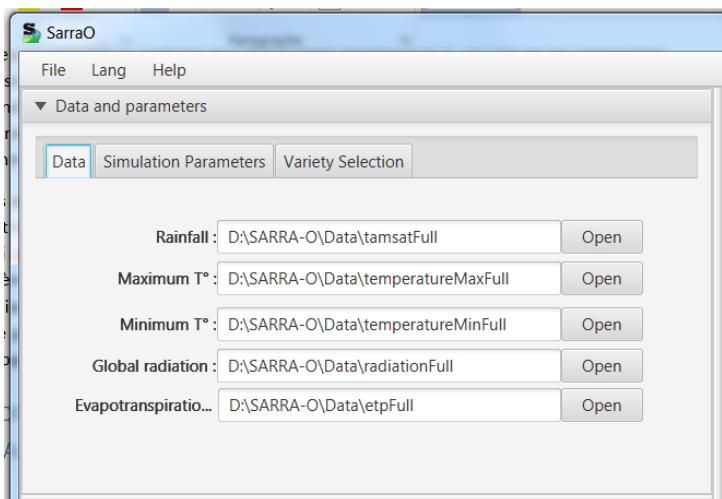
**Table 1: 1989-present**

---

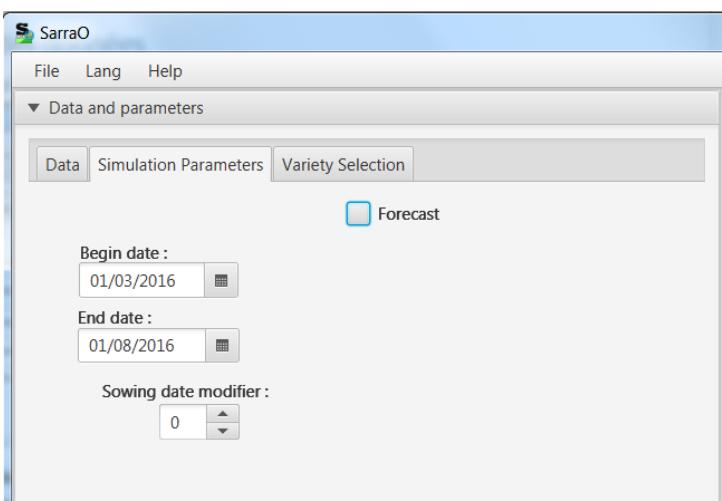
<sup>4</sup> Valeur absente ou sans définition

### III. Gestion globale des données

#### A. Données climatiques et paramètres



Sur la capture d'écran ci-dessous, « Simulation Parameters », vous définissez les dates de début et de fin des simulations ainsi que le décalage en jours en fonction de la date de semis moyen, rapportée pour chaque pixel (de 3,7 km de résolution dans le cas de TAMSAT) à partir de la carte de dates de semis moyens calculée par AGRHYMET (p. 20).



Pour chaque type de données climatiques vous pouvez définir le répertoire d'accès. Ceux proposés par défaut correspondent à l'installation préconisée et conseillée. Pour cette version, seuls les fichiers correspondant à la nomenclature TAMSAT et ECMWF sont reconnus.

En fonction des données disponibles, temps semis réel, lors du suivi en cours de campagne vous pouvez définir la fin des simulations : ex. le 01/08/2016.

En dehors du suivi de campagne, vous pouvez aussi effectuer des analyses pluriannuelles, ou sur une année particulière: ex. pour une série d'années (du 01/03/2007 au 30/11/2015), la simulation s'effectuera pour chaque année du 01/03 au 30/11, sinon pour une année particulière vous spécifiez la même année en début et fin de simulations.

Enfin la recherche de la date de semis est conditionnée par le délai défini autour de la date moyenne de semis. **Cette option est détaillée dans le chapitre Diagnostic -> Date Semis. (p. 17)**

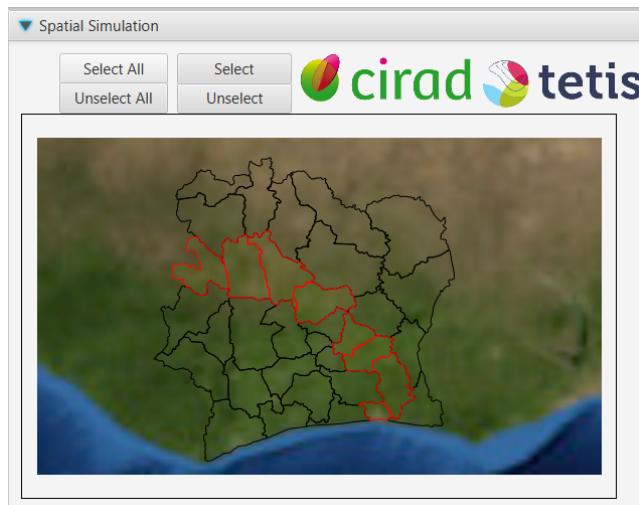
**De même l'option prévision (bouton « Forecast ») sera détaillée dans le chapitre Prévision. (p. 20)**

## B. Définition de l'aire géographique de simulations

The figure consists of four separate windows, each titled "Spatial Simulation". Each window contains a map of a country or region with a red outline indicating the selected administrative divisions. The top-left window shows a complex network of small, irregularly shaped regions. The top-right window shows a large, roughly rectangular region divided into several smaller, irregular shapes. The bottom-left window shows a long, narrow, vertically elongated region divided into several smaller, irregular shapes. The bottom-right window shows a large, roughly rectangular region divided into several larger, more regular rectangular or square-like shapes. Each window has a toolbar at the top with buttons for "Select All", "Unselect All", "Select", and "Unselect". The Cirad and tetis logos are visible in the top right corner of each window.

Etc...

La définition de l'aire géographique est adaptée à chaque pays et découpage administratif souhaité, et peut être adaptée à d'autres territoires (ex. du Mozambique en fin de document). Ici six pays sont présentés avec le premier niveau de découpage administratif (à vous de les retrouver !).



Vous pouvez simuler sur l'ensemble de l'aire géographique proposée (choix par défaut) ou ne choisir qu'un ou plusieurs sous -ensembles (ici sous-ensembles administratifs). Pour cela vous désélectionnez tout : «Unselect All» puis vous cliquez sur le bouton «Select» et vous choisissez un ou plusieurs sous-ensembles en cliquant sur cet ensemble.

## C. Définition des variables simulées en sortie

**Data export**

Property	Path	File Name	Export	Frequency
rgcalc	D:\SARRA-O\output	rgcalc	<input type="checkbox"/>	Annual
altitude	D:\SARRA-O\output	altitude	<input type="checkbox"/>	Annual
rain	D:\SARRA-O\output	rain	<input type="checkbox"/>	Annual
etp	D:\SARRA-O\output	ept	<input type="checkbox"/>	Annual
tempMax	D:\SARRA-O\output	tempMax	<input type="checkbox"/>	Annual
tempMin	D:\SARRA-O\output	tempMin	<input type="checkbox"/>	Annual
soil	D:\SARRA-O\output	soil	<input type="checkbox"/>	Annual
deltaBio...	D:\SARRA-O\output	deltaBio...	<input type="checkbox"/>	Annual

**Data export**

Property	Path	File Name	Export	Frequency
biomass...	D:\SARRA-O\output	biomassevegetative	<input type="checkbox"/>	Annual
conv	D:\SARRA-O\output	conv	<input type="checkbox"/>	Annual
daybio...	D:\SARRA-O\output	daybiomleaf	<input type="checkbox"/>	Annual
deltabio...	D:\SARRA-O\output	deltabiomassetotale	<input type="checkbox"/>	Annual
drdtpot	D:\SARRA-O\output	drdtpot	<input type="checkbox"/>	Annual
drespm...	D:\SARRA-O\output	drespmaint	<input type="checkbox"/>	Annual
lai	D:\SARRA-O\output	lai	<input checked="" type="checkbox"/>	10-Daily
manque...	D:\SARRA-O\output	manqueAssim	<input type="checkbox"/>	Annual
parinter...	D:\SARRA-O\output	parIntercepte	<input type="checkbox"/>	Annual
rdt	D:\SARRA-O\output	rdt	<input checked="" type="checkbox"/>	Annual
rdtPot	D:\SARRA-O\output	rdtPot	<input checked="" type="checkbox"/>	Annual
reallocat...	D:\SARRA-O\output	reallocation	<input type="checkbox"/>	Annual
sia	D:\SARRA-O\output	sia	<input type="checkbox"/>	Annual
vrac	D:\SARRA-O\output	vrac	<input type="checkbox"/>	Annual

Si souhaité, vous pouvez définir différents réertoires en fonction de jeux de simulations que vous effectuez avec le bouton «Choose directory». Après avoir choisi le réertoire, celui-ci est automatiquement attribué à toute la liste des variables de sortie.

Pour sélectionner ou désélectionner une variable il suffit de cliquer sur la case «Export » en face de la variable. Si elle est cochée, la variable est sélectionnée, si elle est vide, elle n'est pas retenue. Vous pouvez choisir une liste de différentes variables en sortie (images rasters). Enfin, vous pouvez aussi choisir le pas de temps de ces variables en sortie sous la colonne « Frequency » en cliquant sur la fréquence affichée (ici par défaut « Annual »). Un menu déroulant vous permet de choisir différents pas de temps (de journalier à annuel).

Dans l'exemple ci-dessus il a été choisi trois variables en sortie. Les noms de fichiers sont construits en fonction des différentes options choisies :

- rdtMais\_90\_F4\_2016.tif : signifie que l'on a choisi la variable rdt, qui est le rendement à la récolte, que la simulation concerne un maïs de durée de cycle court de 90 jours (Mais\_90), que le niveau d'intensité est très bon (\_F4) et 2016 traduit à la fois le pas de temps et bien sur l'année simulée. Enfin le format du fichier est un format tif (.tif) qui est une norme reconnue par un grand nombre de logiciel de traitement de données géo-référencées.

Ainsi pour le choix de la variable en sortie rdtPot, rendement à la floraison, on aura :

rdtPotMais\_90\_F4\_2016.tif

Dans le cas des sorties à pas de temps infra annuels la date est spécifiée avec le N° de la décennie dans le mois (an\_mois\_NumDécade) ou la date du jour si journalier (an\_mois\_jour) : ex. 2016\_01\_01 pour la 1<sup>re</sup> décennie du mois de janvier 2016 ou le 1<sup>er</sup> Janvier 2016 si sortie journalière.

## D. Lancement et sauvegarde des scénarios de simulations

Run      Save      Stop

running...  
Mais\_90\_F4 2016

2016-07-02 00:00  
2016-07-03 00:00  
2016-07-04 00:00

Quoi de plus simple, un bouton suffit pour lancer le scénario de simulations que vous avez défini « Run » !

Conseil : après avoir défini vos jeux de simulations, le bouton « Save » vous permet de garder ces nouveaux choix !

Au cas où, erreur, oubli dans le scénario, si rien n'apparaît en défilement des simulations en cours... Le bouton « Stop » est là...

Il vous est conseillé, si les simulations ne défilent pas de bien aller vérifier les répertoires pour vos données d'entrée : les dates et/années ainsi que la présence des séries de fichiers devant correspondre aux périodes définies... Erreur typique lors des formations !!!

BONNES SIMULATIONS !!!

## IV. Les différents modes de fonctionnement du modèle

SARRA-O est généralement utilisé dans trois modes différents. Le premier, appelé mode diagnostic, est l'utilisation routinière, en temps semi-réel, pour suivre la saison de croissance et détecter rapidement les zones d'anomalies. Le second, appelé mode prévision, consiste à générer, au milieu de la saison de croissance, une évaluation du rendement potentiel à la récolte, ainsi qu'une probabilité associée des rendements en fin de saison par l'utilisation de séries historiques, ou encore estimer ce rendement en fin de saison en utilisant les prévisions saisonnières provenant de modèles météorologiques. Ces deux modes sont gérés à partir de l'interface utilisateur. Un troisième mode, appelé mode analyse et amélioration, peut impliquer des petites adaptations du code du modèle pour gérer autrement les données et ou les scénarios actuellement proposés, ces adaptations doivent alors se faire avec l'environnement de développement de la plateforme Ocelet pour plus de flexibilité. Ce dernier mode est utilisé pour une évaluation à posteriori des simulations faites pour une saison de croissance, une fois que les statistiques des récoltes sont disponibles dans les différents pays ou encore analyser/évaluer les impacts du changement climatique. L'objectif est d'avoir une amélioration continue du modèle SARRA-O au fil des ans en tenant compte des saisons de culture passées et ou des avancées dans les différents domaines auxquels fait appel le modèle : télédétection, météorologie et climatologie, agronomie.

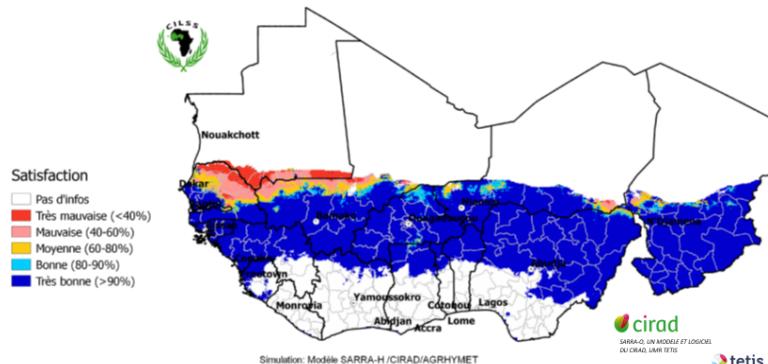
Les trois modes de simulations sont décrits ci-dessous. Comme spécifié dans la licence que vous avez signée, vous pouvez observer que quels que soient les supports utilisés pour présenter les sorties provenant de ce logiciel vous devez les accompagner de ce groupe de logos :



## A. Mode diagnostic

AGRHYMET publie un bulletin mensuel pour le suivi de la campagne agropastorale en Afrique de l'Ouest (AO) (cartes extraites du bulletin AGRHYMET, 2017).

Une section du bulletin est consacrée à la description de la situation des cultures depuis le début de la



satisfaction en eau de la plante

Parmi les informations délivrées par le modèle SARRA-O, il y a la **date de semis** (cf. Fig. 2) simulée en fonction de l'année en cours et de l'état de la culture durant sa période juvénile : selon le démarrage de la saison, il peut y avoir mortalité de la plante et donc un ou plusieurs re-semis. La date de semis est aussi

appelée date de semis réussie afin de la distinguer des dates de semis qui ont pu échouer. Cette capacité du modèle à rechercher des dates de semis en fonction des conditions d'humidité du sol et d'absence de période de sécheresse juste après est très importante dans ces régions. En effet d'une année à l'autre, en un même lieu, le démarrage de la saison des pluies peut varier de plusieurs mois. Et comme cela s'observe ici, au cours d'une même année, le démarrage de la saison des pluies varie, en fonction de la latitude, de janvier/mars à mi-fin juillet.

Fig. 1 : Indicateur de stress hydrique,

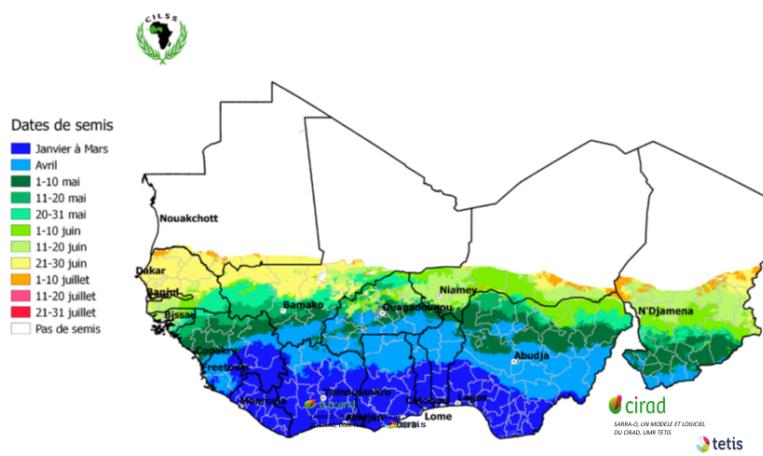


Fig. 2 : Date de semis réussie saison 2017

Pour chaque variable choisie, les valeurs en chaque pixel sont sauvegardées dans un fichier raster en fonction du pas de temps choisi pour les sorties. Ces cartes, au format GeoTIFF, peuvent aisément être finalisées pour faciliter l'interprétation de l'information en vue de la prise de décisions. Nous conseillons l'utilisation du logiciel de cartographie QGIS, libre et gratuit, pour lequel plusieurs formats et modes de présentations prédéfinis et adaptés aux variables en sortie (légendes... logos...) sont proposés lors des formations. Les cartes qui vous sont présentées ont été finalisées sous QGIS.

## B. Mode prévision

Lors du démarrage de la saison, les bulletins d'AGRHYMET mettent l'accent sur l'installation des cultures (dates de semis réussis), le niveau de satisfaction en eau des cultures, les stocks d'eau disponibles dans le sol... Ces indices sont suivis tout au long de la saison des cultures. Dès le milieu de la saison, il est possible de proposer une série d'indices de prédiction des rendements (Cf. Bulletin de suivi de la campagne agropastorale en Afrique de l'Ouest ; Août 2018 : <http://agrhymet.cilss.int/index.php/bulletins/>).

Les indicateurs retenus sont des anomalies de rendements plutôt qu'une estimation de rendements potentiels absolus. L'anomalie de rendement a l'avantage de pouvoir être comparée relativement aux situations antérieures, de 0 à 100%, et d'être plus facile à interpréter qu'un rendement absolu.

$$\text{Equation : } \text{AnomalieRdt}_i = \frac{d(Rdt_i - \text{Moy}(Rdt))}{\text{Moy}(Rdt)}$$

*Moy(Rdt)* = moyenne des rendements simulés sur la série d'années antérieures choisie.

*Rdt<sub>i</sub>* = rendement simulé pour l'année i (année en cours)

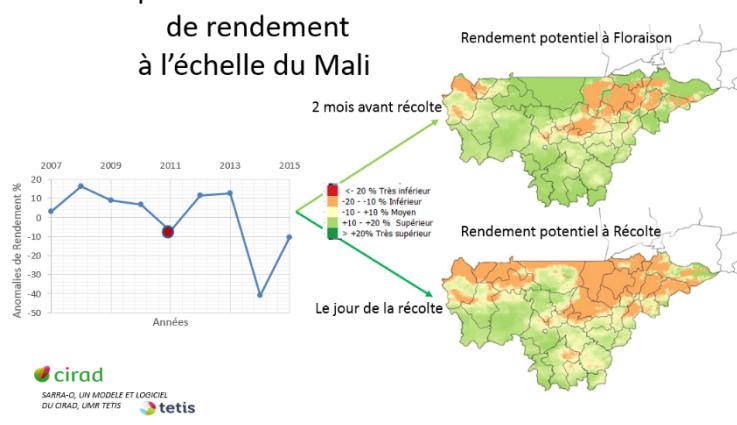
La période sur laquelle est effectuée la moyenne dépend de l'analyse souhaitée. Dans les exemples ci-dessous sont présentées plusieurs périodes en fonction de l'analyse effectuée.

- 1) **Estimation du rendement à floraison :** il vous faut choisir en variable de sortie « RdtPot » qu'il faut comprendre comme le rendement à la floraison : ie qui sera le rendement que l'on peut obtenir à la récolte sous condition d'absence de tout stress jusqu'à cette date. Cette variable est le rendement calculé à la date de floraison qui est atteinte aux environs de la moitié de la saison des cultures. Pour le calcul de l'anomalie du rendement à floraison il faut avoir choisi cette même sortie « RdtPot » sur une période antérieure de trente années. Vous avez donc à disposition 30 images de rendement à floraison issues de données TAMSAT où chaque pixel (cellule) a une résolution de 3,7 km \* 3,7 km. Il faut calculer la moyenne des rendements à floraison des 30 années précédentes (Moy(Rdt) dans l'équation) afin de pouvoir effectuer le calcul de l'anomalie des rendements à floraison que vous avez obtenus pour l'année en cours.
- 2) **Prévision probabiliste des rendements à récolte durant la saison des cultures :** c'est la variable « Rdt » qu'il faut choisir en sortie, qui est le rendement simulé à la date de la récolte, cette date correspond en fait à la date de la maturité physiologique permettant cette récolte, la récolte réelle pouvant être effectuée plus tardivement. Pour simuler ce rendement, à partir de la date choisie au cours du développement de la culture, le calcul est prolongé jusqu'à la date de récolte en utilisant les pluies des années antérieures. Il est recommandé là encore de choisir une période de même durée, 30 années étant la norme en météorologie notamment. On obtient de même 30 images rasters de rendements probables à la récolte (voir précisions ci-dessous). Sur cette série de rendements on recherche pour une occurrence déterminée, la valeur de rendement pour laquelle on peut espérer obtenir un rendement au moins égal ou supérieur à cette valeur. D'habitude on propose les quartiles 75% ou 25%, ici nous recommandons de choisir les occurrences à 80%, 50% et 20% qui peuvent se traduire comme étant la probabilité d'obtenir au moins ce rendement respectivement 8, 5 ou deux années sur 10, ce qui est beaucoup plus explicite pour le commun des mortels. Là encore, il est conseillé d'appliquer la méthode de calcul des anomalies en fonction des probabilités d'occurrences retenues.
- 3) **Estimation du rendement à la date de récolte :** il vous faut choisir là aussi la variable « Rdt ». Dans l'exemple, le calcul de l'anomalie pour l'année en cours a été effectué sur les 5 dernières années dont on a simulé les rendements (variable en sortie « Rdt »). On applique ensuite l'équation ci-dessus.

Pour pouvoir effectuer ces traitements, des scripts développés sous l'environnement de programmation R sont disponibles et diffusés lors des formations, de même pour les différents fichiers liés à QGIS.

SARRA-O permet de générer quatre différents indicateurs de rendement qui servent à des fins prédictives. Les trois premiers ne font pas appel à des prévisions météorologiques ou climatiques. Le dernier indicateur, utilise ces prédictions climatiques :

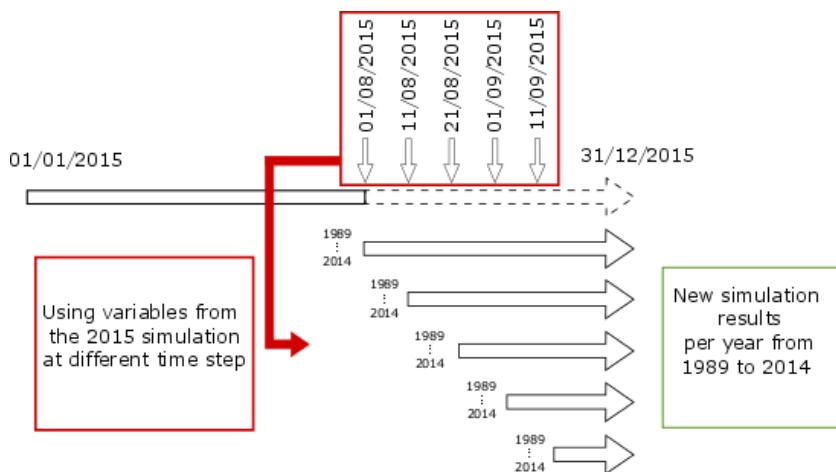
- 1. Estimation du rendement à floraison:** cette estimation du rendement, que pour dissocier des autres, nous nommons rendement à floraison (variable de sortie « RdtPot ») est obtenue environ 1 à 2 mois avant la date de récolte. Chaque cultivar a un rendement potentiel en situation optimale, sans insectes nuisibles ni de maladies, et sans contraintes hydriques. Mais des contraintes hydriques peuvent impacter le rendement lors de la phase reproductive, phase d'élaboration des appareils reproducteurs et floraison, qui va donner le nombre de grains. Ainsi, si la plante a souffert de stress, elle produira moins de fleurs, moins de grains et son rendement maximum atteignable aura diminué dès cette date. Cela permet de mettre en évidence, dès le stade de floraison, les zones qui ont déjà été particulièrement impactées et d'en estimer dès cette période les superficies touchées ainsi que l'impact sur les rendements maximum atteignables en fin de saison. À partir de cette date, le rendement simulé ne peut qu'être équivalent ou plus faible si des stress se produisent. La carte des Evolution pluriannuelle des anomalies



anomalies de rendements potentiels à floraison (**Fig. 3, carte du haut**) montre les surfaces qui ont été déjà impactées par des périodes de stress (orange). On observe que celles-ci se sont étendues à la date de récolte (**Fig. 3, carte du bas**). Ces cartes sont très utiles pour qualifier en cours de saison les rendements atteignables en fin de saison et mettre en évidence les surfaces en situations défavorables, nécessitant ainsi une attention particulière.

Fig. 3 : Anomalies des rendements à la date de floraison et à la date de récolte (maturité physiologique)

- 2. Prévision probabiliste des rendements à récolte durant la saison des cultures :** cet indice s'appuie sur les méthodes d'analyses probabilistes et permet d'estimer des rendements potentiels (variable « Rdt ») en fonction de leur probabilité d'occurrence. Les simulations sont effectuées en chaque pixel (cellule), pour l'année en cours. La fin de la saison étant inconnue on va utiliser les données climatiques des années antérieures jusqu'à la date de récolte. Il est recommandé de choisir une période de trente ans, on obtient alors 30 images des rendements probables correspondant à la fin de la saison des années antérieures qui reflètent la variabilité du climat en chaque lieu (pixel).



Comment procède la simulation pour un pixel ?

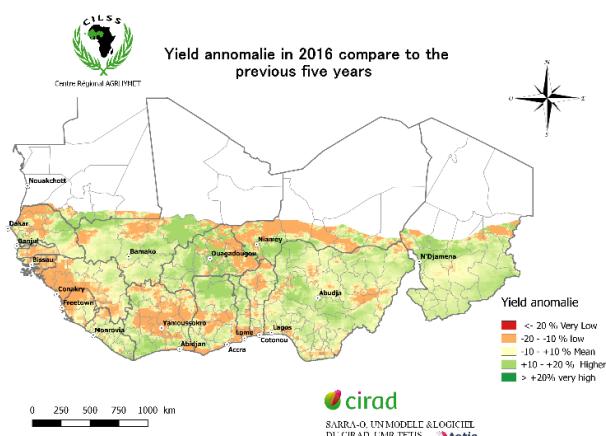
La figure ci-contre (Castets & al., prévue 2019), schématise les étapes de simulations pour l'année 2015, considérée ici comme l'année en cours. Dans cet exemple nous avons les données de l'année en cours jusqu'au 01/08/2015,

permettant de simuler l'impact du climat sur la culture depuis sa date de semis. Pour compléter l'année en cours, encore inconnue, nous finalisons la simulation en allant chercher, en chaque pixel simulé, les données de 1989, ce qui nous donne alors un rendement, puis le même processus est reconduit pour chaque année ici de 1990 à 2014.

Dans le cas de TAMSAT, nous avons une série débutant en 1989 qui, en chaque pixel simulé et pour chaque année, effectue les simulations jusqu'à la date de récolte (maturité physiologique) et simule un rendement à récolte. Ainsi, en chaque pixel simulé, pour la période 1989 à 2018, nous pouvons simuler 30 rendements probables qui tiennent compte de la variabilité climatique observée en ce lieu : pour tous les pixels simulés (600 000 pour le cas de l'Afrique de l'Ouest), nous avons 30 rendements simulés pour chacun des pixels, nous obtenons de fait 30 images de rendements. Nous calculons alors sur cette série de rendements probables les occurrences à 80%, 50% ou 20%, pour chaque pixel, correspondant à une probabilité d'occurrence de 8, 5 ou 2 années sur 10.

Pour la décennie suivante, au 11/08/2015, dès que l'on obtient les informations, on reproduit l'ensemble des traitements. Plus on se rapproche de la date de récolte, plus l'écart des rendements entre chaque fin d'année se réduit, jusqu'à disparaître.

- Estimation du rendement à la date de récolte :** à la date de maturité physiologique simulée, une carte des rendements est disponible à partir de laquelle il est possible de calculer l'anomalie de rendement simulée pour l'année en cours. Dans la Fig. 4, cette anomalie a été calculée à partir de la moyenne des cinq années précédentes (par exemple 2016 par rapport à 2011-2015). Cinq ans correspondent à la période pendant laquelle il est estimé que les individus ont une mémoire plus fiable de la série d'événements s'étant produits par le passé et donc pour les agriculteurs de leurs rendements obtenus les 5 dernières années.



Cette carte (Fig. 4), obtenue en fin de saison des cultures, permet d'avoir une information globale couvrant plusieurs pays. Plusieurs grandes zones apparaissent en plus grand déficit que d'autres (orange) notamment dans la zone Ouest ainsi que pour la Côte d'Ivoire et le Niger.

Fig. 4 : Anomalies des rendements simulés en fonction des 5 années précédentes

4. **Prévision des rendements à récolte avec les prévisions météorologiques saisonnières :** on utilise les sorties de modèles de prévisions météorologiques, ces prévisions, au pas de temps journaliers, sont utilisées pour terminer la simulation jusqu'à la date de récolte simulée (maturité physiologique) permettant d'obtenir une carte de prévision des rendements (variable « Rdt »). De même que pour les autres méthodes précédentes, on peut alors fournir une carte des anomalies en fonction de la période passée retenue. L'intérêt de l'utilisation de ces prévisions saisonnières a déjà été montré en utilisant la version SARRA-H de ce modèle (Roudier P. et al. 2016).

### C. Mode analyse et amélioration

Ce mode est exploité en dehors de la saison de culture sans les contraintes en temps semi -réel du SAP. Comme pour tout modèle de culture, il est nécessaire d'assurer une vérification et une amélioration continue du niveau de performance du système. Avec l'interface graphique il est possible d'analyser l'effet de différentes stratégies paysannes et les tendances sur de longues séries historiques en prenant en compte leur localisation géographique : les sols et les contraintes climatiques. Il est donc possible d'analyser l'effet des niveaux d'intensification/fertilité, des stratégies de semis (précoce... tardive), du choix des cultivars... Cela permet d'obtenir des zonages agro-climatiques et d'améliorer à terme ces scénarios de simulations au travers de nouvelles cartes thématiques. Ainsi, les stratégies paysannes (dates, cultivars...) que l'on représente au travers des scénarios de simulations sont mieux adaptées aux contraintes environnementales de ces zones : par ex. au lieu de proposer la même longueur de cycle partout, dans les zones où la longueur de la saison est trop courte ne seront simulés que les cultivars ayant une longueur de cycle plus courte adaptée à cette contrainte.

D'autre part des analyses de sensibilité et des tests sont à effectuer régulièrement portant sur :

- 1) des sources de données d'entrée nouvelles dans le cadre notamment de la télédétection (nouveaux capteurs, ...),
- 2) l'amélioration des estimations des données climatiques et/ou des prévisions climatiques et changements climatiques (correction de biais...),
- 3) et enfin les traditionnelles évolutions au sein d'un modèle. Evolution se traduisant par de nouveaux cultivars, des modifications des valeurs de paramètres (suite à de nouvelles données d'expérimentations et/ou d'enquêtes en milieu paysan), des modifications dans la formulation de certains processus du modèle ...

Cette dernière activité, de recherche et développement (R&D), est menée par le Cirad en collaboration notamment avec l'AGRHYMET ainsi que d'autres organismes de recherche : ces études pouvant se faire dans le cadre de simples collaborations ou encore dans le cadre de projets internationaux qui peuvent aborder des thématiques plus larges. Ce dernier aspect ne sera pas développé ici; seules les potentialités actuellement offertes par l'interface seront détaillées. Et une série de modes d'analyses et de résultats seront présentés en fin de ce manuel.



## V. Diagnostics

Ce mode d'analyse implique la capacité d'effectuer des suivis en continu lors de la saison des cultures et donc d'obtenir en temps semi-réel, dans un délai de quelques jours, les données climatiques indispensables pour effectuer les simulations. Dans notre cas, les données TAMSAT et ECMWF sont accessibles avec un délai inférieur à 10 jours, ce qui permet un suivi et surtout une diffusion en continu avec un délai court, connu et constant.

Le mode diagnostic permet de mettre en évidence tout au long du développement de la culture :

- l'installation des cultures (dates de semis), ainsi qu'une information concernant le nombre de semis ratés qui peut souligner des problèmes importants (disponibilité des semences...);
- des poches de sécheresse, leurs superficies et d'estimer leur impact sur le développement de la culture;
- de montrer la disparité géographique des semis qui peuvent être précoces ou tardifs en regard des années précédentes;
- les stocks d'eau disponible pour les cultures permettant d'estimer les risques pour les 10 jours à venir ou encore de prévoir des actions (ex. irrigation d'appoint);
- l'état de la culture depuis son semis au travers d'indicateurs de stress subi, d'estimation de sa croissance (Cstr, LAI, biomasses....).

En chaque point du territoire suivi (région, pays, découpage administratif), ce mode de suivi permet au travers des différentes variables en sortie (indicateurs) d'estimer et évaluer de façon continue, en temps semi-réel et géo-localisé, les impacts sur la culture qui peuvent affecter l'élaboration du rendement.

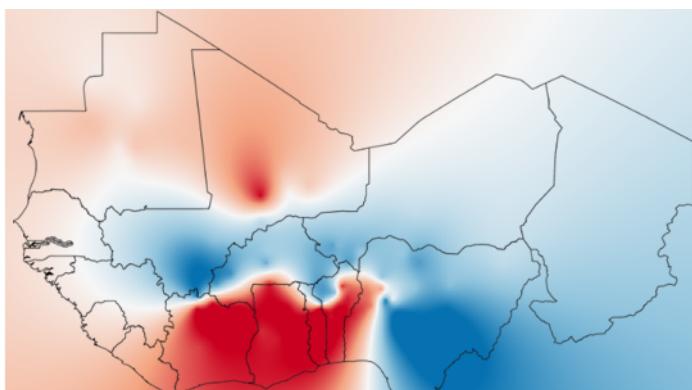
### A. Date de semis

La date de semis simulée est le jour où l'eau disponible dans le réservoir de surface (ici 20 cm) est supérieure ou égale à 10 mm. Le semis alors est considéré comme réussi si la culture n'est pas soumise durant sa période juvénile (20 jours) à un stress hydrique trop important se traduisant par une chute de sa biomasse durant plusieurs jours.

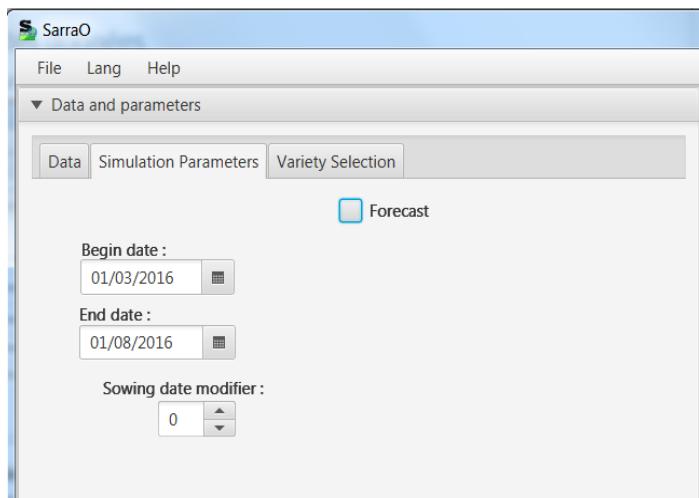
Une information stratégique pour le suivi d'une campagne est la carte de semis réussis montrant si la saison a commencé précocement, tardivement ou normalement en différents lieux de la zone étudiée. La carte des dates de semis simulées à l'aide du modèle est étroitement liée au démarrage de la mousson de l'année en cours, permettant ou non le semis, puis des contraintes hydriques (période sèche) subies par la culture pouvant entraîner sa mortalité dans sa phase juvénile et impliquer des re-semis. Elle peut être considérée comme la date de référence à partir de laquelle les agriculteurs définissent leur stratégie de semis pour cette saison des cultures (p. 12, Fig 2).

- Stratégies de semis :

Le modèle permet de prendre en compte les stratégies de semis des agriculteurs : notion de semis précoces ou tardifs, en définissant un délai en jours. La recherche de la date de semis est conditionnée par la date moyenne de semis en chaque point et le délai est défini en jours.



La date de semis moyenne est définie en chaque point par la carte thématique du démarrage moyen de la saison des cultures. Cette carte a été obtenue par analyse des séries climatiques de réseau de stations au sol effectuée par l'AGRHYMET.



Dans le cas de la recherche de la date de semis **au plus tôt** le décalage avec la date de semis moyenne doit être important. Dans le cas de l'Afrique de l'Ouest il est conseillé de démarrer la simulation en définissant un décalage de plus de trois mois (- 90 jours), « sowing date » pour lancer la recherche de la date de semis.

Si l'on souhaite tenir compte des stratégies d'étalement des semis, on peut effectuer plusieurs simulations en chaque point (pixel). En effet si l'on a une résolution de 3,7 km par

pixel (TAMSAT) cela recouvre plusieurs parcelles cultivées et/ou exploitations dans ces régions. Selon les zones climatiques, les semis peuvent s'étaler sur plus d'un mois (latitude Sud). On peut définir, un décalage de plus ou moins 20 jours et évaluer ainsi l'impact de différentes stratégies de semis (cf p. 12).

## B. Indice de stress hydrique de la culture

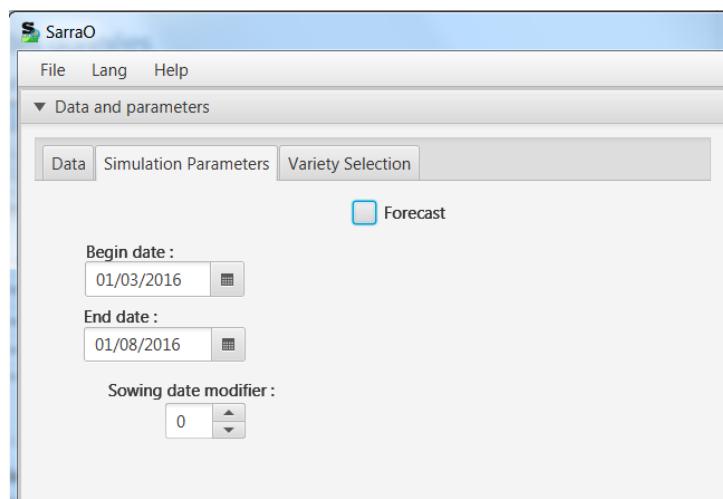
Data export					
Property	Path	File Name	Export	Frequency	
sla	D:\SARRA-O\output	sla	<input type="checkbox"/>	Annual	
vrac	D:\SARRA-O\output	vrac	<input type="checkbox"/>	Annual	
biomMc	D:\SARRA-O\output	biomMc	<input type="checkbox"/>	Annual	
cstr	D:\SARRA-O\output	cstr	<input checked="" type="checkbox"/>	10-Daily	
dr	D:\SARRA-O\output	dr	<input type="checkbox"/>	Annual	
eaudispo	D:\SARRA-O\output	eaudispo	<input type="checkbox"/>	Annual	
evap	D:\SARRA-O\output	evap	<input type="checkbox"/>	Annual	
evapPot	D:\SARRA-O\output	evapPot	<input type="checkbox"/>	Annual	

Tout au long de la campagne, l'état hydrique des cultures fait l'objet d'un examen attentif, car un état de stress hydrique prolongé peut avoir des impacts très importants. Pour les céréales, ont été définies deux phases critiques ayant un effet très marqué sur le rendement : 1) la phase reproductive, de l'initiation des panicules à la floraison, phase d'élaboration des organes reproducteurs définissant le nombre de fleurs et donc le nombre de grains, 2) la phase de remplissage des grains. L'indice utilisé dans le modèle pour exprimer le stress hydrique des cultures est le CSTR (crop water stress ratio), calculé comme étant le rapport de la transpiration réelle de la plante (mm), contrainte par l'eau disponible dans le sol, sur la transpiration potentielle qui correspond à ses besoins (mm). Cette valeur, calculée chaque jour, est comprise entre 0 et 1. Les cartes de l'indice CSTR peuvent être produites à tout moment pendant la campagne (p. 12, Fig 1). Ces cartes peuvent être obtenues soit tous les 10 jours (10-daily), soit depuis le semis (Annual). Elles correspondent au stress moyen subi sur la période choisie.

## VI. Prévisions des rendements

### - Prévision à floraison :

Le modèle propose une première prévision à la date de floraison qui est ici défini par la variable RdtPot, qui doit être lue comme le rendement potentiel à la date de floraison. En effet cette prévision intègre les stress hydriques subis depuis le semis et leur impact : 1) d'une part sur le développement végétatif de la culture, 2) d'autre part durant la phase sensible de développement, la phase reproductive (RPR), au cours de laquelle le nombre de cellules reproductives se développe. Dans le cas des céréales cela se traduit par les fleurs qui donnent le nombre de grains. En cas de stress, le nombre de cellules reproductives sera réduit impactant directement le rendement maximum à venir, quelles que soient les situations environnementales à venir jusqu'à la récolte.

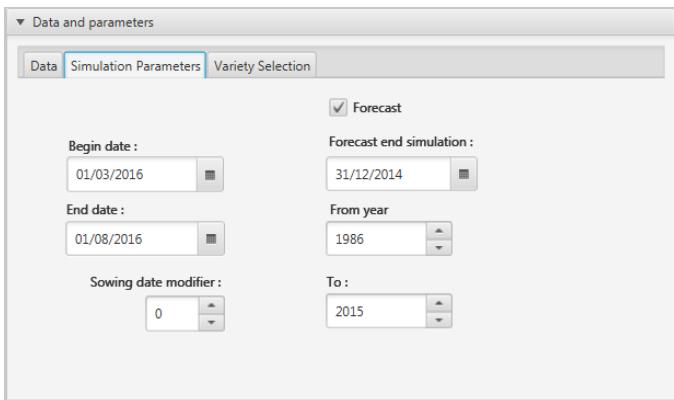


### - Prévisions jusqu'à la récolte :

Plusieurs modes de prévisions peuvent s'effectuer : soit en ayant des prévisions climatiques adaptées au format d'entrée du modèle, soit en utilisant les séries climatiques historiques donnant une probabilité des rendements à venir et prenant en compte la variabilité climatique en chaque point.

*a) Prévisions climatiques :*

Il suffit, pour lors, d'adapter la nomenclature et format de fichiers aux normes retenues de TAMSAT et ECMWF, permettant de constituer la fin de la saison avec les prévisions climatiques et de définir la date de fin de simulations au-delà de la date de récolte. Nota : à terme des adaptations sur l'interface sont prévues, pour faciliter l'utilisation de données de prévisions avec des nomenclatures variées, les formats étant pour lors un format GEOTiff pour les données spatialisées.

*b) Prévision probabiliste des rendements (séries historiques) :*

Pour cette option il vous faut compléter les informations qui apparaissent lorsque vous sélectionner le bouton « Forecast ».

Dans cet exemple, nous sommes environ à la mi-saison des cultures, au mois d'août, correspondant plus ou moins au stade de floraison pour la zone soudano -sahélienne (en bordure du désert).

En ayant sélectionné le bouton « Forecast » apparaissent plusieurs nouveaux paramètres.

Concernant la date de fin de simulations pour le mode prévision, il est recommandé de prévoir une date allant au-delà de la date traditionnelle de récolte (nota : ne pas tenir compte de l'année, seuls le jour et le mois sont retenus), puis de définir la période historique qui permettra de constituer la fin de l'année en cours avec les données climatiques de chaque année de cette série historique. Pour effectuer cette analyse probabiliste, il est conseillé de définir une période antérieure de 30 ans, identique à celle retenue dans les analyses climatologiques. (Nota : dans le cas de TAMSAT et ECMWF la période historique remonte à 1989).

## VII. Analyses et Améliorations

On se contentera dans ce dernier chapitre de présenter succinctement quelques résultats d'analyses et d'études de sensibilité du modèle qui ont surtout pour vocation d'être en premier lieu didactiques, de poser un ensemble de questions... de proposer des ébauches de résultats d'analyses et de tests tentant d'y répondre et surtout d'ouvrir des portes.

### A. Stratégies de semis : des espèces & des variétés vs un environnement

Le modèle permet d'effectuer des recherches de dates de semis sur tous les pixels en fonction de critères de réussite du semis et d'une date de démarrage. Cette date de démarrage de la recherche est définie à partir de la carte de démarrage de la saison des cultures (p. 18). Deux scénarios de stratégies de semis ont été donc définis : un premier, en commençant la recherche à partir de cette date de démarrage (Fig. 5), puis un second où l'on considère que l'agriculteur attend environ 15 jours au regard de cette date (Fig. 6), pour par exemple préparer le sol par un labour attelé qui s'effectue après les premières pluies pour ne pas fatiguer les bœufs.

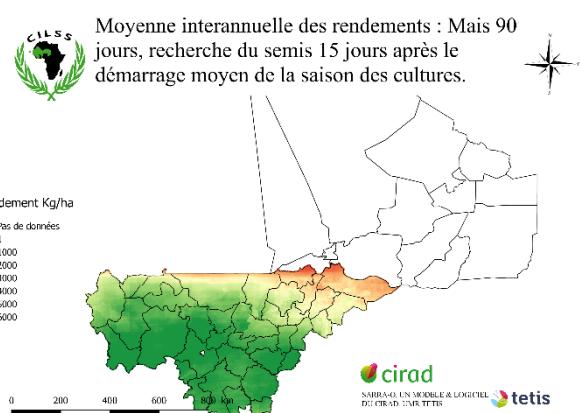
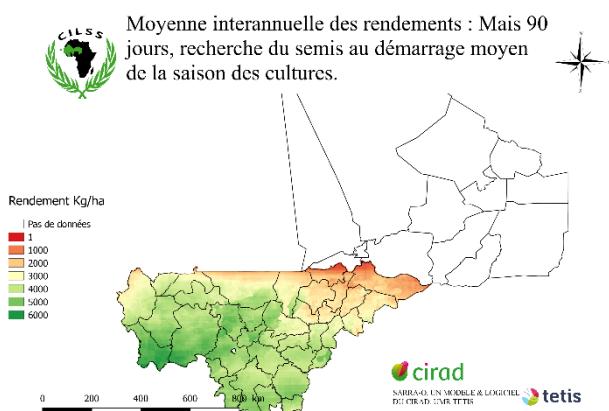


Fig. 5 : Recherche de semis à partir de la date moyenne

Fig. 6 : Recherche 15 jours après

Les rendements simulés correspondent à une situation technique et de niveau de fertilité à l'optimum (I4) ainsi que pour une variété couramment utilisée dans ces régions (non hybride). Il est à noter que quelle que soit la stratégie de semis la zone Nord n'est pas propice au maïs (rouge, orangé). Le fait de choisir une stratégie de semis plus tardive se traduit dans la zone traditionnellement reconnue pour la culture de maïs (vert) par une augmentation du rendement forte et moins variable spatialement. Ces résultats d'analyses peuvent donc

permettre de mieux définir les zones les plus adaptées et présentant moins de risques en fonction des pratiques associées.



## B. Capter la variabilité des rendements : simuler le rendement réel ?

Dans le cadre du projet Européen FP7 SIGMA (*Stimulating Innovation for Global Monitoring of Agriculture and its Impact on the Environment ; 2013-17*), des enquêtes et des mesures en milieu paysan ont été effectuées au Burkina Faso, portant sur 2 céréales : le maïs et le sorgho. Ce travail a été conduit pendant trois ans sur 6 villages avec un suivi et des mesures en champs d'environ 180 parcelles par année. Pour capter la variabilité des rendements mesurés en champs paysans, variant de 500 à 5000 kg/ha pour le maïs, nous avons défini 4 niveaux d'intensification (niveau technique et de fertilité de I1 à I4), afin de simuler les rendements et vérifier la capacité prédictive du modèle sur les rendements observés :

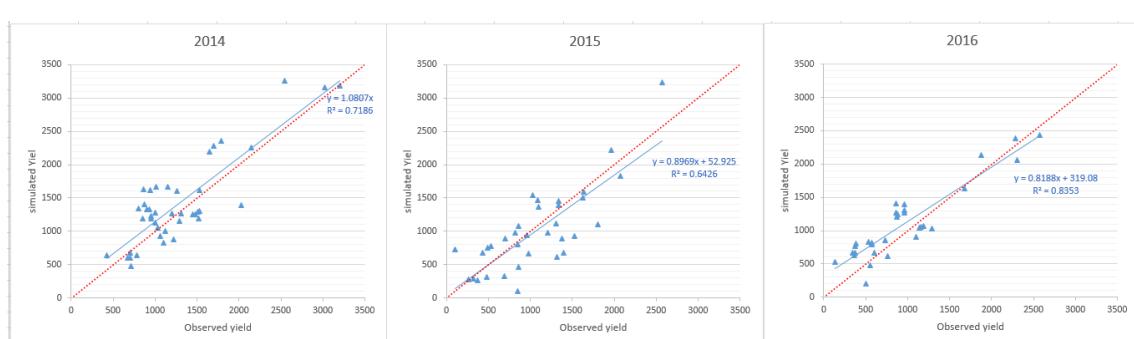
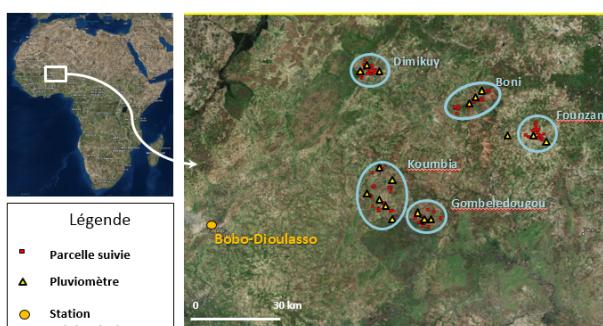


Fig. 7 : corrélation entre rendements simulés et observés de maïs mesurés en champs paysans (2014 à 2016)

Les corrélations obtenues sont élevées ou correctes étant donnée la très grande variabilité des rendements et surtout se vérifient sur les autres années :  $R^2$  de 0.71 en 2014, 0.64 en 2015 et 0.83 en 2016. Pour reproduire par simulations le rendement réel, en milieu paysan, nous avons donc effectué une série de 4 jeux de simulations sur l'ensemble du Burkina Faso. La Fig. 8 montre la variabilité spatiale des rendements pour une même année simulée en fonction des 4 niveaux d'intensification (I1 à I4). Les titres des cartes indiquent les valeurs minimum et maximum des rendements simulés pour chaque niveau d'intensification. La Fig. 9 est obtenue en appliquant une somme pondérée des rendements calculée pour chaque pixel et pour ces 4 niveaux d'intensification. Le polygone sur la carte délimite la zone des 6 villages. En faisant la moyenne des rendements simulés pour les pixels dans le polygone, le rendement simulé est proche de l'observé (2.8 Sim. et 2.3 Obs.).

Simulation du Rendement réel (milieu paysan)

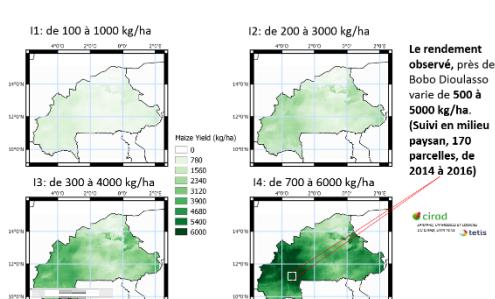
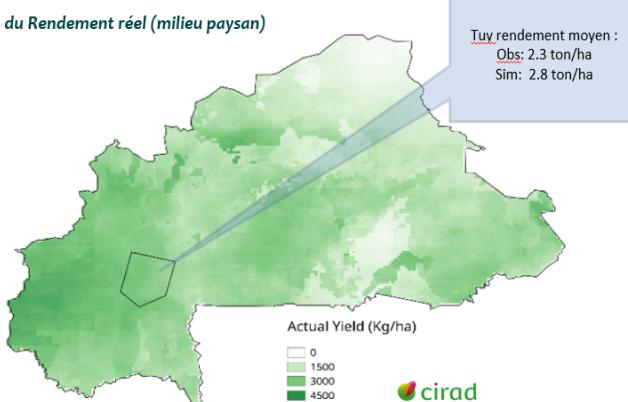


Fig. 8 : cartes des rendements simulés en fonction des niveaux d'intensification

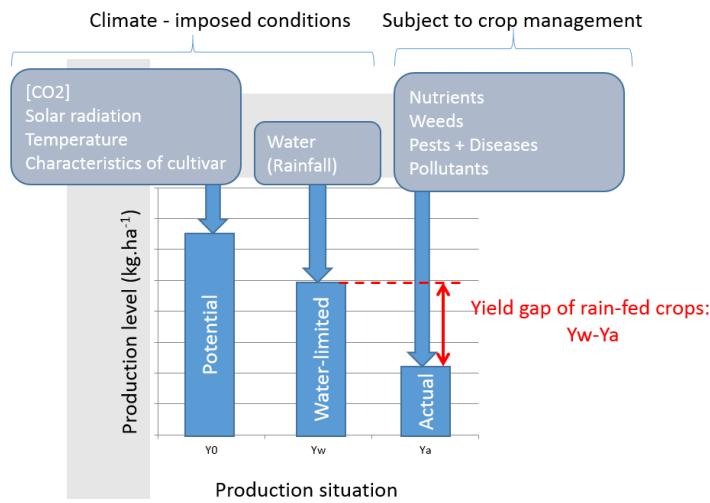
*Fig. 9 : carte des rendements réels simulés*



### C. Analyse des écarts de rendements : The Yield Gap !

Toujours dans le cadre de ce projet SIGMA, un des thèmes d'étude était d'estimer l'écart entre les rendements réels et les rendements potentiels obtenus en milieu contrôlé et en situation optimum. Cette analyse se fait traditionnellement en comparant les rendements observés avec les rendements simulés en situation optimum, mais sans apport d'irrigation (water-limited), comme présenté par ce schéma. Les terminologies, ont changé depuis 2013, celles actuellement utilisées pour dissocier les situations sont :

Absolue pour les cultures non limitées en eau, Potentiel pour les cultures limitées en eau et Réel pour les rendements à la ferme.



van Ittersum & al., 2013. Yield gap analysis with local to global relevance.

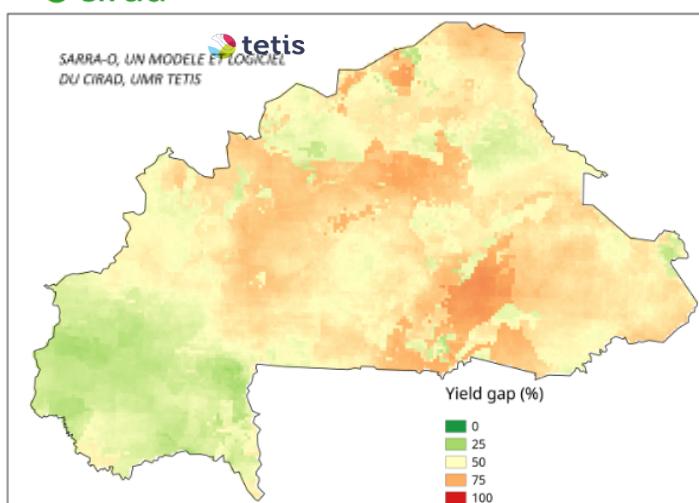


Fig. 10 : carte des écarts entre les rendements potentiels et les rendements réels simulés

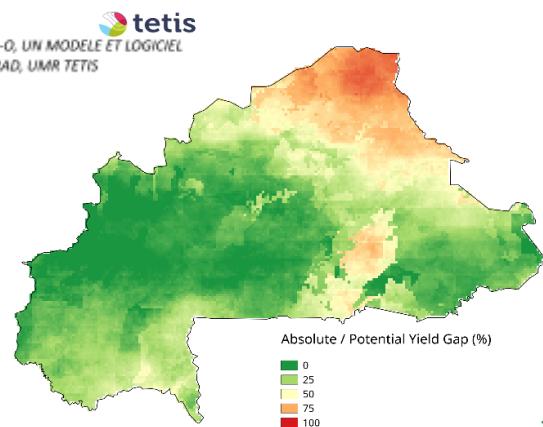


Fig. 11 : carte des écarts des rendements absolus et potentiels

L'intérêt de la méthode proposée ici est que l'on utilise la capacité prédictive du modèle à simuler les rendements en milieu paysan. Cette approche donne une répartition spatiale beaucoup plus fine et homogène sur les territoires étudiés, tout en intégrant l'effet du sol. Les zones présentant un aspect très découpé dans les anomalies de rendements soulignent l'effet des caractéristiques du sol : capacité de stockage de l'eau, profondeur maximum d'enracinement et potentiel de ruissellement (Fig. 10).

Comme spécifié dans le schéma ci-dessus une analyse peut être aussi effectuée en ne tenant pas compte des contraintes hydriques. Cette seconde analyse a pour intérêt de montrer les zones où il ne sera pas possible d'atteindre le rendement potentiel du cultivar, sans apport d'irrigation complémentaire : rendement absolu (Fig. 11). La zone Nord est celle qui met en évidence le plus de contraintes hydriques. A noter l'effet du sol dans ces contraintes que l'on retrouve dans la zone Sud Est. Il est possible, bien sûr, d'obtenir la carte des irrigations complémentaires permettant d'obtenir ce rendement absolu.

## D. Du rendement à la production

Un des objectifs du projet LAUREL (Land Use Planning For Enhanced Resilience of Landscape, 2017-2019), financé par la banque mondiale, concerne l'estimation de la production de différentes cultures.

*Crop area to Crop Production in Mozambique*

From cropping plan to crop production 2015 : e.g. Maize

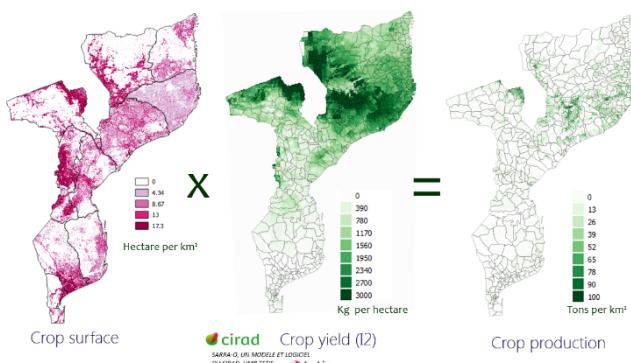


Fig. 12 : carte de production de maïs (I2)

La production (Fig. 12, Crop production) est obtenue par combinaison des surfaces cultivées, estimées par télédétection (Fig. 12, Crop surface) avec les cartes de rendements simulés obtenues en fonction des cultures et pratiques (Fig. 12, Crop yield (I2) : rendements simulés pour un maïs 90 jours avec un niveau d'intensification faible).

Partant de cet état en 2015, des simulations prenant en compte les changements climatiques ainsi que des prévisions d'évolution des superficies cultivées, ont permis d'estimer les évolutions de productions à l'horizon de 2050.

## E. Cartes thématiques et scénarios de simulations

Les Fig. 5 et 6 (p. 21) ont montré les effets de différentes stratégies (scénarios) de semis sur l'estimation des rendements. La gestion du calendrier des cultures doit s'adapter aux contraintes climatiques telles que : le démarrage de la saison, sa durée, les périodes les plus adaptées aux contraintes de gestion des cultures.

L'exemple présenté ici (Fig 13, droite) montre les possibilités offertes par l'utilisation des séries journalières historiques de pluies estimées à partir de satellites. Il est possible, grâce aux processus d'estimation des dates de semis réussis du modèle, d'obtenir des cartes de semis au plus tôt de la saison des cultures (sowing onset). Bon nombre des méthodes utilisées pour estimer les saisons de culture ne tiennent compte que du climat ou encore seulement des précipitations. La méthode proposée ici combine l'effet du climat, estimé à partir de séries temporelles d'images satellites (précipitations, évapotranspiration, température, radiation globale), et des sols sur les plantes. Ainsi : i) elle ne dépend plus de la qualité du réseau de stations au sol, couverture non homogène, faible couverture, qualité des séries historiques (Fig 13, gauche), ii) elle prend également en compte les caractéristiques du sol, iii) et enfin elle est basée sur les processus biologiques de la plante, et des impacts de la satisfaction de ses besoins en eau tant pour l'émergence que pour la phase juvénile pouvant induire un re-semis.



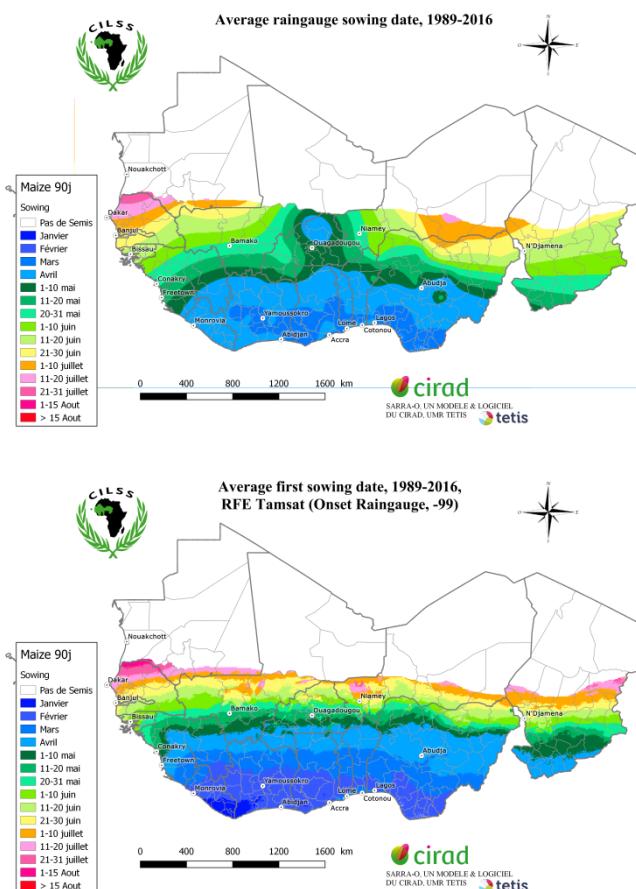


Fig. 13 : carte des dates de la moyenne interannuelle de semis au plus tôt : 1) à gauche estimation des dates de semis à partir du réseau de station au sol (méthode type Sivakumar), 2) à droite simulation de la date de semis au plus tôt par le modèle avec les données de pluies estimées par Tamsat.

Cet exemple montre à la fois les problèmes d’accessibilité et disponibilité des données ainsi que l’importance d’une bonne couverture du réseau de stations au sol, celle-ci ayant chutée ces dernières décades. On voit bien les effets liés à la mauvaise répartition des stations par ces effets de bulles sur la carte de gauche. La nouvelle carte, de par le maillage continu des pixels des images satellites, ne présente pas le même problème. Les isohyètes des pluies sont plus régulières avec des zones qui traduisent l’effet sol, au dessus de Bamako par exemple. Si cette répartition est plus en cohérence avec les connaissances des dynamiques de déplacements des phénomènes pluvieux, déplacement du front inter tropical (FIT), la qualité des estimations des pluies par satellites, qui sont calibrées par le réseau de station au sol disponible, doivent aussi être interrogées et vérifiées (Pellarin T. et al., 2019 ; Ramarohetra et al., 2013 ; Maidment et al., 2017).

## F. Et bien plus encore...

Dans le cadre de travaux de recherche et développement conduits au travers de projets et/ou partenariats avec différents instituts, universités, plusieurs axes d’études sont en cours ou ont déjà produit différents résultats dont des résultats académiques : plus de 50 publications dans des revues à comité de lecture.

En premier lieu, ont été abordées les problématiques de changement d’échelle et de leur impact sur les simulations (Baron et al. 2005, Sultan B. et al. 2005, Oettli P. et al. 2011). Les pratiques et adaptations des

cultures ont aussi fait l'objet d'étude (Traore S. B. et al. 2011, Marteau R. et al. 2011, Philippon N. et al. 2016) ainsi que de l'intérêt des prévisions saisonnières dans le cadre des systèmes d'alertes précoce (Roudier P. et al. 2011, Roudier P. et al. 2016).

L'impact des changements climatiques a aussi été beaucoup étudié et abouti à un très grand nombre de simulations effectuées avec les modèles de cultures SARRA-H&O sur plusieurs pays de l'Afrique de l'Ouest, en confrontant plusieurs modèles de changements climatiques (Guan, K. et al. 2015 ; Sultan B. et al. 2013, Parkes B. et al., 2018). Dans le cadre du projet international AgMip, depuis 2011, le Cirad a participé à une série d'études permettant de comparer le modèle SARRA-H à environ 29 autres modèles sur le maïs et d'aborder différentes problématiques telles que l'impact de la concentration de CO<sub>2</sub> effectuée en plein champ (Durand J-L et al., 2017), la capacité prédictive d'estimation de l'évapotranspiration (Bruce A. 2019). La dernière étude en cours concerne le continent Africain et la capacité des modèles à simuler des rendements dans des situations présentant un faible niveau de fertilisation, chacune des avancées étant intégrée sur la version spatialisée SARRA-O.

La version spatialisée du modèle ouvre les portes à une meilleure utilisation des différentes sources de données satellites. Ces données, même si elles sont régulièrement réparties, fiables et répétitives ne sont pas sans biais (Ramarohetra et al., 2013). Portée par l'université de Grenoble, l'utilisation de données SMOS (humidité superficielle du sol) a déjà montré des résultats prometteurs (Gibon F. et al., 2018 et thèse). Son utilisation en temps semi-réel est en cours de réalisation, et devrait permettre d'améliorer les performances des modèles d'estimations des pluies à partir d'images satellites (Pellarin T., 2019). D'autres sources satellites ont été analysées et confrontées au modèle dans une approche d'assimilation et/ou de vérification (Vintrou E. et al. 2014, Leroux et al. 2016, Jahel C. et al. 2018, Leroux et al. 2019).

L'utilisation de nouveaux satellites (Sentinels...), offrant une meilleure résolution, ouvre de belles perspectives pour une meilleure assimilation de ces données en cours de saison permettant d'améliorer et/ou confronter différentes méthodes : ie. démarrage de la saison de croissance végétative, périodes de récoltes...

## VIII. Remerciements

Le logiciel SARRA-O est l'aboutissement d'un long parcours et d'un grand nombre d'expériences. L'historique concernant ces évolutions montre toute la diversité des actions autour du modèle et logiciel SARRA-H et permet aussi de remercier tous ceux qui y ont participé (<https://sarra-h.teledetection.fr/Historique.html>). Pour cette nouvelle version intégrant notamment les images satellites ou encore des données de modèles de changements climatiques il est important de souligner un ensemble de collègues qui pour certains étaient déjà là et pour d'autres ont été de précieux appuis. En premier, il nous faut remercier les agriculteurs et organisations paysannes qui nous ont accueilli et beaucoup apporté dans le cadre de différents projets, notamment AMMA et Sigma (projets Européens). Il y a eu aussi un fort appui de stagiaires, post doc et doctorants qui nous ont permis d'avancer et de mieux appréhender et traduire la diversité de ce que nous essayons de capter. Pour les post doctorants et doctorants cela a été un plaisir de les citer au long de ce petit manuel en regard des résultats de leurs travaux. Pour les stagiaires nous souhaiterions notamment remercier : Stella Guillemot, Koladé Akakpo, Cyrille Ahmed Midingoyi et Thomas Gendron.

Les partenaires scientifiques sont nombreux et nous souhaitons associer à travers eux leur institut. Tout particulièrement l'AGRHYMET qui nous a accueilli et accompagné, nous adressons un merci tout particulier à Seydou B. Traore, Agali Alhassane et Henri Songoti pour leur forte et constante participation et investissement.

Les partenaires des météorologies nationales des différents pays de la CEDEAO avec qui nous avons pu dialoguer, vérifier et tester le logiciel dans le cadre de formations (notamment le projet Crews en lien avec l'OMM) ainsi que les partenaires de l'EMBRAPA au Brésil (projet GEOABC-Capex Cofecub).

Dans le cadre des études sur les impacts climatiques et du changement climatique il nous faut citer notamment : Albert Olioso (Inra), Thierry Pellarin (CNRS, IRD, Univ. Grenoble) et Benjamin Sultan (IRD).

Le Cirad et l'UMR TETIS qui nous ont permis d'avoir ce temps long pour œuvrer à toutes ces évolutions et notamment aux collègues Cirad : Agnès Bégué, Danny Lo Seen et Camille Jahel qui a lors de sa thèse essuyé les plâtres et participé à la mise en place de cette nouvelle version, avec aussi Louise Leroux (Cirad, UPR Aida).



## IX. Quelques références bibliographiques

Baron, C., Sultan, B., Balme, M., Sarr, B., Traore, S., Lebel, T., Janicot, S., Dingkuhn, M., 2005. From GCM grid cell to agricultural plot: scale issues affecting modelling of climate impact. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 360(1463), 2095–2108. <http://doi.org/10.1098/rstb.2005.1741>

Bruce A. Kimball, Kenneth J. Boote, Jerry L. Hatfield, Laj R. Ahuja, Claudio Stockle, Sotirios Archontoulis, Christian Baron, Bruno Basso, Patrick Bertuzzi et al., 2019. Simulation of maize evapotranspiration: An inter-comparison among 29 maize models, *Agricultural and Forest Meteorology*, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.02.037>

Castets M., Baron C., Traore S.B., Jahel C., Songoti H., Degenne P., Alhassane A., Lo Seen D, 2016. Assessing agricultural practices in highly variable environments: SARRA-H spatialized crop model for West Africa. AgMIP6 Global Workshop, Montpellier, France.

Degenne, P, Lo Seen, D, Parigot, D, Forax, R, Tran, A, Ait Lahcen, A, Curé, O, Jeansoulin, R, 2009. Design of a domain specific language for modelling processes in landscapes. *Ecol. Model.* 220(24), 3527–3535.

Degenne P., Lo Seen D., 2016. Ocelet: Simulating processes of landscape changes using interaction graphs. *SoftwareX*, 5:89-95.

Dingkuhn M, Baron C, Bonnal V, Maraux F, Sarr B, Sultan B, Clopes A, Forest F, 2003. Decision support tools for rainfed crops in the Sahel at the plot and regional scales. T.E. Struif Bontkes, M.C.S. Wopereis (Eds.), *Decision support tools for smallholder agriculture in sub-Saharan Africa: a practical guide*, IFDC, Muscle Shoals, USA, pp. 127-139

Durand J.L., Kenel Delusca ,Ken Boote, Jon Lizaso, Remy Manderscheid, Hans Johachim Weigel, Alex C Ruane, Cynthia Rosenzweig, Jim Jones, Laj Ahuja, Saseendran Anapalli, Bruno Basso, Christian Baron, Patrick Bertuzzi, Christian Biernath, Delphine Deryng et al., 2017. How accurately do maize crop models simulate the interactions of atmospheric CO<sub>2</sub> concentration levels with limited water supply on water use and yield? *European Journal of Agronomy*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2017.01.002>

FAO (2016), *Crop Yield Forecasting: Methodological and Institutional Aspects*"

Gibon F., Thierry Pellarin, Carlos Román-Cascón, Agali Alhassane, Seydou Traoré, Yann Kerr, Danny Lo Seen, Christian Baron, 2018. Millet yield estimates in the Sahel using satellite derived soil moisture time series, *Agricultural and Forest Meteorology*, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.07.001>

Guan, K., B. Sultan, M. Biasutti, C. Baron, and D. B. Lobell, 2015. What aspects of future rainfall changes matter for crop yields in West Africa?, *Geophys. Res. Lett.*, 42, 8001–8010, <https://doi.org/10.1002/2015GL063877>.

Jahel C., Baron C., Vall E., Karambiri M., Castets M., Coulibaly K., Bégué A., Lo Seen D., 2017. Spatial modelling of agro-ecosystem dynamics across scales: A case in the cotton region of West-Burkina Faso, *Agricultural Systems*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2016.05.016>

Kouressy M., Dingkuhn M., Vaksman M., Heinemann A., 2008. Adaptation to diverse semi-arid environments of sorghum genotypes having different plant type and sensitivity to photoperiod. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148 (3) : 357-371. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2007.09.009>

Louise Leroux, Mathieu Castets, Christian Baron, Maria-Jose Escorihuela, Agnes Begue, Danny Lo Seen, 2019. Maize yield estimation in West Africa from crop process-induced combinations of multi-domain remote sensing indices, *European Journal of Agronomy* <https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.04.007>

Leroux, L., Baron, C., Zoungrana, B., Traoré, S. B., Lo Seen, D., & Bégué, A., 2016. Crop Monitoring Using Vegetation And Thermal Indices For Yield Estimates: Case Study Of A Rainfed Cereal In Semi-Arid West Africa. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9(1), 347–362. <http://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2501343>

Maidment, Ross, Black, Emily, Tarnavsky, Elena, 2016. TAMSAT Daily Rainfall Estimates. University of Reading. Dataset. <http://dx.doi.org/10.17864/1947.40>

Maidment RI, Grimes D, Black E, Tarnavsky E, Young M, Greatrex H, Allan RP, Stein T, Nkonde E, Senkunda S, Alcántara EMU, 2017. A new, long-term daily satellite-based rainfall dataset for operational monitoring in Africa. *Scientific Data*, 4, 170063. <http://dx.doi.org/10.1038/sdata.2017.63>

Parkes B., Dimitri Defrance, Benjamin Sultan, Philippe Ciais, and Xuhui Wang, 2018. Projected changes in crop yield mean and variability over West Africa in a world 1.5K warmer than the pre-industrial era. *Earth Syst. Dynam.*, 9, 119–134, 2018. <https://doi.org/10.5194/esd-9-119-2018>

Pellarin T., Roman-Gascon C., Baron C., Brocca L., Camberlin P., Prieto D.F., Kerr Y.H., Massari C., Panthou G., Perrimond B., Philippon N., and Quantin G., 2019 en cours. From SMOS surface soil moisture retrievals to near real-time rainfall estimates in Africa: the PrISM methodology.

Ramarohetra J, Sultan B, Baron C, Gaiser T and Gosset M, 2013. How satellite rainfall estimate errors may impact rainfed cereal yield simulation in West Africa. *Agric. For. Meteorol.*, 180:118–31

Roudier P., A. Alhassane, C. Baron, S. Louvet, B. Sultan, 2016. Assessing the benefits of weather and seasonal forecasts to millet growers in Niger, *Agricultural and Forest Meteorology*, Volume 223, 15 June 2016, Pages 168-180, ISSN 0168-1923, <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.04.010>

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192316302416>

Sultan B, Roudier P, Quirion P, Alhassane A, Muller B, Dingkuhn M, Ciais P, Guimberteau M, Traore S, Baron C, 2013. Assessing climate change impacts on sorghum and millet yields in the Sudanian and Sahelian savannas of West Africa. *Environmental Research Letters*, 8:014040, 9 pages, <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/8/1/014040>

Traoré, S. B., Alhassane, A., Muller, B., Kouressy, M., Somé, L., Sultan, B., Oettli, P., Siéné L., Ambroise C., Sangaré, S., Vaksmann, M., Diop, M., Dingkuhn, M., Baron, C., 2011. Characterizing and modeling the diversity of cropping situations under climatic constraints in West Africa. *Atmos. Sci. Lett.* 7p., DOI: 10.1002/asl.332.

## X. Annexe description des variables

### A. Paramètres plantes (cultures)

Paramètres fréquemment utilisés pour la calibration : ils sont tous mesurés ou déduits des suivis en champs (expérimentations ou paysans)							
	Paramètres des cultures	Groupe fonctionnel	Unité	Défaut	Fourchette de valeurs	Qu'est-ce que cela représente?	Fréquemment utilisés
	SDJBVP	Phénologie et photopériodisme	°C.d	400	200...1000	Phase 2. Durée en degrés jours de l'émergence à l'initiation paniculaire (organes reproducteurs), phase développement végétatif	Entre espèces et variétés : durée du cycle en absence de photopériodisme
	SDJRPB	Phénologie et photopériodisme	°C.d	400	200...600	Phase 4. Durée en degrés jours de l'initiation paniculaire à la floraison (phase reproductive)	idem
	SDJMatu1	Phénologie et photopériodisme	°C.d	400	200...600	Phase 5. Durée en degrés jours de la floraison à la fin du remplissage des grains. Plus de développement végétatif pour les céréales.	idem
	SDJMatu2	Phénologie et photopériodisme	°C.d	50	0...300	Phase 6: Durée en degrés jours de la fin du remplissage des grains à la maturité physiologique (date de récolte). Plus de développement végétatif, période de dessiccation des grains	idem
	PPSens	Phénologie et photopériodisme	none	0.7	0.1...1	Sensibilité au photopériodisme. De 0.3 à 0.6 c'est sensible au PP, elle disparaît pour des valeurs allant de 0.7 à 1. Voir Dingkuhn et al. 2008; Euro.J.Agron. (Impatience model)	Définition de la sensibilité au PP.
	SlaMin	Propriétés des feuilles	kg/ha	0.0018	0.001...0.004	SLA (specific leaf area) : Surface des feuilles/biomasse sèche Valeur finale (minimale) pour l'ensemble de la canopée	A utiliser avec précaution et seulement si vous avez des mesures ou en fonction de la littérature
	SlaMax	Propriétés des feuilles	kg/ha	0.0060	0.004...0.008	Valeur initiale (maximale) pour l'ensemble de la canopée.	idem
	Kdf	Conversion de la lumière et extinction	none	0.5	0.3...1	Définit l'extinction du rayonnement solaire diffus du couvert végétal en fonction du LAI. 0.4 = feuilles droites, 1 = feuilles horizontales.	A utiliser avec précaution et seulement si vous avez des mesures ou en fonction de la littérature. Varie peu pour les céréales (0.4 à 0.6)
	TxConversion	Conversion de la lumière et extinction	g/MJ	4 (C3), 6 (C4)	2...8	Efficience du rayonnement (RUE=epsilon-b) AVANT la respiration de maintenance. Cette valeur peut être jusqu'à 2 fois plus élevée que la RUE trouvée dans la littérature, qui n'est pas basée sur l'assimilation mais sur la biomasse, et ne comprend pas le système racinaire et la respiration de maintien. Paramètre important!	A utiliser avec précaution. Faible variation au sein des variétés d'une même espèce. L'apport de fertilisant et/ou la fertilité des sols impactent fortement ce taux de conversion
	KrdtPotA	Propriétés de la biomasse	kg/kg	0.4 ... 1.1		Potentiel de rendement (équivalent au HI mais en kg)	Entre espèces et variétés
	FeuilAeroPente	Propriétés de la biomasse	none	-9E-5...-0.00018		Pente de régression de la répartition des biomasses foliaires sur la biomasse aérienne	Entre espèces et variétés

Paramètres rarement utilisés							
Peu utilisés, défaut=	Paramètres des cultures	Groupe fonctionnel	Unité	défaut	Fourchette de valeurs	Qu'est-ce que cela représente?	Utilisés pour
0.5	TxResGrain	Propriétés des semences	fraction	0.5	0.4...0.8	Fraction du poids de grain mobilisable pour la croissance (émergence)	
	PoidsSecGrain	Propriétés des semences	g	0.028	0.01-0.05	Poids sec d'un grain	Surtout entre espèces, utiliser des mesures de poids sec de grains
	SDJLevee	Propriétés des semences	°C.d	50	0...infinite	Phase 1. Durée en degrés jours du semis à l'émergence, lorsque le sol est humide	Surtout entre espèces
	TBase	Phénologie et photopériodisme	°C	10	0...15	Température de base de l'air permettant le développement de la plante	Entre espèces rarement entre variétés d'une même espèce
	TOpt1	Phénologie et photopériodisme	°C	25	15...30	Limite inférieure du plateau thermique de développement optimum	idem
	TOpt2	Phénologie et photopériodisme	°C	35	25...40	Limite supérieure du plateau thermique de développement optimum	idem
	TLim	Phénologie et photopériodisme	°C	40	30...50	Température maximum de développement de la plante (température létale)	idem
0.17	PPExp	Phénologie et photopériodisme	none	0.2	0.1...1	Atténuation progressive de la réponse au photopériodisme peu utilisée. Valeur par défaut 0.17	
13.5	SeuilPP	Phénologie et photopériodisme	h	13.5	14	Longueur du jour maximum limitant la réponse au PP	
11.5	PPCrit	Phénologie et photopériodisme	h	11	10	Longueur du jour minimum limitant la réponse au PP	
	SlaPente	Propriétés des feuilles	none			Pente de régression entre le SLA Max et Min	Entre espèces
0.9955	AttenMitch	Propriétés des feuilles	none	0.9955	ca. 0.9955	Coefficient de Mitscherlich fonction permettant une évolution non linéaire du SLA de max à min.	
1	TxAссимMatu1	Conversion et extinction de la lumière	fraction	1	0...1	Facteur de réduction de l'assimilation durant cette phase	Seulement s'il existe une sénescence des feuilles terminales indépendante de la concurrence.
0.5	TxAссимMatu2	Conversion et extinction de la lumière	fraction	0.5	0...1	Facteur de réduction de l'assimilation durant cette phase	Seulement s'il existe une sénescence des feuilles terminales indépendante de la concurrence.
1.5	CoefficientQ10	Respiration de Maintenance	none	1.5	1...2	Q10 coefficient pour la respiration de maintenance. Pas d'effet pour la valeur de 1, la littérature suggère une valeur de 2 quand la T° augmente de 10°. Un taux de 1.5 est suggéré dans les littératures récentes	
	KcMax	En relation avec l'eau	fraction	1.2	1...1.5	Coefficient FAO de référence pour l'évapotranspiration (ET) du couvert végétal en fraction de l'évapotranspiration potentielle (ETP).	Entre espèces, mais se tenir aux recommandations ou aux observations de la FAO.
	PFactor	En relation avec l'eau	none	0.5	0...0.7	Référence FAO pour la valeur critique FTSW de réponse à la transpiration. Valeur 0 = les stomates répondent immédiatement si FTSW<1. la plupart des cultures sont autour de 0.5 : la réponse commence lorsque la moitié de l'eau	Entre espèces, mais se tenir aux recommandations ou aux observations de la FAO.

						disponible est épuisée. Le riz est sensible (valeur entre 0.1 et 0.4)	
3	SeuilCstrMortality	En relation avec l'eau	fraction	3	3...6	Nombre de jours de décroissance de la biomasse aboutissant à la mortalité de la plante durant sa période juvénile.	Entre espèces
0.5	TxRealloc	Propriétés de la biomasse	kg/kg	0.5		Taux de réallocation des assimilats (sucre d'amidon) lorsque la demande est supérieure à l'offre	
25	TempMaint	Propriétés de la biomasse	°C	25			
0.6	FeuilAeroBase	Propriétés de la biomasse	%	0.6		Interception de la ligne de régression de la répartition de la biomasse des feuilles sur la biomasse au-dessus du sol	
0.7	PCReallocFeuille	Propriétés de la biomasse	%	0.5 ... 0.8		Pourcentage de réallocation des assimilats des feuilles vers le grain	
0.6	AeroTotBase	Propriétés de la biomasse	kg/kg			Interception de la ligne de régression de la répartition de la biomasse au-dessus du sol sur la biomasse totale	Entre espèces (allocation des racines)
	AeroTotPente	Propriétés de la biomasse	kg/kg	1E-5 ... 9E-5		Pente de régression de la biomasse aérienne sur la biomasse totale	Entre espèces
	KrdtPotB	Propriétés de la biomasse	kg/ha	200 ... 1000		Paramètre d'évaluation du rendement	Entre espèces
	VRacBVP	Vitesse des racines	mm/d	15	0...50	Vitesse d'enracinement journalière durant la phase végétative.	Entre espèces, plus grande vitesse
	VRacPSP	Vitesse des racines	mm/d	15	0...50	Idem pour PSP	Entre espèces, plus grande vitesse
	VRacRPR	Vitesse des racines	mm/d	15	0...50	Idem pour la phase reproductive	Entre espèces, plus grande vitesse
	VRacMatu1	Vitesse des racines	mm/d	8	0...50	Idem pour la phase de remplissage des grains	Entre espèces, vitesse réduite
	VRacMatu2	Vitesse des racines	mm/d	8	0...50	Idem pour la phase de dessiccation des grains	Entre espèces, vitesse réduite

## B. Paramètres sols

Paramètres des sol et parcelles	Groupe fonctionel	Unité	Défaut	Fourchette de valeurs	Qu'est-ce que cela représente?	Mesures
StockIniSurf	Réservoir superficiel	mm		0...20	Stock d'eau initial du réservoir de surface défini à la 1ère date de simulation devant correspondre à la date de mesure.	
StockIniProf	Réservoir en profondeur	mm		0...100	Stock d'eau initial du réservoir en profondeur défini à la 1ère date de simulation devant correspondre à la date de mesure.	
EpaisseurSurf	Réservoir superficiel	mm	200	50...200	Epaisseur du réservoir de surface	
EpaisseurProf	Réservoir en profondeur	mm		200...2000	Epaisseur du réservoir en profondeur, dépend du sol (blocage des racines par un sol induré) et de la profondeur maximum d'enracinement de la culture : 200 riz irrigué, 600 riz pluviale, 1200 maïs & sorgho, 2000 mil...	
PourcRuiSS	Typologie des sols	%			Pourcentage d'eau ruisselée au-delà du seuil (SeuilRuis) de ruissellement fonction des hauteurs de pluie	
SeuilRuiSS	Typologie des sols	mm			Seuil de pluie journalière déclenchant un ruissellement	
RU	Typologie des sols	mm/m			Déduit de HumCR (= HumFC) et de HumPF	
HumCR	Typologie des sols	m3/m3			Teneur en eau volumétrique du sol à la capacité du champ (l'eau qui reste après drainage suite à une irrigation excessive, en l'absence d'évaporation).	
HumPF	Typologie des sols	m3/m3	0.05	0.01...0.08	Teneur en eau volumétrique du sol au point de flétrissement (limite de pouvoir d'extraction des racines)	Mesurer en laissant une plante extraire l'eau du sol d'un pot jusqu'à flétrissement de la plante, tout en empêchant parfaitement l'évaporation à la surface du sol. Mesurer ensuite la teneur en eau.
HumFC	Typologie des sols	m3/m3	0.25	0.1...0.3	Teneur en eau volumétrique du sol à la capacité du champ (l'eau qui reste après drainage suite à une irrigation excessive, en l'absence d'évaporation).	Mesurer en saturant complètement le sol, puis vidanger le pot jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'eau qui coule des trous de drainage. Mesurer ensuite la teneur en eau.
HumSat	Typologie des sols	m3/m3	0.35	0.2...0.5	Teneur en eau volumétrique du sol lorsqu'il est complètement rempli d'eau, tous les espaces d'air étant remplis d'eau.	Mesurer en saturant complètement le sol sans le compacter. Difficile parce que le gaz peut être piégé dans le sol. Mesurer ensuite la teneur en eau.
PercolationMax (pas utilisé)	Typologie des sols	mm	5	0...20	Taux journalier de percolation (drainage profond)	Mesurer en plaçant des lysimètres à fond ouvert dans le champ, remplir d'eau et couvrir contre l'évaporation. Observez la diminution de la colonne d'eau stagnante par jour.

## C. Paramètres pratiques culturales

Pratiques paysannes	Groupe fonctionel	Unité	Defaut	Fourchette de valeurs
DatesSemis	dd/mm/aaaa	none	none	Date de semis observée ou date de recherche automatique de la date de semis (conditions permettant l'émergence et la survie de la plante)
ProfRacini	mm	50	5...100	Profondeur initial de racines (pas utilisé), cas repiquage.
Densite	plants/ha			Densité de semis
SeuilEauSemis	mm	10		Stock d'eau dans le sol permettant la germination
NbjTestSemis	jours	20		Nombre de jours de test de mortalité (période juvénile)
IrrigAuto	binary		0 ou 1	Si égal à 1 cela permet de simuler des doses d'irrigations
IrrigAutoTarget	fraction (0...1)	0.6	0...1	Fraction de stock d'eau dans le sol déclenchant une irrigation. E.g., si 0.6 l'irrigation sera déclenchée si on a un stock d'eau inférieur à ce seuil.
MaxIrrig	mm		5...70	Stock d'eau d'irrigation maximum
Precision	mm		1..20	Précision des calculs de la quantité à irriguer (par ex. 5 correspond à une précision de 5 en 5 mm)