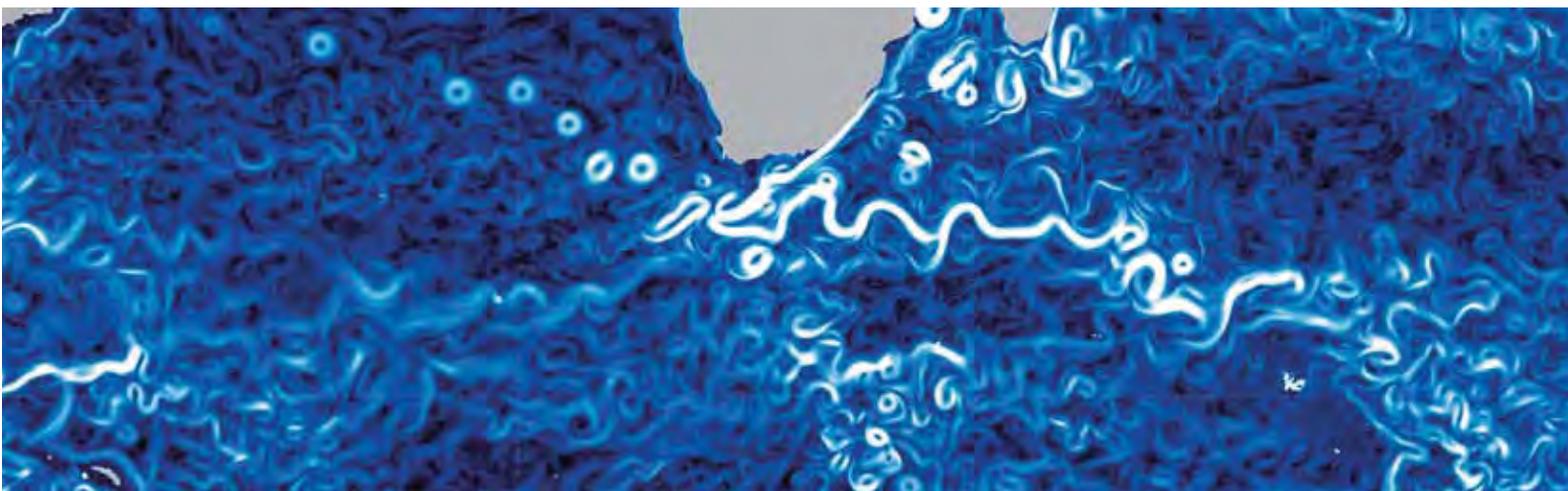


# Comprendre la machine climatique grâce aux modèles de climat



© EU Copernicus Marine Service / Mercator Océan

**L**a compréhension du fonctionnement du système climatique et environnemental de la Terre passe, d'une part, par l'utilisation d'outils statistiques appliqués à l'analyse des données d'observations, d'autre part, par des approches diagnostiques mettant en jeu certains concepts ou théories, et, plus largement, par des outils de modélisation représentant la complexité des processus et mécanismes physiques en jeu dans le système Terre. Ces outils de modélisation sont très élaborés, mais ils comportent cependant encore de forts biais et incertitudes, ce qui nécessite des travaux de validation à l'aide d'observations adaptées. Ces travaux sont indispensables pour évaluer ensuite le niveau de confiance et d'incertitude des projections climatiques fournies par ces modèles.

Modèle Mercator Océan, carte des courants de surface.

Le courant des Aiguilles, qui longe la côte est du continent africain, subit une rétroflexion à la rencontre des eaux froides du courant de Benguela et du courant circumpolaire antarctique.

## Qu'est-ce qu'un modèle de climat ?

Les modèles de climat représentent le fonctionnement des processus physiques du système Terre-atmosphère. Ils reproduisent les circulations de l'atmosphère et de l'océan, les échanges énergétiques avec la surface, le cycle hydrologique, les interactions entre le climat et les cycles biogéochimiques. Ils fonctionnent à partir de la résolution numérique des équations de la physique de l'atmosphère et de l'océan et reposent sur

Encadré 8

### La modélisation océanique, une composante essentielle des modèles de climat

La composante océanique est très importante dans les modèles de climat.

Les modèles océaniques développés à l'IRD sont ainsi incorporés dans les travaux du Giec. Ces modèles sont également utiles pour faire des prévisions, une sorte de « météorologie océanique », et pour comprendre les mécanismes qui régissent les variations de l'océan.

Déclinés à l'échelle locale, ils permettent de suivre les évolutions du milieu.

Les chercheurs de l'IRD contribuent au développement de la modélisation des océans dans la zone intertropicale. Ces modèles ont tout d'abord été mis au point pour l'océan global, afin de représenter les caractéristiques physiques (température, salinité, courants) et biogéochimiques (quantité de plancton, sels nutritifs, oxygène dissous) en surface et en profondeur. L'échelle globale permet de visualiser les contrastes entre les bassins océaniques aux hautes latitudes, dans les tropiques, à proximité des côtes ou au centre des océans tropicaux. L'intérêt des modèles globaux est de tester leur capacité à reproduire la dynamique de l'océan et des cycles biogéochimiques dans des conditions océaniques très différentes (fort contraste de température, de luminosité et de nutriments). Les résultats issus des modélisations sont ensuite confrontés aux observations, notamment celles des satellites, et aux bases de données *in situ*.

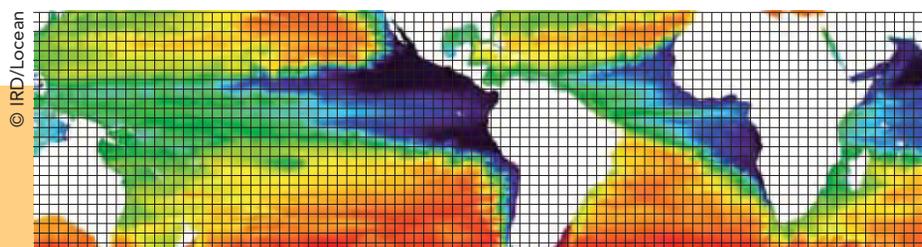
#### Des modèles globaux...

La composante océanique est très importante dans les modèles de climat, car l'océan joue un rôle de stockage de chaleur et réagit à des échelles de temps beaucoup plus longues (de quelques années à quelques centaines d'années) en comparaison à l'atmosphère. Les modèles Nemo (composante physique) et Pisces (composante biogéochimique), développés en grande partie par l'unité Locean, sont implémentés dans deux modèles de climat utilisés par le Giec. Le modèle Pisces permet en outre de représenter le **cycle du carbone** et de mesurer l'effet de pompe de gaz carbonique joué par l'océan à l'échelle globale. Ces modèles sont également utilisés pour l'océanographie opérationnelle, dont l'objectif est de proposer aux utilisateurs publics ou privés un état réaliste de l'océan présent et des prévisions à des échelles de temps courtes, de l'ordre du mois,

la division d'un milieu continu en un grand nombre de petits volumes (la discrétisation en mailles) pour permettre de relier entre elles les variables de chaque maille et de quantifier les échanges d'énergie et les processus biogéochimiques. La modélisation des surfaces continentales traite des échanges d'eau, d'énergie et de quantité de mouvements avec l'atmosphère, ainsi que du cycle hydrologique continental. Les processus de dimension inférieure au **maillage** (« processus sous-maille » : nuages, tourbillons, vagues, ruissellement de surface...) sont quant à eux paramétrés à partir de mesures de terrain ou grâce à des modélisations plus fines d'un processus en particulier.

Concentration en oxygène dissous à 150 m de profondeur simulée par le modèle Nemo-Pisces global à 1/4° de résolution. Les zones de minimum d'oxygène apparaissent dans les tons bleu-noir ( $O_2 < 150$  micromoles/litre) dans les océans tropicaux du Pacifique est, de l'Atlantique et de l'Indien.

Le maillage fin du modèle est représenté de façon grossière par une grille de 4° de côté (chaque carré englobe 16 x 16 points de grille)



ouvrant la voie à une « météorologie océanique » en quelque sorte.

### ... déclinés à l'échelle du kilomètre

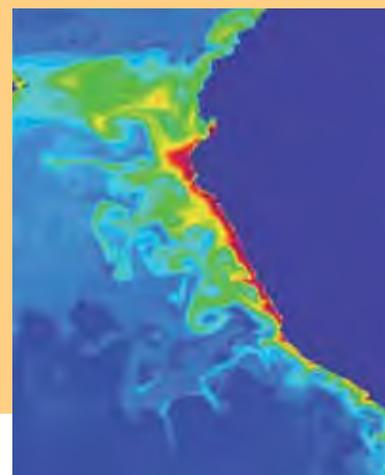
Les résultats des modèles globaux sont également utilisés pour initialiser des modèles régionaux, comme le modèle Roms développé principalement par les unités Legos et LPO qui permet d'étudier la dynamique et les cycles biogéochimiques à des échelles spatiales beaucoup plus fines. Le champ d'application de ces modèles régionaux est par définition limité (quelques centaines de kilomètres), et leurs mailles (jusqu'à 1 km) sont beaucoup plus petites que celles des modèles globaux.

Grâce à une représentation des phénomènes physiques de fine échelle, ces modèles sont capables de calculer explicitement les flux de masse, de chaleur et de sels nutritifs associés à des structures océaniques, les tourbillons par exemple, dont les tailles caractéristiques sont

de l'ordre d'une dizaine de kilomètres. Les mécanismes physiques à ces petites échelles ont un rôle fondamental pour la biogéochimie, en particulier pour l'alimentation en sels nutritifs et la production de plancton dans les eaux de surface, comme par exemple dans les systèmes d'*upwellings* situés au large des côtes du Pérou, d'Afrique de l'Ouest et du Sud ou de l'Inde, où se développent des écosystèmes marins très riches avec une grande abondance de poissons. Ces outils de modélisation régionaux permettent ainsi de répondre à des problématiques variées et qui ont un fort impact sur les populations du Sud (gestion des ressources pour la pêche, désoxygénation des océans, accumulation de polluants dans la chaîne trophique).

Chlorophylle de surface modélisée par le modèle régional Roms-Pisces dans la région du Pérou au mois de janvier.

Les fortes concentrations de chlorophylle près de la côte correspondent à une forte abondance de phytoplancton constitué majoritairement de diatomées.

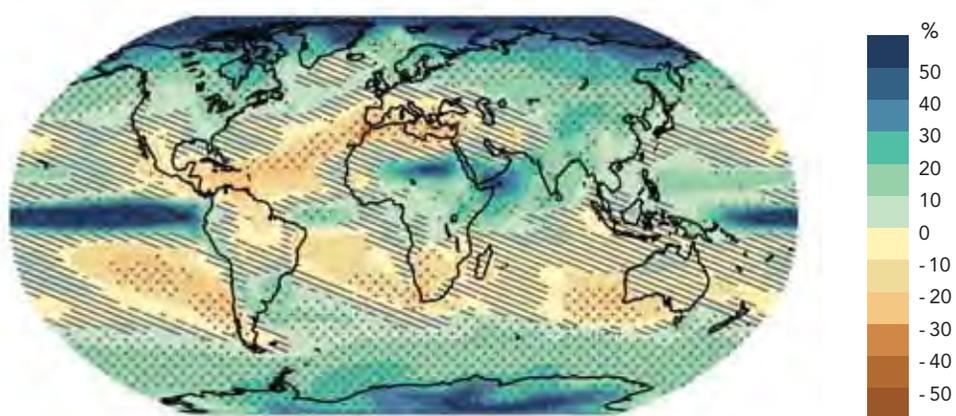


Depuis les années 1970, où la modélisation du climat a commencé à se développer de manière significative, ces modèles ont été régulièrement améliorés, avec une meilleure description de la complexité des processus. En parallèle, les résolutions horizontales et verticales du maillage des modèles ont progressivement augmenté, atteignant pour l'atmosphère des dimensions volumiques de 200 km x 200 km x 1 km et, pour l'océan, passant de quelques kilomètres à plusieurs centaines de kilomètres avec une épaisseur de 1 m à 500 m. Ainsi, ces outils permettent de progresser dans la compréhension du fonctionnement du système climatique et de proposer des projections sur son évolution future.

## Évaluer les outils de modélisation

Malgré des efforts constants pour améliorer les modèles de climat et malgré leur sophistication, ces derniers sont globalement moins fiables pour les régions tropicales et subtropicales que pour les autres zones du globe. En particulier, les différents modèles ne s'accordent pas sur les projections des précipitations dans cette zone à l'horizon 2100 (fig. 9). Les différences d'un modèle à l'autre sont liées aux incertitudes sur certains mécanismes de rétroaction, impliquant entre autres les nuages, la convection atmosphérique ou les interactions continent-atmosphère-océan. Une des principales sources d'incertitude réside dans la paramétrisation « sous-maille » de ces processus, qui résulte souvent d'ajustements empiriques.

Figure 9.  
Évolution des précipitations moyennes entre 1986-2005 et 2081-2100 (en %) dans le scénario d'émissions du Giec le plus pessimiste (RCP 8.5). On observe une plus grande incertitude des modèles en zones tropicales et subtropicales.  
Source : Giec, 2013.



Les points indiquent les zones où les modèles climatiques s'accordent sur le changement des pluies. Les zones hachurées et les zones sans hachure ni point indiquent des zones où subsistent de fortes incertitudes sur l'évolution des pluies.

Les données d'observations sont donc d'autant plus indispensables dans les régions tropicales pour améliorer la représentation de ces processus. Les mesures de la composition isotopique des pluies et de la vapeur d'eau, par exemple, permettent d'appréhender certains processus comme la convection atmosphérique et de mettre ainsi en évidence les défauts de paramétrisation de la convection dans les modèles. La composition isotopique de l'eau est en effet sensible à de nombreux processus atmosphériques et hydrologiques (origine, transport, mélange, changement de phase, etc.), et elle est donc un bon moyen de diagnostiquer les processus physiques dans les modèles de climat. Ces mesures ont été développées ces dernières années par des équipes de recherche de l'IRD au Niger, en Bolivie et, récemment, à la Réunion, des régions où les projections de changement des précipitations restent très incertaines.

## Comparer les résultats des modèles pour les améliorer

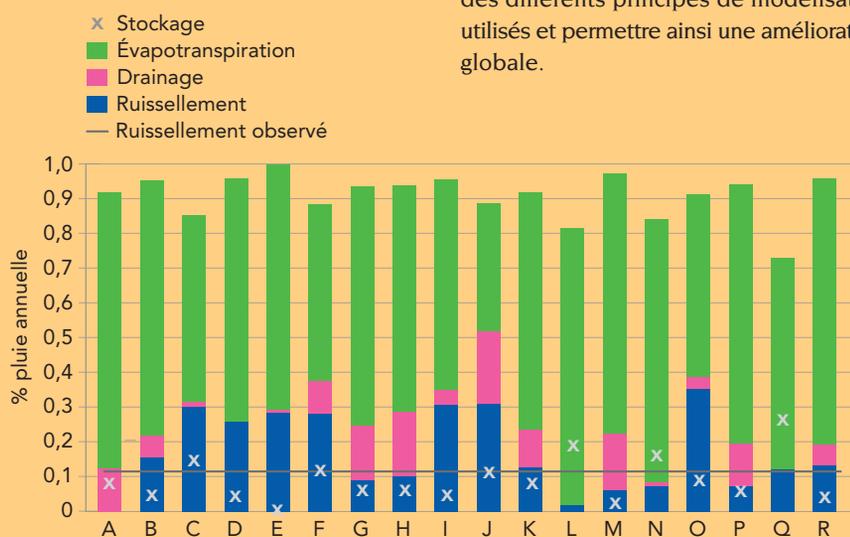
Le projet Almip, mené à partir de 2007, est la première expérience internationale de comparaison de modèles de surface continentale dédiée à l'Afrique de l'Ouest. Les résultats montrent la très grande variabilité d'un modèle à l'autre.

Figure 10.

Termes du bilan hydrologique du bassin de l'Ouémé supérieur simulés par 18 modèles de surface (A à R), qui fait apparaître des réponses très différentes d'un modèle à l'autre.

L'enjeu principal d'Almip est d'utiliser les observations de terrain disponibles pour comprendre l'origine de ces différences, évaluer les simulations les plus réalistes et chercher les moyens d'améliorer les simulations.

Source : IRD/C. PEUGEOT *et al.*, à paraître



Dans les modèles de climat, les modèles de surface continentale servent à représenter et à calculer les échanges de masse (eau, carbone) et d'énergie (rayonnement, chaleur) entre l'atmosphère et les différents compartiments de la surface du sol et du sous-sol. Ce type de modèle est fondé sur les équations de la mécanique des fluides et de la thermodynamique. Différents modèles de surface ont été développés dans le monde, tous légèrement différents en fonction des expériences des chercheurs dans leurs régions d'étude ou de leurs hypothèses de travail.

Les comparaisons de modèles sont des expériences numériques qui consistent à alimenter différents modèles avec les mêmes jeux de données (les « forçages ») et à comparer ensuite les résultats en les confrontant également à des données de référence, comme les observations quand elles existent. L'objectif n'est pas de sélectionner « le meilleur modèle », mais plutôt de tirer parti de leur diversité en identifiant les forces et faiblesses des différents principes de modélisation utilisés et permettre ainsi une amélioration globale.

### La variabilité intermodèle domine les autres sources de variabilité

Le projet Almip, mené à partir de 2007 dans le cadre du programme Amma, est la première expérience internationale de ce type dédiée à l'Afrique de l'Ouest. La première phase du projet, consacrée à l'échelle régionale, a confirmé la très grande variabilité d'un modèle à l'autre et le très fort impact des incertitudes liées aux données de forçages, notamment des précipitations, dérivées de l'imagerie satellitaire. La seconde phase du projet (Almip2), qui a démarré en 2013, s'appuie sur les données à haute résolution de l'observatoire Amma-Catch et des campagnes de mesures du projet Amma. Les résultats montrent que les simulations restent très marquées par les principes constitutifs de chaque modèle, et que la variabilité intermodèle domine les autres sources de variabilité.

### Une représentation incomplète des processus hydrologiques

Les modèles montrent un relatif consensus dans la représentation du bilan d'énergie. Mais, des biais sont identifiés pour certaines composantes du bilan d'eau (ruissellement, dynamique des eaux souterraines) concernant le cycle saisonnier et les quantités d'eau. Ces biais sont principalement attribués à une représentation incomplète des processus hydrologiques et, parfois, à des valeurs inappropriées des paramètres utilisés dans les équations (texture et profondeur du sol, propriétés hydrodynamiques, etc.). Des corrections destinées à réduire ces biais sont depuis explorées.

## Le paradoxe de la mousson indienne d'été

Les projections de la mousson indienne présentées dans le dernier rapport du Giec sont actuellement mises à mal par les observations disponibles.

Les travaux détaillés d'observations et de simulations de la mousson indienne, menés par l'IRD en collaboration avec l'Indian Institute of Tropical Meteorology, apportent des éléments d'explication.

L'Asie du Sud-Est reçoit 75 à 90 % de sa pluviométrie annuelle pendant la mousson d'été (de juin à septembre). Ce phénomène risque d'être profondément perturbé par le changement climatique global. En effet, modèles et observations suggèrent que le réchauffement global de la planète se fait à une humidité relative quasi constante, c'est-à-dire avec une augmentation importante de la vapeur d'eau présente dans l'atmosphère (proportionnelle à l'augmentation de la température). Autrement dit, les précipitations et le cycle hydrologique associés à la mousson risquent d'être modifiés. Ce réchauffement étant plus marqué sur les terres que dans les océans, le contraste thermique terre-mer (un ingrédient fondamental du système de mousson) sera aussi certainement différent dans le futur avec des conséquences difficiles à prévoir pour la mousson.

### Les observations contredisent les projections

La majorité des projections présentées dans le 5<sup>e</sup> rapport du Giec indiquent une augmentation des précipitations

sur le sous-continent indien. La fréquence et l'intensité des événements pluvieux extrêmes sont aussi susceptibles d'augmenter en Asie du Sud. La crédibilité de ces projections de la mousson indienne est actuellement mise à mal par les observations disponibles. En effet, les précipitations de mousson indienne montrent une tendance à la baisse depuis les années 1950.

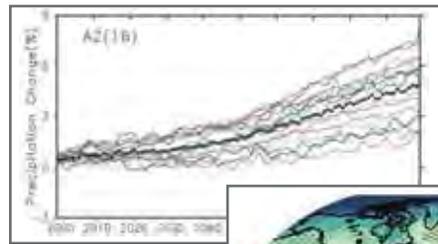
### Un problème d'échelle

Les travaux de l'IRD apportent des éléments d'explication. Les projections des pluies de mousson dans les scénarios climatiques résultent de la compétition entre une contribution thermodynamique « positive » et une contribution dynamique « négative ». Compte tenu de la résolution spatiale grossière des modèles utilisés, l'effet positif – lié au transport de vapeur d'eau en surface – domine, ce qui explique l'augmentation des pluies. Or, selon les chercheurs, la contribution dynamique négative due au changement anthropique est fortement sous-estimée, parce que la résolution spatiale des modèles n'est pas suffisante pour simuler correctement les processus convectifs et le système de mousson lui-même.

Enfin, des expériences numériques dédiées suggèrent que cette baisse observée des précipitations de mousson est à mettre en relation avec des facteurs régionaux, tels que le réchauffement important de l'océan Indien, le rôle des aérosols ou encore les changements d'utilisation des sols qui modifient l'albedo de la surface. Or, les modèles utilisés pour les projections simulent mal ou ne prennent que partiellement en compte ces différents facteurs.

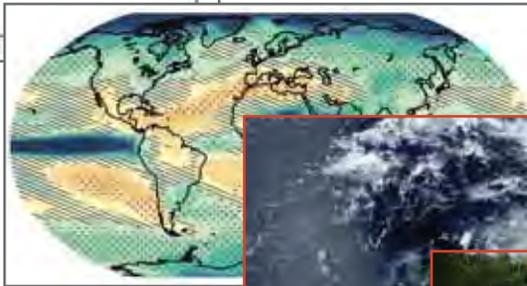
Pluie de mousson à Udaipur, Inde.





Ce que produisent les modèles globaux

Plus de 300 km  
L'échelle globale  
avec une moyenne  
des précipitations  
sur le globe et  
des cartes de pluies  
produites par  
les modèles de climat.



**Centaine de km**

L'échelle de la centaine de kilomètres  
qui caractérise la partie la plus active  
des cyclones tropicaux.



**Dizaine de km**

L'échelle de la dizaine de kilomètres  
qui est celle des événements de pluies  
intenses parfois responsables  
d'inondations.



**km**

Le kilomètre qui est l'échelle  
qui intéresse les agriculteurs  
au Sahel.



**Ce qui est nécessaire  
pour étudier les impacts**

**Point**

L'échelle de la plante qui reçoit l'eau de pluie et  
la réinjecte dans l'atmosphère avec la transpiration.



## Régionaliser les modèles atmosphériques pour réduire les incertitudes ?

On l'a vu, les équations mathématiques et physiques utilisées dans la modélisation climatique sont discrétisées en mailles volumiques. Cette approche, trop grossière, ne permet pas de simuler avec toute la précision nécessaire le comportement de l'atmosphère et des océans, où de fortes interactions se font à toutes les échelles d'espace et de temps. De fortes incertitudes en découlent dans l'évolution simulée de l'atmosphère et du climat. Pour réduire ces incertitudes, la paramétrisation « sous-maille » vise à décrire les processus se déroulant à l'intérieur des mailles du modèle et leurs effets à l'échelle de la maille. Mais, malgré tous les efforts faits pour quantifier ces processus, les paramètres s'appuient encore souvent sur des ajustements empiriques et ne répondent que partiellement à la réduction des incertitudes. Enfin, il ne faut pas perdre de vue que l'atmosphère reste un fluide très instable, et qu'une perturbation initialement faible peut s'amplifier et conduire à plus grande échelle à des situations météorologiques contrastées (l'effet « papillon »). Ce qui nécessite de réaliser des « ensembles » de simulations, où l'on perturbe faiblement l'état initial pour obtenir un éventail d'évolutions possibles de l'atmosphère et du climat.

Figure 11.  
Illustration de la descente  
d'échelle dans le domaine  
du changement climatique  
et de ses impacts.

Source : IRD/B. Sultan

### **Des observations haute résolution pour rétablir la variabilité des pluies au Sahel**

À partir du réseau pluviographique dense de l'observatoire Amma-Catch au Niger, les scientifiques ont pu améliorer les modèles hydrologiques, dont les résolutions spatiales sont trop grossières pour simuler le ruissellement des systèmes hydrologiques sahéliens.

La mousson ouest-africaine est un des trois grands systèmes de mousson qui jouent un rôle clé dans le climat de notre planète. Son intensité présente une forte variabilité interannuelle et décennale, dont les causes restent largement inconnues.

Le service d'observation Amma-Catch (Analyse multidisciplinaire de la mousson africaine – couplage de l'atmosphère tropicale et du cycle hydrologique) permet le suivi à long terme de la dynamique de la végétation, du cycle de l'eau et de leurs interactions avec le climat en Afrique de l'Ouest.

Il s'appuie sur un dispositif mis en place sur trois sites répartis le long du gradient bioclimatique soudano-sahélien, respectivement au Bénin, au Niger et au Mali.

#### **La sous-estimation peut atteindre plus de 50 %**

À partir du réseau pluviographique dense de l'observatoire Amma-Catch au Niger, les scientifiques ont en particulier pu évaluer l'incertitude

des modèles hydrologiques liée à l'utilisation de résolutions spatiales trop grossières pour simuler le ruissellement des systèmes hydrologiques sahéliens. En effet, les bilans d'eau au Sahel sont très directement liés à l'interaction entre les pluies orageuses et la surface des sols, qui pilote le ruissellement. Modéliser le cycle hydrologique nécessite donc de représenter les hétérogénéités spatiales des propriétés de surface des sols, puis d'alimenter les modèles de surface par des forçages pluviométriques aux échelles qui rendent compte de la variabilité intrinsèque des épisodes de pluie.

Au Sahel, ces échelles spatiales sont de l'ordre de quelques kilomètres. Avec une résolution de 25 km (la résolution des produits satellitaires de pluie), les modèles hydrologiques peuvent sous-estimer le ruissellement jusqu'à 15 %. À la résolution de 100 km (typiquement celle des modèles de climat), cette sous-estimation peut atteindre plus de 50 %.

Pour tenter de dépasser cet écueil, la régionalisation s'appuie sur des modèles de climat qui fonctionnent sur un domaine spatial limité (une « région »), à plus haute résolution spatiale (un point de grille tous les 10 à 50 km). Cette approche préserve la complexité locale des processus physiques en jeu. Elle ne corrige pas forcément les biais des modèles globaux, car les modèles régionaux sont confrontés aux mêmes limites de la paramétrisation « sous-maille ». Ces incertitudes posent un problème majeur pour quantifier les impacts locaux du changement climatique sur les ressources (ressources en eau ou rendements agricoles à l'échelle d'une parcelle, par exemple), à cause de leur propagation et de leur amplification possibles de la grande échelle vers l'échelle locale. D'autant que les modèles d'impacts (hydrologiques ou agronomiques) ont eux aussi leurs biais et leurs incertitudes.

Ces effets d'échelles justifient de recourir à des méthodes dites de « désagrégation », qui permettent, à partir de simulations climatiques de grande échelle (de l'ordre de 300 à 50 km), de descendre à des échelles fines de l'ordre de la dizaine de kilomètres. Grâce aux observations haute résolution de l'équipe Amma-Catch, des méthodes de désagrégation ont ainsi pu être développées. Elles permettent de rétablir toute la variabilité de la pluie lorsque la résolution initiale de la donnée – qu'elle soit issue de réseaux de mesures classiques au sol, de faible densité spatiale, ou résultant de modèles de climat – est inadéquate pour modéliser le cycle hydrologique.



© IRD/T. Lebel

Radar de l'Institut de technologie du Massachusetts (MIT) utilisé dans un dispositif expérimental de l'observatoire Amma-Catch, en périphérie de Niamey au Niger. Au cours de ces campagnes, plusieurs radars météorologiques ont été déployés pour étudier la dynamique des lignes de grain à l'origine des pluies intenses et très variables qui caractérisent le climat sahélien.

Colas François, Echevin Vincent, Peugeot Christophe, Terray Pascal, Sultan Benjamin, Vischel T. (2015).

Comprendre la machine climatique grâce aux modèles de climat.

In : Reinert M., Janicot Serge (ed.), Aubertin Catherine (ed.), Bernoux Martial (ed.), Dounias Edmond (ed.), Guégan Jean-François (ed.), Lebel Thierry (ed.), Mazurek Hubert (ed.), Sultan Benjamin (ed.), Sokona Y. (pref.), Moatti Jean-Paul (pref.).

Changement climatique : quels défis pour le Sud ?

Marseille : IRD, 51-59. ISBN 978-2-7099-2168-8