

Publication de l'Académie
des sciences

23, quai de Conti 75 006 PARIS
Tél. : 01 44 41 43 68
Fax : 01 44 41 43 84
http : www.academie-sciences.fr

Directeur de publication
Jean-François Bach

Directoire
Jean-François Bach
Jean Dercourt

Rédacteur en chef
Paul Caro

Secrétariat général
de la rédaction
Marie-Christine Brissot

Conception & réalisation
graphique
Nicolas Guilbert

Photographies & illustrations
Uwe George couv.,
DR p. 1, 19, 20, 22, 23, 24, 28, 31, 32, 33, 34
B. Eymann p. 33
Nicolas Guilbert p. 2, 10, 11, 26, 37

Comité de rédaction
Jean-François Bach, Édouard Brézin,
Pierre Buser, Paul Caro, Alain Carpentier,
Pascale Cossart, Anne Fagot-Largeault,
Jean-Pierre Kahane, Nicole Le Douarin,
Jacques Livage, Dominique Meyer,
Jean Salençon, Philippe Taquet

Photogravure & impression
Edipro/PrintreferenceTM
01 41 40 49 00
n° de C.P. : 0108 B 06 337
ISSN 2102-5398

Lac Yoa,
Ounianga Kebir,
Tchad



INSTITUT DE FRANCE
Académie des sciences

Dossier
**Les déserts
d'Afrique
et d'Arabie**

ÉDITORIAL

Nouveaux enjeux de l'IST

Jean Salençon et Alexandre Moatti

page 2

DOSSIER

Les déserts d'Afrique et d'Arabie

Histoire climatique des déserts d'Afrique et d'Arabie

Anne-Marie Lézine

page 2

Les moussons indienne et africaine : de l'Holocène à l'horizon 2100

Serge Janicot et Pascale Braconnot

page 10

Dialogue entre archéologie et climats anciens. Les enseignements du désert

Serge Cleuziou

page 16

Un lac au Sahara

Interview de Stefan Kröpelin avec Paul Caro

page 19

Théodore Monod, le naturaliste des déserts

Philippe Taquet

page 24

QUESTION D'ACTUALITÉ

L'espace méditerranéen de la science

André Capron et Jacques Fröchen

page 26

LA VIE DES SÉANCES

Les grandes avancées scientifiques françaises

page 30

LA VIE DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES

Jumelages Parlementaires / Membres de l'Académie des sciences / Chercheurs

page 31

Les douze Membres élus en décembre 2008 ont été solennellement reçus sous la coupole de l'Institut le 16 juin 2009

page 32

CARNET

Comment Anders Lundberg a renouvelé nos conceptions du contrôle nerveux de la motricité

Emmanuel Pierrot-Deseilligny

page 35

UNE IMAGE

page 37

Nouveaux enjeux de l'IST

Au cours de l'année 2008, les auteurs de la présente contribution ont été respectivement Président et Rapporteur du Comité mis en place à la demande du Directeur général de la recherche et de l'Innovation et du directeur général de l'Enseignement supérieur pour « définir les nouveaux périmètres et les éléments stratégiques d'une feuille de route de l'IST ». Le rapport remis par ce comité le 19 mai 2008 est disponible à l'adresse <http://www.enseignement-sup-recherche.gouv.fr/cid21677/rapport-du-comite-ist-information-scientifique-et-technique.html>. Nous en donnons ici quelques éléments actualisés.

Une révolution des moyens et des usages...

En ce qui concerne ce que l'on peut appeler la production, le développement des technologies numériques permet désormais aux auteurs d'effectuer eux-mêmes les tâches fondamentales de saisie de texte et de mise en page pour lesquelles ils avaient jusqu'alors recours aux spécialistes fournis par les éditeurs. Cette révolution des pratiques est un aspect de la désintermédiation et

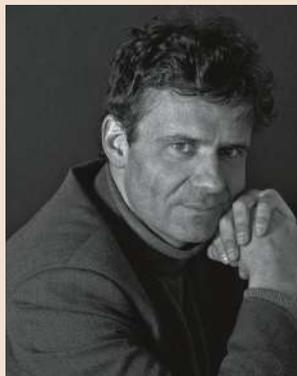
les éditeurs ont suivi avec intérêt cette forme de « publication assistée par ordinateur ». Outre la fabrication, le corps de métier des éditeurs comporte évidemment la diffusion. Cet aspect s'est, lui aussi, trouvé profondément modifié par le développement de la Toile qui permet aux chercheurs de diffuser eux-mêmes leurs travaux à travers les sites de sociétés savantes dont ils sont membres, sur leurs pages personnelles, ou dans des bases d'articles à accès libre comme *arXiv* ou HAL.

Du point de vue des « utilisateurs » de l'IST, on constate qu'une bonne partie d'entre eux, qu'ils soient chercheurs publics ou industriels, se rend moins volontiers dans une bibliothèque ou un centre de ressources mais souhaite accéder directement à l'information par son ordinateur personnel, en tout lieu et en tout temps.

Le chercheur, acteur de l'IST

Cette mutation de « l'écosystème » de l'IST a diverses conséquences. Du côté de l'édition, on observe une concentration du secteur, avec une forte prédominance européenne chez les grands éditeurs (Reed Elsevier, Springer, Thomson Reuters, Wolters Kluwer, etc.); elle s'accompagne, sans aucun paradoxe, de l'apparition de petits acteurs dont l'objectif est d'occuper des niches





Par **Jean Salençon**¹ et **Alexandre Moatti**²

1. Président de l'Académie des sciences, professeur honoraire à l'École polytechnique et à l'École nationale des ponts et chaussées.
2. Ingénieur en chef des Mines.

en profitant de l'abaissement du « ticket d'entrée » permis par les nouvelles technologies.

Du côté des chercheurs, pour lesquels l'accès aux collections électroniques est devenu crucial, on s'inquiète de l'augmentation constante et importante des coûts d'abonnement (5 ou 7 % par an actuellement) en faisant remarquer que les organismes de recherche en sont à payer trois à quatre fois l'IST dont ils sont à la fois les auteurs, les évaluateurs et les consommateurs.

C'est, de fait, sous l'impulsion d'un collectif de chercheurs et d'organismes que fut signée en octobre 2003 à Berlin une déclaration prônant « l'accès ouvert à la connaissance dans les sciences et les humanités ». Elle a donné naissance, en France, à la base d'articles en accès libre HAL. Aux États-Unis, les pouvoirs publics ont accompagné ce mouvement en votant le *Consolidated Appropriations Act* (2008) : il stipule que tout article concernant des résultats de recherche bénéficiant du soutien des *National Institutes of Health* (NIH) doit être en libre accès sur la base *PubMed* au plus tard un an après sa publication. Le Conseil de l'Union européenne quant à lui a pris, fin 2007, une recommandation incitant les États-membres à aller dans ce sens.

En tout état de cause, l'information et la sensibilisation des chercheurs représentent des enjeux primordiaux : information sur la politique des

éditeurs en matière d'accès libre – avec appui des chercheurs dans la négociation des clauses correspondantes de leurs contrats –, et sensibilisation à l'importance de l'enjeu – l'objectif étant de passer de 15 % à 75 % de la production de recherche française dans les bases à accès libre.

L'IST au cœur de la politique de recherche et de compétitivité

L'évaluation de la recherche est une nécessité qui ouvre la voie au développement de nouveaux outils prétendant *mesurer* la qualité de la recherche par la bibliométrie. Fondés sur les facteurs d'impact des revues et les indices de citation, ils introduisent chez les chercheurs des « règles du jeu nouvelles », nouvelle forme du « *publish or perish* », qui peuvent avoir des effets pervers concernant la déontologie, les stratégies de publication et, tout à la fois, l'accroissement du nombre de journaux et la prééminence des « grandes revues » de « grands éditeurs ».

L'aspect économique de l'édition scientifique et technique doit être abordé au niveau européen où apparaissent de réels enjeux : un examen de la concurrence effective entre éditeurs par champ scientifique, ainsi qu'une réflexion sur l'harmonisation des taux de taxes entre l'information scientifique sur papier et sur Internet sont nécessaires.

En conclusion

La problématique posée à la recherche publique a bien des points communs à celle qui est posée aux groupes industriels en matière d'IST ou de veille technologique, mais aussi d'accès libre. Outre la nécessité de clarifier les différentes initiatives publiques françaises d'accès libre, organiser le partage des expériences et stratégies entre recherches publique et privée serait bénéfique. Ce partage pourrait avoir lieu au sein des pôles de compétitivité, y associant les PMI technologiques, avec l'avantage complémentaire d'une meilleure circulation de l'IST ■

Histoire climatique des déserts d'Afrique et d'Arabie

Par **Anne-Marie Lézine**
Directeur de recherche au CNRS,
LSCE, Gif-sur-Yvette



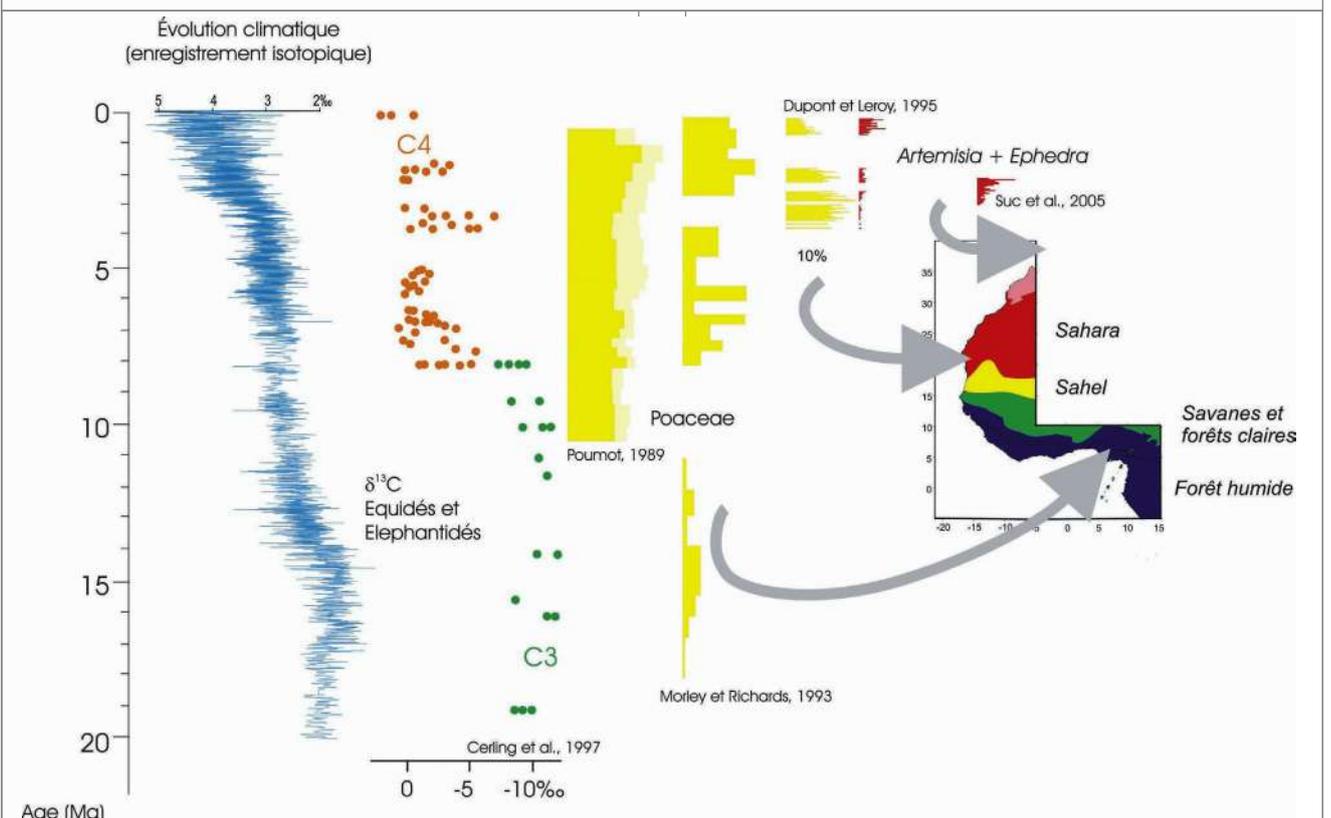
L'a fascination des occidentaux pour les grands déserts du Sahara et du Rub-al-Khali remonte aux récits des géographes de l'Antiquité comme Strabon au 1^{er} siècle AD *Anno Domini*, qui décrit l'Arabie Méridionale, ou de géographes arabes du Moyen Âge comme Ibn Batouta qui traversa le Soudan pour atteindre Tombouctou au XIV^e siècle : la splendeur du royaume perdu de Saba et des cités caravanières du Sahara, la richesse du commerce des épices, du sel et des esclaves ont longtemps alimenté une vision romantique d'un désert à la fois hostile et plein de richesses ; vision renforcée par les nombreuses découvertes archéologiques et paléontologiques témoignant de la présence de populations néolithiques pratiquant l'élevage et la culture des céréales, ainsi que de la présence d'une faune abondante et variée de grands animaux : éléphants, girafes, hippopotames, crocodiles, tortues, gazelles, antilopes, buffles, bubales... en bordure de grands lacs aujourd'hui asséchés. On sait maintenant que les déserts n'ont pas toujours été les vastes étendues arides et inhospitalières que l'on connaît aujourd'hui. À quand remonte leur origine, comment les variations du climat y ont-elles été enregistrées et comment les hommes s'y sont-ils adaptés, c'est l'enjeu du colloque qui a été organisé par l'Académie des sciences à Paris au mois de septembre 2008 et qui a présenté des avan-

cées récentes en terme d'acquisition de données et de modélisation climatique.

À quand remonte le Sahara actuel ?

La recherche de l'origine du Sahara s'inscrit dans le cadre plus large de l'apparition et l'évolution des grands biomes du globe au cours des temps géologiques et de leur influence sur l'origine de l'homme en Afrique. Dès 1925, R. Dart publiait dans la revue *Nature* un article dans lequel il considérait la bipédie, qui différencie l'homme du singe, comme le résultat de l'adaptation des espèces à l'extension de savanes en Afrique, liée à l'aridité croissante du climat. Notre plus ancien ancêtre, Toumaï, il y a 7 millions d'années, vivait aux abords du lac Tchad, dans un environnement varié où galeries forestières, savanes et même espaces désertiques étaient entremêlés (Vignaud *et al.*, 2002). Le débat sur l'apparition des zones arides et des savanes en Afrique a été largement alimenté par les travaux de Cerling *et al.* (1977) portant sur la composition isotopique des restes paléontologiques et des paléosols associés aux lieux de trouvaille. Cerling a montré qu'un changement majeur dans la composition isotopique des dents de mammifères herbivores (Proboscidiens et Équidés) d'Afrique orientale était enregistré entre 8 et 7 Ma (millions d'années) (Figure 1). Ce changement paléoenvironnemental

Figure 1 : Variations climatiques et environnement en Afrique au cours des derniers 20 millions d'années. Cette figure montre de gauche à droite l'évolution du climat global tel qu'enregistré dans les séquences marines (cette courbe isotopique mesure le volume global des glaces et niveau de la mer) (en bleu) (Zachos *et al.*, 2001) (noter l'intensification de la variabilité glaciaire-interglaciaire au fur et à mesure que l'on se rapproche des temps présents), l'évolution des flores terrestres tirées des études isotopiques de Cerling *et al.* 1997 qui indique le passage à 8 Ma de la forêt à la savane; les données de pollen et phytolithes de carottes marines au large de l'Afrique montrant l'apparition des Poaceae (en jaune foncé) dès 16 Ma et leur augmentation à 8 et 3 Ma. À partir de cette date et plus encore après 1 Ma, les plantes désertiques (en rouge) augmentent en Afrique du Nord. À droite, la répartition actuelle des grandes zones de végétation en Afrique d'après White (1983).



a été interprété comme reflétant le remplacement d'écosystèmes forestiers en C3 qui dominaient largement auparavant, par des espaces ouverts, herbacés, en C4. Il aurait accompagné l'évolution des faunes terrestres, en particulier l'expansion des animaux herbivores. La contemporanéité d'observations identiques dans différents secteurs du globe laisserait également penser à un événement global lié, selon les auteurs, à un abaissement drastique du taux de CO₂ de l'atmosphère défavorable aux plantes en C3 (Cerling *et al.*, 1977), à des conditions climatiques marquées par un accroissement de la saisonnalité aux basses latitudes – avec l'allongement de la saison sèche – (Pagani *et al.*, 1999), ou encore à l'augmentation des feux liés à la sécheresse (Beerling et Osborne, 2006).

Les données paléobotaniques suggèrent, pour le développement des espaces herbacés en Afrique, une histoire plus longue : selon Jacobs (2004), la famille la plus caractéristique des savanes, les Poaceae, serait présente dès le Paléocène et les conditions climatiques nécessaires à son extension remonteraient à l'Eocène ancien. Cependant, l'étude des phytolithes ou des grains de pollen fossilisés dans les sédiments marins ne semblent indiquer son extension que beaucoup plus tardivement, vers le milieu du Miocène, il y a 16 millions d'années (Morley et Richard, 1993 ; Poumot, 1989). Ce n'est qu'après 3 millions d'années que s'observe l'augmentation drastique des indicateurs steppiques en Afrique du

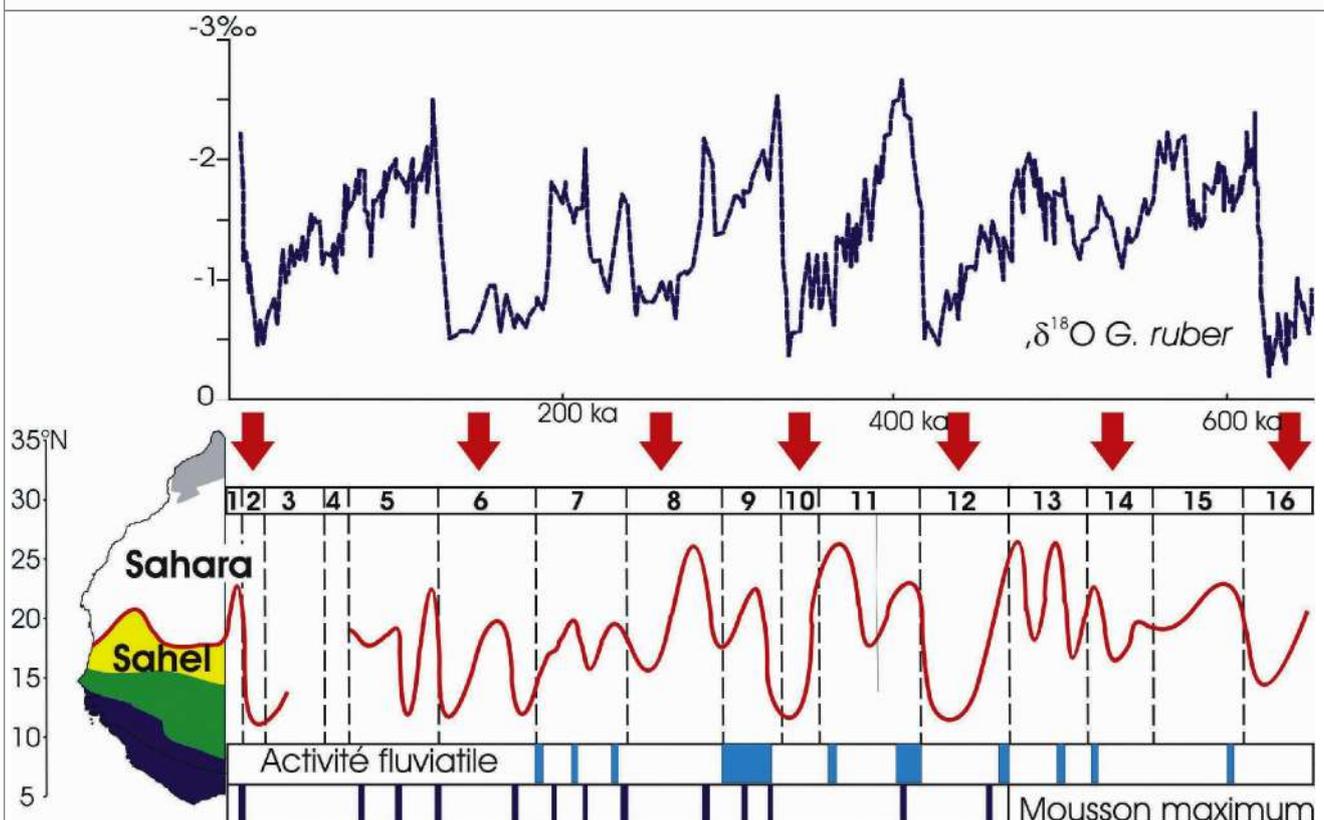
Nord et en Arabie, en particulier *Artemisia* et *Ephedra* (Dupont et Leroy, 1995 ; Van Campo, 1991 ; Fauquette *et al.*, 1998). Celle-ci s'accroît encore au cours du tout dernier million d'années. Dans le même temps, les indicateurs d'une activité éolienne croissante d'orientation NE-SW apparaissent dans l'enregistrement du site ODP 658. Alors que les savanes se développent vers le sud comme le montrent les données palynologiques du Golf de Guinée, le désert s'étend donc vers le nord, en même temps que les écosystèmes steppiques chassent des régions méditerranéennes les plantes tropicales (*Taxodium*, *Engelhardia*, *Myrica*...) qui y étaient largement présentes auparavant.

L'extension des biomes xérophiles en Afrique du Nord et en Arabie Méridionale après 3 millions d'années a lieu, alors que la variabilité glaciaire – interglaciaire s'accroît et que s'allonge la saison sèche. Les reconstitutions climatiques effectuées en Méditerranée occidentale montrent qu'alors, les températures du mois le plus chaud étaient comprises entre environ -7 °C par rapport aux actuelles au cours des phases glaciaires et +5 °C au cours des phases interglaciaires (Fauquette *et al.*, 1998).

L'impact de la variabilité glaciaire-interglaciaire sur les déserts d'Afrique et d'Arabie

Une des principales difficultés, dans la reconstitution des environnements et des climats passés des zones

Figure 2 : Variations de la limite Sahara – Sahel au cours des derniers 600 000 ans d'après Dupont et Leroy (1995). En bas, l'évolution des paléoenvironnements déduite des enregistrements palynologiques du site ODP 658. En haut, les variations climatiques mondiales tirées de l'enregistrement isotopique marin. Les nombres correspondent aux stades isotopiques avec les nombres pairs pour les stades glaciaires et nombres impairs pour les stades interglaciaires. Les flèches rouges montrent la correspondance entre périodes glaciaires et extension du désert en Afrique du nord.



désertiques, est l'extrême rareté des témoins géologiques préservés. On se tourne donc vers l'étude des séquences du milieu marin qui fournissent des séries temporelles longues et continues permettant de comprendre l'évolution générale du climat et de l'environnement; séquences auxquelles sont confrontées les données fragmentaires du milieu continental: affleurements lacustres, spéléothèmes, paléosols ou massifs dunaires.

D'après l'analyse palynologique de la carotte ODP 658, Dupont et Leroy (1995) ont ainsi montré que les fluctuations de la limite sud du Sahara ont suivi, au moins au cours du dernier million d'années, les alternances glaciaires – interglaciaires du climat global (Figure 2). Le Sahara se serait étendu bien au-delà de sa limite actuelle au cours des périodes glaciaires et aurait, au contraire, été considérablement réduit au cours des périodes interglaciaires. Au cours de certaines périodes interglaciaires comme celles qui correspondent aux stades isotopiques 7 (ca. 245 000 ans BP *Before Present*), 9 (ca. 340 000 ans BP), 11 (ca. 420 000 ans BP) et 13 (ca. 490 000 ans BP), la limite sud du Sahara aurait été particulièrement déplacée vers le nord, au moins jusqu'à 25° de latitude – alors qu'elle ne dépasse pas 21°N aujourd'hui –. L'humidité des périodes interglaciaires antérieures à l'Holocène est par ailleurs attestée par la présence de

grands lacs, notamment en Libye (Petit-Maire *et al.*, 1980; Armitage *et al.*, 2007) ou au Sahara oriental (Szabo *et al.*, 1995) pendant les stades isotopiques 11, 9, 7 et 5, par l'intensification de l'activité karstique dont témoignent les spéléothermes d'Égypte (Moeyersons *et al.*, 2002; Osmond et Dabous, 2004) et d'Oman (Burns *et al.*, 1998) et par la formation de sols dans le massif dunaire des Wahibas (Preusser *et al.* 2002) au cours de ces mêmes périodes (Figure 3). Pour autant, l'humidité a-t-elle entraîné la complète disparition des espaces désertiques? Nous n'avons aucune donnée permettant de le vérifier, sauf pour la dernière période « humide » africaine de l'Holocène.

Lors des périodes glaciaires, la sécheresse intense a entraîné l'assèchement complet des lacs, la destruction de la couverture végétale et la mobilisation des particules terrigènes, sables et poussières. Sur le continent, de grands massifs dunaires se sont donc étendus, alors que, dans l'océan, s'accumulaient des poussières éoliennes. Ceci d'autant plus que l'abaissement général du niveau des mers (Waelbroeck *et al.*, 2002), augmentait les surfaces continentales exposées à la déflation. Trois grandes périodes de mobilisation des sables ont ainsi été détectées en Arabie Méridionale entre 160 000 et 140 000 ans BP, 120 000 et 100 000 ans BP, 78 000 et 64 000 ans BP,

Figure 3 : Variations climatiques glaciaires-interglaciaires en Arabie méridionale. Cette figure montre, du bas vers le haut, l'enregistrement isotopique de la carotte de l'océan Indien MD900963 (qui mesure le volume global des glaces et du niveau de la mer) (Bassinot *et al.*, 1994) l'insolation à 15°N (Berger et Loutre, 1991), et la chronologie des périodes humides déduite de la croissance des spéléothèmes (Burns *et al.*, 2001) et des sédiments fluviatiles (Juyal *et al.*, 1998; Preusser *et al.*, 2005). En haut, figure la chronologie des périodes arides illustrées par les datations par luminescence des sables dunaires de plusieurs sites d'Arabie méridionale (Juyal *et al.*, 1998; Goudie *et al.*, 2000; Glennie and Sighvi, 2002; Preusser *et al.*, 2005).

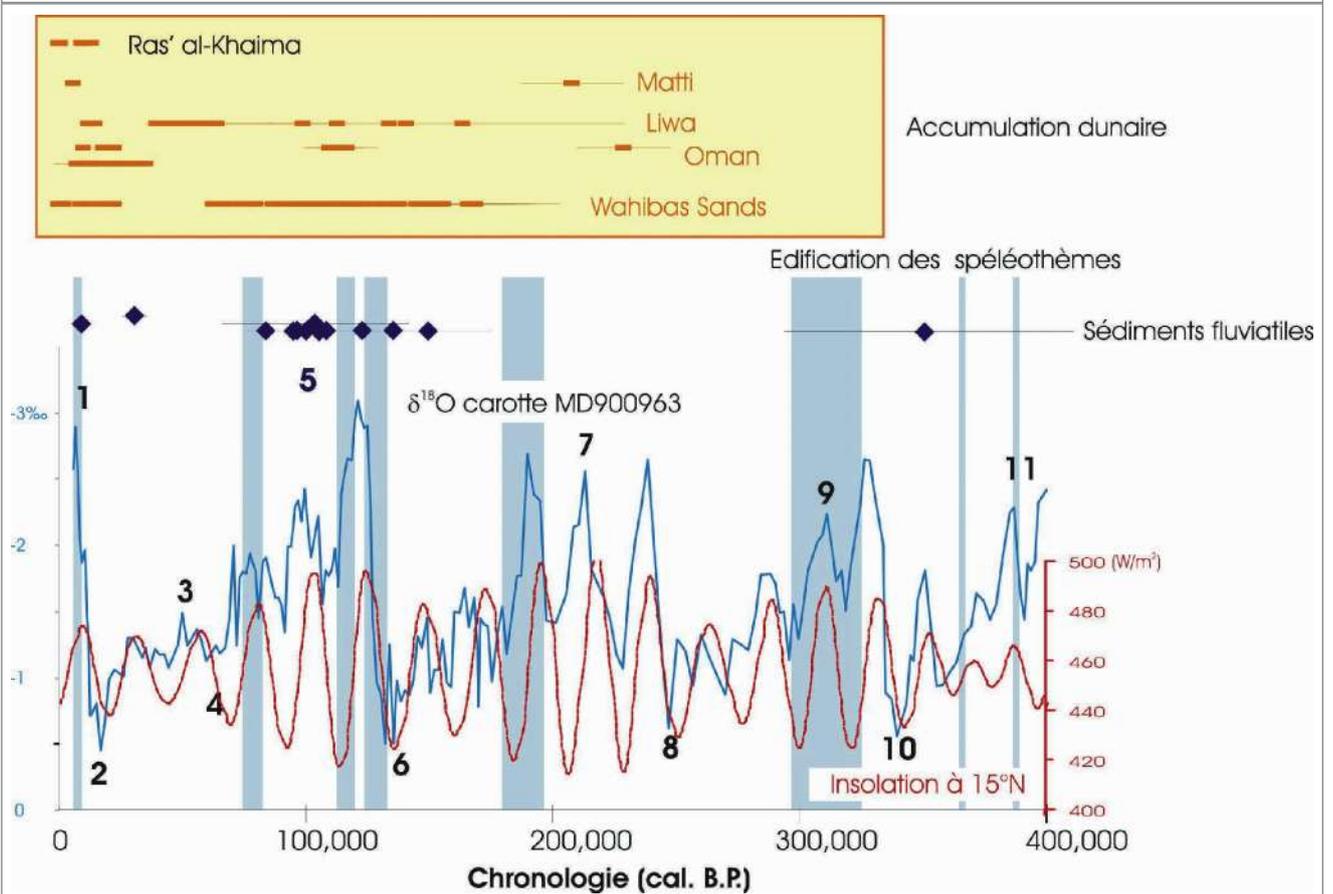
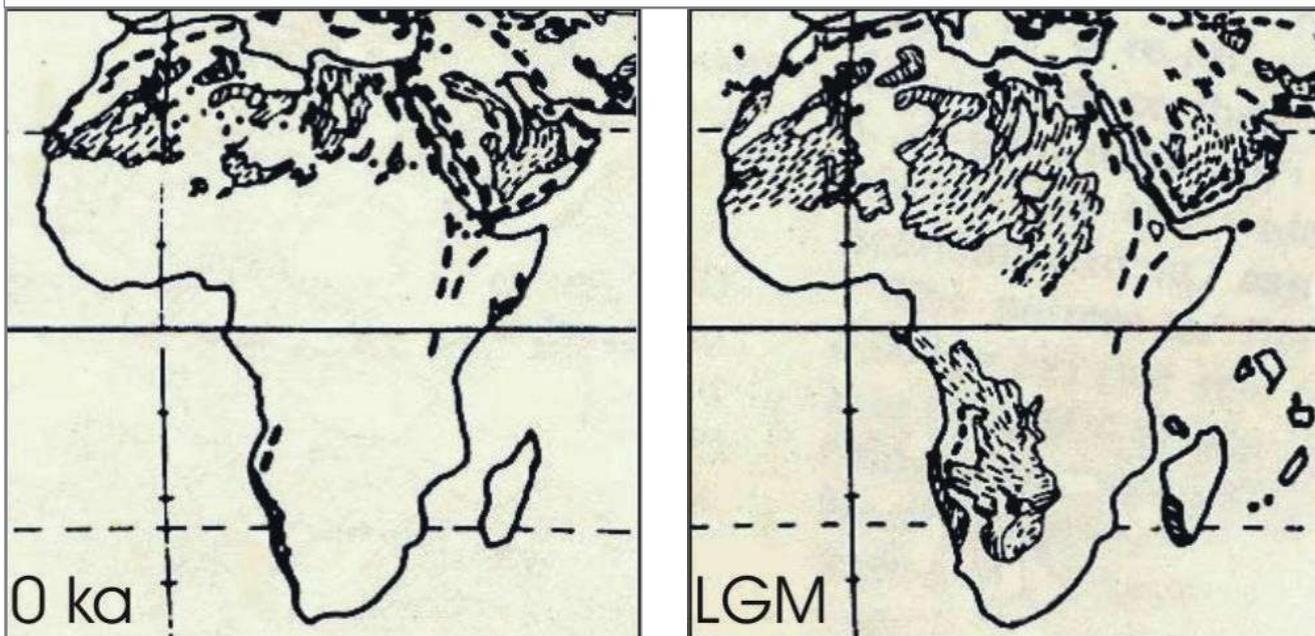


Figure 4 : Étendue des massifs dunaires aujourd'hui (à gauche) et au cours du Dernier Maximum Glaciaire, il y a 21 000 ans (Sarnthein, 1978)



puis au cours du Dernier Maximum Glaciaire (Juyal *et al.*, 1998; Goudie *et al.*, 2000; Glennie et Sighvi, 2002; Preusser *et al.*, 2002). Sarnthein (1978) a évalué que, lors du Dernier Maximum Glaciaire il y a 21 000 ans, les déserts occupaient alors jusqu'à 50 % des territoires compris entre les latitudes 30° N et 30° S contre 10 % uniquement aujourd'hui (Figure 4).

Le « Sahara vert »

En renforçant le déséquilibre thermique entre l'océan et le continent, le réchauffement post-glaciaire a provoqué l'augmentation massive des flux humides de mousson au-dessus de l'Afrique et de l'Arabie, entraînant la formation de grands lacs et l'activation d'un dense réseau hydrographique dans les zones désertiques. L'impact de ce changement climatique sur les zones désertiques est énorme : les lacs voient leur niveau s'élever de 120 à 150 m par rapport à l'actuel comme c'est le cas en Afrique Orientale, au lac Abhé (Gasse, 2000) ou au Ghana, au lac Bosumtwi (Shanahan *et al.*, 2006) et les zones inondées s'étendent massivement : c'est l'époque du Méga-lac Tchad qui occupe alors une surface de plus de 350 000 km² (Schuster *et al.*, 2005). On estime que les lacs et les zones humides occupaient jusqu'à 2,8 et 4,6 % du territoire d'Afrique et d'Arabie compris entre 10 et 30° N au maximum de la « Période Humide Africaine » (Hoelzmann *et al.*, 1998).

La végétation, quant à elle, n'apporte pas une réponse identique selon que l'on se situe en Afrique ou en Arabie : en Afrique, toutes les analyses palynologiques des sédiments lacustres holocènes (Lézine, 2007; Watrin *et al.*, sous presse), ainsi que l'analyse des charbons de bois retrouvés dans les foyers des sites archéologiques (Neumann, 1989) convergent pour montrer que le change-

ment climatique a provoqué un bouleversement majeur dans la répartition des écosystèmes et la biodiversité des zones désertiques : les arbres tropicaux, qui poussent aujourd'hui dans des régions où les précipitations s'élèvent à plusieurs centaines de millimètres par an au Sahel ou encore plus au sud dans la zone des savanes et forêts claires soudanaises (*Celtis*, *Combretaceae*, *Piliostigma*, *Lannea* etc), ont migré en direction du tropique et envahi les bas-fonds humides du Sahara, les bords des rivières et des lacs formant d'importantes forêts galeries (Figure 5). Des plantes d'environnements désertiques ou sub-désertiques et d'abondantes plantes herbacées restaient cependant présentes dans le paysage. On est donc en présence d'une situation sans équivalent actuel où ont cohabité des plantes aujourd'hui localisées dans des aires disjointes : tropicales (sahélienne ou soudanienne) et désertiques. Il est, dans ces conditions, très difficile d'estimer les conditions climatiques contemporaines d'une telle situation paléogéographique qui varient selon les auteurs et les méthodes autour d'une valeur moyenne de 250 ± 130 mm par an (Street-Perrott *et al.*, 1990).

En Arabie, bien que l'augmentation des précipitations de mousson ait également provoqué l'extension de nombreux lacs d'eau douce comme à Mundafan (McClure, 1976) ou à al-Hawa (Lézine *et al.*, 2007), on ne voit pas, dans les données palynologiques, de changement biogéographique majeur : au centre de l'Arabie la végétation reste, tout au long de l'Holocène, de type steppique semi-désertique identique à l'actuelle. Seules, les régions côtières enregistrent quelques changements avec, par exemple, l'extension massive de mangroves tropicales humides à *Rhizophora* (Van Campo, 1983) aujourd'hui presque totalement absentes de la péninsule arabique. La présence d'une barrière topographique au sud de la péninsule limitant la pénétration des plantes

tropicales vers l'intérieur pourrait être l'une des explications de cette situation particulière.

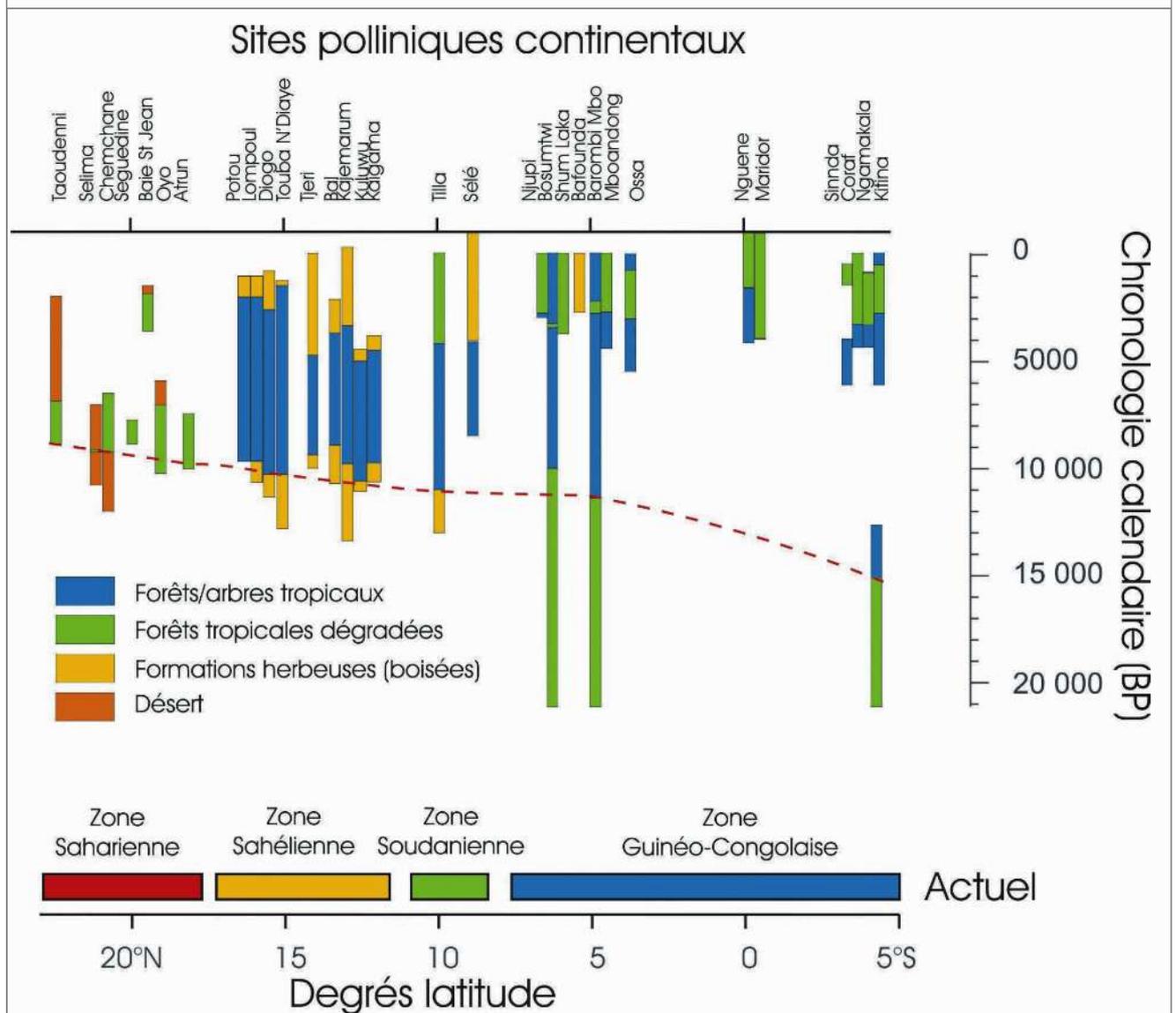
La fin de la période humide africaine : un enjeu scientifique majeur

Comment le Sahara et le Rub-al-Khali sont passés à un environnement favorable aux déserts que l'on connaît aujourd'hui? Les spéléothermes d'Oman et du Yémen (Fleitmann *et al.*, 2003, 2007), les exceptionnelles séquences sédimentaires du lac Yoa au Tchad (Kröpelin *et al.*, 2008), des mangroves d'Oman et de la mer d'Arabie (Ivory et Lézine, in press) sont autant de données nouvelles qui permettent aujourd'hui de comprendre ce changement majeur qui a vu le climat basculer d'un mode humide (celui de la « période humide holocène ») au mode aride que l'on connaît aujourd'hui. À quelle vitesse ce changement s'est-il produit, quels sont les mécanismes en jeu, quels impacts a-t-il eu sur le vivant et sur les civilisations?

De nombreux groupes de modélisation climatique (par exemple Brovkin *et al.*, 1998; Claussen *et al.*, 1999; Renssen *et al.*, 2003; Liu *et al.*, 2007) ont en effet focalisé leur attention sur cette période clé jusqu'à très récemment illustrée par l'unique enregistrement marin du site ODP 658 (de Menocal *et al.*, 2000). Cet enregistrement montrait, à $5\,490 \pm 190$ ans BP, une augmentation brutale de la quantité de poussière transportée à l'océan reflétant la mise en place, sans réelle transition, d'un environnement et d'un climat désertiques en Afrique nord tropicale. Le contraste entre le caractère progressif du changement de l'insolation à la fin de l'Holocène et la brutalité de ce signal climatique soulevait toutefois de nombreuses questions, notamment sur l'impact des rétroactions liées à la couverture végétale sur le fonctionnement de la machine climatique.

L'étude du lac Yoa révèle une histoire plus complexe, où l'environnement terrestre et l'environnement lacustre ont, chacun, eu leur propre temps de réponse au chan-

Figure 5 : Progression des écosystèmes tropicaux en Afrique nord tropicale au cours de la dernière déglaciation et l'Holocène. Cette figure montre en bas la localisation latitudinale moyenne des écosystèmes de désert, savanes et forêts en Afrique nord tropicale aujourd'hui. En haut, sont figurés de façon synthétique les données palynologiques en fonction de la latitude entre 5°S et 25°N et du temps de 21 000 ans à nos jours. La ligne rouge pointillée souligne cette progression (Lézine, 2007).

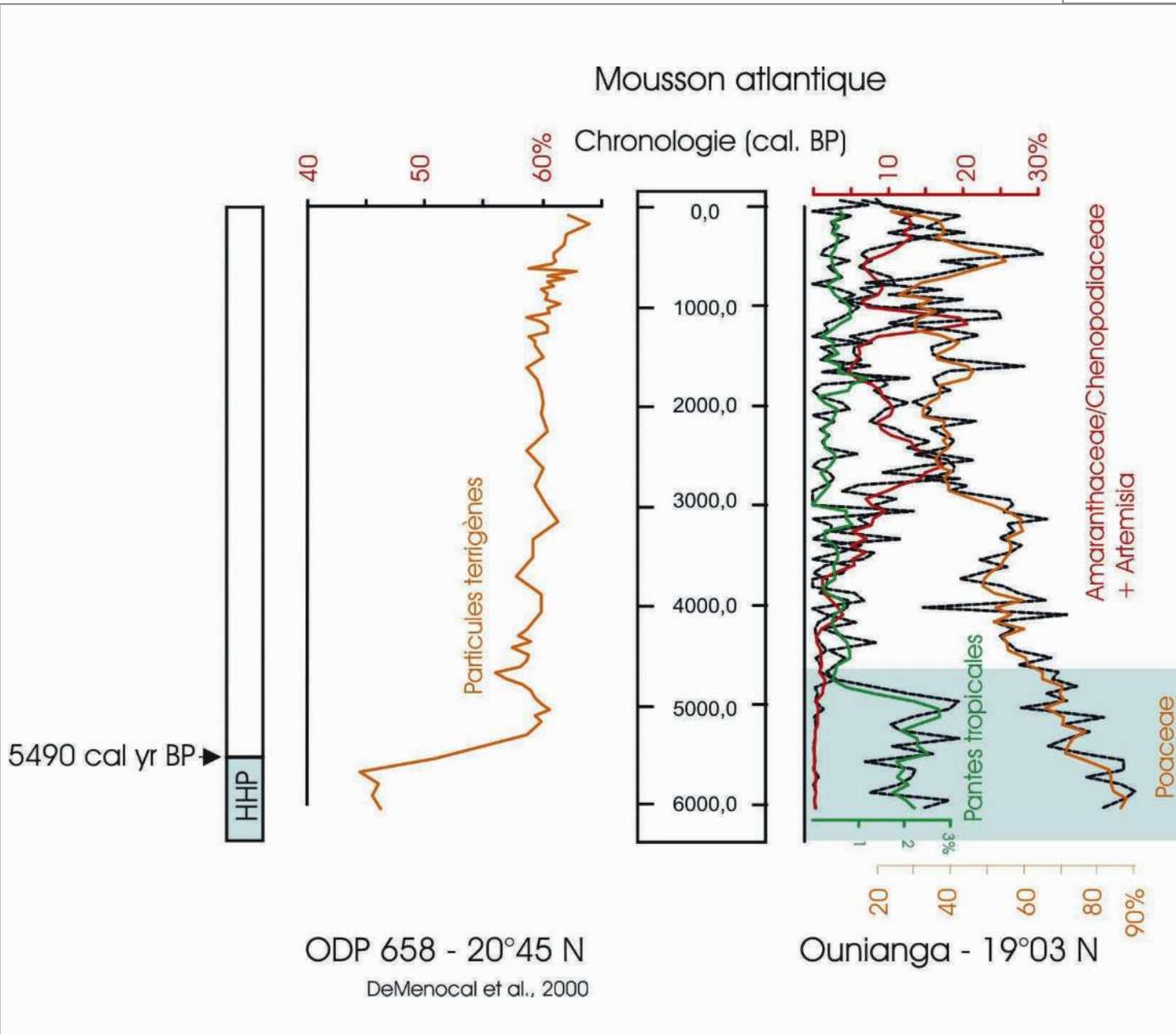


gement climatique. A Yoa, la fin de la période humide holocène s'est produite en plusieurs étapes au cours d'une période allant de 4700 à 2700 ans BP : il s'est agi tout d'abord du retrait successif des plantes d'origine tropicale soudaniennes et sahéliennes entre 4700 et 4300 ans BP, puis du changement des eaux qui de douces deviennent salines il y a 3300 ans, puis enfin de l'installation définitive des plantes désertiques il y a 2700 ans. En Oman et au Pakistan, c'est une aridification très progressive de l'environnement qui est enregistrée avec l'augmentation croissante des plantes steppiques halophiles, ceci malgré la récurrence d'événements

pluvieux au cours des tous derniers millénaires (Figure 6).

L'histoire du Sahara est exemplaire en ceci qu'elle démontre de façon éclatante toute l'amplitude du changement climatique et ses effets sur les écosystèmes et les populations. Le changement climatique a eu, sur l'environnement, un écho amplifié - allant du « Sahara vert » au désert absolu - auquel les hommes ont su répondre en « inventant » la domestication des plantes et des animaux et l'irrigation ou encore en développant des stratégies d'adaptation et d'échange. Les avancées

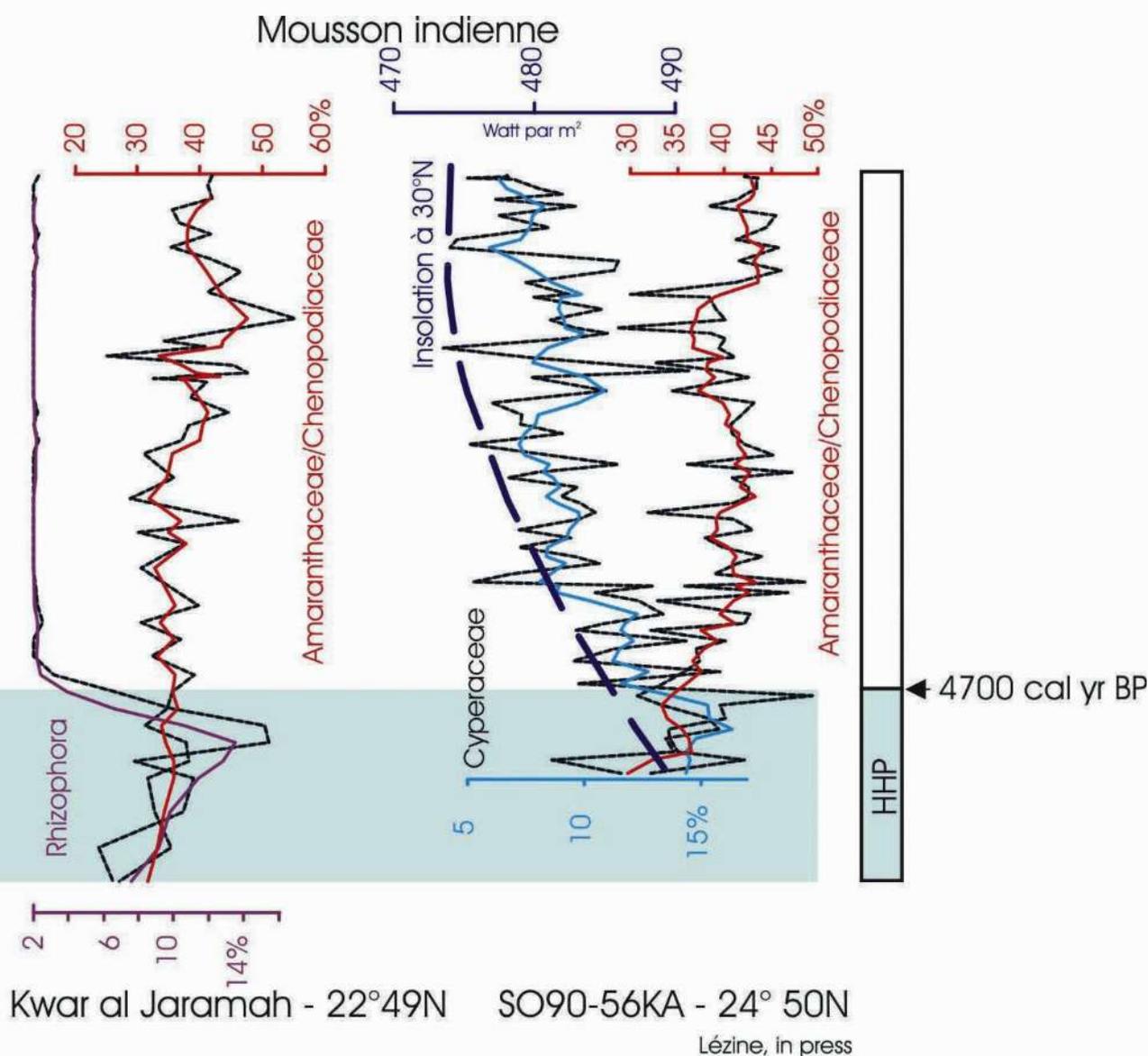
Figure 6 : La fin de la dernière période humide en Afrique du Nord et en Arabie. Cette figure illustre la polémique entre les partisans d'une fin brutale à 5500 ans BP qui se basent sur l'enregistrement océanique ODP 658 des mesures des particules terrigènes transportées à l'océan (de Menocal et al., 2000 - figure de gauche) et les partisans d'une fin plus progressive, ou tout au moins plus complexe, comme le montrent les enregistrements palynologiques d'Ounianga (Tchad), Kwar al Jaramah (Oman) et SO90-56KA (Pakistan) (Lézine, sous presse ; Ivory et Lézine, sous presse). Ces données palynologiques montrent en fait que les écosystèmes présentent une réponse individuelle au changement climatique : les arbres tropicaux d'Ounianga et les *Rhizophora* de Kwar al Jaramah semblent disparaître rapidement, mais ceci est une fausse impression due aux très faibles pourcentages des grains de pollen correspondants dans les diagrammes polliniques. Il est probable que la décroissance de ces plantes dans le paysage ait été amorcée plus tôt. Les plantes de milieux arides (Amaranthaceae-Chenopodiaceae) croissent de façon progressive alors que les plantes indicatrices de milieux plus favorables (Cyperaceae et Poaceae) présentent une tendance inverse. Les courbes pointillées indiquent les variations de pourcentage, les courbes en couleur les tendances (ici, les moyennes mobiles). La courbe bleu foncée montre la décroissance progressive des valeurs d'insolation à la fin de l'Holocène.



françaises actuelles dans le domaine de la recherche sur l'environnement et le climat des déserts tropicaux se situent dans la longue lignée des recherches archéologiques et paléontologiques menées depuis Camille Arambourg, Henriette Alimen, Jean Chavaillon, Théodore Monod, Yves Coppens au Sahara, Jacques Tixier et Marie-Louise Inizan en Arabie, pour ne citer que quelques-unes des personnalités scientifiques qui ont marqué notre histoire, mais également des recherches environnementales menées par Hugues Faure qui publiait dès 1969 un des tout premiers articles de synthèse sur les lacs quaternaires du Sahara, Nicole Petit-Maire dont les travaux ont abouti à la publication de cartes paléogéographiques du Monde à différentes périodes du passé, Pierre Rognon, puis Françoise Gasse et Jean-Charles Fontes dont les travaux ont permis de grandes avancées dans le domaine de la connaissance des environnements lacustres. Les travaux de modéli-

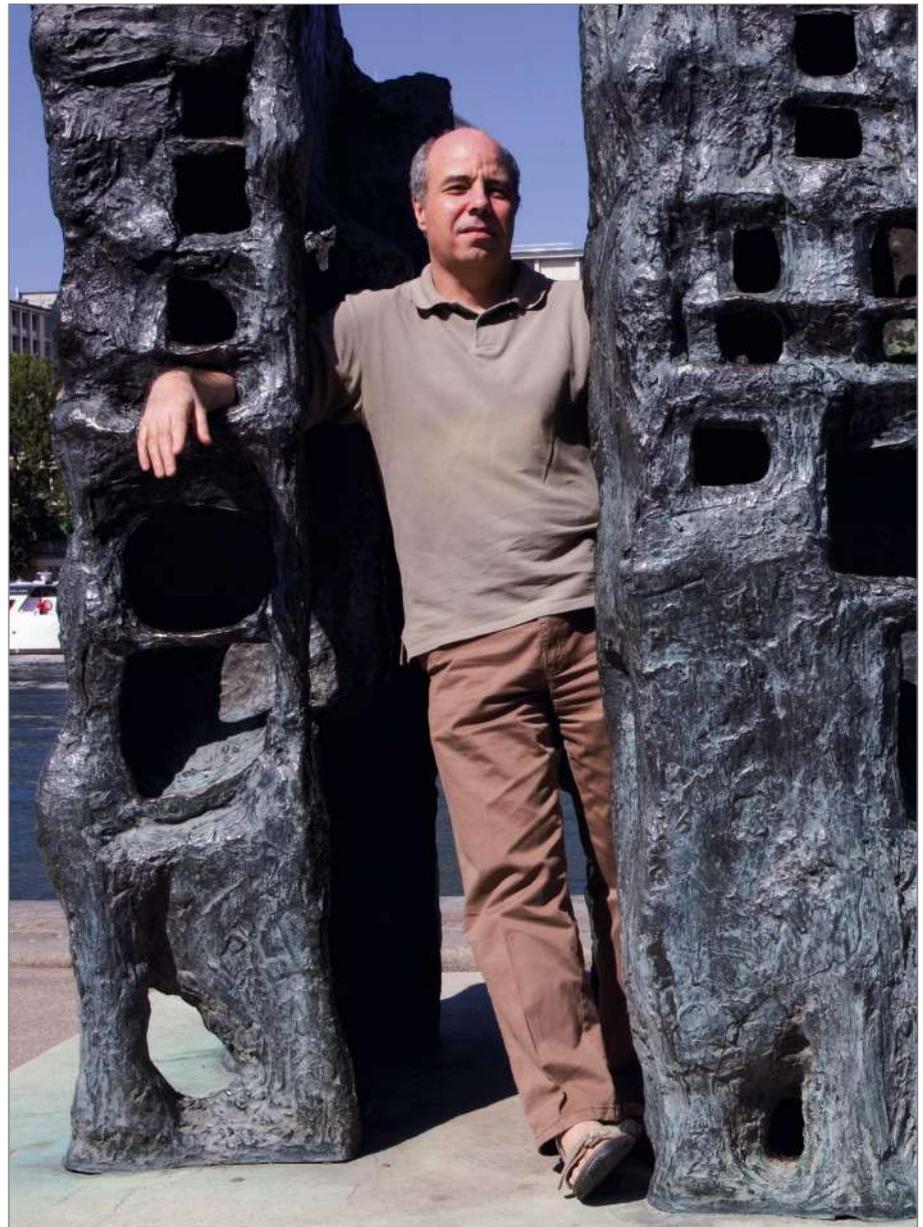
sation initiés par le programme international PMIP dès les années 1990 ont ensuite considérablement contribué à améliorer notre compréhension des mécanismes climatiques à l'origine des variations de l'environnement désertique. C'est en s'appuyant sur la connaissance du passé, basée sur l'expertise de plusieurs générations de naturalistes, géologues, hydrologues, archéologues et de modélisateurs du climat qui ont travaillé ensemble à l'étude des déserts, que l'on pourra comprendre le changement climatique global (en l'occurrence, le système de mousson) et prévoir les périodes de « crises » de l'ampleur de celle qui a provoqué, il y a quelques millénaires à peine, la fin du « Sahara vert » ■

Les références sont sur le site de l'Académie des sciences : www.academiedessciences.fr



Les moussons indienne et africaine : de l'Holocène à l'horizon 2100

Par **Serge Janicot**
et **Pascale Braconnot**



Serge Janicot

Directeur de recherche à l'IRD,
LOCEAN, université Pierre-et-
Marie-Curie, Paris

Les systèmes de mousson d'été indienne et africaine

La subsistance de plus de 60 % de la population mondiale dépend des moussons. Les ressources en eau locales et l'agriculture peuvent être fortement affectées par l'amplitude et le calendrier de cet événement qui apporte en quelques mois la plus grande partie des pluies annuelles. Les moussons sont contrôlées d'abord par la course annuelle du soleil, mais son évolution dépend aussi fortement de la dynamique interne de l'atmosphère et des conditions de surface océaniques et continentales aux échelles locale, régionale et globale, incluant des interactions d'échelles complexes.

Le développement et l'intensité des moussons d'Inde et d'Afrique durant l'été de l'hémisphère Nord sont très

bien suivis par la télédétection satellitaire de la Zone de Convergence Inter-Tropicale (ZCIT), le lieu du maximum de convection et de précipitations (Figure 1). La zone pluviométrique de la mousson indienne s'étend de 10° S à 30° N, à l'est de 60° E, tandis que celle de la mousson africaine est limitée entre l'équateur et 20° N.

La Figure 1 montre aussi en été le champ de pression réduite au niveau de la mer et le vent de basses couches (1 000 hPa). Dues au fort contraste de la capacité thermique des terres et des océans, les masses continentales chaudes créent une zone de basses pressions, alors que les zones de hautes pressions des anticyclones des Açores, Sainte-Hélène et des Mascareignes sont situées au-dessus des océans tropicaux (Atlantique nord et sud, Indien sud, respectivement). Le gradient de pression trans-équatorial résultant induit des vents de sud (sud-est au sud de l'équateur, sud-ouest au nord de l'équateur) qui apportent une forte quantité de vapeur d'eau au-dessus des terres. Ces vents de mousson convergent dans la zone de basses pressions avec des vents continentaux plus secs venant du nord-est, l'ensemble formant une circulation cyclonique.

Vers 3 kilomètres d'altitude (700 hPa; Figure 1), la circulation atmosphérique est très différente entre les deux moussons. Le maintien de la circulation cyclonique au-dessus de l'Inde démontre une mousson très épaisse, alors qu'au-dessus de l'Afrique, cette circulation est remplacée par une circulation anticyclonique et la disparition des vents de mousson. Les vents d'est présents correspondent à ce qui est appelé le Jet d'Est Africain dans lequel se développe des « ondes d'est » qui favorisent



Pascale Braconnot

Directeur de recherche,
CEA, LSCE, Gif-sur-Yvette
Sculpture d'Étienne Martin,
Demeure I

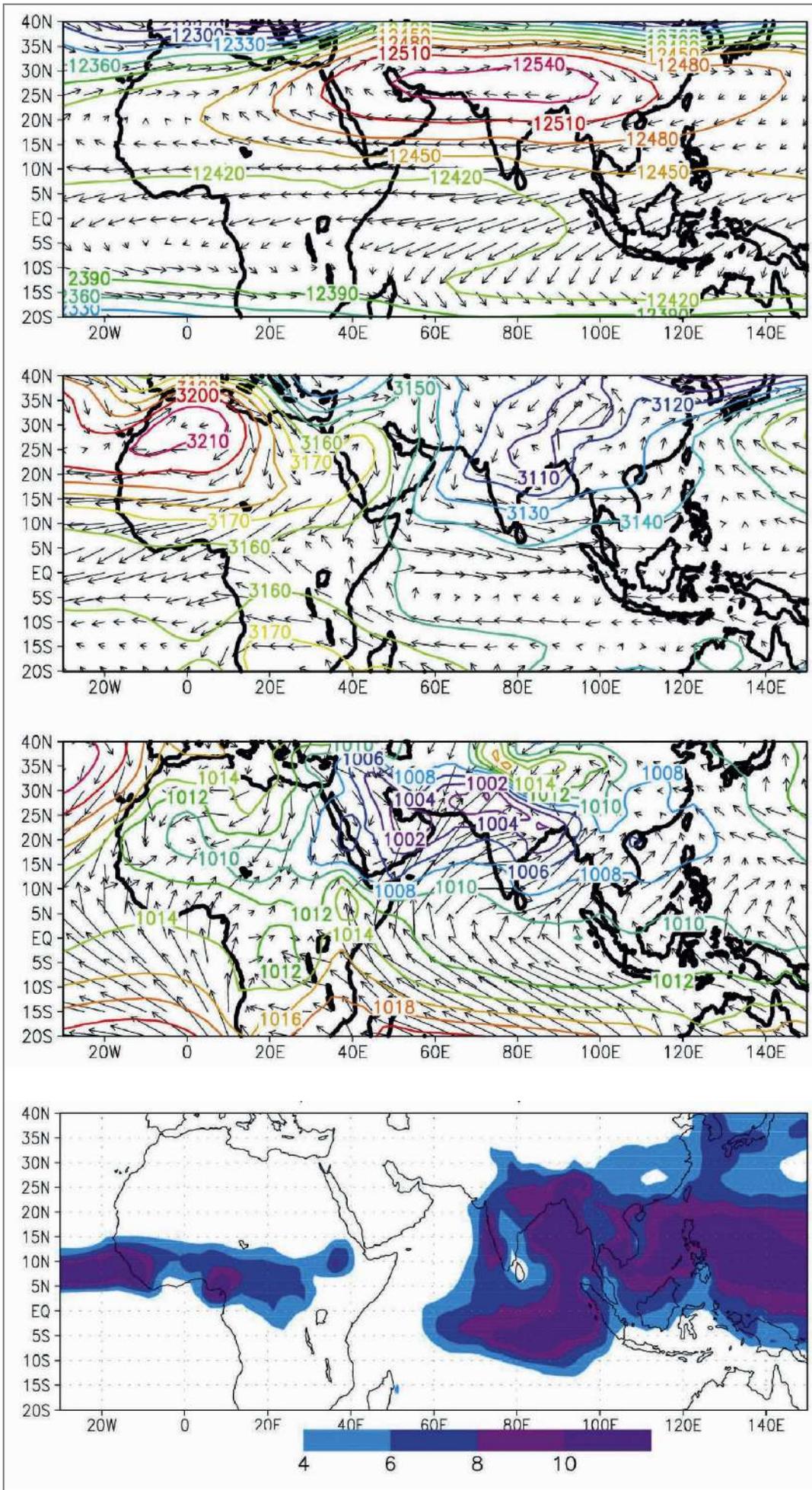


Figure 1: De haut en bas: 1- Hauteur géopotentielle (contours) et vent (vecteurs) à 200 hPa en juillet-septembre 1979-1998. 2- Idem mais pour la hauteur géopotentielle (contours) et vent (vecteurs) à 700 hPa. 3- Idem mais pour la pression réduite au niveau de la mer (contours; hPa) et vent à 1000 hPa (vecteurs). 4- Idem mais pour l'estimation de précipitation par satellite (mm/jour, données CMAP) en juillet-septembre 1979-2006.

le développement des systèmes convectifs. Vers 12 kilomètres d'altitude (200 hPa; Figure 1), une circulation anticyclonique de grande échelle couvrant l'ensemble Afrique-Asie signe la présence et l'intensité de ces moussons et les vents d'est associés forment le Jet d'Est Tropical.

Leur variabilité à différentes échelles de temps

Le cycle saisonnier de ces deux systèmes de mousson n'est pas régulier, mais évolue par à-coups où les mécanismes de l'échelle de temps intra-saisonnière (inférieure à 70 jours) jouent un rôle important. Ce cycle saisonnier peut aussi être fortement perturbé par des anomalies d'échelle de temps interannuelle ou décennale.

La Figure 2 montre un exemple de la variabilité intra-saisonnière des pluies en Afrique (plus particulièrement au Sahel pour l'année 1968) et en Inde (sur l'ensemble du sous-continent pour l'année 1972). Dans les deux cas, un cycle saisonnier lissé est visible montrant un maximum de précipitations en Août, mais des fluctuations d'échelle intra-saisonnière de forte amplitude se superposent induisant des séquences temporelles pouvant dépasser 10 jours de déficit ou d'excédent persistants de pluies. On observe ainsi des « rythmes » montrant des périodicités comprises entre 10 et 25 jours, et entre 25 et 60 jours. Les mécanismes contrôlant ces fluctuations ne sont pas complètement élucidés, mais on peut dire qu'ils sont contrôlés en grande partie par la dynamique interne de l'atmosphère et qu'ils sont différents en Inde et en Afrique, même si des téléconnexions d'une zone de mousson à l'autre sont possibles.

Ce n'est pas le cas pour les mécanismes gérant la variabilité interannuelle et décennale de ces systèmes de mousson. Les états de surface océaniques et continentaux ont un impact dominant même si les téléconnexions atmosphériques ont là aussi leur place. Le rôle des anomalies de températures de surface de mer (TSM) est primordial. À l'échelle interannuelle, les événements El Niño – La Niña dans le Pacifique montrent l'impact le plus fort sur les deux moussons, des TSM plus chaudes dans le Pacifique équatorial central et est (El Niño) étant liées à des moussons déficitaires et vice-versa, par une modification de la circulation atmosphérique dans toute la bande tropicale. Des événements chauds similaires dans l'Atlantique équatorial est produisent un blocage de la ZCIT sur la côte guinéenne et moins de pluies sur le Sahel. Les liens avec les événements El Niño – La Niña sont cependant modulés par la variabilité climatique générale à l'échelle décennale, et leur impact sur ces deux moussons apparaissent plus faibles dans les dernières décennies. Cette variabilité climatique décennale des TSM module aussi directement le régime des pluies de

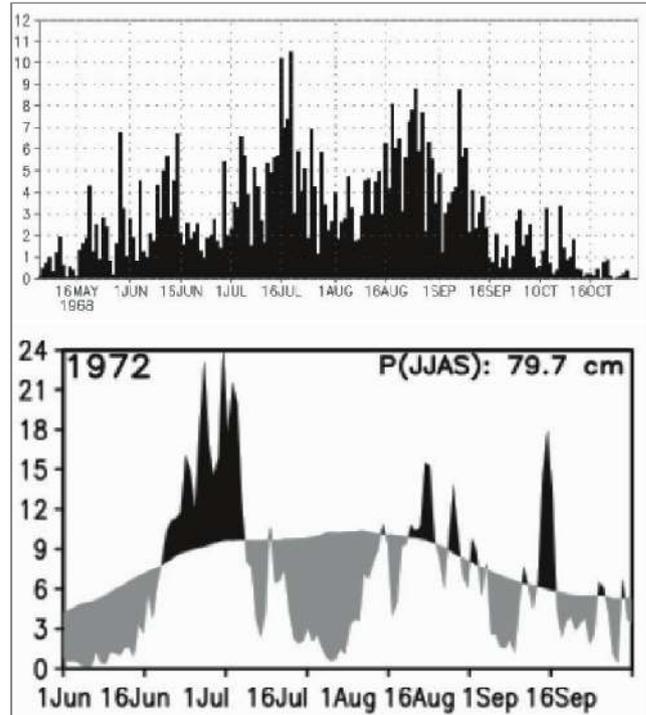


Figure 2 : En haut: 1- Indice régional de précipitations quotidiennes sur le Sahel (mm) en mai-octobre 1968 calculé sur la zone 12.5°N-15°N/10°W-10°E (données IRD). En bas: 2- Indice régional de précipitations quotidiennes sur l'Inde (mm) en juin-septembre 1972 calculé sur la zone 10°N-25°N/72°E-87°E à partir de données stations [16].

mousson et explique en grande partie les alternances au Sahel des décennies excédentaire 1950-1960, déficitaire 1970-1980, et le retour vers la moyenne ensuite, ainsi que la faible (resp. forte) occurrence d'années déficitaires en Inde sur la période 1920-1965 (resp. 1965-1990). Les états de surface continentaux (albédo, humidité des sols, couvert végétal, couverture de neige en Himalaya) jouent un rôle secondaire mais non négligeable sur le régime de ces moussons, en modulant l'intensité de leur circulation par l'évolution du profil méridien de température et d'humidité.

La mousson a aussi largement varié dans le passé. De nombreuses données de terrain attestent de conditions plus humides dans une ceinture s'étendant de l'Afrique au nord de l'Inde et à l'Asie dans la première partie de l'Holocène. Ces fluctuations passées ont principalement été régulées par les variations lentes des paramètres orbitaux de la Terre qui modulent la répartition latitudinale et saisonnière de l'ensoleillement. À cet effet s'ajoutent différentes rétroactions faisant intervenir les interactions entre les différents éléments du système climatique (océan-atmosphère-surface continentale, glace de mer et glaces continentales) qui modifient la répartition des sources et de puits d'énergie et d'eau sur la planète. Ainsi, bien que ces périodes de l'Holocène ne puissent pas être considérées comme des analogues de ce qui peut se passer dans le futur, leur étude permet des avancées sur la compréhension des interactions non-linéaires entre les différentes rétroactions liées à l'océan et aux modifications du couvert végétal.

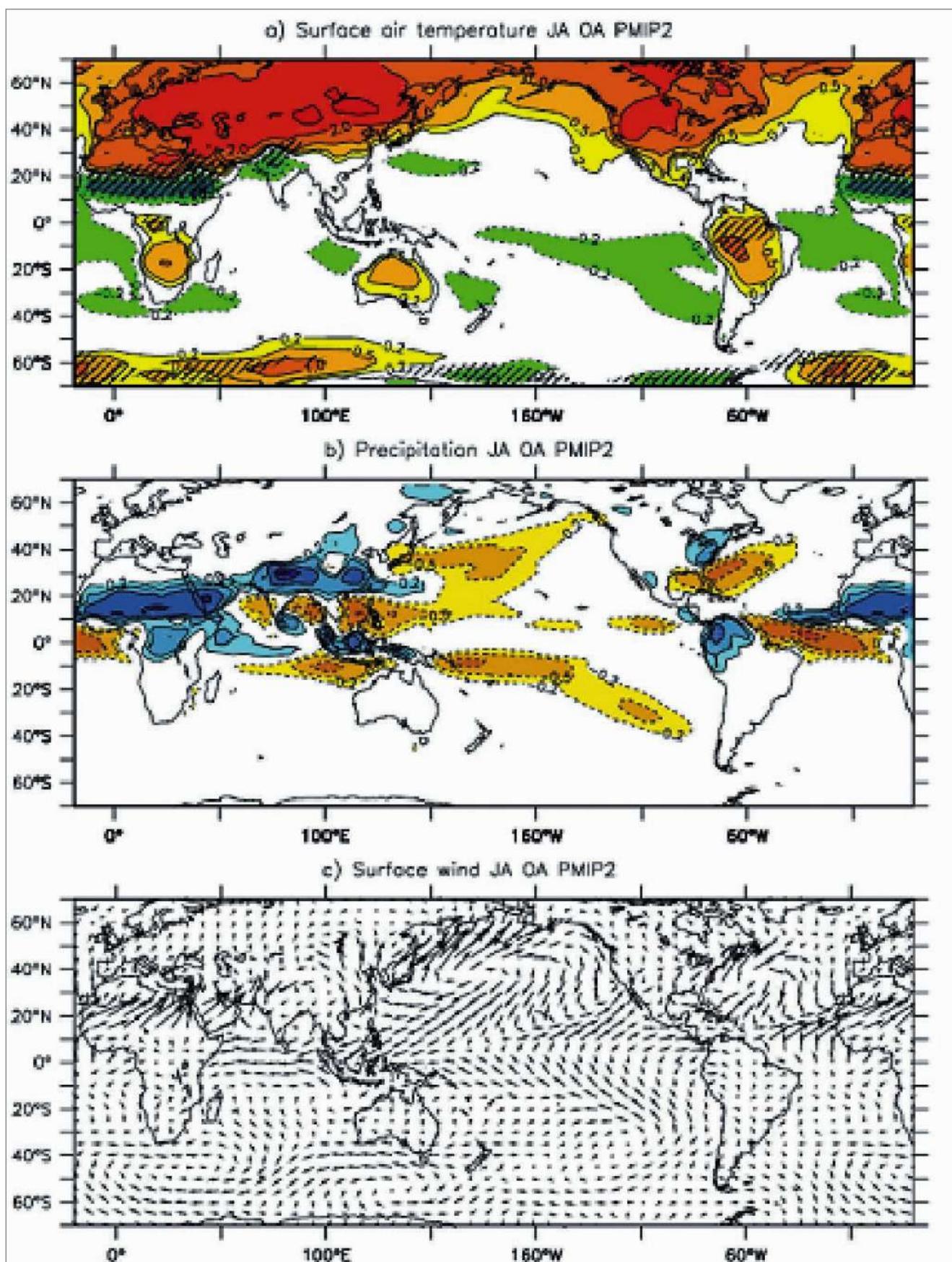


Figure 3 : Changement de mousson à l'Holocène moyen, simulé pour les mois de juillet-août. Les cartes de a) différence de température (°C), b) différence de précipitation (mm/j) et c) différence de vent de surface (m/s) entre l'Holocène moyen et l'actuel ont été obtenues à partir de la moyenne d'ensemble des simulations du climat d'il y a 6000 ans et du climat pré-industriel, réalisées pour le projet international « Paleoclimate Modeling Intercomparison Project ».

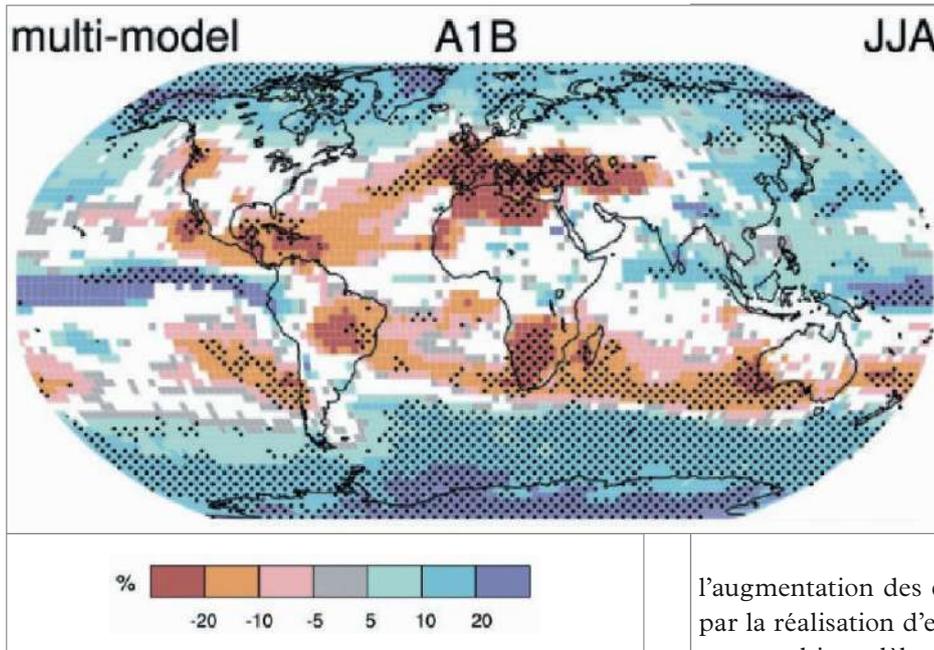


Figure 4 : Changements relatifs des précipitations (%) en juin-août sur la période 2090-2099 par rapport à la période 1980-1999. Les valeurs sont issues d'un ensemble multi-modèles de simulations basées sur le scénario économique A1B. Les zones blanches représentent les zones où moins de 66 % des modèles donnent le même signe dans le changement des précipitations, et les zones hachurées où plus de 90 % des modèles donnent le même signe.

Au début de l'Holocène, l'obliquité de la Terre était plus grande ($24,2^\circ$) qu'à l'actuel ($23,9^\circ$) et la Terre était au périhélie de son orbite au solstice d'été au lieu du solstice d'hiver. Le cycle saisonnier de l'ensoleillement était accru dans l'hémisphère Nord avec un surplus d'environ 40 W. m^2 en été, et réduit dans l'hémisphère Sud. Les contrastes de température entre les hémisphères et entre l'océan et le continent étaient renforcés, ce qui contribue à intensifier le phénomène de mousson (Figure 3). Au printemps, les océans tropicaux, plus froids à cause du déficit d'ensoleillement hivernal, renforcent le gradient terre-océan et favorise un démarrage précoce de la mousson. En fin d'été, l'océan plus chaud de l'hémisphère Nord maintient la zone de pluie dans une position relativement nord et retarde le retrait de la mousson. Les précipitations plus intenses sont aussi favorables au développement de la végétation. Dans la région sahélienne, cette végétation absorbe plus de rayonnement que le sol nu et renforce le réchauffement printanier. Elle permet aussi de mieux recycler l'eau du sol, d'amplifier les pluies de mousson et de les entretenir en fin de saison des pluies. Les simulations de l'Holocène moyen indiquent aussi que le phénomène El Niño, qui est la principale manifestation de la variabilité interannuelle résultant du fort couplage entre l'océan et l'atmosphère dans les régions tropicales, était amorti et avait un impact plus confiné au Pacifique équatorial qu'aujourd'hui. Ces résultats sont en accord avec les données de coraux ou de lacs situés sur le pourtour de l'océan Pacifique. Il est cependant difficile à partir des données d'évaluer si l'impact moins marqué d'El Niño

sur les précipitations au Sahel, simulé par les modèles est réaliste ou non. Ces estimations feront l'objet des investigations futures, car ces questions sont importantes pour comprendre l'évolution du climat du prochain siècle.

Les scénarios climatiques à l'horizon 2100 servent de base de réflexion pour quantifier l'impact de l'activité humaine sur le climat dans les rapports successifs du Giec. Ils décrivent l'évolution probable du climat sous l'influence de

l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre par la réalisation d'ensembles de simulations climatiques multi-modèles. Le quatrième rapport publié en 2007 indique que, sur les zones des moussons indienne et africaine, les modèles de climat utilisés ne fournissent pas de réponse cohérente en termes de cycle de l'eau, et donc qu'actuellement il est impossible de dire si ces moussons seront plus ou moins intenses, ou bien inchangées (Figure 4).

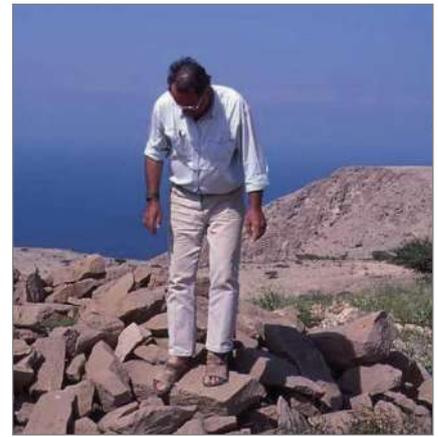
Les incertitudes sur les mécanismes en jeu

Les simulations climatiques produites doivent cependant être considérées avec prudence. Elles sont basées sur des modèles de climat couplés atmosphère-océan-végétation, se combinant pour les scénarios du futur avec des modèles économiques de développement. Les projections climatiques à l'échelle globale indiquent qu'à l'horizon 2100, la trajectoire du climat est avant tout déterminée par le choix du scénario économique. C'est sur cette base que peut se construire la réflexion socio-économique permettant de réduire les émissions et l'impact de l'activité humaine sur le climat. À l'échelle des régions de mousson, les résultats sont plus complexes. Une des raisons provient de la difficulté de représenter correctement les processus de petite échelle intervenant dans la convection profonde, la couche limite atmosphérique et le couplage avec les surfaces continentales. Ainsi, certains modèles simulent un gradient mer-terre accru et une intensification des moussons, alors que d'autres installent de façon préférentielle la convection sur l'océan lorsque celui-ci se réchauffe. Les téléconnexions associées aux événements El Niño ne sont en général pas représentées de façon satisfaisante dans les simulations actuelles. Les TSM simulées trop chaudes dans l'est des bassins océaniques tropicaux font partie de ces biais. Il reste aussi des incertitudes sur la nature du couplage entre la végétation et le climat, qui n'était pas considéré dans l'ensemble multi-modèles de simula-

tions réalisé pour le 4^e rapport du Giec. L'étude de la fin de la période humide en Afrique au cours de la dernière partie de l'Holocène suggère que l'installation d'une végétation plus sèche au Sahara et au Sahel résulte, soit d'un couplage entre la végétation et le climat, soit d'une réponse non linéaire de la végétation à la variabilité climatique ou de l'humidité des sols. L'étude des climats passés montre aussi que la mousson africaine est moins intense lorsque la circulation de l'océan Atlantique est perturbée par une fonte massive des calottes de l'hémisphère Nord. Ces effets ne sont pas encore incorporés de façon routinière dans les modèles de climat, ce qui implique que bien que les grandes lignes des effets du réchauffement climatique en cours sur le cycle hydrologique soient tracées, il reste des incertitudes sur l'évolution à long terme dans certaines régions.

Progrès réalisés et perspectives

Des efforts importants et permanents sont portés vers l'amélioration de notre connaissance des processus primordiaux et de leur représentation dans les modèles de climat. Cela passe d'abord par la réalisation de campagnes de mesures intensives et le maintien sur le long terme d'observatoires géophysiques, permettant d'acquérir des jeux de données les plus exhaustifs possibles. Le programme international AMMA (Analyses Multidisciplinaires de la Mousson Africaine) est un exemple actuel d'un tel effort. En parallèle, des études théoriques et le développement de modèles plus conceptuels contribuent aussi à l'amélioration de notre connaissance sur les mécanismes en jeu. Les ensembles de simulations multi-modèles et la constante confrontation des résultats aux données disponibles permettent de mieux évaluer les mécanismes robustes de ceux qui dépendent de la modélisation des différents processus physiques et de leurs interactions. L'ensemble des simulations prévues au niveau international en amont du prochain rapport du Giec comprend pour la première fois des simulations du climat actuel, des climats passés et des projections pour le prochain siècle et au-delà. Les projets d'analyse vont ainsi pouvoir considérer présent, passé et futur dans une vision cohérente, ce qui devrait permettre de mieux comprendre et évaluer les différentes échelles de temps intervenant dans les fluctuations de la mousson et leurs interactions ■



Par **Serge Cleuziou**

Directeur de recherche,
UMR7041 CNRS, ARSCAN,
université Paris X, Nanterre.

L'association d'archéologues aux spécialistes des climats du passé n'a pas pour but la recherche d'illusoires « leçons de l'histoire » qui alimenteraient les interrogations actuelles. Elle vise d'abord à mieux comprendre la façon dont, selon la formule de Maurice Godelier, les sociétés humaines transforment la nature et leur nature propre, face aux transformations de leur environnement, à travers des études de cas multiples sur des sociétés et dans des milieux variés. Les contraintes environnementales des déserts imposent aux communautés humaines qui y vivent des réponses techniques et sociales, en apparence faciles à appréhender parce que plus fortes que des milieux plus favorables, faute de quoi elles ne survivraient pas. Certaines d'entre elles s'adaptent à cet environnement, en s'organisant en petites communautés qui tentent de tirer davantage de la nature telle qu'elle se présente, en pesant peu sur elle comme le font par exemple les Bushmen du Kalahari ou les Aborigènes d'Australie. D'autres, au contraire, développent des moyens appropriés d'exploitation de cette nature, représentés dans notre imaginaire par les oasis, avec dans un cas comme dans l'autre des structures sociales adaptées, dont dépend le succès de ces stratégies.

En 1908, le géologue américain Raphaël Pumpelly, publiant ses fouilles d'Anau au Turkménistan russe, suggérait que c'est dans les oasis laissées par le désert, après le retrait des grands lacs endoréiques d'Asie centrale à la fin de la dernière glaciation, que les communautés humaines, confrontées à un environnement de plus en plus restreint, commencèrent à sélectionner plus ou moins consciemment les variétés de graines les plus favorables, à aider à leur reproduction, à se mêler de celle des troupeaux d'animaux, à développer des méthodes simples d'irrigation. Ce n'est que par la suite, que ces techniques auraient été transplantées dans les régions fluviales de climat aride ou semi-aride (Mésopotamie,

Dialogue entre archéologie et climats anciens. Les enseignements du désert

Égypte), donnant naissance aux grandes civilisations de l'Orient ancien. L'idée reprise en 1929 par le préhistorien australien Vere Gordon Childe dans son *New lights on the most ancient Near East* est connue depuis cette date sous le nom de « théorie des oasis ». Dans les années 1960, elle fut remplacée par celle des « zones nucléaires » du préhistorien américain Robert J. Braidwood, selon qui la domestication des plantes et des animaux aurait eu lieu dans les zones de basse montagne du Levant, de Turquie ou d'Iran occidental dont étaient originaires les espèces en question, théorie depuis en partie confirmée par les recherches de terrain. « L'ardent aiguillon de la nécessité » invoqué par Pumpelly et Childe laisse ainsi la place à l'abondance qui aurait favorisé, et non imposé, une sédentarisation à proximité des ressources. Il revint très vite à travers les hypothèses démographiques (Boserup, Binford), selon lesquelles la véritable agriculture se serait développée quand l'accroissement de population dans les zones d'abondances aurait rendu nécessaire l'occupation de nouveaux territoires, en tentant d'y reproduire des ressources jusque là exploitées à l'état naturel, avant que les interrogations actuelles sur le changement climatique ne renvoient au rôle de ce dernier dans le processus. En Mésopotamie, au Pakistan ou au Pérou, le désert s'est en bien des endroits installé sur le territoire de cités autrefois florissantes que les archéologues vont « arracher aux sables », à moins qu'ils n'aillent retrouver le témoignage des communautés humaines qui vivaient dans un Sahara autrefois verdoyant, mettant ainsi les relations entre homme et désert au cœur des problématiques archéologiques. Il convient donc de s'interroger sur les méthodologies qui le permettent en tenant compte, des progrès considérables réalisés, tant par l'archéologie que par l'étude des climats anciens.

M. Tosi a montré que les sociétés confrontées à des phénomènes de péjoration climatique tentent d'y faire face sur place. On doit prendre en compte le fait que les sociétés traditionnelles ne perçoivent pas ces change-

ments de la même façon que nous, et réagissent selon des schèmes qui leur sont propres, fruits de leur propre expérience. Elles ont en général élaboré de multiples solutions de caractère religieux, social ou technique, efficaces ou non d'un point de vue pratique à court ou à long terme, au nombre desquelles l'abandon d'un territoire, des transformations sociales profondes ou l'adoption de nouvelles pratiques agricoles ne sont pas forcément prioritaires. Pour prendre un exemple très discuté, la fin de l'empire mésopotamien d'Agadé (vers 2200 av. J.-C.) n'était pas considérée par les textes anciens comme le résultat d'une sécheresse exceptionnelle ainsi qu'on le propose aujourd'hui, mais comme le fruit des multiples impiétés commises par son plus puissant et avant-dernier empereur, Naram Sin, qui prétendit se faire diviniser. Avec la complexité croissante des sociétés humaines au cours des six derniers millénaires, attribuer l'effondrement d'un empire à un événement climatique est au mieux un pari risqué et c'est dans toute l'étendue de cette complexité, qu'il convient de travailler si l'on souhaite le comprendre. Plusieurs stratégies aux recoupements multiples sont envisageables, consistant les unes à étudier les réactions des sociétés face à une désertification de leur environnement, documentée par les études environnementales, qu'elles l'aient ou non engendrée, et les autres à analyser la façon dont des communautés humaines ont créé des oasis dans un environnement désertique.

Notre équipe travaille sur cette dernière en étudiant l'origine des oasis de la Péninsule d'Oman, dans l'Est de la péninsule arabique. Leur apparition est maintenant datée avec précision des derniers siècles du quatrième millénaire av. J.-C., à une époque où un climat aride proche de l'actuel est déjà établi dans toute la région. Sur le site de Hili dans l'oasis d'al-Aïn, à la frontière entre les Émirats arabes unis et le Sultanat d'Oman, un habitat fondé sur une économie agro-pastorale fut créé *ex-nihilo* vers 3100 av. J.-C. On y cultivait le palmier-dattier, diverses légumineuses, diverses variétés de blé et d'orge ainsi que du sorgho.

Des animaux domestiques, vaches, moutons et chèvres constituaient l'essentiel de l'alimentation carnée, le rôle de la chasse étant négligeable. L'âne était domestiqué et utilisé comme moyen de transport, mais le chameau connu par quelques exemplaires chassés était encore à l'état sauvage. L'habitat consistait en maisons de briques crues, simplement séchées au soleil, ou de matériau léger, dominées par des tours en briques crues d'une dizaine de mètres de hauteur et de 20 à 30 m de diamètre. Sur d'autres sites comme Bat, les tours sont construites en très grosses pierres, les deux matériaux étant parfois associés. Chaque tour possède un puits permettant un ravitaillement en eau autonome, ce qui conduit en général à les interpréter comme des forteresses contrôlées par l'élite de la société. D'autres puits semblent avoir été utilisés pour arroser les champs et abreuver les animaux, mais l'essentiel de l'eau provient de galeries drainantes qui captaient les nappes de sous-écoulement des oueds à proximité desquels l'habitat était établi. Ce système connu sous le nom de *falaj* (ou *qanat* en Iran) est encore en usage dans l'Oman traditionnel. Les oasis protohistoriques omanaises apparaissent ainsi comme un système complexe associant des cultures dont les récoltes s'échelonnent tout au long de l'année; elles sont un paysage créé et entretenu par l'Homme. Contrairement à une impression parfois répandue, elles sont étroitement associées à l'ensemble des autres milieux proches et lointains et de la région. De la steppe et du désert proviennent l'élevage du mouton et de la chèvre, mais aussi divers autres plantes et animaux, les montagnes fournissent de multiples ressources minérales qui sont élaborées dans les ateliers de l'oasis pour fournir armes, récipients, etc. La péninsule omanaise du III^e millénaire av. J.-C. apparaît ainsi comme un ensemble hautement intégré de populations variées dont l'oasis est certes le point central, mais qui toutes ont besoin des autres pour exister et, notamment, faire face aux multiples crises environnementales que peut entraîner une pluviosité très basse et très inégalement répartie au cours de l'année.

C'est dans la région du Ja'lan, à l'Est du pays, que nous avons pu établir toute la complexité sociale et économique du système, en analysant l'intégration des ressources de la mer à celles de la montagne, des oasis et du désert. Le poisson séché, salé ou fumé était expédié vers les oasis où il constituait une ressource non négligeable de protéines. Le commerce maritime lui-même, avec notamment la civilisation de l'Indus, fournissait un supplément de ressources artisanales et alimentaires, comme les huiles animales qui n'étaient produites qu'en petite quantité dans la région.

Les études archéologiques suggèrent une société tribale, visible notamment dans les rites funéraires qui mettent en avant une certaine forme d'égalité entre tous les membres de la société, contrairement à ce qui se passe à la même époque avec les pyramides d'Égypte

ou les tombes royales d'Ur en Mésopotamie. C'est cette société qui réussit à se maintenir pendant plus d'un millénaire, avant de se transformer profondément, d'une manière encore mal comprise, aux environs de 2000 av. J.-C. Les causes de cette transformation restent inexpliquées et les facteurs climatiques ont été invoqués à diverses reprises, notamment la possibilité d'une période plus sèche, comparable sinon identique à celle qui aurait entraîné la fin de l'empire d'Agadé. Les recherches les plus récentes montrent certes des variations tout au cours du III^e millénaire, mais n'autorisent pas à reconnaître un événement particulièrement marqué aux environs de 2000 av. J.-C., auquel les techniques dont disposait la société omanaise du troisième millénaire n'aurait pas permis de faire face. D'autres causes ont été recherchées, comme des crises internationales (effondrement des relations commerciales) ou des transformations dans la société elle-même. Notre équipe a suggéré que l'accroissement continu de la richesse avait conduit les élites à tenter de pérenniser leur pouvoir, comme cela s'était produit en Égypte ou en Mésopotamie, à l'encontre de l'idéologie égalitaire dominante, mais que c'est finalement cette dernière qui a triomphé, conduisant à un repli sur le système tribal.

Nous n'évoquons brièvement ces faits que pour montrer la multiplicité des causalités possibles et combien il serait hasardeux de privilégier une seule d'entre elles, reposerait-elle sur des données bien établies par les études paléoclimatiques. Les meilleures reconstructions de ce type telles qu'elles sont proposées se bornent souvent à mettre en évidence la contemporanéité plus ou moins précise de faits sociaux et de faits environnementaux. Pour sortir de cette impasse, nous proposons une stratégie qui consiste, à partir des données de l'archéologie, à créer une société artificielle dont l'évolution en relation avec l'environnement serait étudiée via des modèles de simulation multi-agents afin d'intégrer, de manière aussi précise que possible, les données de l'archéologie et celles des sciences naturelles. De telles stratégies sont actuellement développées pour des situations aussi différentes que la Mésopotamie du Nord, au III^e millénaire av. J.-C., la fin de la culture Anasazi en Arizona au XIII^e siècle de notre ère, ou le développement de la royauté aux îles Hawaï dans les siècles qui suivirent. Ce type de recherche ambitieux n'est pas sans multiples écueils, et nombre de spécialistes de l'environnement y verront l'introduction de trop d'hypothèses issues des molles sciences humaines. Nous pensons qu'une compréhension de la place de l'Homme et des sociétés dans l'évolution de la planète est à ce prix ■

Les références sont sur le site de l'Académie des sciences : www.academiedessciences.fr

Un lac au Sahara

Théodore Monod
et Stefan Kröpelin



Un lac au Sahara

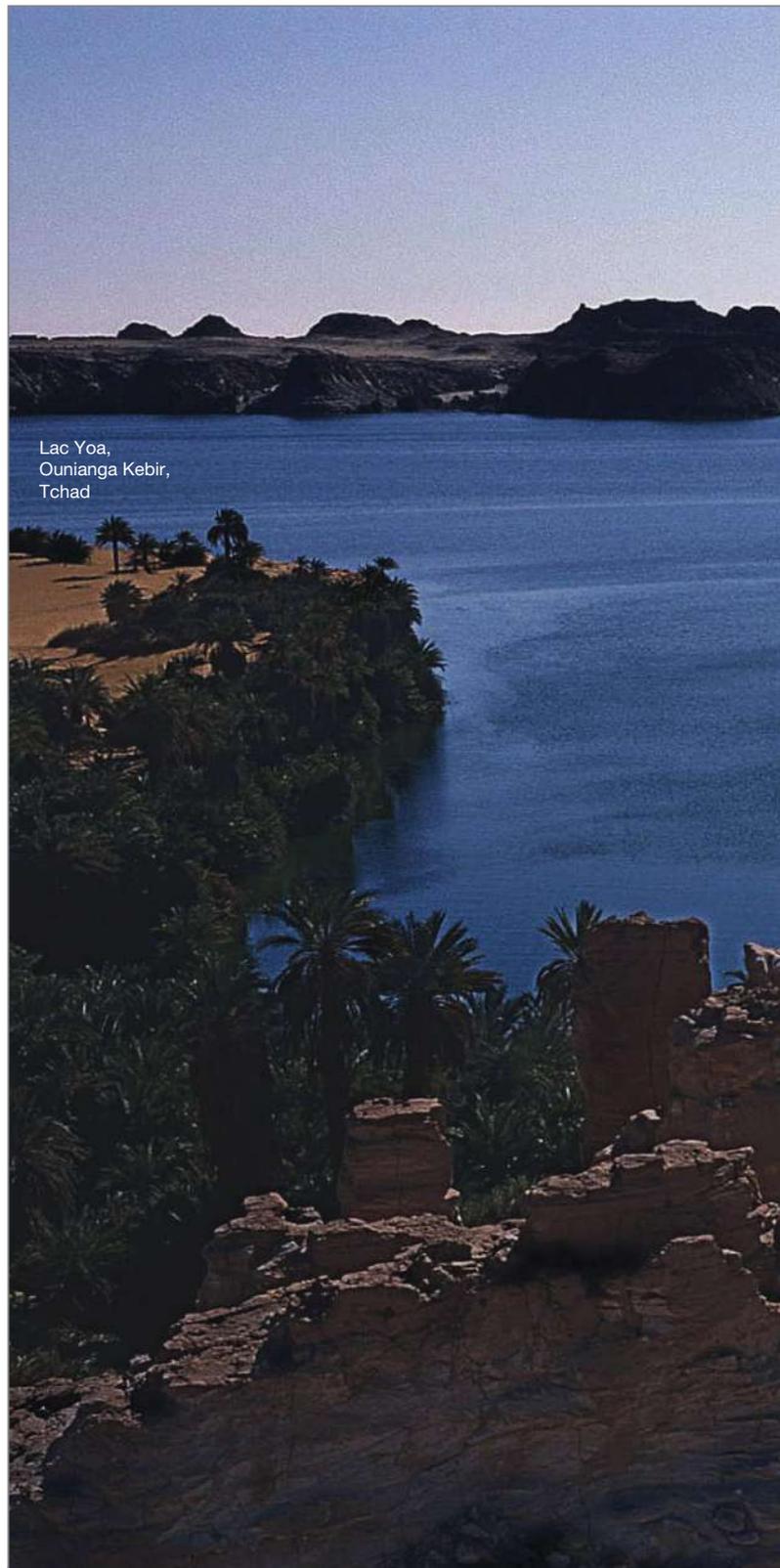
Entretien de **Stefan Kröpelin**¹ par **Paul Caro**²

1. Chercheur à l'Université de Cologne.
2. Correspondant de l'Académie des sciences, directeur de recherche honoraire au CNRS.

Des dépôts riches en carbone (les sapropèles) se sont formés au fond de la Méditerranée orientale entre 8970 et 7960 ans avant le temps présent (BP). Il y a eu un épisode comparable entre 11 760 et 10 440 BP. Ces dépôts sont interprétés comme l'évidence d'une arrivée massive d'eau douce en surface, via le Nil. Ce déluge en deux temps est probablement dû à des périodes pluviales qui ont affecté la zone équatoriale. Vous avez étudié l'évolution du climat au Sahara depuis cette période humide. Comment avez-vous été amené à conduire ces recherches ?

Nous avons travaillé sur deux voies de recherche. L'une est la distribution des sites préhistoriques, trouvés durant trente ans de recherche en passant beaucoup de temps sur le terrain, en les utilisant comme indicateurs de climat parce que l'homme est un indicateur de climat très sensible, surtout au Sahara car s'il n'y a pas d'eau, il n'y a pas d'hommes. C'est un repérage très facile mais efficace. On peut continuer à survivre un peu en creusant des puits, mais après la fin des pluies il faut partir. L'existence, ou la non existence, des sites sont de bons indicateurs du mouvement des pluies, d'abord du sud vers le nord et ensuite, après le début de l'aridification, dans l'autre direction, du nord vers le sud, dans les régions où l'on trouve encore des gens aujourd'hui¹.

L'autre voie de recherche, ce sont les sites exceptionnels comme ce lac Yoa situé dans le nord-est du Tchad, entre les massifs montagneux du Tibesti et de l'Ennedi. Il a été trouvé en octobre 1914 par la mission militaire



Lac Yoa,
Ounianga Kebir,
Tchad

du commandant Jean Tilho, mais depuis il n'y a pas eu de recherches sur cette région, à l'exception d'une étude archéologique de M. Arkell et d'une étude sur la géographie régionale de M. Capot-Rey. Il n'y a pas eu d'autres recherches à cause de la situation assez difficile au niveau de la sécurité. Ce site nous y sommes allés en janvier 1999 et là, avec un petit bateau gonflable, j'ai pris le premier échantillon au fond du lac à 25 mètres, ne connaissant la profondeur, mais je suis arrivé à extraire

1. R. Kuper et S. Kröpelin : Climate-Controlled Holocene Occupation in the Sahara: Motor of Africa's Evolution, *Science*, **313**, 803-807, 2006 (11 août).



une carotte d'environ un mètre de long, repartie dans l'eau ensuite à cause des vagues, mais cela m'a permis de me rendre compte que les sédiments présentaient des couches très fines probablement annuelles, et on le sait maintenant, même sub-annuelles, c'est-à-dire que pour toutes les années passées, il y a une couche déposée en hiver et une autre déposée en été. Ce sont des dépôts « varvés » et c'est ce que l'on peut espérer de mieux pour faire de la paléo-climatologie !

Cette autre technique de recherche couvre seulement les 6 000 dernières années, moins que les sites préhistoriques qui remontent à 12 000 ans. Le plus important c'est d'aller plus loin, de récupérer des sédiments plus profonds et j'ai l'intention de retourner là-bas bientôt. Si l'on réussit, on aura une archive climatique complète, à l'échelle sub-annuelle, pour les 12 000 dernières années et ce sera l'archive climatique la plus complète et la plus détaillée pour



tout le Sahara et peut-être même pour tout le continent africain.

Quels sont les phénomènes climatiques qui influencent les précipitations ?

La communauté scientifique est aujourd'hui plus ou moins d'accord sur le fait que ce sont les changements dans le système des moussons, qui ont poussé l'humidité des océans beaucoup plus loin à l'intérieur, au centre du continent, qu'aujourd'hui. Avec la déglaciation, il y a eu un réchauffement de la Terre, et en même temps plus d'évaporation de l'eau sur les océans et des températures plus élevées sur le continent qui ont contribué à renforcer le système des moussons. C'est peut-être ce que l'on voit aujourd'hui avec le réchauffement climatique engendré par les activités humaines : depuis 20 ans dans les régions du Sahara où il n'y a personne, pas même des nomades, on trouve très nettement des zones un peu plus vertes, un peu plus humides. Les moussons viennent surtout de l'Atlantique et, pour les régions plus orientales du Sahara aussi de l'Océan indien. Les systèmes climatiques en provenance de l'ouest semblent responsables du changement de climat au Sahara septentrional.

Quelles sont les informations qu'apporte l'étude des sédiments du Lac Yoa ?

Il y a beaucoup de choses dans les dépôts ! Cela commence par les poussières, puis les pollens et les restes d'insectes qui ont vécu à la surface de l'eau. Le problème bien sûr, c'est que nous n'avons qu'une carotte de moins de 10 cm de diamètre et les couches ont en moyenne une épaisseur d'un millimètre et demi ! On n'a pas assez de matériel pour analyser tout ce qu'il y a dedans ! Alors, on s'est concentré sur la poussière, ensuite sur les pollens, puis sur les diatomées et les restes d'insectes (chironomides). On a fait des analyses granulométriques, des analyses minéralogiques et géochimiques, des analyses isotopiques, des analyses optiques pour voir le changement d'aspect des couches, et comme cela on a abouti aux résultats, encore partiels, publiés dans l'article de *Science* en mai 2008². On a surtout insisté sur l'histoire terrestre, c'est-à-dire sur les pollens. Mais d'autres articles vont être publiés bientôt et placer le lac Yoa dans un contexte plus saharien, alors que nos premiers résultats devraient intéresser plutôt les modélisateurs du climat. Evidemment il faut faire la différence entre les signaux climatiques qui proviennent de l'environnement immédiat de ce paysage qui était beaucoup plus humide et plus vert, ce que l'on sait depuis longtemps, et les informations sur les rapports avec l'eau souterraine et les changements en fonction de la salinité. Pour la paléoclimatologie, on est plus intéressé par les

2. S. Kröpelin et al : Climate-Driven Ecosystem Succession in the Sahara: The Past 6000 Years, *Science*, **320**, 765-768, 2008 (9 mai).



signaux terrestres que par les signaux aquatiques. Ce lac Yoa se trouve dans une situation extrêmement isolée. Les réserves d'eau douce souterraines du Sahara, ont fait l'objet de nombreuses recherches menées de 1980 à 1995 par les universités de Berlin. On sait maintenant que les aquifères supérieurs ont été rechargés durant la période pluvieuse de l'Holocène inférieur et moyen. Les niveaux étaient proches de la surface et même ils ont provoqué la formation des lacs. L'aquifère autour du Lac Yoa est très rempli, d'ailleurs alimenté aussi par les pluies qui tombent sur le Tibesti. L'évaporation potentielle dans le lac est annuellement de plus de six mètres, ce qui augmente la salinité, mais ceci est compensé par l'aquifère souterrain depuis plus de 4 000 ans, sinon le lac aurait disparu comme beaucoup d'autres au Sahara !

Vous avez trouvé que l'évolution, avec le temps, de la couverture végétale était progressive et qu'il n'y avait pas de traces de ruptures brutales ?

Beaucoup de chercheurs français ont travaillé au Sahara, comme mon ami Théodore Monod. Personne n'a cru que le dessèchement s'était produit en quelques dizaines d'années, mais l'école anglo-saxonne, quelquefois composée de spécialistes qui n'ont jamais visité le Sahara, a répandu l'idée, surtout à partir de l'analyse de poussières tombées sur l'Atlantique, d'un phénomène abrupt survenu en quelques années et qui s'appuie en particu-

lier sur la séquence sédimentaire obtenue sur le site 658 de l'Ocean Drilling Program, publiée en 2000. Il faut se souvenir que l'Afrique est un continent de 30 millions de km² qui ne peut changer d'un seul coup, sauf catastrophe du genre d'un impact météoritique ! On n'avait pas, il est vrai, de mesures continues de l'évolution des climats au cœur du continent africain, mais maintenant, ce n'est plus le cas ! On observe un changement très graduel des conditions humides vers les conditions sèches, ce qui contredit absolument certaines théories très répandues dans la littérature scientifique.

Quelles différences entre la partie est et la partie ouest du Sahara ?

Le Sahara est comme un continent et, comme le disait Théodore Monod, plus on y va et plus on se rend compte qu'on le connaît peu, une vie n'y suffit pas. Il y a beaucoup de Saharas, et il y a de grandes différences entre le nord, le sud, le centre, l'est et l'ouest, mais si on pense à un paysage relativement homogène, c'est le Sahara quand même ! Les modélisateurs disent que peut être nous avons raison au Sahara oriental, parce que nos données expérimentales ne viennent pas d'un ordinateur, d'un modèle très simplifié... mais dans l'ouest, disent-ils, il y a une autre histoire climatique. Il est très difficile d'imaginer une coupure en deux du Sahara, à l'est une transition climatique graduelle vers les conditions arides, à l'ouest un changement abrupt,



et de trouver une explication climatologique pour une telle différence! Il n'y a pas l'équivalent du Lac Yoa pour le Sahara occidental, mais il y a quand même les données de Nicole Petit-Maire qui montrent qu'il n'y a pas eu de dessèchement brutal, mais un décalage de zones, avec des pluies qui disparaissaient progressivement vers le sud à la fin de la période humide. J'ai repéré quelques sites où l'on peut espérer trouver des dépôts, pas aussi détaillés que ceux du Lac Yoa, mais quand même suffisants pour permettre d'évaluer l'évolution du climat près de la côte atlantique. C'est du travail pour les années qui viennent. J'espère que nous pourrions montrer que l'évènement climatique catastrophique à l'ouest est un mythe également! Aujourd'hui les modélisateurs construisent leurs modèles *a priori* sans toujours disposer de mesures expérimentales³! ■

« *Tout passe et se transforme. Le désert aussi. Rien n'est permanent, ni la forme des montagnes, ni celle de notre crâne, ni même celle des constellations, ni la limite des terres et des mers. Tout change. Pourquoi le désert ferait-il exception ?* »

Théodore Monod
L'Hippopotame et le philosophe

Théodore Monod, né en 1902, a débuté sa carrière de naturaliste au Muséum comme assistant au Laboratoire des pêches et productions coloniales d'origine animale. C'est à ce titre qu'il effectua en 1922 une première mission sur les côtes de Mauritanie. Au terme de son séjour, il choisit de regagner Dakar non pas par bateau, mais par voie de terre, à dos de dromadaire. Il sera dès lors partagé entre deux océans : celui des profondeurs, de la verticalité, qui lui livrera en abondance poissons et crustacés et celui des sables et de l'horizontalité, qui lui fournira les rares trésors des milieux arides ou désertiques. Passer de la mer au désert, du désert à la mer, changer d'océan fut la démarche de Théodore Monod : « qu'il soit d'eau salée, de sable ou de cailloux, c'est toujours un océan. Et voilà pourquoi, à les avoir vécues tour à tour, on découvre tant de points communs entre la vie du marin et celle du saharien, une si secrète et profonde parenté ».

En 1927, Théodore Monod participe comme naturaliste à la mission Augières-Draper organisée par la Société de géographie et traverse l'Afrique d'Alger à Dakar par le Hoggar. Il ne cessera dès lors de parcourir le Sahara en tous sens. Parmi ses nombreuses méharées, il faut noter la série de ses explorations du Majâbat al-Koubrâ à la limite de la Mauritanie et du Mali avec une traversée à dos de chameau de 900 km sans point d'eau, ainsi que ses nombreuses explorations en Mauritanie à la recherche de l'hypothétique météorite de Chinguetti. Dans le domaine de la botanique, ses *Contributions à l'étude du Sahara Occidental*, ses *Études sur la flore et la végétation du Tibesti*, sa série de notes sur *Les fruits et les graines de Mauritanie* sont autant de chapitres ajoutés à la flore du Sahara. Mais il a récolté des plantes jusque dans les régions désertiques d'Iran et du Yémen. Son travail fondamental et précurseur de 1956 intitulé *Les*

3. Une controverse s'est installée après la publication de l'article de S. Kröpelin et al, référence 1, voir l'article de V. Brovkin et M. Claussen et la réponse de Kröpelin et al : *Science*, **322**, 1326b, 2008 (28 novembre).

Théodore Monod, le naturaliste des déserts

Par **Philippe Taquet**

Membre de l'Académie des sciences,
professeur au Muséum national
d'histoire naturelle

grandes divisions chorologiques de l'Afrique fait le point des connaissances sur la phytogéographie africaine et a servi de base aux travaux plus récents.

Théodore Monod fut aussi un excellent géologue et paléontologue saharien. Dès 1930 alors qu'il effectue son service militaire comme chamelier de deuxième classe dans une compagnie méhariste, il découvre entre le Précambrien et le Primaire du nord-ouest de l'Ahaggar une série intermédiaire, qu'il nomme série pourprée et qui deviendra célèbre, car elle illustre le premier exemple connu de molasses panafricaines, accumulation extraordinairement puissante des sédiments arasés d'une énorme chaîne de montagnes, aussi importante que l'Himalaya et aujourd'hui disparue. Il étudiera ensuite les falaises de l'Adrar mauritanien pour en donner la succession stratigraphique et y décrire des stromatolithes précambriens, masses calcaires à structures laminaires, fruit de la consolidation de boues fines par des filaments d'algues bleues associées à des bactéries; il se passionnera pour le complexe concentrique des Richat en Mauritanie qu'il avait découvert en 1934, structure géologique annulaire surprenante, formée de sédiments du Précambrien et renfermant des roches siliceuses à micro-organismes unicellulaires primitifs; en 1934 encore, son œil exercé lui permettait de découvrir, dans les auréoles tassiliennes de l'Ahnet, le Gothlandien schisteux à graptolithes, de proposer dès 1937 grâce à ces datations un essai de synthèse de la structure du Sahara occidental qui demeure valable et dont toutes les cartes géologiques actuelles tiennent compte. Devaient suivre les découvertes de plantes carbonifères dans le Westphalien de Taoudenni, de faunes dévoniennes à goniatites et à fusulinelles dans l'erg Chech.

Théodore Monod fut aussi un découvreur de sites préhistoriques: riches stations de galets aménagés du début du Quaternaire dans l'Adrar mauritanien et dans le nord

du Mali, nombreuses stations à bifaces et hachereaux de l'Acheuléen des chasseurs du Paléolithique, squelette de l'homme d'Asselar au nord du Mali, témoignage de la présence dans le Sahara de populations n'existant actuellement que dans la moitié sud de l'Afrique et enfin relevés de très nombreuses gravures et peintures rupestres réalisées par les populations pastorales du néolithique.

Théodore Monod, qui dirigea de 1938 à 1964 l'Institut français d'Afrique Noire, devenu l'Institut fondamental d'Afrique Noire a été un grand artisan du progrès de la connaissance de l'Afrique et il fut considéré par tous les Africains, au premier rang desquels figurent Léopold Sédar Senghor et Hamadou Hampâté Bâ, comme un des leurs.

Membre honoris causa, membre ou correspondant de nombreuses Académies et de sociétés savantes en France et à l'étranger, Théodore Monod fut lauréat de l'Académie des sciences à quatre reprises; il reçut la grande médaille d'Or de la Société de Géographie, la médaille d'Or de la Royal Geographical Society et celle de l'American Geographical Society. Il était Commandeur de la Légion d'honneur, de l'Ordre national du Sénégal et du Mérite Saharien.

Au terme d'une vie exceptionnellement féconde et généreuse, Théodore Monod s'en est allé le 22 novembre 2000 pour son ultime méharée. Il nous a laissé une oeuvre scientifique immense et une série d'ouvrages instructifs et savants, drôles et espiègles, poétiques et humanistes: *Méharées*, *L'Hippopotame et le philosophe*, *L'Émeraude des Garamantes*, autant de témoignages précieux d'un homme original, d'un naturaliste des déserts qui fut, ainsi que j'eus l'occasion de lui dire, le seul représentant d'une espèce unique, Monod-spécifique ■

Les références sont sur le site de l'Académie des sciences: www.academiedessciences.fr

L'Espace méditerranéen de la science

Par **André Capron**¹
et **Jacques Fröchen**²

1. Membre de l'Académie des sciences, directeur honoraire de l'Institut Pasteur de Lille.
2. Secrétaire général du GID, adjoint au délégué aux relations internationales de l'Académie des sciences.



Au-delà des progrès spécifiques souvent spectaculaires qu'elle a connus, la science a acquis à la fin du XX^e siècle deux dimensions nouvelles :

- celle de l'affirmation du rôle moteur essentiel des sciences dans le développement économique et social et la construction encore préliminaire des sociétés du savoir. De Dubaï à Shanghai, de Pretoria à Tallinn, les rapports nouveaux entre la science et le développement ont conféré au triangle d'or que constituent Formation – Recherche – Innovation une importance stratégique particulière ;
- celle des rapports nouveaux entre la science et la société : fondée sur une prise de conscience – encore partielle – que le partage du savoir et le développement scientifique ne peut plus reposer sur des pratiques de *marchandisation* passive mais sur des stratégies d'appropriation intégrant les spécificités socio-culturelles.

À ce titre, au-delà de l'évidente universalité de la connaissance, l'intégration de ses composantes ou dimensions régionales est une condition essentielle de leur appropriation et de leur diffusion.

S'appuyant sur les technologies et les outils modernes de communication, ces stratégies visent à rapprocher, dans une même finalité de progrès, de mieux-être et d'intégration sociale, le monde de l'éducation et les structures communautaires et familiales.

Dans ce contexte général, et dans plusieurs pays (États-Unis, Royaume-Uni, Pays-Bas, Italie, etc.), le rôle des académies est apparu comme un élément important

d'animation et de coordination des réflexions interdisciplinaires sur les grands enjeux du développement. Garanties par essence, de l'excellence scientifique, carrefours naturels du dialogue interdisciplinaire, mais aussi reflets des dimensions socioculturelles nationales et régionales, les académies, par leur indépendance politique et économique, leur autonomie et leur légitimité, constituent des lieux privilégiés d'échanges entre la science et l'action politique, notamment au plan international.

L'émergence du concept de « diplomatie d'influence » a naturellement conduit à faire de la science, domaine jusqu'ici peu privilégié du rayonnement culturel, un enjeu important de l'influence internationale de nombreux pays industrialisés.

Dans le même temps, le poids croissant des grands enjeux du développement (agriculture, alimentation, santé, énergie, environnement, etc.) et l'irruption spectaculaire de quelques priorités essentielles : pandémies (VIH – SARS), sécurité alimentaire, ressources hydriques, par exemple, ont particulièrement conduit à de nouvelles approches *intégratives* des stratégies de développement. Sur ces bases naissait, en 2005, le concept du Groupe Inter-académique pour le Développement (GID) reposant sur trois grands principes d'actions :

- l'adaptation du savoir et de sa pratique aux réalités du terrain ;
- l'appropriation des connaissances, finalités essentielles de toute stratégie d'éducation et de développement ;
- le caractère intégré du savoir associant aux connaissances scientifiques et techniques interdisciplinaires, les dimensions économiques, juridiques et socioculturelles de leur application.

Initialement constitué d'un noyau fondateur de cinq académies nationales : Académie des sciences, Académie des sciences morales et politiques, Académie nationale de médecine, Académie d'agriculture de France, Académie des technologies, le GID a vu se joindre à lui l'Académie dei Lincei (Italie), la Real Academia de Ciencias (Espagne), l'Académie Hassan II des sciences et techniques (Maroc), l'Académie des sciences du Sénégal. À ce jour, 17 académies de la région méditerranéenne ont manifesté leur souhait d'association.

Dans une première étape, le GID s'est essentiellement consacré à la promotion de l'éducation des femmes à la santé (Women Health Education Programme -WHEP), aux stratégies éducatives (Avicenne), à la promotion de l'excellence des cadres scientifiques et techniques (Programme « Sciences, Métiers, Sociétés »).

En 2008, s'appuyant sur la participation importante d'académies de la région méditerranéenne, l'action du GID s'est particulièrement concentrée sur le développement d'un *Espace méditerranéen de la science* et la création du programme *Parmenides*, dont deux événements majeurs ont marqué la naissance : d'une part l'organisation d'une première rencontre scientifique méditerranéenne à Paris du 24 au 26 juin 2008 ; d'autre part, l'organisation d'un réseau interacadémique méditerranéen (Euro Mediterranean Academic Network - EMAN), premières étapes vers la création d'un Espace méditerranéen de la Science dont le Programme *Parmenides* constitue le fer de lance.

Cette première conférence « Vers un Espace méditerranéen de la science » a réuni à l'Institut de France du 24 au 26 juin 2008, 120 participants représentant 20 pays riverains de la Méditerranée et 17 académies des sciences de ces pays.

Cette rencontre a particulièrement relevé la double identité de la région méditerranéenne :

- comme conservatoire biogénétique unique au monde, recueillant la diversité culturelle et biologique au cœur des préoccupations de survie de l'humanité ;
- comme laboratoire exemplaire de codéveloppement de valeur universelle reposant sur des composantes spécifiques de sociabilité.

L'ensemble des ateliers a souligné la nécessité de promouvoir en Méditerranée une réflexion commune et des actions concrètes dans trois domaines d'application :

- la sécurité alimentaire (qualitative et quantitative) dans des marchés en transition vers un monde globalisé ;
- la préservation et la gestion des ressources halieutiques et de l'environnement marin ;
- la coordination des initiatives relatives au climat et à ses changements globaux.

Les enjeux sous-jacents à ces réflexions et pistes d'actions communes concerneront également le domaine de la santé et de ses priorités spécifiques en Méditerranée. La conférence de Rome consacrée, sous le titre général « Sciences et Santé » concernera trois thèmes essentiels en Méditerranée : *Maladies génétiques, Environnement et santé, Épidémiologie comparative*. Organisée conjointement sous le parrainage du GID avec l'Académie des sciences de France et l'Académie nationale de médecine, par l'Accademia dei Lincei, la Bibliothèque Alexandrine et l'Académie Hassan II des sciences et techniques du Maroc, cette rencontre marquera la deuxième étape de la construction du programme *Parmenides*.

La troisième étape sera constituée par l'organisation de la conférence *Diversité biologique et diversité culturelle*, prévue à Alexandrie au printemps 2010.

Par ailleurs, la première assemblée constitutive du Réseau inter-académique sera accueillie en novembre 2009 à l'Institut de France et sera consacrée au thème de l'eau en Méditerranée, ressources et qualité. La première conférence, qui constitue l'étape initiale espérée de *l'Espace méditerranéen de la Science*, a été marquée, au-delà de ses dimensions scientifiques et techniques, par l'expression d'une volonté unanime de solidarité de projets et d'un partenariat permanent et sans exclusive, de coopérations scientifiques ainsi que d'intégration de la science dans les réalités humaines et sociales de la région.

Sa réussite a illustré le rôle fédérateur que peuvent jouer les académies et parfaitement légitimé les missions du

Groupe Inter-académique pour le Développement (GID), animateur et coordinateur d'actions prévues par les universités et les organismes de recherche.

Les dimensions indispensables de formation et d'innovation technologique, accompagnent naturellement les conclusions de cette première conférence qui constitue le premier socle du programme *Parmenides*.

Les missions essentielles du programme *Parmenides*, qui bénéficie du parrainage et du soutien de l'Unesco, visent à promouvoir et renforcer l'identité scientifique de la région méditerranéenne par l'émergence de jeunes académies et le soutien à leur apporter. La récente création de l'Académie des sciences du Liban constitue, à cet égard, un premier succès significatif.

Parmenides entend jouer, au-delà de ses stratégies de formation, un rôle de pivot dans l'espace méditerranéen en renforçant, par l'animation d'un réseau de recherche scientifique et technologique, la collaboration et les échanges permanents, et en tenant compte des priorités définies par les pays eux-mêmes : l'agriculture, l'environnement et le développement durable, l'eau, la santé, les multiples aspects de la diversité, notamment biologiques et culturels, constitueront les thèmes des réseaux de recherche en cours de constitution.

Les enjeux de cette initiative sont considérables. La région méditerranéenne, en dépit de ses richesses humaines, de son passé culturel et scientifique, ne représente actuellement que 4 % des échanges mondiaux et 2 % des investissements. Les investissements recherche et développement ne représentent, en particulier, que moins de 1 % des investissements mondiaux. Les brevets ne représentent que moins de 0.5 %.

Il est clair que les progrès durables ne peuvent être que le fruit d'une union, pragmatique et stratégique, de projets permettant de faire de cette région




Journées organisées en collaboration avec la Fondation Maison des Sciences de l'Homme et bénéficiant du soutien du Ministère des Affaires Étrangères & Européennes et de l'Union pour la Méditerranée ainsi que du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, dans le cadre de la préparation de la Présidence française de l'Union européenne.

Avec le concours de : l'Agence Inter-établissements de Recherche pour le Développement (AIRD), du Centre International des Hautes Etudes Agronomiques (CIHEAM), du centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), du Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), de la Commission Nationale Française pour l'UNESCO (CNF UNESCO), du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), de la Conférence des Présidents d'Universités (CPU), de l'Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer (IFREMER), de l'Institut National de Recherche Agronomique (INRA), de l'Institut National des Sciences de l'Univers (INSU), de l'Institut Océanographique de Monaco (Fondation Albert I^{er}) et de Plan Bleu.

*Rencontre Scientifique Méditerranéenne
Mediterranean Scientific Conference*

*Paris, 24-26 juin 2008
Institut de France*



l'un des plus grands laboratoires de codéveloppement du monde. Le but à atteindre repose sur la nécessité de tisser des solidarités par des actions concrètes, et d'accompagner la création de l'*Espace méditerranéen de la science* par des programmes ciblés de formation adaptés aux enjeux du développement. À cet égard, organiser avec l'aide des académies et autour des chaires Unesco, un réseau méditerranéen de partage du savoir et d'animation scientifique constituée, à moyen terme, un objectif majeur.

La création récente d'un portail de communication <http://g-i-d.org> constitue à cet égard un instrument efficace, propre à développer à la fois les interactions nécessaires entre les 19 académies qui composent le réseau EMAN (Euro Mediterranean Academic Network) et l'animation des réseaux thématiques de collaboration.

La participation essentielle des organismes de recherche qui ont soutenu l'organisation de la première conférence et contribué à sa réussite (AIRD -Agence inter-établissements de recherche pour le développement-, CIHEAM -Centre international de hautes études agronomiques méditerranéennes-, Cirad -Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement-, Cnes - Centre national d'études spatiales-, CNRS - Centre national de la recherche scientifique-, Ifremer - Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer -, Inra - Institut national de recherche agronomique-, Insu - Institut national des sciences de l'univers-, Institut océanographique de Monaco, Plan Bleu, associés à la CPU (Conférence des présidents d'université) et à la Commission nationale française de l'Unesco - CNFU -), cette participation, donc, permet la structuration, autour de la plate-forme du GID, des trois premiers réseaux méditerranéens : sécurité alimentaire et développement agricole, ressources halieutiques et environnement marin, changements climatiques et adaptations.

Le développement de liens interactifs forts, avec l'Unesco, le ministère des Affaires étrangères et européennes, la Mission de l'Union pour la Méditerranée, l'Agence française pour le développement, contribuent à faire naturellement du GID une plate-forme de dialogue et de réflexion sur les grands enjeux du développement scientifique de la région méditerranéenne.

À cet égard, la perspective récemment ouverte d'un partenariat actif avec l'Unesco donne une dimension nouvelle aux objectifs originaux du GID.

Utiliser la dynamique politique encore modeste mais réelle du projet d'*Union pour la Méditerranée*, pour y insérer l'indispensable dimension fédératrice de la

science et les potentiels de progrès social et de paix qu'elle représente, est à court terme l'un des objectifs de ce nouveau mouvement international.

Composante désormais essentielle du dialogue culturel, la science se doit, au-delà de ses finalités spécifiques et de ses exigences propres, d'accompagner les inéluctables mutations sociopolitiques qui touchent le monde en développement et les régions émergentes.

Sans prétendre intervenir dans des domaines politiques prioritaires qui sont hors de son champ de compétences, la science et la communauté scientifique qui la représente, peut être une composante importante des grandes stratégies politiques de développement.

Constatons avec regret, que ces dimensions sont rarement prises en compte tant dans leurs objectifs concrets de développement régional (traité de Barcelone, projet *Union pour la Méditerranée*) que dans leurs perspectives à long terme de structuration des sociétés émergentes.

L'un des objectifs essentiels du GID est, en s'insérant dans ce mouvement international de la science, et par la légitimité que lui confèrent les académies qui le constituent, de créer un courant d'initiatives qui anime et fédère les projets de développement scientifique de la région méditerranéenne, et d'y créer un véritable mouvement international de la science ■

Les grandes avancées scientifiques françaises présentées par leurs auteurs

L'Académie des sciences consacre, depuis quatre ans, une de ses séances publiques annuelles à la présentation des six meilleurs articles publiés, dans l'année, par des jeunes chercheurs dans les plus prestigieuses revues internationales. Le nombre très élevé et la qualité des articles reçus par le jury sont impressionnants. Ils apportent une réponse éclatante et sans appel à tous ceux qui doutent encore de la qualité des recherches françaises en biologie.

Cette initiative, conçue par Pascale Cossart, Membre de l'Académie des sciences, a deux buts principaux : créer ou réactiver des échanges entre l'ensemble de la communauté scientifique française et l'Académie des sciences et renforcer ainsi la place et le rôle de celle-ci dans le paysage scientifique français ; valoriser de jeunes chercheurs engagés dans une carrière de recherche et leur donner une occasion originale de se faire connaître.

Le programme de la séance du mardi 9 juin 2009 a montré que la France a franchi cette année des avancées majeures aussi bien dans le domaine des cellules souches qu'en microbiologie fondamentale, en neurobiologie, en biologie du développement, en biologie des plantes sans oublier les maladies graves comme le diabète...

- *Structuration à grande échelle du chromosome du colibacille : mécanisme et raison d'être* par Romain Mercier et son directeur de recherche Frédéric Boccard, Centre de génétique moléculaire, CNRS, Gif-sur-Yvette.
- *Inaction du chromosome X et développement embryonnaire : les liens se resserrent enfin* par Pablo Navarro et son directeur de recherche Philip Avner, Unité de génétique moléculaire murine, Institut Pasteur, Paris.
- *Un mécanisme conservé à la base de la découpe des feuilles* par Thomas Blein et son directeur de recherche Patrick Laufs, Laboratoire de biologie cellulaire, Inra, Versailles.
- *Des cellules spécialisées redeviennent des cellules souches* par Vilma Barroca et son directeur de recherche Pierre Fouchet, Unité mixte Inserm U 967 - CEA, université Paris 7, Fontenay aux roses.
- *Trafic insoupçonné des récepteurs neuronaux* par Laurent Groc et son directeur de recherche Daniel Choquet, UMR 5091 - CNRS, université Bordeaux 2.
- *La génétique de la glycémie à jeun pour comprendre le diabète de type 2* par Nabila Bouatia-Naji et son directeur de recherche Philippe Froguel, Génomique et physiologie moléculaire des maladies métaboliques, CNRS, Lille ■

Jumelages Parlementaires / Membres de l'Académie des sciences / Chercheurs



Le Président de l'Assemblée nationale, Bernard Accoyer, entouré par les Membres de l'Académie des sciences, les jeunes chercheurs et les Parlementaires en mars 2009.

La troisième édition des jumelages réunissant des Parlementaires, des Académiciens et des jeunes chercheurs s'est ouverte en mars 2009.

En 2005, l'Académie des sciences et l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (OPECST), avaient décidé la création de « Jumelages Parlementaires - Membres de l'Académie - Chercheurs » afin de jeter des passerelles entre les mondes scientifique et politique, pour :

- permettre aux Députés et Sénateurs de mieux connaître le milieu de la recherche à travers des contacts personnels et des visites de laboratoire,
- contribuer à la formation civique des chercheurs en leur faisant découvrir la réalité du travail parlementaire aussi bien à Paris que dans les circonscriptions ou les départements,
- instituer un dialogue contribuant à favoriser la relation entre Science et Société.

Douze jumelages sont en place pour cette troisième session 2009. Une partie des Parlementaires participant à cette session est composée de membres de l'OPECST ; l'autre, de Parlementaires non membres de l'OPECST qui se sont portés candidats. Le Bureau de l'Académie a choisi douze Académiciens parmi les volontaires. Les Académiciens ont à leur tour associé un de leurs jeunes collaborateurs pour les accompagner tout au long de cette année.

Les scientifiques ont été reçus au Sénat et à l'Assemblée nationale les 10 et 11 mars 2009. Ces journées ont été unanimement appréciées et paraissent pleines de promesses.

Les visites des Parlementaires dans les laboratoires d'une part, et des scientifiques dans la circonscription des Parlementaires d'autre part, auront lieu de mars à octobre 2009 ■

Information :

Dominique Meyer et Anne Bernard
disc@academie-sciences.fr

Les douze Membres élus en décembre 2008 ont été solennellement reçus sous la coupole de l'Institut de France le 16 juin 2009



Serge Abiteboul, élu dans la section des sciences mécaniques et informatiques. Né le 25 août 1953, directeur de recherche à l'INRIA (Institut national de recherche en informatique et automatique), Serge Abiteboul est un des informaticiens français les

plus connus dans le monde grâce à ses travaux sur la théorie des bases de données et leurs applications. Les résultats qu'il a obtenus influencent profondément les conceptions des chercheurs dans ce domaine et, au-delà, bénéficient à tous les utilisateurs d'Internet et des bases de données qui lui sont associées. Il a ainsi établi un pont entre la théorie des bases de données, dont il est l'un des principaux créateurs, ses applications industrielles et ses implications sociétales.

Par ses ouvrages de référence, il contribue à la formation de générations de jeunes informaticiens.



Yves Agid, élu dans la section biologie humaine et sciences médicales. Né le 13 novembre 1940, professeur honoraire des universités et praticien hospitalier, est spécialiste des maladies neurodégénératives. Médecin et chercheur, il en a étudié les causes,

les mécanismes ainsi que les manifestations cliniques, et a proposé de nouvelles thérapeutiques. Ses travaux de recherche, multidisciplinaires, ont été consacrés à l'étude des mécanismes de la mort cellulaire, et à leurs conséquences physiopathologiques avec, pour modèle essentiel, la maladie de Parkinson dont il a souligné la diversité. Il a notamment identifié des facteurs contribuant à la vulnérabilité et à l'apoptose des neurones, mis en évidence des mutations dans diverses affections neurodégénératives, décrit les mécanismes physiologiques et biochimiques à l'origine des symptômes moteurs cognitifs et psychiques dans ces maladies; mis au point de nombreuses thérapeutiques pharmacologiques et neurochirurgicales dans diverses affections neurologiques et psychiatriques résistant à toutes les thérapeutiques.

Yves Agid a joué un rôle essentiel dans la création de l'Institut du cerveau et de la moelle épinière, dont il assure la direction scientifique.



Françoise Barré-Sinoussi, élue dans la section biologie humaine. Née le 30 juillet 1947, est directeur de recherche à l'Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm) et professeur à l'Institut Pasteur de Paris où elle dirige

l'Unité de régulation des infections rétrovirales. Premier signataire de l'article princeps publié dans *Science* en 1983, décrivant un nouveau rétrovirus humain isolé à partir de cultures de lymphocytes T d'un ganglion d'un patient atteint d'un stade précoce du SIDA, Françoise Barré-Sinoussi a eu une part primordiale dans la caractérisation de ce virus, et des virus apparentés, ainsi que dans la démonstration de son mode d'action. L'analyse des mécanismes mis en jeu dans le contrôle ou l'échec de l'infection a représenté un thème majeur des recherches entreprises par Françoise Barré-Sinoussi et son groupe.

Françoise Barré-Sinoussi s'est constamment engagée sur le terrain dans le combat mené contre l'épidémie du SIDA. À travers les responsabilités internationales qu'elle a exercées à l'Institut Pasteur et à l'ANRS, où elle coordonne pour la France les sites du Cambodge et du Vietnam, elle s'est beaucoup investie dans des actions destinées à la création de centres de dépistage et de soin, à la formation de personnels, et à l'accès du plus grand nombre à la prévention et aux traitements anti-rétroviraux, dans les pays les plus pauvres.

Françoise Barré-Sinoussi est la première femme Prix Nobel Membre de l'Académie des sciences et de l'Institut de France.



Jean-Paul Behr, élu dans la section chimie. Né le 29 juin 1947, directeur de recherche au CNRS, dirige le laboratoire de Chimie génétique à l'université de Strasbourg.

Jean-Paul Behr est un acteur international majeur dans le domaine de la vectorisation des acides nucléiques en raison des résultats qu'il a obtenus en recherche fondamentale, et des applications de ses travaux dans le domaine biomédical. En pionnier, il a mis au point les premiers agents chimiques reproduisant les caractéristiques des particules virales, pour transférer des gènes dans le noyau des cellules animales. Ces vecteurs sont à la base de la thérapie génique, et plusieurs essais cliniques sont en cours dans le domaine du cancer et du SIDA. En 2001, Jean-Paul Behr a créé une société, Polyplus-transfection S.A., dédiée à la vectorisation de gènes et de siRNA, afin de valoriser le résultat de ses recherches.



Christian Bordé, élu dans la section physique. Né le 15 mars 1943, est directeur de recherche émérite au CNRS. D'abord expérimentateur en physique des lasers, Christian Bordé a inventé de nouvelles méthodes de spectroscopie laser à ultra-haute

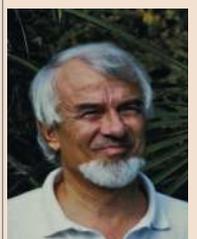
résolution qu'il a utilisées pour révéler de nombreux aspects fondamentaux liés à la symétrie et à la dynamique interne des molécules. Il a démontré le recul des

molécules sous l'action de la lumière laser et l'a mis en œuvre dans la conception de nouveaux interféromètres atomiques. Ces interféromètres permettent de mesurer la masse des atomes et de réaliser des horloges optiques et des capteurs gravito-inertiels de haute précision pour sonder l'espace-temps. Christian Bordé a consacré de nombreux développements théoriques à l'optique atomique et à la métrologie fondamentale.



Henri Décamps, élu dans la section biologie intégrative. Né le 18 décembre 1935, est directeur de recherche émérite au CNRS. Ayant consacré ses recherches aux échanges entre les écosystèmes d'eau courante et les écosystèmes terrestres voisins, il

a jeté les bases de l'étude de l'écologie des systèmes riverains fluviaux. Il a montré l'importance des zones rivulaires comme interface pour ces échanges et leur influence sur le fonctionnement écologique des rivières et sur la dynamique de leur biodiversité. Il a également pris une part importante dans le développement des deux notions phares de l'écologie du paysage, la notion de corridors et celle de connectivité. Ses travaux, dont l'originalité a été largement reconnue, se sont considérablement développés en France et dans le monde, l'amenant à s'engager dans de grands programmes nationaux et internationaux. Henri Décamps s'est également impliqué dans des programmes interdisciplinaires reliant les sciences de la nature et les sciences humaines.



Jean Dénarié, élu dans la section biologie intégrative. Né le 26 octobre 1940, est directeur de recherche émérite à l'Institut national de la recherche agronomique (INRA). Ses recherches sur la symbiose entre les légumineuses et des bactéries

fixatrices d'azote, les Rhizobium, ont abouti à la découverte majeure des facteurs "Nod". Ces signaux moléculaires, sécrétés par les Rhizobium, sont nécessaires pour la formation d'organes particuliers, les nodosités racinaires. Dans ces nodosités, les Rhizobium se multiplient et fournissent à la plante de l'azote assimilable qui représente la source principale de fertilisants azotés naturels de la planète. Les facteurs Nod constituent une nouvelle classe de régulateurs de croissance actifs chez les végétaux. Jean Dénarié a ensuite identifié une voie de transduction de signaux commune à deux associations bien différentes, la symbiose bactérienne fixatrice d'azote et la symbiose fongique endomycorhizienne, qui joue un rôle important dans la nutrition des plantes. L'ensemble de ses travaux a ouvert la voie à des applications agronomiques respectueuses de l'environnement.



Anne Ephrussi, élue dans la section biologie moléculaire. Née le 15 septembre 1955, est directrice de l'Unité de biologie du développement à l'European Molecular Biology Laboratory (EMBL) à Heidelberg. Après avoir obtenu des résultats importants

dans l'analyse de la transcription, Anne Ephrussi a étudié les déterminants cytoplasmiques du développement par des approches combinant la génétique, la biologie moléculaire et la biologie cellulaire. En abordant trois sujets interdépendants, la localisation cytoplasmique des ARN et leur traduction localisée, l'établissement de la polarité cellulaire sous-jacente à la localisation des ARN et la capacité d'une protéine à induire la lignée germinale, elle apporte un regard original sur les fonctions cellulaires. Ses travaux contribuent de manière importante à la reconnaissance de la localisation des ARN comme un facteur central pour le contrôle spatial et temporel de l'expression des gènes au cours du développement.

Anne Ephrussi ajoute à son activité de chercheur un engagement dans l'organisation de la science et dans la formation scientifique à l'échelle européenne.



Uriel Frisch, élu dans la section sciences mécaniques et informatiques. Né le 10 décembre 1940, directeur de recherche émérite au CNRS, est l'un des spécialistes internationaux de la mécanique des fluides, notamment de la turbulence

appliquée à l'astrophysique. Il a contribué, en France, au renouveau de l'intérêt porté à la mécanique des fluides en géophysique et astrophysique. Ses recherches ont porté sur le développement et l'utilisation d'outils relatifs à la dynamique non linéaire, à la théorie des processus stochastiques et au calcul scientifique intensif. Dans ce dernier domaine, il a joué un rôle central dans l'introduction en France des supercalculateurs, particulièrement pour la simulation numérique des écoulements turbulents.

Plus récemment, Uriel Frisch a abordé de façon originale un des défis actuels de la cosmologie, celui de la reconstruction des fluctuations de densité dans l'Univers jeune.



Claude Jaupart, élu dans la section sciences de l'univers. Né le 22 mai 1953, est professeur de géophysique à l'université Paris Diderot. Il a contribué à l'essor de la mécanique des fluides en Sciences de la Terre. Chercheur de renommée internationale

en volcanologie physique, il est un des spécialistes mondiaux des risques naturels d'origine géologique.

Les travaux de Claude Jaupart portent sur l'énergétique

et la mécanique des systèmes géologiques. Il a étudié plus particulièrement l'évolution thermique de la Terre, les caractéristiques de ses mouvements internes responsables de la dérive des continents, la structure thermique des continents jeunes et anciens, la physique des systèmes magmatiques et la dynamique des éruptions volcaniques.



Didier Roux, élu dans la section chimie. Né le 16 mai 1955, est le directeur de la recherche et de l'innovation du groupe Saint-Gobain.

Didier Roux a développé ses recherches à l'interface de la chimie, sa discipline d'origine, de la physique et de

la biologie, sur le thème général de la matière molle et plus particulièrement des tensioactifs en solution. Les résultats les plus marquants de ses premiers travaux sont la compréhension de la stabilité des microémulsions et la découverte expérimentale de l'existence des interactions d'ondulations et des "phases éponges" illustrant le comportement de surfaces flexibles soumises aux fluctuations thermiques. Passant à la physico-chimie hors d'équilibre, il a été un des premiers à étudier la rhéophysique des fluides complexes. Il s'est ensuite intéressé aux interactions entre particules colloïdales (virus, vecteurs synthétiques...) et cellules, avec la conviction que ce domaine de la biologie cellulaire peut bénéficier des connaissances accumulées sur la matière molle



Wendelin Werner, élu dans la section mathématique. Né le 23 septembre 1968, est professeur à l'université Paris-Sud à Orsay. Il est le premier mathématicien au monde travaillant dans le domaine des probabilités à avoir reçu la Médaille Fields qui lui

a été attribuée en 2006.

Il étudie des objets probabilistes tels que les marches aléatoires, le mouvement brownien, les modèles aléatoires sur réseau inspirés par la physique statistique (et en particulier les phénomènes de changement de phase), ainsi que leurs liens avec d'autres branches des mathématiques comme l'analyse complexe ou les équations d'évolution. Ses recherches le situent au cœur d'un mouvement scientifique important de notre époque concernant les probabilités et les relations entre mathématique et physique.

Il est aujourd'hui le Membre le plus jeune de l'Académie des sciences. ■

Comment Anders Lundberg¹ a renouvelé nos conceptions du contrôle nerveux de la motricité

Par **Emmanuel Pierrot-Deseilligny²**

1. Associé étranger de l'Académie des sciences, professeur émérite à l'université de Göteborg.
2. Professeur émérite à l'université Pierre-et-Marie-Curie.

Anders Lundberg (1920-2009) a complètement renouvelé les conceptions concernant la physiologie du contrôle nerveux de la motricité. Avant lui, prévalait l'idée que le cerveau élaborait dans le détail les commandes motrices et les transmettait telles quelles à la voie finale commune de toute activité motrice, à savoir les motoneurones de la moelle épinière (qui innervent les muscles). D'un autre côté, les circuits réflexes de la moelle épinière alimentés par de multiples afférences sensibles – issues des muscles, des tendons, des articulations et de la peau – étaient présumés ne servir qu'à l'exécution d'activités stéréotypées (retrait devant une stimulation menaçant l'intégrité du corps, par exemple). On admettait alors que chaque information était transmise aux motoneurones par un circuit propre dont les interneurons fonctionneraient comme de simples relais. Cette conception d'une motricité empruntant des circuits indépendants les uns des autres a été profondément changée par les découvertes majeures de Lundberg et de son école (car il a fait partager ses idées à de très nombreux scientifiques venus du monde entier). Trois concepts fondamentaux émergent de l'œuvre scientifique de Lundberg. 1- Les interneurons spinaux sont le siège d'une convergence de voies descendantes et d'afférences sensibles multiples : ce sont de véritables centres intégrateurs. 2- Le fonctionnement des circuits spinaux n'est pas déterminé par le seul "pré-cablage" des neurones qui les composent : sous l'influence des voies descendantes, il varie continuellement en fonction des besoins. 3- Au cours de la locomotion, il existe une activité programmée centralement de flexion-extension : Lundberg en a montré le support neuronal, et sa modulation par des réflexes à point de départ périphérique.



Capacité intégrative des interneurons

Lundberg et ses élèves ont démontré que virtuellement tout interneuron de la moelle épinière est le siège de projections, excitatrices et inhibitrices, provenant d'une grande variété de modalités sensibles. Lundberg, qui pensait toujours en termes fonctionnels, souligna que tout mouvement donne naissance à une modification de l'activité des récepteurs musculaires, tendineux, articulaires et cutanés. Il était donc sensé que ces différents récepteurs périphériques, qui procurent des informations sur le déroulement du mouvement, combinent leur action. Cela était réalisé au mieux par une convergence multimodale sur des interneurons communs. L'intérêt de centres intégrateurs situés près des motoneurons, mais distincts d'eux, tient au fait que la transmission de la commande descendante peut y être modulée par les afférences d'origine périphérique sans altérer l'excitabilité des motoneurons. Une intense inhibition (ou une intense excitation) de la population de motoneurons pourrait, en effet, la rendre transitoirement moins capable de répondre à d'autres influences cruciales pour le déroulement du mouvement en cours. D'éventuels processus de saturation se produisent ainsi en amont des motoneurons, et seule une commande mise à jour "updated" peut les atteindre. Les travaux de Lundberg dans ce domaine ont atteint leur apogée avec la description du système propriospinal cervical.

Il représente, à ce jour, le seul système d'interneurons spinaux dont on connaisse exactement les connexions (grâce à des enregistrements intracellulaires) et la fonction (grâce à des expériences comportementales pratiquées après diverses lésions spinales). Ce système, qui transmet la commande descendante pour les mouvements dirigés visuellement vers une cible, contient deux réseaux d'interneurons inhibiteurs. L'un, activé par les faisceaux descendants, focalise la commande avec finesse sur les muscles requis. L'autre, activé par les afférences périphériques, contrôle – via les afférences musculaires – la vitesse et la force du mouvement, et permet d'assurer – via les afférences cutanées – sa terminaison en temps utile (contact cutané avec la cible). La convergence de

faisceaux descendants multiples et d'afférences périphériques variées donnent au système propriospinal la possibilité de mettre à jour la commande afin de l'adapter à d'éventuels changements soudains et imprévus de l'environnement.

Circuits réflexes différents activés par les mêmes afférences périphériques

Le concept de circuits réflexes différents émergea de l'analyse par Lundberg des effets de la stimulation des afférences périphériques (appelées "FRA" pour "*Flexion Reflex Afferents*", afférences cutanées en particulier) qui déclenchent le classique réflexe de flexion. Il a montré que la stimulation de ces FRA, qui évoque une excitation des motoneurones des fléchisseurs chez l'animal "spinal aigu" (c'est à dire après section transversale récente de la moelle épinière au dessous du bulbe), produit, au contraire, leur inhibition après une section à un étage particulier du tronc cérébral alors que la moelle est intacte. Cela prouve que les mêmes afférences alimentent des circuits réflexes différents "*alternative pathways*", ayant des effets opposés sur les motoneurones. Ce concept de circuits différents alimentés par les mêmes afférences trouva son expression la plus achevée avec la démonstration que la DOPA (précurseur de la dopamine, neuromédiateur très répandu dans le système nerveux) supprime, chez l'animal "spinal aigu", le réflexe de flexion classique et révèle un réflexe à latence beaucoup plus longue empruntant un circuit spinal entièrement différent. Dans le même ordre d'idées, Lundberg et son équipe ont montré que la stimulation des voies descendantes issues des centres supérieurs (cortex cérébral moteur et divers noyaux du tronc cérébral) était capable de faire apparaître des réflexes spinaux, qui, sans cela, ne se manifestaient pas. Ces différents résultats amenèrent Lundberg à formuler une conception entièrement nouvelle des circuits de la moelle épinière, selon laquelle leur fonctionnement n'est pas figé par le "précablage" des neurones qui les composent. Au contraire, le cerveau par son action sur ces interneurones sélectionne à tout moment le(s) circuit(s) approprié(s) pour la régulation du mouvement voulu, tout en inhibant ceux qui n'y contribuent pas. Cette conception s'est avérée extrêmement féconde : tant chez l'animal que chez l'Homme, les élèves de Lundberg ont pu démontrer que la stimulation des mêmes afférences avait une action complètement différente (voire opposée) au cours d'activités motrices différentes.

Mécanismes sous-tendant la locomotion

Lundberg avait souligné que, puisque les muscles sont quasiment identiques chez les quadrupèdes et les bipèdes, les différences considérables que présentent leur locomotion devaient trouver leur origine dans une orga-

nisation différente des circuits de leur moelle épinière. Il vérifia cette hypothèse en montrant que le pattern des projections des fibres afférentes musculaires de gros calibre sur les motoneurones du membre postérieur du chat et du babouin avait évolué pour procurer l'assistance réflexe particulière adaptée à la locomotion de chaque espèce (ce qui a été ensuite confirmé chez l'Homme). Cependant, la contribution majeure de Lundberg à la compréhension des mécanismes nerveux sous-tendant la locomotion est venue de ses travaux sur les effets de la DOPA chez l'animal "spinal aigu", chez lequel la stimulation des FRA (voir ci-dessus) produit un réflexe de flexion ipsilatéral accompagné d'un réflexe d'extension contralatéral, tous deux de très longue latence. Dans certaines conditions, une alternance de mouvements de flexion et d'extension peut ainsi être enclenchée. Cela fournissait une base cellulaire pour les "*half-centres*" spinaux que Graham Brown avait postulés, au début du XX^e siècle, afin de rendre compte de cette alternance caractérisant la locomotion. En combinant les résultats obtenus avec la DOPA aux données cinématiques et électromyographiques enregistrées au cours de la marche, Lundberg souligna que le contrôle de la locomotion impliquait une interaction entre le programme centralement élaboré au niveau des "*half-centres*" et des réflexes d'origine périphérique procurant un "*timing*" individuel précis pour l'activation de chaque muscle.

Parce qu'il avait bousculé – parfois sans grands ménagements – les idées simplistes de certains de ses prédécesseurs, et même de certains de ses contemporains, Anders Lundberg s'était acquis, à une certaine époque, la réputation d'un penseur compliqué. Ce à quoi il avait l'habitude de répondre : "*ce n'est pas de ma faute si le système nerveux est complexe!*" ■

Références bibliographiques correspondant au texte d'AM Lézine page 3

- Armitage, S.J., Drake, N.A., Stokes, S., El-Hawat, A., Salem, M.J., White, K., Turner, P., McLaren, S.J. (2007). *Quaternary Geochronology* 2, 181-186.
- Bassinot, F., Labeyrie, L.D., Vincent, E., Quidelleur, X., Shackleton, N.J., Lancelot, Y. (1994). The astronomical theory of climate and the age of the Bruhnes–Matuyama magnetic reversal. *Earth and Planetary Science Letters* 126, 91–108.
- Beerling, D.J., Osborne, C.P. (2006). The origin of the savannah biome. *Global Change Biology*, 12, 2023-2031
- Berger, A., Loutre, M.-F. (1991). Insolation values for the climate of the last 10 million years. *Quaternary Science Reviews*, 297-317.
- Brovkin, V., Claussen, M., Petoukhov, V., Ganopolski, A. (1998). On the stability of the atmosphere-vegetation system in the Sahara/Sahel region. *Journal of Geophysical Research* 103 (D24), 31613–31624.
- Burns, S.J., Matter, A., Frank, N., Mangini, A. (1998). Speleothem-based paleoclimate record from northern Oman. *Geology* 26, 499-502.
- Cerling, T. E., Harris, J. M., MacFadden, B. J., Leakey, M. G., Quade, J., Eisenmann, V., Ehleringer, J. R. (1997). Global change through the Miocene/Pliocene boundary. *Nature* 389, 153-158.
- Claussen, M., Kubatzki, C., Brovkin, V., Ganopolski, A., Hoelzmann, P., Pachur, H.-J. (1999). Simulation of an abrupt change in Saharan vegetation in the Mid-Holocene. *Geophysical Research Letters* 26, 2037–2040.
- Dart, R.A. (1925). *Australopithecus africanus*: the man ape of South Africa. *Nature* 115, 195-199.
- deMenocal, P., Ortiz, J., Guilderson, T., Adkins, J., Sarnthein, M., Baker, L., Yarusinsky, P. (2000). Abrupt onset and termination of the African Humid period: rapid climate responses to gradual insolation forcing. *Quaternary science Reviews* 19, 346-361.
- Dupont, L.M., Leroy, S.A.G. (1995). Steps toward drier climatic conditions in northwestern Africa during the Upper Pliocene. In: Vrba, E., Denton, G., Burckle, L. et Partridge, T. (eds) *Paleoclimate and Evolution With Emphasis on Human Origins*, Yale University Press, New Haven.
- Fauquette S., Guiot J., Suc J.P. (1998). A method for climatic reconstruction of the Mediterranean Pliocene using pollen data. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 144, 1-2, 183-201.
- Faure, H. (1969). Lacs quaternaires du Sahara. *Mitt. Internat. Verein. Limnol.* 17, 131-146.
- Fleitman, D., Burns, S.J., Mudelsee, M., Neff, U., Kramers, J., Mangini, A., Matter, A., (2003). Holocene forcing of the Indian monsoon recorded in a stalagmite from Southern Oman. *Science* 300, 1737-1739
- Fleitmann, D., Burns, S.J., Mangini, A., Mudelsee, M., Kramers, J., Villa, I., Neff, U., Al-Subbary, A.A., Buettner, A., Hippler, D., Matter, A. (2007). Holocene ITCZ and Indian monsoon dynamics recorded in stalagmites from Oman and Yemen (Socotra). *Quaternary Science Reviews* 26, 1-2, 170-188.
- Gasse, F. (2000). Hydrological changes in the African tropics since the Last Glacial Maximum. *Quaternary Science Reviews* 19, 1-5, 189-211.
- Glennie, K.W., Singhvi, A.K. (2002). Event stratigraphy, paleoenvironment and chronology of SE Arabian deserts. *Quaternary Science Reviews* 21, 853-869.

- Goudie, AS., Colis, A., Stokes, S., Parker, A., White, K., al-Farraj, A., (2000). Latest Pleistocene and Holocene dune construction at the north-eastern edge of the Rub al Khali, United Arab Emirates. *Sedimentology* 47, 1011-1021.
- Ivory, S., Lézine, AM. sous presse. Climate and Environmental change at the end of the Holocene Humid Period: a pollen record off Pakistan. CR Geoscience.
- Jacobs, BF. (2004). Paleobotanical studies from tropical Africa: relevance to the evolution of forest, woodland, and savannah biomes. *Philosophical Transaction of the Royal Society of London B* 359, 1573-1583.
- Juyal, N., Singhvi, AK., Glennie, KW. (1998). Chronology and paleoenvironmental significance of Quaternary desert sediment in southeastern Arabia. In: Alsharan et al. (Eds.) *Quaternary Deserts and Climatic Change* pp. 315-325. Balkema, Rotterdam.
- Kröpelin, S., Verschuren, D., Lézine, AM., Eggermont, H., Cocquyt, C., Francus, P., Cazet, J., Fagot, M., Rumes, B., Russell, JM., Darius, F., Conley, DJ., Schuster, M., von Suchodoletz, H., Engstrom DR. (2008). Climate-Driven Ecosystem Succession in the Sahara: The Past 6000 Years. *Science* 320, 5877, 765 - 768
- Lézine, AM. (2007). Pollen records, postglacial. In Encyclopaedia of Quaternary Sciences, Scott A Elias ed., Elsevier. Vol. 4, 2682-2698.
- Hoelzmann, P., Jolly, D., Harrison, S.P., Laarif, F., Bonnefille, R., Pachur, H.-J., 1998. Mid-Holocene land-surface conditions in northern Africa and the Arabian Peninsula: A data set for the analysis of biogeophysical feedbacks in the climate system. *Global Biogeochemical Cycles* 12, 1, 35-52.
- Lézine, AM., Tiercelin, JJ., Robert, C., Saliège, JF., Cleuziou, S., Braemer, F., Inizan, ML. (2007). Centennial to millennial-scale variability of the Indian monsoon during the early Holocene from a sediment pollen and isotope record from the desert of Yemen. *Palaeogeography, Palaeoecology, Palaeoclimatology* 243, 235–249
- Liu, Z., Wang, Y., Gallimore, R., Gasse, F., Johnson, T., deMenocal, P., Adkins, J., Notaro, M., Prentice, I.C., Kutzbach, J., Jacob, R., Behling, P., Wang, L., Ong, E. (2007). Simulating the transient evolution and abrupt change of Northern Africa atmosphere–ocean–terrestrial ecosystem in the Holocene. *Quaternary Science Reviews* 26, 1818–183.
- McClure, H.A. (1976). Radiocarbon chronology of late Quaternary lakes in the Arabian Desert. *Nature* 263, 755-756.
- Moeyersons, J., Vermeersch, P. M., Van Peer, P. (2002). Cave deposits and their palaeoenvironmental significance during the last 115 ka, Sodmein Cave, Red Sea Mountains, Egypt. *Quaternary Science Reviews* 21, 7, 837-851
- Morley, RJ., Richards, K. (1993). Gramineae cuticle: a key indicator of Late Cenozoic climatic change in the Niger Delta. *Review of Palaeobotany and Palynology* 77, 119-127.
- Neumann, K. (1989). Holocene Vegetation of the Eastern Sahara : Charcoal from Prehistoric Sites. *African Archaeological Review* 7, 97-116.
- Osmond, JK., Dabous, AA. (2004). Timing and intensity of groundwater movement during Egyptian Sahara pluvial periods by U-series analysis of secondary U in ores and carbonates. *Quaternary Research* 61, 1, 85-94
- Pagani, M., Freeman, K.H., Artur, M.A. (1999). Late Miocene atmospheric CO2 concentrations and the expansion of C4 grasses. *Science* 285, 876-878.
- Petit-Maire, N., Delibrias, G. and Gaven, C., (1980), Pleistocene lakes in the Shati area, Fezzan (27°30' N), in Sarnthein, M., Seibold, E. and Rognon, P., eds., *Sahara and the surrounding seas*, Rotterdam (NL), Balkema, pp. 289-295.
- Poumot, C., (1989). Palynological evidence for eustatic events in the tropical Neogene. *Bulletin du Centre de Recherche et Exploration-Production Elf-Aquitaine* 13, 437-453.

- Preusser, F., Radies, D., Matter, A. (2002). A 160,000-year record of dune development and atmospheric circulation in Southern Arabia. *Science* 296, 2018-2020.
- Renssen, H., Brovkin, V., Fichet, T., Goosse, H. (2003). Holocene climate instability during the termination of the African Humid Period. *Geophysical Research Letters* 30, 1184.
- Sarnthein, M. (1978). Sand deserts during glacial maximum and climatic optimum. *Nature* 272, 43 – 46
- Schüster, M., Roquin, C., Düringer, P., Brunet, M., Caugy, M., Fontugne, M., Mackaye, H.T., Vignaud, P., Ghienne, J.F. (2005). Holocene Lake Mega-Chad palaeoshorelines from space. *Quaternary Science Reviews* 24, 1821-1827
- Shanahan, T.M., Overpeck, J.T., Wheeler, C.W., Beck, J.W., Pigati, J.S., Talbot, M.R., Scholz, C.A., Peck, J., King, J.W. (2006). Paleoclimatic variations in West Africa from a record of late Pleistocene and Holocene lake level stands of Lake Bosumtwi, Ghana. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 242, 3-4, 287-302
- Street-Perrott, F.A., Mitchell, J.F.B., Marchand, D.S., Brunner, L.S. (1990). Milankovitch and albedo forcing of the tropical monsoons: a comparison of geological evidence and numerical simulations for 9000 yr BP, *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 81, 407.
- Szabo, B.J., Haynes, C.V., Maxwell, T.A. (1995). Ages of Quaternary pluvial episodes determined by uranium-series and radiocarbon dating of lacustrine deposits of Eastern Sahara. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 113, 227-242.
- Van Campo, E. (1983). Paléoclimatologie des bordures de la mer d'Arabie depuis 150 000 ans. *Analyse pollinique et stratigraphie isotopique*. Thèse, Université Montpellier II, 114 p.
- Van Campo, E. (1991). Pollen transport into Arabian Sea sediments. In: Prell, W.L., Niitsuma, N., et al. (eds), *Proceedings Ocean Drilling Program, Scientific Results* 117, 277-281.
- Vignaud, P., Düringer, P., Taïso Mackaye, H., Likies, A., Blondel, C., Boissérie, J.R., de Bonis, L., Eisenmann, V., Etienne, M.E., Geraads, D., Guy, F., Lehmann, T., Lihoreau, F., Lopez-Martinez, N., Mourer-Chauviré, C., Otero, O., Rage, J.C., Schuster, M., Viriot, L., Zazzo, A., Brunet, M. (2002). Geology and paleontology of the Upper Miocene Toros-Menalla hominid locality, Chad. *Nature* 418, 151 - 155.
- Watrין, J., Lézine, A.M., Hély C. and contributors. Soumis. Plant migration and ecosystems at the time of the “green Sahara”. C.R. Geoscience.
- White, F. (1983). *La végétation de l'Afrique*. Paris, UNESCO
- Zachos, J. C., Shackleton, N.J., Revenaugh, J.S., Pälike, H., Flower, B.P. (2001). Climate Response to Orbital Forcing Across the Oligocene-Miocene Boundary. *Science* 292, 274-278.

Références bibliographiques correspondant au texte de S Cleuziou page 16

- V. G. Childe (1929). *The Most Ancient Near East: the Oriental prelude to European Prehistory* (Alfred A. Knopf ed.)
- S. Cleuziou (2002). *The Early Bronze Age of the Oman Peninsula: From Chronology to the Dialectics of Trade and State Formation*, in: S. Cleuziou, M. Tosi, J. Zarins (Eds.), *Essays on the Late Prehistory of the Arabian Peninsula*, Vol. Serie orientale Roma XCIII, pp. 181-227.
- S. Cleuziou, L. Costantini (1982). *A la recherche des oasis*, La Recherche, 137, 1180-1182

S. Cleuziou, M. Tosi (Eds.) (2007) *In the Shadow of Ancestors: the Prehistoric Foundations of Early Arabian Civilization* in Oman, Muscat: Ministry of Heritage and Culture

P. B. deMenocal (2001) *Cultural Responses to Climate Change during the Late Holocene*, *Science*, 292, 667 - 672

A. Miller Rosen (2007) *Civilizing Climate: Social responses to Climate Change in the Ancient Near East*, Altamira Press, Plymouth

Références bibliographiques correspondant au texte de P. Taquet page 24

Billard R. et Jarry I. (1997). *Hommage à Théodore Monod, naturaliste d'exception*. Ed. du Muséum National d'Histoire naturelle. 181p.

Hureau J.C et Escudier D. (2005). *Théodore Monod. 90 années de publications*. Ed. du Muséum national d'Histoire naturelle. 357p.

Taquet P. (2007). On camelback : René Chudeau (1864-1921), Conrad Kilian (1898-1950), Albert Félix de Lapparent (1905-1975) and Théodore Monod (1902-200) four French geological travellers cross the Sahara. In: *Four Centuries of Geological Travel: The Search for Knowledge on Foot, Bicycle, Sledge and Camel*. Geological Society of London, Special Publications, 287, 183-190.

Marvin U.B. (2007). Théodore André Monod and the lost *Fer de Dieu* meteorite of Chinguetti, Mauritania. In: *Four Centuries of Geological Travel: The Search for Knowledge on Foot, Bicycle, Sledge and Camel*. Geological Society of London, Special Publications, 287, 191-205