

EL NIÑO

Réalité et fiction

Bruno Voituriez Guy Jacques

COI Forum Océans | Éditions UNESCO

COI Forum Océans

El Niño

Réalité et fiction

BRUNO VOITURIEZ GUY JACQUES

Remerciements

Nous tenons à remercier les scientifiques de l'Institut de recherche pour le développement (ex-Orstom) qui nous ont aidé aux différentes étapes de cette rédaction : Philippe Cury, Philippe Hisard, Luc Ortlieb, Yves du Penhoat et Joël Picaut. Cet ouvrage doit beaucoup à leur pragmatisme fécond qui, grâce à leur très bonne connaissance du terrain, sait confronter de manière critique les approches théoriques à la réalité des observations.

Les idées et opinions exprimées dans cet ouvrage sont celles des auteurs et ne reflètent pas nécessairement les vues de l'UNESCO. Les appellations employées dans cette publication et la présentation des données qui y figurent n'impliquent de la part de l'UNESCO aucune prise de position quant au statut juridique des pays, territoires, villes ou zones ou de leurs autorités, ni quant à leurs frontières ou limites.

Publié en 1999 par l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation la science et la culture,
7, place de Fontenoy, 75352 Paris 07 SP

Composé par les Éditions du Mouffon, 119, avenue de Fontainebleau,
94270 Le Kremlin-Bicêtre
Imprimé par Jouve, 18, rue Saint-Denis, 75027 Paris Cedex 01

ISBN 92-3-203649-5

© UNESCO 1999

Préface

L'El Niño 1997-1998 a incontestablement été un des grands sujets de l'actualité médiatique et son nom est maintenant connu de tous. Des comptes rendus d'inondations, de feux de forêts, de sécheresses, de pêcheries sinistrées, avec leur lot de pertes en vies humaines et en matériels, ont fait régulièrement la une des journaux et des magazines à travers le monde. Pour beaucoup, il s'agissait d'un nouveau phénomène, d'une nouvelle menace liée au changement climatique. Nous savons que ce n'est pas le cas. El Niño est un phénomène climatique ancien et récurrent. A la différence des saisons, qui se succèdent chaque année régulièrement, El Niño est irrégulier et pluriannuel, d'où, peut-être, la difficulté qu'ont bien des gens à comprendre ses caprices.

Plusieurs décennies de recherches menées dans le cadre d'une coopération internationale sur l'océan et le climat ont beaucoup amélioré la connaissance scientifique d'El Niño. Et pourtant, le grand public continue de s'interroger, désireux de comprendre les catastrophes nombreuses et variées associées à ce phénomène. Ce n'est pas à prendre à la légère.

La communication des résultats de la recherche est importante non seulement pour aider le public à mieux comprendre la science, mais aussi pour aider les responsables politiques à prendre des décisions éclairées. Les relations entre la production de la connaissance scientifique et la manière dont celle-ci est utilisée est un problème sociologique intéressant. La question clé est la suivante : quelle part des connaissances disponibles est-elle effectivement utilisée par les politiques dans la prise de décision ?

A travers sa Commission océanographique intergouvernementale,

l'UNESCO participe activement au développement de la base de connaissances et des observations nécessaires pour expliquer ce phénomène — avec d'autres — et pour conseiller les États membres sur les moyens d'en limiter l'impact. Mais il reste encore beaucoup à faire si l'on veut contribuer à rendre vraiment durable l'utilisation de l'océan.

Pour réussir dans cette entreprise, nous devons apporter partout notre plein appui aux institutions chargées de fournir des avis scientifiques aux décideurs. Nous devons aussi répondre à la demande d'information du public. Avec cette publication, nous espérons satisfaire, à propos d'El Niño, à cette double exigence.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Federico Mayor', with a stylized, cursive script.

Federico Mayor

Avant-propos

Environ deux fois par décennie, des pluies exceptionnellement abondantes inondent les hautes vallées des Andes, augmentant le risque de coulées de boues, les fameux « *huaicos* » (du quechua, prononcé « ouaïcosse ») si redoutés qui apportent leur lot de mort et de destruction. Bien avant l'apparition de l'appellation « El Niño », la civilisation inca avait su s'adapter à ce phénomène récurrent. Dans une région extrêmement aride au nord du Pérou, les Incas, empilant pierre sur pierre, ont construit un vaste réseau d'aqueducs. A certains endroits du réseau, les pierres étaient remplacées par du rotin entrelacé. Lors des inondations provoquées par El Niño, ces maillons cédaient et des chenaux de dérivation entraînaient l'excédent d'eau vers les flancs de la montagne, préservant ainsi de la destruction les ouvrages du réseau. Malgré les efforts du gouvernement péruvien pour tirer parti de cette expérience ancienne durant El Niño 1997-1998 en captant l'excédent de précipitations dans deux lacs artificiels, la plupart des sociétés modernes n'ont pas encore appris à s'adapter à ce phénomène climatique.

Aujourd'hui nous savons qu'El Niño est une manifestation d'un phénomène climatique mondial. Au phénomène océanique correspond un déplacement des principaux systèmes météorologiques. Ainsi, des régions habituellement humides découvrent-elles la sécheresse alors que des déserts sont inondés, avec toutes les conséquences qui en découlent pour l'agriculture, la pêche et la santé humaine. Même si le phénomène est mondial, ses effets se font sentir localement, tous n'étant d'ailleurs pas néfastes ou catastrophiques.

Bruno Voituriez et Guy Jacques nous offrent une description très vivante d'El Niño : son histoire, sa dynamique et ses conséquences pratiques. Sans déroger à

la rigueur scientifique, ils réussissent à introduire le lecteur dans la complexité et les limites que la science rencontre dans sa quête de la compréhension du système climatique. En évoquant les limites de prévisibilité des systèmes climatiques complexes tel qu'El Niño, ils nous amènent aux portes de la théorie du chaos, un des plus récents développements des mathématiques modernes.

L'océan joue un rôle essentiel dans le déclenchement et l'évolution de ce type d'anomalies climatiques. Pour comprendre le climat et les caprices du temps aux différentes échelles de temps et d'espace, nous avons besoin d'étudier et comprendre l'océan. La recherche sur El Niño a ouvert la voie à l'intégration de l'océanographie et de la météorologie, qui culmine avec le développement d'un Système mondial d'observation de l'océan (GOOS : Global Ocean Observing System) et d'un Système mondial d'observation du climat (GCOS : Global Climate Observing System) très étroitement coordonnés. Tous les deux sont construits sur trois prédécesseurs : le Système mondial intégré des services océaniques (IGOSS : Integrated Global Ocean Services System), le Programme d'observations des navires occasionnels (SOOP : Ship-of-Opportunity Programme) et le Groupe de coopération pour les programmes de bouées de mesure (DBCP : Data Buoy Co-operation Panel). Leur objectif est de suivre l'évolution du niveau de la mer et les changements en temps réel des principaux paramètres océaniques. Ces systèmes d'observation sont développés à la lumière des résultats du Programme mondial de recherche sur le climat (WCRP : World Climate Research Programme), conduit sous l'égide conjointe de l'Organisation météorologique mondiale (OMM), du Conseil international de la science (ICSU) et de la Commission océanographique intergouvernementale (COI) de l'UNESCO.

La capacité de prévoir El Niño a été beaucoup améliorée par la mise en place d'un système d'observation dans le Pacifique équatorial. Soixante-dix plates-formes instrumentées ont été mouillées en plein océan. Elles constituent autant d'îles miniatures artificielles dédiées aux mesures météorologiques et océanographiques. Certains des instruments échantillonnent l'océan jusqu'à une profondeur de deux mille mètres et ont été capables de détecter, pour la première fois et sans équivoque, le signal de la naissance du dernier El Niño (1997-1998). Ce système, appelé « tropical atmosphere-ocean » (TAO), est maintenant un élément du Système mondial d'observation des océans (GOOS).

Après trente années d'un travail de recherche fructueux, nous sommes en mesure d'étendre les capacités de prévision aux phénomènes océaniques à différentes échelles de temps et d'espace. Par comparaison avec le cadran d'un poste radio, on pourrait dire que l'étude des événements El Niño qui surviennent avec une périodicité de trois à cinq ans ressemble un peu à un réglage sur une ou deux stations. Aujourd'hui, GOOS développe une capacité d'observation qui devrait permettre un accord sur toute les « stations radio » que compte le cadran de

l'océan. Ce faisant, la Commission océanographique intergouvernementale remplit sa mission de promouvoir le développement des connaissances de base et des observations nécessaires à une utilisation intelligente de l'océan.

Je souhaite exprimer ma satisfaction pour le soutien que Fugro GEOS, notre co-parrain, apporte aux efforts de la Commission. A travers la série « COI Forum Océans », la littérature traitant des problèmes de la mer et destinée à la communauté internationale s'enrichit. De tels gestes en faveur du public sont précieux pour l'accomplissement de notre mission éducative.

Patricio A. Bernal

Secrétaire exécutif

Commission océanographique intergouvernementale

Océans et atmosphère

Les descriptions par les médias des impacts du récent phénomène El Niño ont montré au public que les variations du climat, aux échelles locales et globales, dépendaient d'interactions indissociables entre l'océan et l'atmosphère. Le public a ainsi pris conscience de l'importance d'une compréhension fine de l'environnement marin et de la prévision de son évolution.

Tout au long de l'histoire, la connaissance du comportement des océans et des mers a joué un rôle critique dans l'aventure humaine. Sans informations sur le milieu marin, il eut été impossible d'étendre le commerce au monde entier, de mener des batailles navales, de se protéger des inondations côtières ou d'exploiter les ressources marines.

Les activités humaines dégradent parfois le milieu marin et ses ressources qui, on le sait maintenant, sont limitées. Il y a donc un besoin croissant de gestion et de protection des mers, qui ne peuvent être efficaces que si l'on dispose des informations indispensables sur l'océan.

Au cours du prochain millénaire, les demandes concernant l'environnement marin croîtront rapidement. L'exploitation raisonnée et durable des ressources marines et la sauvegarde des environnements locaux et globaux dépendent de notre compréhension et de notre capacité de prévision du comportement des océans et de l'atmosphère.

Comme « fournisseur » mondial d'observations météorologiques et océanographiques et de services de prévision, Global Environmental and Ocean Sciences tire parti de la compréhension scientifique pour résoudre des problèmes pratiques de protection de l'environnement marin.

La plupart de nos travaux impliquent le transfert de connaissances océanographiques et météorologiques aux spécialistes d'autres disciplines. Nous sommes donc très heureux d'être associés à un ouvrage qui se propose de mieux faire comprendre El Niño, phénomène océanographique et météorologique, à des non-spécialistes et de leur donner ainsi une meilleure perception de l'intérêt et des enjeux d'un renforcement de la recherche sur le fonctionnement de l'océan et la prévision de son comportement.

Ralph Rayner
Managing Director
Fugro Global Environmental and Ocean Sciences Limited

Principaux bureaux du GEOS :

Fugro GEOS Limited
Gemini House
Hargreaves Road
Swindon (Wiltshire) SN2 5AZ
Royaume-Uni
Tél : (44) 1793 72 57 66
Fax : (44) 1793 70 66 04
e-mail : geosuk@geos.com

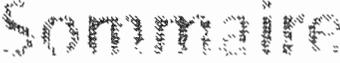
Fugro GEOS Incorporated
PO Box 740010
6100 Hillcroft (77081)
Houston (Texas) 77274
États-Unis d'Amérique
Tél : (1) 713 773 56 99
Fax : (1) 713 773 59 09
e-mail : geosusa@geos.com

Fugro GEOS Limited
Southampton Oceanography Centre
Empress Dock
Southampton SO14 3 ZH
Royaume-Uni
Tél : (44) 1703 59 60 09
Fax : (44) 1703 59 65 09
e-mail : seadata@geos.com

Fugro GEOS Private Limited
Box 5187 Loyang Crescent
Singapore 508988
Tél : (65) 543 44 04
Fax : (65) 543 44 54
e-mail : geossingapore@geos.com

Visitez notre site sur le web :

<http://www.geos.co.uk>



	Introduction	17
→	CHAPITRE 1 Pourquoi le climat varie-t-il ?	19
	Regard sur les climats passés	
	La machine climatique	
	Les variations du système climatique	
→	CHAPITRE 2 Histoire d'une rencontre entre l'océan et l'atmosphère	25
	El Niño, ange ou démon ?	
	Oscillation australe et mousson indienne	
	L'Année géophysique internationale en 1957-1958	
→	CHAPITRE 3 Le couple océan-atmosphère	35
	La rotation de la Terre et la force de Coriolis	
	Équateur météorologique et circulation méridienne : les cellules de Hadley	
	Un soupçon de complexité : la circulation de Walker	
	La thermocline océanique	
	La circulation océanique : courants et contre-courants	
	Alizés et remontées d'eau : upwellings côtiers et divergence équatoriale	
	Les ondes dans l'océan	
→	CHAPITRE 4 Comment fonctionne ENSO	49
	Le couple océan-atmosphère et le schéma de Bjerknes	
	Indices et anomalies	
	El Niño, la phase chaude d'ENSO	
	La Niña, la phase froide d'ENSO	
	Un scénario type pour ENSO ?	
	L'oscillateur retardé	

—> CHAPITRE 5	A l'échelle de la planète	59
	Un regard planétaire	
	Du côté de l'Atlantique tropical	
	Le cousinage d'El Niño et de la mousson indienne	
	Téléconnexions planétaires : le Pacifique Nord et le reste du monde	
—> CHAPITRE 6	Peut-on prévoir ENSO ?	79
	Succès et échecs de la prévision	
	Un optimisme mesuré	
	Les irrégularités d'El Niño	
	Le passé pour prévoir l'évolution à long terme	
—> CHAPITRE 7	El Niño au banc des accusés	91
	De la difficulté de l'approche socio-économique	
	El Niño, le Pacifique et ses abords	
	El Niño, vedette médiatique	
	Conséquences économiques et humaines	
—> CHAPITRE 8	Perspectives	103
	Pour en savoir plus	107
	Glossaire	109

◀ L'Enfant accourt de l'île de Pâques, tiède et malsain, l'enfant de la mort par noyade, drossé contre les côtes du Pérou, suffoquant dans son étreinte chaude les anchois et les algues, confisquant la fraîcheur vitale des nitrates et des phosphates équatoriaux, rompant la vaste chaîne de la nutrition et de la procréation des grands poissons de l'océan : l'Enfant nage, pesant et en sueur, projetant des poissons morts contre les murs du continent, engourdisant et pourrissant toute chose, l'eau engloutissant l'eau, l'océan asphyxié par sa propre marée morte, l'océan froid étouffé par l'océan chaud, les vents affolés et déviés de leurs cours : l'Enfant destructeur, l'Enfant criminel ravage les côtes de Californie, assèche les plaines d'Australie, inonde de boue les pentes de l'Équateur. ▶

Carlos Fuentes, *Cristóbal Nonato*.

Traduit de l'espagnol par Céline Zins,

Christophe et son œuf, Paris, Gallimard/Folio, 1993.

© Éditions Gallimard.

Introduction

Avant les Jeux olympiques d'hiver de Nagano en 1998 que des précipitations neigeuses excessives risquaient de perturber, M. Kobayashi, directeur du comité d'organisation, déclarait : « Une fois le problème de la descente résolu, seul El Niño m'empêchera de dormir. » Heureusement pour lui, les Jeux se sont finalement très bien déroulés ; mais qu'est donc cet El Niño malveillant accusé ainsi de vouloir saboter les Jeux ?

En 1997-1998, El Niño a régulièrement été à la une des médias. Il fut tenu responsable d'inondations dans les pays andins et en Californie, de sécheresse accompagnée de gigantesques incendies en Indonésie, chacun ayant pu voir, grâce aux images des satellites, le spectaculaire panache de fumée s'étendant des Philippines à la Malaisie. Lui furent également attribués la sécheresse au Brésil, en Afrique du Sud et au Zimbabwe, les inondations au Kenya, les cyclones en Polynésie, etc. Aucune calamité ne semblait échapper à la toute-puissance d'El Niño ou de sa sœur La Niña plus récemment reconnue, antithétique d'El Niño mais tout aussi dangereuse que lui. On lui attribua, en 1998, le renforcement des cyclones dans les Caraïbes (Mitch durant l'été) et les inondations en Chine.

Quelque chose d'irrationnel apparaît dans la manière dont les médias, avec parfois la complicité de scientifiques, exploitent cette personnification d'un phénomène naturel. Si ses conséquences sont souvent néfastes, elles sont parfois aussi bénéfiques et il s'agit en fait d'une perturbation climatique parmi d'autres qui se déroule à une échelle de temps (de la saison à quelques années) à laquelle les hommes sont particulièrement sensibles. Lors d'un colloque tenu à l'UNESCO en 1999, un prix Nobel de physique a déclaré que la science, loin d'apporter des certitudes, tuait les mythes mais créait des mystères. Il aurait pu ajouter que les mystères engendrant les mythes, la science contribuait, à son corps défendant, à

créer de nouveaux mythes. On peut se demander si l'engouement médiatique pour le couple El Niño-La Nina ne relève pas de la pensée mythique, traduisant le fait que, pour la plupart de nos contemporains, l'évolution du temps garde tout son mystère en dépit des efforts de prévision et d'explication des météorologues et des climatologues. A lire la presse, El Niño pourrait être un avatar ou un ersatz de Tlaloc, le dieu aztèque qui, selon son bon vouloir, faisait la pluie ou le beau temps. Caprice des cieux ? Caprice des dieux ! Ainsi peut-on résumer l'idée que l'être humain s'est faite pendant longtemps des variations du temps et du climat. L'illustration la plus universelle en est incontestablement le Déluge, moyen radical pour le Créateur de se débarrasser d'une créature qui n'avait plus l'heur de lui plaire. Il y a sans doute encore, plus ou moins refoulée, un peu de cette perception dans l'idée que l'on se fait des caprices du temps auxquels nous sommes soumis et dans notre scepticisme persistant à l'égard des prévisions météorologiques.

Pourtant, ces dernières décennies, notre connaissance du système climatique et de nos capacités de prévision ont beaucoup progressé grâce aux programmes internationaux de recherche menés depuis le milieu des années 70. Mais toute prévision comporte un risque d'erreur qui croît avec l'échéance de la prévision. Après que les scientifiques ont été accusés d'un scientisme étroit et totalitaire, au moment où ils ont abandonné l'énoncé de certitudes, rigueur leur est tenue de manquer maintenant de cette assurance qu'on leur reprochait naguère ! Il faut apprendre à vivre avec cette incertitude que les progrès de la recherche ne cessent de réduire en même temps qu'ils repoussent les horizons des prévisions sans jamais y parvenir complètement.

La « réputation médiatique » d'El Niño résulte d'avancées scientifiques qui montrent que des relations physiques existent entre les perturbations climatiques de régions aussi éloignées que le Kenya et le nord-ouest des États-Unis d'Amérique, ou entre la mousson indienne et les précipitations au Pérou. El Niño n'est évidemment pas le *diabolus ex machina* des variations climatiques mais il cristallise cette découverte essentielle des relations qui lient les perturbations climatiques des diverses régions tropicales entre elles d'abord mais aussi au reste du monde. C'est une avancée importante qui permet d'améliorer les modèles de prévision du climat et d'en tester les performances puisque la vérification ne suit la prévision que de quelques mois. Manifestation, sur un pas de temps de quelques années, des variations d'un système climatique qui évolue à toutes les échelles de temps, la paire El Niño-La Nina, par sa connaissance approfondie, laisse espérer des progrès dans la prévision des fluctuations du climat et de son évolution à long terme face à la menace d'une autre perturbation : l'accroissement de la teneur de l'atmosphère en gaz à effet de serre.

C'est l'histoire et les résultats de cette aventure scientifique qui sont rapportés dans cet ouvrage.

1 Pourquoi le climat varie-t-il ?

REGARD SUR LES CLIMATS PASSÉS

Le mythe du paradis terrestre détruit par l'action malfaisante de l'être humain a la vie dure, que l'on évoque un hypothétique âge d'or ou que l'on se réfère à un équilibre naturel cher à certains écologistes pour qui tout irait au mieux dans le meilleur des mondes, n'était-ce la présence de l'être humain. Or il n'y a pas d'équilibre naturel : le climat, les écosystèmes évoluent sans cesse, que l'être humain soit ou non présent. Depuis plus d'un million d'années, la Terre oscille entre des épisodes chauds, comme actuellement, et des périodes glaciaires durant lesquelles la température moyenne est inférieure de trois à quatre degrés.

La dernière période glaciaire remonte à vingt mille ans. Des glaciers analogues à celui de l'Antarctique actuel recouvrent alors la Scandinavie, le nord de l'Allemagne, le Canada et le nord des États-Unis d'Amérique. Les habitants de l'Europe de l'Ouest, géniaux décorateurs de grottes, connaissent alors un climat et un environnement proches de ceux du nord de la Scandinavie aujourd'hui. Rien n'interdit de penser que, dans les prochains millénaires, la Terre connaîtra d'autres épisodes glaciaires.

Les « optimums climatiques », périodes les plus chaudes comme celle que nous connaissons à l'heure actuelle, sont brefs. Les optimistes pensent que l'accroissement des gaz à effet de serre, entraînant un réchauffement global, vient à point pour éviter à l'humanité de se confronter aux affres d'une nouvelle glaciation. Qui sait ?

Ces oscillations entre périodes glaciaires et phases interglaciaires sont récentes dans l'histoire de la Terre (deux à trois millions d'années) et typiques du quater-

naire. En remontant beaucoup plus loin, au crétacé (entre – 135 et – 65 millions d'années), la Terre ne comporte aucune partie englacée : la température de l'air y est supérieure d'environ cinq degrés à celle de maintenant et celle des profondeurs océanes ne descend pas au-dessous de 10 °C, alors qu'elle avoisine maintenant zéro. Il y a cinquante-sept millions d'années, au cœur du paléocène, la température des côtes antarctiques approche, en été, les 20 °C. La calotte glaciaire de ce continent a commencé à se former seulement il y a dix à quinze millions d'années.

Très près de nous, l'Europe connaît, entre le XVI^e et le XIX^e siècle, une période relativement froide, le « petit âge glaciaire » où la température est inférieure de plus d'un degré à ce qu'elle est actuellement. Le 26 juin 1675, la marquise de Sévigné écrit à sa fille qui séjourne en Provence : « Il fait un froid horrible. Nous nous chauffons et vous aussi, ce qui est une bien plus grande merveille », et elle ajoute, le 24 juillet : « Nous avons un froid étrange. Le procédé du Soleil et des saisons est tout changé. » La Tamise, fréquemment gelée en hiver sur une vingtaine de centimètres, permettant la tenue de foires entre 1607 et 1813, la retraite de Russie en 1812-1813 durant laquelle l'armée de Napoléon perdit quatre cent cinquante mille hommes sont quelques autres événements de cette période.

A l'inverse, aux X^e et XI^e siècles, des conditions climatiques plus clémentes permettent aux Scandinaves d'établir des colonies au Groenland (*Greenland* = « terre verte ») et en Amérique du Nord (*Vineland* = « terre à vigne »). Cette colonisation dure jusqu'à ce que le climat se refroidisse, rendant la navigation périlleuse entre l'Islande et le Groenland. Plus loin dans le temps, au sortir du dernier épisode glaciaire il y a huit à dix mille ans, le Sahara connaît une période pluvieuse et la forêt amazonienne, emblème de l'écologie actuelle et encore qualifiée, à tort, de poumon de la planète, se limite à quelques îlots au sein d'une vaste savane.

LA MACHINE CLIMATIQUE

Le système climatique est une machine qui convertit et distribue l'énergie solaire que la Terre absorbe, soit environ deux cent quarante watts par mètre carré. Pour la planète, cet apport représente dix mille fois la production mondiale de chaleur et d'électricité. Une partie (30 %), réfléchiée par l'atmosphère, est renvoyée dans l'espace et perdue pour le système climatique. Une autre (20 %) est absorbée par l'atmosphère qu'elle chauffe. La troisième enfin (50 %) atteint la surface de la Terre et sa biosphère, où elle est absorbée par les continents (18 %) et les océans (32 %). Cette fraction joue un rôle essentiel dans la régulation du climat car les terres, et surtout les océans, renvoient à l'atmosphère une partie de l'énergie reçue :

- par rayonnement, puisque tout corps émet un rayonnement caractéristique de sa température. Le rayonnement que la Terre reçoit du Soleil est caractéristique d'un corps à 6 000 °C. La surface de la Terre, dont la température moyenne est de

15 °C, rayonne dans l'infrarouge, ce rayonnement étant absorbé par l'atmosphère : c'est l'effet de serre naturel ;

- par conduction, c'est-à-dire transfert direct de chaleur par contact du corps le plus chaud vers le plus froid ;
- par évaporation enfin, et c'est là le terme le plus important. Il confère à l'océan un rôle prépondérant ; par évaporation, il se refroidit et l'atmosphère récupère l'énergie correspondante lorsque la vapeur d'eau se condense.

L'atmosphère est donc principalement « chauffée par le bas ». C'est dans les régions tropicales que l'océan et les continents reçoivent le maximum d'énergie solaire et que l'océan est le plus généreux avec l'atmosphère ; l'océan tropical est la « chaudière » du système climatique.

Ainsi alimentée, l'atmosphère se met en mouvement et transfère l'énergie reçue vers les régions plus froides des hautes latitudes. En raison de la rotation terrestre, ce transport s'effectue sous forme de mouvements tourbillonnaires d'échelles variées : anticyclones, dépressions, cyclones et autres tornades. Les courants marins naissent aussi de cette répartition thermique inégale ; ils s'organisent aussi en mouvements tourbillonnaires, transportant en direction des pôles la même quantité de chaleur que l'atmosphère. Leurs mouvements sont accélérés par les vents, ce qui est une manière pour l'atmosphère de restituer, sous forme mécanique, une partie de l'énergie empruntée à l'océan par évaporation. Le Gulf Stream, branche occidentale d'un vaste tourbillon océanique, est une manifestation de ce transport de chaleur par l'océan.

Il y a donc un couplage étroit entre l'océan et l'atmosphère pour répartir l'énergie solaire sur la planète et assurer le fonctionnement du système climatique. Les continents et leur végétation interviennent aussi par leurs échanges énergétiques avec l'atmosphère, mais de manière plus limitée et plus statique ; ils sont immobiles aux échelles de temps qui nous préoccupent. La cryosphère (calottes glaciaires, banquise, glaciers) joue également un rôle important dans la dynamique du climat. Dotée d'un fort pouvoir réfléchissant, elle renvoie vers l'atmosphère la plus grande partie de l'énergie reçue. Plus la surface englacée est importante, moins la Terre absorbe de chaleur. La cryosphère constitue de plus une formidable réserve d'eau douce ; en période glaciaire, le niveau marin est d'ailleurs plus bas de cent vingt mètres environ qu'actuellement.

LES VARIATIONS DU SYSTÈME CLIMATIQUE

La « machine climatique » est donc un système complexe aux acteurs multiples : le Soleil, l'orbite de la Terre autour du Soleil, les continents, l'océan, l'atmosphère, la cryosphère, la biosphère. Tous ces éléments évoluent en permanence avec des vitesses qui leur sont propres et qui sont très différentes. Toute variation, toute perturbation de l'un d'entre eux retentit sur les autres qui réagissent à leur propre

rythme. Le système climatique court après un équilibre qu'il ne peut jamais atteindre.

Prenons un exemple : la Terre tourne autour du Soleil en parcourant une ellipse dont la forme et la position varient. Aussi, l'énergie reçue du Soleil et sa répartition sur la Terre fluctuent-elles à des échelles de temps de dix à cent mille ans ; c'est ainsi que s'explique la succession des périodes glaciaires et interglaciaires.

Un autre exemple à une échelle de temps plus longue encore : la tectonique des plaques n'est pas étrangère au climat particulièrement chaud du crétacé et à son évolution ultérieure. En effet, la répartition des continents sur le globe modifie considérablement les transports de chaleur par les courants marins et les échanges avec l'atmosphère.

Aux échelles de temps plus proches des préoccupations humaines, nous sommes familiarisés avec la ronde des saisons, nous nous inquiétons de leurs variations et nous aimerions bien les prévoir. Dans le même temps, nous nous interrogeons sur l'impact de l'accroissement des gaz à effet de serre sur le climat du siècle prochain. En fait, de la durée d'une saison à des millions d'années, toute une série de causes de variabilité de différents pas de temps s'enchevêtrent rendant impossible tout équilibre et faisant de la prévision climatique un art bien délicat. A l'échelle de temps qui nous intéresse c'est le « couple » océan-atmosphère qui est le principal régulateur des variations climatiques et il est intéressant de s'y arrêter.

L'ATMOSPHÈRE

Il peut sembler vain de se soucier du climat des prochains mois ou des prochaines années alors que l'on fait sans cesse l'expérience de la capacité limitée de la prévision météorologique. Actuellement, les services météorologiques avancent une prévision à sept jours. Il semble qu'il sera toujours impossible de faire une prévision météorologique au-delà de quinze jours. Cette prévision s'appuie en effet sur des modèles construits à partir des lois physiques qui gouvernent la dynamique de l'atmosphère. Partant de l'état de l'atmosphère établi à un moment donné à partir des mesures des stations météorologiques à travers le monde et des satellites d'observation de la Terre, le modèle calcule l'état de l'atmosphère, et donc le temps qu'il fera, un, trois ou sept jours plus tard. La prévision combine donc observations et modèles, mais il est à peu près certain que l'état de l'atmosphère à un moment donné est indépendant de ce qu'il était quinze jours auparavant. Aussi, quelle que soit la qualité des observations et des modèles, la situation actuelle ne nous renseigne en rien sur ce qu'elle sera dans quinze jours. Toute prévision de ce type est impossible. C'est, en reprenant l'image du météorologue Edward Lorenz, ce que l'on appelle l'effet « papillon » : un battement d'aile d'un papillon en Chine pourrait être responsable, quelques jours plus tard, d'un cyclone aux

Antilles. Autrement dit, une prévision au-delà de quinze jours nécessite de connaître, à un moment donné, l'état de l'atmosphère en tous points avec une précision équivalente à ce que représente un battement d'aile de papillon, ce qui est rigoureusement impossible. En d'autres termes, l'atmosphère n'a aucune mémoire et en quinze jours tout est effacé.

L'OCÉAN

L'océan présente un temps d'évolution plus long et, donc, une bien meilleure mémoire. Il joue un double rôle : fournir une fraction de son énergie à l'atmosphère et distribuer directement, par les courants, l'autre partie à l'échelle de la planète. En un lieu donné, la quantité d'énergie échangée avec l'atmosphère dépend de la température de surface de l'océan et donc de la quantité de chaleur qu'il a véhiculée jusque-là. La portion d'océan à considérer dans les processus climatiques dépend de l'échelle de temps choisie. Si l'on se soucie de prévisions météorologiques à moins de deux semaines, les modèles ont seulement besoin de la température de surface océanique pour déterminer les échanges d'énergie entre l'océan et l'atmosphère. Pendant ce laps de temps, l'évolution des températures de surface de la mer est trop faible pour avoir un impact significatif sur ces échanges ; il serait inutile de compliquer les modèles en faisant intervenir la dynamique océanique.

Aux échelles climatiques en revanche il faut considérer cette dynamique : c'est le partenaire le plus lent, l'océan, qui impose son rythme à la variabilité climatique. Pour l'évolution d'un mois sur l'autre, d'une année sur l'autre (El Niño par exemple), ce sont les premières centaines de mètres de l'océan équatorial qui sont prépondérantes. Au-delà, on doit considérer la totalité de la circulation océanique de la surface au fond dont le cycle s'étale sur plusieurs siècles. L'océan garde en effet en mémoire pendant plusieurs centaines d'années la « signature » d'événements climatiques antérieurs. Le climat actuel dépend jusqu'à un certain point du refroidissement de la Terre pendant le petit âge glaciaire évoqué auparavant. Si l'océan amortit les variations climatiques, il en restitue les effets des décennies, voire des siècles plus tard.

EL NIÑO

Les océans tropicaux sont les principaux fournisseurs d'énergie de l'atmosphère. Le plus grand d'entre eux, le Pacifique, qui, dans sa partie équatoriale, couvre presque la moitié de la circonférence terrestre, joue un rôle prépondérant et toute perturbation de ses échanges avec l'atmosphère a des répercussions sur le climat planétaire.

El Niño est la manifestation tangible de la variabilité interannuelle du climat (de la saison à quelques années) caractéristique du couple atmosphère-océan

dans le Pacifique tropical ; or c'est à cette échelle que les hommes sont particulièrement sensibles.

Que l'on puisse rattacher des événements météorologiques *a priori* aussi différents que des inondations au Pérou et en Afrique de l'Est, la sécheresse en Australie, en Inde et au Brésil, la diminution du nombre des cyclones dans les Caraïbes à un même phénomène que l'on commence à comprendre et à prévoir constitue une découverte essentielle laissant espérer une prévision climatique. Ceci explique le « succès » médiatique d'El Niño, présenté comme un magicien maléfique alors qu'il s'agit seulement d'un élément de la variabilité naturelle du climat. C'est, pour les chercheurs, une étude de cas idéale pour tester la possibilité de prévoir le climat et de vérifier la validité des modèles puisque l'effet, donc la vérification expérimentale, suit de près la prévision. Mais avant d'en arriver là il a fallu un long cheminement qui mérite d'être conté.

2 Histoire d'une rencontre entre l'océan et l'atmosphère

EL NIÑO, ANGE OU DÉMON ?

Depuis quelques décennies, le phénomène El Niño fait irruption dans les médias qui lui accordent une place de plus en plus grande à chacune de ses apparitions. Une telle sollicitude semble indiquer une aggravation du phénomène et renvoie immanquablement à une autre « vedette » climatique, l'accroissement de l'effet de serre dont un des premiers effets pourrait être, justement, le renforcement d'El Niño. De ce point de vue, les années 1997-1998 ont été particulièrement intéressantes puisqu'il y eut conjonction entre les deux phénomènes. Micros et caméras étaient tournés vers Kyoto où se déroulait la conférence internationale sur les changements climatiques dont l'objectif était de réduire les émissions de gaz à effet de serre, au moment où El Niño 1997-1998, présenté comme le nouvel El Niño du siècle, atteignait son apogée avec son cortège de catastrophes : sécheresse et incendies en Indonésie, inondations en Amérique du Sud et dans la corne de l'Afrique.

LES MARINS DE PAITA OU EL NIÑO DU PREMIER TYPE

El Niño est le nom donné affectueusement en espagnol à l'Enfant Jésus (*El Niño Dios*). Il y a donc quelque chose de blasphématoire pour des chrétiens à lier le nom du Sauveur à l'avalanche de catastrophes qu'on lui attribue. Comment est-on parvenu à cette association contre nature ?

El Niño fait son entrée dans le domaine scientifique en 1891 grâce à la jeune Société géographique de Lima. Plusieurs de ses membres sont impressionnés par l'ampleur de la saison des pluies : de février à avril, des pluies diluviennes s'abat-

tent sur la région côtière désertique du Nord-Pérou, entraînant des dégâts dans l'agglomération de Piura et le port de Paita. Le pont sur le Rio Piura, construit en 1870 et qui avait résisté à quatre crues majeures, est balayé par les eaux de la crue exceptionnelle de 1891. Ces géographes sont les premiers à associer ces précipitations exceptionnelles et la présence simultanée, le long de la côte, d'eaux anormalement chaudes. Amenées par un courant marin coulant du nord au sud, ces eaux sont facilement identifiables par les débris qu'elles véhiculent depuis le golfe de Guayaquil : feuilles de palmier, bananes, troncs d'arbre, cadavres d'alligators, etc. En bon marin, c'est le capitaine Camilo Carrillo qui relie ces observations à un courant côtier connu des pêcheurs de Paita, *el corriente del Niño*, simplement parce que ce courant, faible et peu étendu, apparaît presque chaque année au moment de Noël. Il coïncide avec une saison des pluies bienvenue en région aride, notamment pour l'élevage et la culture du coton. Les marins eux-mêmes, qui pratiquent une pêche artisanale, tirent profit de ce courant chaud car ils ont alors accès à des espèces tropicales appréciées : dorades coryphènes, albacores et bonites, poulpes, crevettes, etc. Pour eux, El Niño est une bénédiction ou, avec une connotation païenne, c'est le père Noël ! Parfois pourtant sa générosité déborde et provoque des ravages, comme en 1891. Ces désagréments ne touchent pas encore les ressources (pêche, agriculture, élevage) mais les infrastructures. C'est le développement des activités économiques et industrielles de l'homme et leur insertion dans le circuit commercial international qui vont progressivement « diaboliser » le petit Jésus car la diminution de la biomasse d'anchois n'eut aucun effet négatif tant que leur exploitation demeura très inférieure au potentiel.

ALFONSO PEZET OU EL NIÑO DU DEUXIÈME TYPE

Alfonso Pezet, au nom de la Société géographique de Lima, reprend les données de ses collègues pour présenter à Londres, en 1895, une communication : « *The countercurrent El Niño on the coast of northern Peru* ». C'est une date historique. D'abord parce qu'elle marque la reconnaissance scientifique du courant El Niño. Ensuite, parce qu'elle met en lumière sa variabilité avec l'apparition de crues exceptionnelles comme celle de 1891. Pezet écrit : « Bien que, ici ou là, on trouve chaque année trace d'un courant venant du nord le long de la côte, cette année-là il fut particulièrement visible et ses effets particulièrement sensibles notamment sur les températures de cette région du Pérou en raison du courant chaud qui baignait la côte. » Enfin, il relie El Niño au climat, écrivant encore : « Que ce courant chaud soit la cause d'abondantes précipitations dans une région aride du Pérou apparaît comme un fait. » Les études ultérieures indiqueront qu'il n'y a pas relation directe entre les pluies et le courant chaud, mais que les deux procèdent d'un même phénomène à l'échelle du Pacifique équatorial. Néanmoins, l'article

de Pezet posait déjà la question des relations entre l'océan et l'atmosphère dans le système climatique ; la réponse sera donnée soixante-dix ans plus tard par Jacob Bjerknes.

Conscient du caractère exceptionnel d'El Niño 1891, Victor Eguiguren fouille les archives des missions espagnoles pour retrouver les traces d'épisodes pluvieux analogues. Il remonte ainsi jusqu'en 1578, année particulièrement dévastatrice. Il recense dix années de pluies extrêmement fortes sur les cent années précédant 1891 : 1790, 1804, 1814, 1828, 1845, 1864, 1871, 1877, 1878 et 1884. Pour lui, ces années pluvieuses sont dues à l'avancée inhabituelle des eaux chaudes du courant El Niño, comme en 1891 ; et il a raison ! A tel point que l'appellation El Niño sera réservée aux seuls événements exceptionnels, dépossédant les marins de Paita de leur relation particulière avec un Dieu plutôt débonnaire. On doit donc aux honorables membres de la Société de géographie de Lima, grâce à l'événement de 1891, l'avènement d'un second type d'El Niño vu comme un phénomène océanique exceptionnel et menaçant.

EL NIÑO DE ABUNDANCIA

Si, dès cette époque, des chercheurs fouillent le passé, c'est en pensant à prédire les futurs El Niño. Le biologiste américain Robert Murphy est le témoin de la « cuvée 1925 » qu'il considère comme la plus puissante depuis 1891 et qu'il décrit comme *El Niño de abundancia*. Il rappelle les écrits de témoins de l'événement de 1891, aux antipodes de la présentation apocalyptique actuelle : « La mer est pleine de merveilles et la terre davantage encore. Le sol est gorgé d'eaux par les fortes averses et, en quelques semaines, toute la région est couverte d'abondantes prairies. L'accroissement naturel des troupeaux est pratiquement doublé et le coton peut être planté là où, les autres années, la végétation semble impossible. »

C'est l'exploitation du guano puis des ressources marines qui ternira cette réputation en faisant d'El Niño une catastrophe économique ; parfois à juste titre, parfois à tort, notamment pour la pêche où il sert de bouc émissaire pour masquer les effets de la surpêche.

L'EXPLOITATION DU GUANO

Le guano est un engrais produit par les excréments des myriades d'oiseaux qui se concentrent sur les îles au large du Pérou. Cette prolifération tient à l'abondance de leurs proies, les anchois qui, eux-mêmes, se nourrissent de plancton, abondant dans ces eaux fertiles. En effet, dans l'océan comme sur terre, certaines régions constituent des déserts alors que d'autres, bénéficiant d'apports massifs de nutriments, offrent de bonnes conditions pour la floraison planctonique et constituent de véritables « prairies » marines où les poissons trouvent une nourriture

abondante. Ces aires océaniques fertiles sont celles où les eaux profondes, froides et riches en éléments minéraux, remontent vers la surface. C'est ce qui se produit dans le Pacifique sur les côtes du Pérou et de Californie et, dans l'Atlantique, au large des côtes ouest d'Afrique (Mauritanie-Sénégal au nord, Namibie-Afrique du Sud au sud). Le long de ces côtes, les alizés entraînent les eaux de surface vers le large créant un appel d'eau comblé par la remontée des eaux profondes. Ce phénomène est dénommé « remontée d'eau » ou *upwelling* (chapitre 3, figure 3.6). Au Pérou les anchois représentent un véritable festin pour des millions d'oiseaux de mer qui nichent sur les îles où ils produisent le précieux guano. Exporté dans le monde, il fut une source de devises importante pour le Pérou.

L'exploitation du guano s'intensifie à la fin du XIX^e siècle et, en 1909, le gouvernement péruvien crée une compagnie nationale pour en contrôler l'exploitation. Le guano devient une ressource de première importance. Les exploitants constituent un groupe de pression dont El Niño devient l'ennemi ! D'abord parce que les pluies abondantes lessivent les fientes des oiseaux, diminuant la ressource. Ensuite, parce que l'invasion d'eaux chaudes contraint les anchois à migrer vers le sud ou en profondeur pour retrouver un biotope favorable. Les oiseaux sont donc condamnés, au mieux, à une diète sévère, au pire à une famine meurtrière ; ils sont les grandes victimes d'El Niño ! L'épisode 1957-1958 a divisé par deux leur population, quinze millions d'individus disparaissant ; cela a d'ailleurs donné quelques idées à de nouveaux venus sur la scène, les pêcheurs industriels.

PÊCHE INDUSTRIELLE ET FARINE DE POISSON

Deux éléments ont, après la guerre, mis un terme à la toute-puissance du groupe de pression du guano qui bloquait le développement de la pêche industrielle susceptible de réduire l'alimentation des oiseaux producteurs du guano. Ce fut d'abord la concurrence des nitrates du Chili : la production de guano s'abaisse, la rentrée de devises aussi et, naturellement, la puissance du groupe de pression. Ce fut ensuite la convoitise des entrepreneurs, aiguisée par l'appétit des poulets et du bétail américains devenus, rentabilité oblige, amateurs forcés de farine de poisson. Or la production à partir des sardines de Californie s'effondre pendant la guerre, où les quotas de pêche ne sont plus respectés. Dans son roman *Tendre Jeudi*, John Steinbeck note avec humour : « Les usines de conserve participèrent à la guerre en ne respectant pas les règlements et en pêchant tous les poissons. C'était par pur patriotisme, mais cela ne ressuscita pas les poissons. Comme les huîtres d'*Alice au Pays des Merveilles*, "on avait tout mangé". » Les regards se portent alors sur le Pérou. Le gouvernement péruvien lève les mesures protectrices imposées par le groupe de pression du guano et la pêche industrielle prend son essor : les captures passent de moins de cent mille tonnes au début des années 50 à plus de dix millions de tonnes en 1970-1971. Pour éviter une concurrence

« déloyale », certains proposent même, dans les années 60, d'exterminer les oiseaux pour maintenir leur population au niveau le plus bas compatible avec la conservation de la biodiversité et pour accroître la production de farine de poisson. En 1970, elle représentait pourtant déjà plus du tiers de la production mondiale. C'est alors que survint El Niño et, en 1973, les captures chutent à un million et demi de tonnes pour le plus grand bonheur des producteurs de soja qui prend le relais de la farine de poisson. On ne cherche pas à savoir à qui profite le crime, se contentant de désigner le coupable : El Niño, bouc émissaire pour masquer la responsabilité de la pêche industrielle qui, de 1962 à 1971, a capturé, en moyenne, neuf millions de tonnes par an sur une biomasse évaluée à vingt millions de tonnes.

L'impact d'El Niño est double. Les masses d'eaux chaudes qu'il véhicule recouvrent les eaux froides et fertiles, habitat normal des anchois contraints à migrer, échappant ainsi aux engins de pêche. Les captures diminuent fortement (lors de l'événement 1982-1983 elles furent inférieures à cent mille tonnes), ce qui protège le stock. Mais, en contrepartie, les conditions nécessaires au recrutement dans la pêcherie sont moins favorables : les larves et les jeunes ont du mal à survivre en raison de la diminution de la production primaire liée à l'invasion d'eaux chaudes peu fertiles. Cependant, après l'El Niño historique de 1982-1983 et celui, plus modéré, de 1986-1987, le stock s'est reconstitué et les captures ont repris leur croissance, dépassant six millions de tonnes entre 1992 et 1996 pour atteindre dix millions en 1994, ignorant superbement l'événement El Niño de 1992-1994. Cela indique que la pêche n'est pas seulement régulée par El Niño, mais également par un autre type de variabilité climatique à l'échelle de la décennie et, bien sûr, par l'effort de pêche. Les conséquences de l'événement 1997-1998 seront particulièrement intéressantes à suivre (chapitre 7).

OSCILLATION AUSTRALE ET MOUSSON INDIENNE

Parallèlement à la découverte d'El Niño, perçu comme un phénomène marin local, se déroule une autre histoire concernant l'atmosphère : celle de « l'oscillation australe ».

L'amélioration de notre connaissance doit beaucoup à la curiosité des sujets de Sa Majesté britannique qui régnait sur un empire sur lequel le soleil ne se couchait jamais ; ils ont, en effet, développé à travers le monde des observatoires, notamment météorologiques. L'histoire commence en 1877 où la défaillance de la mousson provoque une redoutable sécheresse en Inde, la famine entraînant la mort de plusieurs dizaines de milliers de personnes. Cette même année, une période de *seca* touche le Nordeste brésilien avec cinq cent mille morts, dont cent mille à Fortaleza, tandis que, l'année suivante, la sécheresse qui affecte la Nouvelle-Calédonie est tenue comme une des causes de la grande révolte canaque.

La météorologie était alors une jeune science et Henry Blandford, « *the first imperial meteorological reporter* », nommé en Inde, note que cet événement correspond à une élévation anormale de la pression atmosphérique. Quitte à nuire au suspense, notons que 1877 est une des années particulièrement pluvieuses au Pérou, répertoriée comme année El Niño par Eguiguren. Faisant appel aux observatoires de la zone indo-pacifique (île Maurice, Australie, Nouvelle-Zélande), Blandford montre que l'anomalie de pression décelée en Inde s'étend à toute la région et que la sécheresse sévit également en Australie. Lui-même et ses successeurs essayent de relier cette découverte à d'autres événements précurseurs de la mousson. Ils tentent, sans grand succès, une relation avec les taches solaires et avec les précipitations neigeuses sur l'Himalaya dans les mois précédant la mousson.

C'est Gilbert Walker, directeur des observatoires de l'Inde de 1904 à 1924, qui franchit le pas décisif grâce à ses connaissances en mathématiques. Ne disposant pas d'ordinateur mais d'une main-d'œuvre pléthorique dont il fit des « calculateurs », il recherche systématiquement les corrélations entre la mousson et les observations météorologiques à travers le monde. Il établit ainsi, en 1909, la première formule de prédiction de la mousson :

$$\text{précipitations de la mousson indienne} = -0,20 (\text{précipitations sur l'Himalaya}) - 0,29 (\text{pression à l'île Maurice}) + 0,28 (\text{pression moyenne en Amérique du Sud}) - 0,12 (\text{précipitations à Zanzibar}).$$

Il agit de même pour prévoir les crues du Nil ainsi que les précipitations en Australie. Synthétisant ces relations statistiques, il met en évidence trois oscillations cohérentes des paramètres de l'atmosphère entre des grandes régions de la surface de la Terre. Il définit l'oscillation australe comme un mouvement de bascule entre pressions et précipitations de la zone indo-pacifique (de l'Égypte à l'Australie) et la pression sur la région Pacifique. A un accroissement de la pression et à une diminution des précipitations dans l'océan Indien correspond une diminution de la pression dans le Pacifique et réciproquement. Pour l'Amérique du Sud, Walker dispose de données du Chili, d'Argentine, du Brésil et du Paraguay. S'il en avait disposé pour le Pérou, il aurait certainement lié oscillation australe et El Niño. Il définit également des oscillations de même nature dans l'Atlantique Nord, entre les Açores et l'Islande (*North Atlantic oscillation*), et dans le Pacifique Nord, entre Hawaii et l'Alaska (*North Pacific oscillation*). Il établit, sur la base de relations statistiques, un *South Oscillation Index* définissant l'état du jeu de bascule de l'atmosphère entre l'Indien et le Pacifique pour en faire un outil de prévision de la mousson. On utilise maintenant un indice simplifié : la différence de pression atmosphérique entre Tahiti et Darwin (indice d'oscillation australe) (chapitre 4, figure 4.1). Walker, qui pose ainsi les bases d'une prévision météorologique à long terme, n'a pas convaincu ses concitoyens. Les capacités prédictives de ses relations étaient modestes, les relations elles-mêmes quelque peu hété-

roclites. Enfin, elles étaient purement statistiques, aucun mécanisme physique, aucune hypothèse ne leur donnait un sens.

Le déclin d'intérêt pour l'oscillation australe dure jusqu'en 1957-1958, l'Année géophysique internationale. Pourtant l'affaire aurait pu rebondir en 1933 si un meilleur écho avait été donné aux travaux de John Leighly. Il associe les différences de pression entre les deux bords du Pacifique équatorial et les conditions océaniques et météorologiques du Pacifique tropical. Il relève que, plus le gradient de pression atmosphérique entre l'est et l'ouest est fort dans le Pacifique central, plus les alizés soufflent, plus les températures de la mer sont basses, moins les précipitations sont abondantes et réciproquement. Il décrit donc ENSO ! Walker s'intéresse à la mousson de l'océan Indien, Leighly au climat des îles Marquises ; ils parlent du même mécanisme, l'oscillation australe, mais personne alors ne fait le rapprochement.

L'ANNÉE GÉOPHYSIQUE INTERNATIONALE EN 1957-1958

L'intuition de Leighly est d'autant plus surprenante qu'il dispose de peu de données de température de surface de l'océan. Car le problème est bien là ; l'océan, que les navigateurs connaissent pourtant bien, demeure, pour les savants, une *terra incognita*... si l'on peut dire. L'exploration de l'atmosphère s'est faite naturellement : nous y vivons et nous en mesurons directement les caprices dont nous subissons les effets dans nos activités agricoles, économiques et dans nos loisirs.

La météorologie devient une science au XVII^e siècle avec le développement d'instruments de mesure pour la température, la pression, l'humidité, la vitesse et la direction du vent et la multiplication des observatoires. On doit à Ferdinand II Médicis la première constitution d'un réseau météorologique. Mécène, il finance, à partir de 1653, la construction de thermomètres, baromètres et hygromètres au bénéfice de savants réputés de onze villes d'Europe. Ce réseau fonctionne jusqu'à ce que le Vatican, prenant ombrage des initiatives du grand-duc, le contraigne à dissoudre en 1667 l'Academia del Cimento fondée dix années auparavant pour l'étude des phénomènes naturels. Son réseau d'observation météorologique n'y survécut pas.

La météorologie demeure longtemps une branche mineure de la physique. L'Observatoire royal de Paris, créé en 1670, est plus soucieux de la noblesse du mouvement des astres que des péripéties capricieuses de ce monde sublunaire fantasque. Sans raison, les observations météorologiques y sont interrompues de 1754 à 1785. En reprenant une terminologie actuelle, on pourrait dire que, pour les physiciens, la météorologie faisait figure de « science molle » comparée à l'astronomie qui, grâce à Isaac Newton et à Simon Laplace, était mise en équations, ce qui permettait de calculer avec précision les trajectoires des planètes. La physique met de l'ordre dans l'univers, la météorologie donne, *a priori*, une image

du désordre à tel point qu'Auguste Comte l'exclut de sa classification des sciences, pour indiscipliné pourrait-on dire !

Cent ans plus tard c'est pourtant de la météorologie que naît la science des systèmes dynamiques non linéaires ou « systèmes chaotiques » popularisés par Lorenz et son célèbre effet papillon. Rien d'étonnant alors que ce soit un naturaliste, Jean-Baptiste de Monet, chevalier de Lamarck, et non un physicien qui publie un *Annuaire météorologique* à partir de 1799 et propose en 1807, sans succès, la constitution d'un Bureau central météorologique.

Le déclic survient en 1850 avec la création de sociétés savantes de météorologie, l'utilisation du télégraphe électrique Morse pour la transmission des observations et « grâce » à la destruction par une tempête le 14 novembre 1854 de la flotte alliée qui assiège Sébastopol durant la guerre de Crimée. Selon Urbain Le Verrier, directeur de l'Observatoire de Paris, cette dérouté aurait été évitée si l'on avait disposé d'un réseau international d'observations météorologiques. A partir de 1858, l'Observatoire de Paris publie quotidiennement un *Bulletin météorologique international* et chaque pays met en place ses services météorologiques. La coopération internationale s'organise (congrès internationaux à Leipzig en 1872, à Vienne en 1873 et à Rome en 1879) pour aboutir, en 1879, à la création du Comité international de météorologie, ancêtre de l'actuelle Organisation météorologique mondiale. En 1877, quand débute l'histoire de l'oscillation australe, une science météorologique et des réseaux d'observation sont donc en place.

Rien d'équivalent n'existe alors pour l'océan qui ne constitue pas un objet de recherche. La circulaire envoyée aux savants par les fondateurs de la Société météorologique de France le 17 août 1852 est édifiante de cet état d'esprit : « Des trois grands embranchements qui constituent le domaine entier de la physique terrestre, la géographie et la géologie, seules jusqu'à présent, sont parvenues à se créer en France, chacune, un centre où viennent converger pour rayonner ensuite, au moyen d'une large publicité, tous les faits, tous les enseignements qui peuvent résulter de l'étude de ces sciences. Placée entre elles et leur servant de lien naturel, la météorologie manque encore de ce puissant moyen d'action et de progrès. » Quant à l'océan, qui couvre 70 % de la planète, il n'a pas droit de cité dans la physique terrestre ! Au XIX^e siècle, il représente seulement un enjeu de pouvoir pour la conquête et le commerce.

Les premières campagnes océanographiques, comme celle, britannique, du *Challenger* qui parcourt les océans de 1873 à 1876, répondent au souci d'affirmer une vocation maritime et coloniale plutôt qu'à une préoccupation scientifique même si, au bout du compte, la moisson scientifique a été fructueuse. L'Allemagne, les Pays-Bas organisent aussi de telles campagnes pour aider à l'exploration de leurs colonies. Jusqu'à la seconde guerre mondiale, la recherche océanographique demeure nationale : la compétition l'emporte sur la coopéra-

tion internationale. C'est seulement en 1960 qu'est créée, au sein de l'UNESCO, la Commission océanographique intergouvernementale : quatre-vingts années après le premier Comité international de météorologie ! Quatre-vingts années qui donnent une idée de l'écart qu'il pouvait y avoir jusqu'à cette date entre la connaissance de l'atmosphère... et la méconnaissance de l'océan. C'est l'Année géophysique internationale de 1957-1958 qui fait de l'océanographie physique une branche reconnue de la physique terrestre. Cette exploration de la planète est organisée au moment du maximum d'activité solaire, source de phénomènes magnétiques contrastés. Soixante-sept pays se mobilisent dans toutes les disciplines des sciences de la terre et, pour la première fois, les océans font l'objet d'observations systématiques, simultanées et coordonnées. La zone équatoriale du Pacifique est quadrillée, des Galapagos à la Nouvelle-Guinée ; magnanime, El Niño se manifeste avec une virulence que l'on ne lui avait pas connue depuis 1941. La communauté scientifique découvre ainsi que l'invasion d'eaux chaudes concerne l'ensemble de la bande équatoriale jusqu'au méridien 180° ; El Niño change d'échelle ! Les chercheurs découvrent aussi que les alizés sont faibles et les précipitations abondantes dans le Pacifique équatorial central, confirmant ainsi le résultat oublié de Leighly. On ne peut alors plus éluder la question : y a-t-il une relation de cause à effet entre l'océan et ses anomalies chaudes (El Niño) et l'atmosphère et ses perturbations à l'échelle du Pacifique (oscillation australe) ?

Récapitulons. L'oscillation australe met en évidence un jeu de bascule de l'atmosphère dans la région indo-pacifique que l'on peut ainsi résumer : plus la pression s'élève dans le Pacifique, plus elle diminue dans l'océan Indien et réciproquement. La mousson indienne est affectée par cette oscillation puisque, à des pressions élevées dans l'océan Indien correspond une défaillance de la mousson qui peut être extrêmement sévère. Les mesures effectuées durant l'Année géophysique internationale de 1957-1958 montrent que ce programme s'est déroulé lors d'une phase de basse pression dans le Pacifique, donc de haute pression dans l'Indien. Cette valeur faible de l'indice de l'oscillation australe correspond à un épisode El Niño qui n'est pas un événement confiné aux seules côtes d'Amérique du Sud. Partant de ces résultats confirmés par l'événement El Niño de 1965-1966, Bjerknes propose un schéma simple d'interaction entre l'océan et l'atmosphère associant les deux phénomènes d'El Niño et de l'oscillation australe. Bien comprendre cette interaction implique d'esquisser les grands traits des circulations atmosphérique et océanique en région tropicale.

3 Le couple océan-atmosphère

LA ROTATION DE LA TERRE ET LA FORCE DE CORIOLIS

L'océan et l'atmosphère, les deux principaux acteurs de l'aventure climatique, sont deux fluides dont la dynamique est régie par les mêmes forces : la pesanteur et la pression. Si la Terre ne tournait pas sur elle-même, les vents souffleraient directement des hautes pressions polaires vers les basses pressions équatoriales (il en serait de même pour les courants marins) tandis que l'air chaud s'élèverait au-dessus de l'équateur retournant vers les pôles au sommet de la troposphère, exportant ainsi une partie de l'excès de chaleur.

Aucun indice n'alerte nos sens de cette rotation qui nous entraîne pourtant à mille sept cents kilomètres à l'heure. Il est plus naturel d'imaginer que ce sont les astres qui se déplacent autour d'une Terre immobile. L'astronome polonais Nicolas Copernic a publié en 1542 sa conception d'un système faisant de la Terre non plus le centre du monde mais un simple satellite du Soleil tournant autour de lui comme une toupie. Trois cents ans ont été nécessaires pour que la rotation de la Terre sur son axe soit démontrée expérimentalement. En 1851, le physicien français Léon Foucault suspend à un fil de soixante-sept mètres de longueur sous le dôme du Panthéon, à Paris, un pendule de vingt-huit kilos. Chacun constate que le plan d'oscillation du pendule, muni d'un stylet inscrivant sa trajectoire sur le sable, effectue un tour complet dans le sens des aiguilles d'une montre en trente-deux heures. Cette expérience est visible de nos jours avec un pendule de moindre dimension au Conservatoire national des arts et métiers de Paris.

La rotation de la Terre fut ainsi démontrée ainsi que son effet sur les mouvements des corps : ici, le pendule dont le plan d'oscillation semble animé d'un

mouvement de rotation par rapport à la Terre, alors, qu'en réalité, c'est la Terre qui tourne autour du plan du pendule. En mécanique, on associe généralement un mouvement à la force qui le génère : la force de gravité pour une pomme qui tombe d'un arbre ou les satellites tournant autour de la Terre. Par analogie, une force a été « inventée » pour traduire l'influence de la rotation terrestre sur les mouvements des corps ; c'est la force de Coriolis du nom du mathématicien français Gaspard Coriolis qui en donne, en 1836, la traduction mathématique. Cette force qui s'applique à tout corps en mouvement sur un solide en rotation, le dévie vers la droite dans l'hémisphère Nord, vers la gauche dans l'hémisphère Sud. Maximale aux pôles et nulle à l'équateur, elle est généralement négligeable à la surface de la Terre comparé aux autres forces. Même si, sur autoroute, vous y êtes soumis à votre insu, ce n'est pas elle qu'il faut incriminer en cas d'accident, ni si vous manquez la cible au tir à la carabine ! Cette force devient en revanche importante sur les longues trajectoires et les mouvements lents et continus comme les courants atmosphériques et marins. Trois exemples permettent de mieux illustrer l'effet Coriolis.

Au début du ^{xx}e siècle, le Norvégien Fridtjof Nansen remarque, lors de son périple dans les glaces de l'Arctique, que la banquise ne dérive pas dans l'axe du vent mais sur sa droite ; le Suédois Walfrid Ekman avance les bases théoriques de cette observation en montrant qu'un courant de surface naît à droite de la direction du vent dans l'hémisphère Nord, à gauche dans l'hémisphère Sud.

Imaginons ensuite le lâcher d'un objet du haut de la tour Eiffel. Celui-ci n'atteint pas le sol à la verticale du point de départ ; il atterrit une dizaine de centimètres plus à l'est. Pourquoi ? C'est que le haut de la Tour décrit en vingt-quatre heures un cercle plus grand que celui décrit par sa base ; il va donc plus vite. L'objet lâché « sans vitesse initiale » a donc, en réalité, une vitesse par rapport au sol, dirigée vers l'est. Pendant les huit secondes de sa chute, l'objet continue à se déplacer vers l'est par rapport au sol.

Un tir de missile de l'équateur vers le pôle Nord offre un dernier exemple. Quand le projectile quitte le lanceur, à sa vitesse de tir vers le nord se superpose un déplacement vers l'est. Mais, bien que la vitesse vers l'est de la surface de la Terre soit maximale à l'équateur, le missile semble aller en droite ligne car il est animé de la même vitesse. En se déplaçant vers le nord, il conserve sa vitesse d'origine alors que, sous lui, la Terre tourne à une vitesse décroissante. Par rapport à la Terre, le missile se déplace donc non seulement vers le nord, mais également vers l'est à une vitesse de plus en plus grande.

Les grands traits des circulations atmosphérique et océanique résultent de l'équilibre entre les forces de pression et la force de Coriolis. Cet équilibre dit « géostrophique » implique que ces deux forces sont, à un instant donné, d'intensité égale et de direction opposée. La force de pression est toujours orientée des hautes

vers les basses pressions alors que la force de Coriolis est perpendiculaire à la vitesse. A l'équilibre, la vitesse est nécessairement perpendiculaire au gradient de pression (tangent aux isobares) et non pas dans le sens des variations de pression comme ce serait le cas si la Terre ne tournait pas (figure 3.1). Ainsi, dans l'hémisphère Nord, le vent tourne-t-il dans le sens des aiguilles d'une montre autour des anticyclones et dans le sens inverse autour des dépressions. Le contraire se produit dans l'hémisphère Sud. Il en va de même pour les courants océaniques.

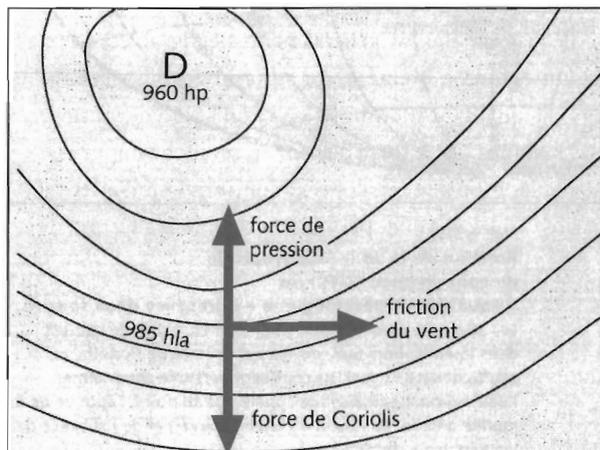


Figure 3.1

Champ de pression, force de Coriolis et vents dans l'hémisphère Nord.

En l'absence de rotation terrestre, les vents souffleraient des hautes pressions vers les basses pressions (D). Mais la force de Coriolis due à la rotation de la Terre dévie les vents à droite dans l'hémisphère Nord et vers la gauche dans l'hémisphère Sud. A l'équilibre géostrophique, la force de pression égale la force de Coriolis et le vent est tangent aux isobares. Dans l'hémisphère Nord, les vents tournent dans le sens des aiguilles d'une montre autour des hautes pressions et en sens inverse autour des basses pressions. C'est le contraire dans l'hémisphère Sud.

**ÉQUATEUR MÉTÉOROLOGIQUE ET CIRCULATION MÉRIDIENNE :
LES CELLULES DE HADLEY**

De part et d'autre de l'équateur existent en permanence des anticyclones, ou zones de haute pression atmosphérique. Leur position et leur intensité varient avec les saisons : ils se renforcent et s'élèvent en latitude durant l'été de l'hémisphère où ils se situent. Il s'agit, au-dessus de l'Atlantique, de l'anticyclone des Açores, à l'origine du beau temps d'été sur l'Europe de l'Ouest, et de l'anticyclone de Sainte-Hélène dans l'hémisphère Sud. Des structures équivalentes existent au-

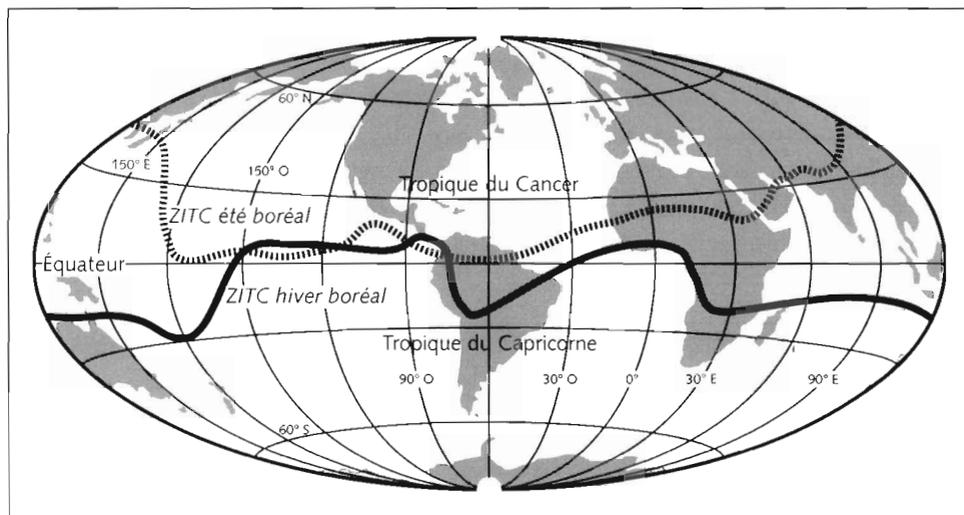


Figure 3.2

Position de la zone intertropicale de convergence (ZITC) ou

« équateur météorologique » durant les deux saisons.

Les alizés de nord-est dans l'hémisphère Nord, de sud-est dans l'hémisphère Sud, déviés par la force de Coriolis, soufflent vers l'ouest. Ils confluent vers une zone calme, l'équateur météorologique appelé pot au noir à l'époque de la marine à voile, en raison du temps couvert et de l'absence de vent subis par les marins.

dessus du Pacifique avec les hautes pressions de Californie au nord et de l'île de Pâques au sud.

Les vents tournent autour de ces anticyclones ; leur branche équatoriale constitue les alizés de secteur est dont la constance était prisée des navigateurs lors de leurs pérégrinations à travers le monde. Les Anglais, pragmatiques et bons marins, ont d'ailleurs baptisé ces vents *trade winds* ou vents du commerce. Les alizés du nord et du sud confluent le long d'une ligne dénommée zone intertropicale de convergence (ZITC) ou « équateur météorologique » (figure 3.2) : c'est le fameux « pot au noir », angoisse des navigateurs qui pouvaient s'y encastrer plusieurs semaines mais également des pionniers de l'aviation transocéanique qui y rencontraient de fortes turbulences dangereuses pour leurs fragiles aéronefs. Le long de cette ZITC, la rencontre des alizés chargés d'humidité océanique se traduit par des mouvements ascendants des masses d'air qui génèrent des turbulences et des précipitations intenses quand la vapeur d'eau se condense au fur et à mesure que l'air se détend en prenant de l'altitude. Les alizés transforment leur énergie cinétique horizontale en énergie cinétique verticale si bien que, au niveau de la mer, les vents sont faibles sous ces régions d'ascendance, au grand dam des marins.

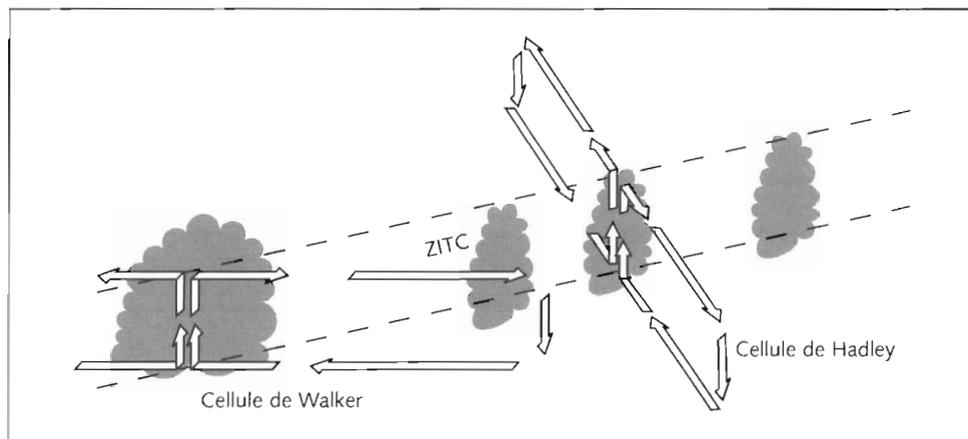


Figure 3.3

Circulation atmosphérique intertropicale de Hadley et de Walker.

En région subtropicale, la circulation atmosphérique à grande échelle peut être décomposée en une circulation méridienne (nord-sud ou sud-nord), avec deux « cellules de Hadley » (l'une au nord, l'autre au sud de l'équateur) et une circulation longitudinale (est-ouest ou ouest-est) avec, au-dessus des océans, les cellules de Walker. Cela constitue une manière simple de présenter la même circulation tridimensionnelle de Hadley-Walker. Elle se caractérise par des zones d'ascendance, donc de pluies, près de l'équateur et à l'ouest des océans (Indonésie, Amazonie) et des zones de descente d'air sec en région tropicale à l'est des océans et sur les continents voisins. Celles-ci sont marquées par la ceinture des grands déserts : dans l'hémisphère Nord, les déserts du Mexique-Texas-Arizona, du Sahara et de Gobi (d'origine plus complexe par le voisinage de l'Himalaya), et, dans l'hémisphère Sud, les déserts des hauts plateaux andins, du Kalahari et le désert australien.

En altitude, ce flux ascendant diverge vers le nord et vers le sud, et, refroidi et asséché, l'air redescend (subsidence) dans les régions subtropicales vers 30° de latitude provoquant des situations anticycloniques. On nomme « cellule de Hadley » (figure 3.3) cette boucle de circulation méridienne qui s'établit entre l'équateur météorologique ou pot au noir, zone de basse pression, et le cœur des anticyclones, au nord comme au sud. Quoique perturbé par les moussons, ce schéma de circulation se retrouve sur les continents, tout autour de la Terre. Les aires de subsidence correspondent à des climats secs à l'origine des grandes ceintures désertiques des deux hémisphères, telles le Sahara au nord, le Kalahari au sud.

Les navigateurs eurent tôt fait de tirer parti de cette configuration des vents. A la tête d'une flottille portugaise, Vasco de Gama, à la recherche de la route des Indes entre 1497 et 1499, montre déjà une connaissance approfondie du régime des vents en Atlantique. Plutôt que de s'encalminer au large des côtes d'Afrique

Des vertus pédagogiques des cyclones...

Phénomène météorologique spectaculaire tant par sa nature que par ses conséquences quand il aborde les côtes, le cyclone, souvent évoqué lors des événements El Niño-La Niña, permet d'introduire des notions sur les échanges entre océan et atmosphère et sur le transport de chaleur dont la méconnaissance nuit à la compréhension d'ENSO.

Un cyclone est une perturbation météorologique des zones tropicales. Mythique, il a reçu un grand nombre d'appellations dans les différentes régions où il sévit. Dans le Pacifique oriental, au Mexique, en Californie et à l'ouest de l'Atlantique, il est baptisé ouragan (*hurricane* en anglais) d'après le dieu maya du vent Hurraken. Dans l'océan Indien, on parle de cyclone, du grec *kuklos*, « qui s'enroule comme un serpent », terme généralement utilisé en français. Près des côtes septentrionales de l'Australie, il est dénommé *willy willy* et, enfin, dans le Pacifique nord-ouest, le terme typhon a la préférence mais son étymologie est discutée : du portugais *tufão*, de l'arabe *tufan* signifiant « tourbillon » ou du chinois *tai-fung*, « grand vent » ?

Véritable soupape de sécurité, sorte de pompe à énergie, il permet à l'océan d'évacuer vers l'atmosphère et, ainsi, vers les régions tempérées l'excès de chaleur accumulé en région tropicale. Des statistiques sur les trajets de cyclones en Atlantique Nord montrent qu'ils naissent vers les 10° de latitude pour s'évanouir entre 30° et 40° N, certains terminant leur parcours sous forme de tempête sur les côtes ouest d'Europe.

Un cyclone ne peut naître tant que la température de la mer ne dépasse pas 27 °C sur une cinquantaine de mètres d'épaisseur. Une telle température permet une évaporation intense et des transferts d'humidité de l'océan vers l'atmosphère. Chaque année, quelques centaines de cyclones prennent naissance au-dessus de l'océan tropical, l'activité cyclonique étant maximale quand la température des eaux de surface atteint 28 à 29 °C. Il s'agit là de conditions nécessaires mais pas suffisantes à la formation de tempêtes tropicales et cyclones. L'existence de vents forts en altitude empêche en effet la cyclogenèse ; ils expliquent l'absence d'activité cyclonique en Atlantique quand le

Pacifique est en période El Niño. D'autre part, les cyclones ne peuvent naître qu'à une certaine distance de l'équateur à des latitudes où la force de Coriolis, indispensable à l'enroulement en spirale des masses d'air, est suffisante. Environ 10 % des tourbillons atmosphériques ainsi créés évoluent en cyclones.

Cette transformation d'énergie thermique en énergie cinétique représente un cas extrême d'échange entre océan et atmosphère et souligne un fait fondamental. L'atmosphère où nous vivons, c'est-à-dire la troposphère, épaisse d'une quinzaine de kilomètres, étant transparente au rayonnement solaire, ce sont les terres et l'océan qui réalisent l'essentiel (plus des deux tiers) de l'absorption des deux cent quarante watts par mètre carré ; ils constituent le « radiateur » de l'atmosphère qui est ainsi chauffée par le bas. Un cyclone souligne, oh combien ! le caractère dynamique de l'atmosphère. L'air afflue de toutes parts vers le centre de basse pression ; ce flux continu vers l'œil du cyclone peut seulement s'échapper vers le haut où il forme d'immenses cumulo-nimbus.

Dans un cyclone, cette libération de chaleur latente accroît l'instabilité et les mouvements ascendants violents. Le cyclone puise une énergie nouvelle tant qu'il reste en contact avec des masses d'eau chaude, chaleur et humidité étant indispensables à sa survie. Quand la masse d'eau chaude du Pacifique se déplace vers l'est, les cyclones suivent ce déplacement ; aucun ne sévit à l'ouest vers l'océan, la fréquence est maximale dans le Pacifique central, dans la région Polynésie-Hawaii-îles Cook, et certains naissent à l'est, frappant l'Amérique centrale généralement concernée par des cyclones d'origine atlantique. L'ouragan Pauline, qui a durement touché Acapulco et Oaxaca au Mexique à l'automne 1997, le plus violent depuis trente-cinq ans, est né dans le Pacifique.

Lorsqu'il arrive sur les côtes ou dans des zones océaniques insuffisamment chaudes, l'énergie produite par la chaleur latente devient inférieure à l'énergie cinétique dissipée et le cyclone s'évanouit ; la température de surface de l'océan constitue en effet un paramètre critique pour l'auto-alimentation en chaleur du cyclone.

dans le pot au noir par la route directe, il tire, à partir des îles du Cap-Vert, un bord vers le Brésil en s'appuyant sur les alizés de nord-est. Il descend ensuite vers le sud au large de l'Amérique du Sud infléchissant sa route vers le cap de Bonne-Espérance seulement au-delà de 30° S pour bénéficier des vents d'ouest. Quelques décennies plus tard, les Espagnols n'agissent pas différemment dans le Pacifique. Parti du Mexique en 1527, Alvaro de Saavedra se laisse pousser par les alizés de nord-est jusqu'aux Philippines, ouvrant ainsi la route des galions espagnols d'Acapulco à Manille. Si l'aller s'effectue entre 5° et 10° N, la route du retour, reconnue par Andrés de Urdaneta en 1565, se situe trente degrés plus au nord pour capter les vents dominants d'ouest à la bordure nord de l'anticyclone. La navigation aux basses latitudes était donc commandée par deux impératifs : éviter le pot au noir et profiter des vents portants, soit les vents d'ouest entre 30° et 40° N, soit les alizés en zone tropicale. Les grandes courses transocéaniques à la voile dont les navires remontent mieux au vent se jouent toujours sur le choix de la meilleure route météorologique comme le montre l'appui de météorologistes « routeurs ».

La position de la ZITC ou équateur météorologique ne coïncide pas avec l'équateur géographique ; elle évolue avec les saisons, étant toujours « tirée » vers l'hémisphère d'été. Cependant, elle se situe le plus souvent au nord de l'équateur, même durant l'été austral en raison de la dissymétrie de la répartition des océans et des continents entre les deux hémisphères.

UN SOUPÇON DE COMPLEXITÉ : LA CIRCULATION DE WALKER

La circulation atmosphérique est en réalité plus complexe. Les alizés qui soufflent du secteur est vers le secteur ouest entraînent les eaux chaudes de surface, mouvement compensé, à l'est, par des remontées d'eaux plus froides. Des différences de températures naissent donc entre les deux rives des océans tropicaux et, bien sûr, entre continents et océans. C'est particulièrement vrai dans le Pacifique ouest où se constitue un vaste réservoir où la température de la mer dépasse 28 à 29 °C. C'est la région du monde où l'océan transfère un maximum d'énergie vers l'atmosphère ; la convection y est très intense. L'air, réchauffé et chargé d'humidité au contact de l'océan s'élève ; au cours de cette ascension, la vapeur d'eau se condense donnant naissance à des cumulo-nimbus particulièrement développés, porteurs de précipitations qui arrosent généreusement la zone indonésienne. Cette convection est la branche ascendante (basse pression atmosphérique) d'une cellule de circulation de l'atmosphère le long de l'équateur (figure 3.3). La branche descendante de cette cellule, reliée à la branche ascendante par un courant d'altitude d'ouest en est, se situe à l'est au niveau d'eaux océaniques plus froides. Elle correspond à des pressions atmosphériques élevées et à un apport d'air sec ; les précipitations sont en effet très rares sur les côtes du Pérou et du Nord-Chili. Les alizés qui soufflent d'est en ouest à la surface de l'océan bouclent cette cellule de

circulation à qui Bjerknes a donné le nom de Walker pour honorer le découvreur de l'oscillation australe. La relation est en effet directe entre cette circulation et l'oscillation australe. L'intensité des alizés est proportionnelle à la différence de pression atmosphérique entre l'est et l'ouest du Pacifique, si bien que l'indice qui la caractérise constitue également une mesure de l'intensité de la circulation de Walker. A un indice élevé correspondent des alizés intenses et réciproquement.

Une cellule analogue de moindre dimension s'observe au-dessus de l'Atlantique. La situation est plus complexe dans l'océan Indien que l'on peut qualifier de demi-océan puisque son extension vers le nord est limitée à 25° N par l'imposante masse du continent asiatique. Il s'établit ainsi, tout au long de la ceinture équatoriale, une série de cellules où alternent des zones de convection (basses pressions atmosphériques, transferts de chaleur importants vers l'atmosphère, précipitations abondantes) comme le Pacifique ouest, l'Afrique équatoriale, l'Amazonie et des zones de subsidence ou de hautes pressions beaucoup plus sèches.

Dans la réalité, ces deux cellules ne sont pas indépendantes ; l'air est simultanément affecté par les circulations de Hadley et de Walker qui représentent la décomposition en mouvements méridiens et zonaux comme on le fait, en physique, dans la décomposition des forces. Ainsi, durant un épisode El Niño qui correspond à un affaiblissement de la circulation de Walker, l'étalement des eaux chaudes vers le Pacifique central et oriental accroît les échanges thermiques avec l'atmosphère et intensifie la cellule de Hadley et, donc, le transfert vers les hautes latitudes. Ainsi s'amorce la chaîne qui explique pourquoi les conséquences d'El Niño ne se limitent pas aux régions tropicales même si c'est là qu'elles sont le plus aisément identifiées.

LA THERMOCLINE OCÉANIQUE

Comme l'océan reçoit son énergie « par le haut », la température diminue de la surface au fond avec des gradients verticaux fort différents d'une région à l'autre. Dans les régions polaires, les températures superficielles basses, même en été, ne permettent pas l'installation d'un gradient thermique marqué. Il en va tout autrement aux basses latitudes. En région tropicale, la température, très élevée en surface (25 à 30 °C), diminue brusquement avec la profondeur : c'est la thermocline (figure 3.4). En dessous, la variation est à nouveau très lente avec une température inférieure à 5 °C dans les couches intermédiaires et profondes. En zone tempérée, une thermocline saisonnière se forme en période estivale.

La thermocline sépare donc une « sphère chaude » de surface d'une « sphère froide » plus profonde. A l'échelle de l'océan, cette sphère chaude représente un très faible volume comparé à la sphère froide ; en moyenne, l'océan est froid avec une température de l'ordre de 2 °C. Mais la thermocline représente aussi une zone de gradient vertical de masse volumique ralentissant les mouvements verticaux et

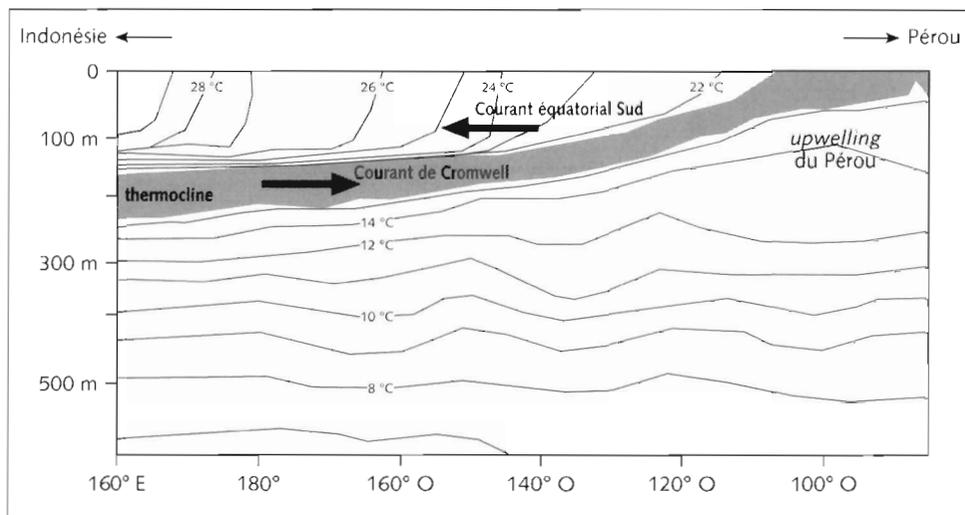


Figure 3.4

Coupe de température dans le Pacifique équatorial et thermocline.

En régime d'alizés, la distribution de la température montre une profonde dissymétrie avec une accumulation d'eau chaude vers l'Indonésie où elle dépasse 28 °C et, par compensation, une remontée d'eau « froide » ou *upwelling* à l'est où elles sont inférieures à 22 °C. La thermocline, qui sépare la sphère chaude superficielle de la sphère froide profonde, se situe donc à plus grande profondeur à l'ouest du bassin. Dans la couche chaude de surface, le courant équatorial Sud coule vers l'ouest. Au cœur de la thermocline, le courant de Cromwell coule vers l'est. On observe ainsi, dans l'océan, une cellule de circulation symétrique à celle de Walker dans l'atmosphère.

la diffusion. Dans le phénomène El Niño, nous nous référons souvent à la thermocline : parce qu'elle marque la base de la couche d'eau chaude et parce que ses variations d'immersion constituent un indice de l'évolution du phénomène.

LA CIRCULATION OcéANIQUE : COURANTS ET CONTRE-COURANTS

L'océan n'est donc pas un milieu homogène : à une même profondeur, il existe, comme dans l'atmosphère, des différences de pression qui induisent des courants pour combler ces différences. La topographie de la surface de la mer constitue une mesure de la pression océanique : plus le niveau de la mer est élevé et plus la pression est forte et réciproquement. Dans l'atmosphère on déduit avec une bonne approximation le vent de l'observation des champs de pression. De même dans l'océan, comme dans l'atmosphère, on peut estimer les courants à partir de la topographie de la surface marine en tablant sur l'hypothèse de l'équilibre géostrophique.

phique. Les différences de niveau marin sont cependant faibles et donc difficiles à mesurer : ainsi au Gulf Stream, un des courants marins les plus intenses, correspond une dénivellation d'environ un mètre pour cent kilomètres. C'est l'observation depuis l'espace qui a permis de surmonter cette difficulté. Les premières mesures du niveau de la mer par satellite ont été faites au début des années 70. Elles n'ont cessé de progresser depuis et, actuellement, le satellite franco-américain Topex-Poseidon, lancé en 1992, qui survole la quasi-totalité des océans est capable de déceler des différences de niveau de l'ordre du centimètre soit, exprimées en pression, un hectopascal. C'est le vent, en générant les courants de surface, qui induit les différences de pression et de niveau océaniques.

Dans le Pacifique (la situation est proche en Atlantique), les alizés génèrent de part et d'autre de l'équateur météorologique deux puissants courants de surface s'écoulant à une vitesse moyenne de soixante kilomètres par jour : le courant équatorial Nord (de 10° N à 25° N) et le courant équatorial Sud (de 2° N à 20° S) (figure 3.5). Portant tous deux à l'ouest, ils accumulent des eaux chaudes dans la partie occidentale des bassins, d'où une montée du niveau marin particulièrement nette dans le réservoir d'eaux chaudes du Pacifique où la surélévation est voisine de un mètre par rapport à l'autre bord. De là partent une série de courants visant à rétablir l'équilibre des pressions. D'abord les puissants courants dits de bord ouest que sont le Gulf Stream dans l'Atlantique Nord et le Kuroshio dans le Pacifique Nord qui constituent les branches ouest de la grande boucle océanique, réplique de la circulation anticyclonique de l'atmosphère. Cette boucle est fermée par les courants équatoriaux Nord et Sud entre lesquels, le long de l'équateur météorologique, s'insinue vers l'est le contre-courant équatorial qui marque l'équateur océanique. Ce gradient est-ouest de pression, inverse du gradient atmosphérique, cette pente de la surface océanique induit également le long de l'équateur géographique un courant de compensation important qui coule sous le courant équatorial Sud dans la thermocline et en sens inverse à des profondeurs allant de deux cent cinquante mètres à l'ouest à moins de cent mètres à l'est où il alimente l'*upwelling* équatorial. C'est le courant de Cromwell, du nom de l'océanographe américain qui le découvrit en 1954. Dans le plan équatorial, l'océan présente donc une circulation analogue à la circulation de Walker pour l'atmosphère avec des variations symétriques des champs de pression, signature du couplage entre les deux fluides.

ALIZÉS ET REMONTÉES D'EAU :

UPWELLINGS CÔTIERS ET DIVERGENCE ÉQUATORIALE

Une carte des températures superficielles du Pacifique équatorial (encart couleur p. 66), montre d'abord des températures relativement fraîches au large du Pérou : de 16 à 17 °C à la latitude de 8° S. Lors de son voyage dans les « régions

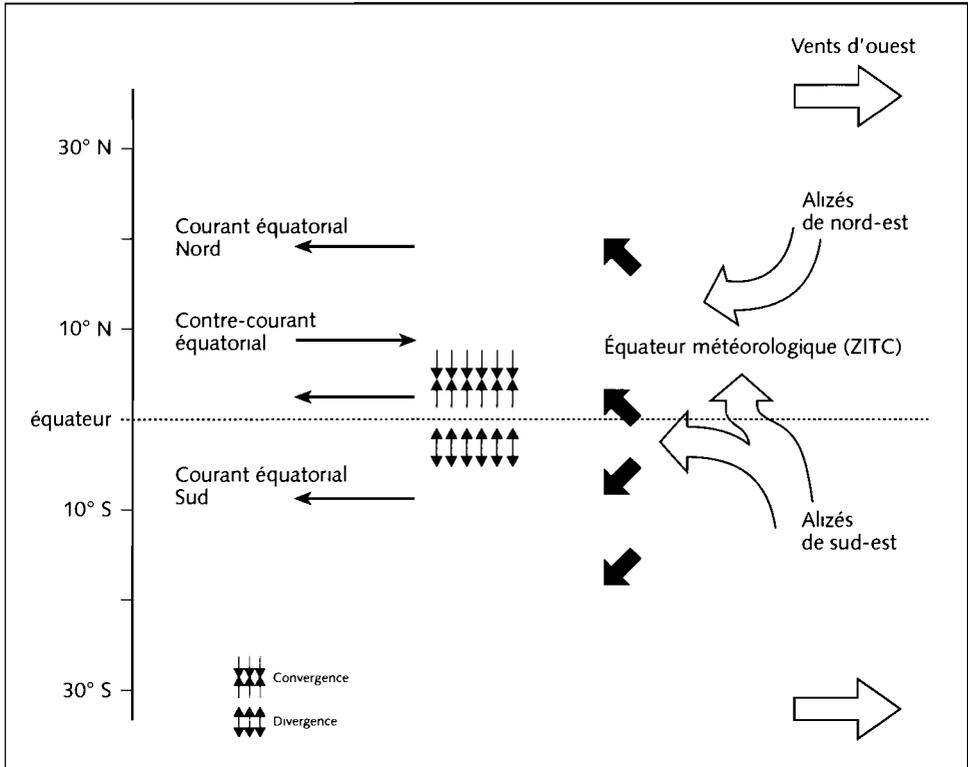


Figure 3 5

Circulation dans la couche superficielle de l'océan tropical.

Ce schéma montre les relations entre vents, courants de surface et transports d'eau (flèches noires) dans la couche d'entraînement du vent. Les flux d'eau sont dirigés à droite du vent et du courant de surface dans l'hémisphère Nord, à gauche dans l'hémisphère Sud en raison de la rotation terrestre. Cela provoque divergences et convergences à la surface de l'océan.

équinoxiales du nouveau continent » de 1799 à 1804, Alexandre von Humboldt est le premier à faire état du contraste entre ces eaux côtières, anormalement froides dans une zone où la température de l'air est élevée, et celles du large qui dépassent 23 °C. Il attribue cette anomalie aux transports d'eau d'origine arctique par le courant auquel on donna son nom : courant de Humboldt. En réalité, ce courant entraîné vers le nord le long des côtes d'Amérique du Sud a, en raison de la force de Coriolis, une composante vers la gauche, entraînant ainsi les eaux de surface vers le large. Celles-ci sont remplacées à la côte par des eaux « profondes » (originaires de deux à trois cents mètres), froides et riches en nutriments (figure 3.6) : c'est l'*upwelling* côtier. Le même phénomène se produit sur les côtes

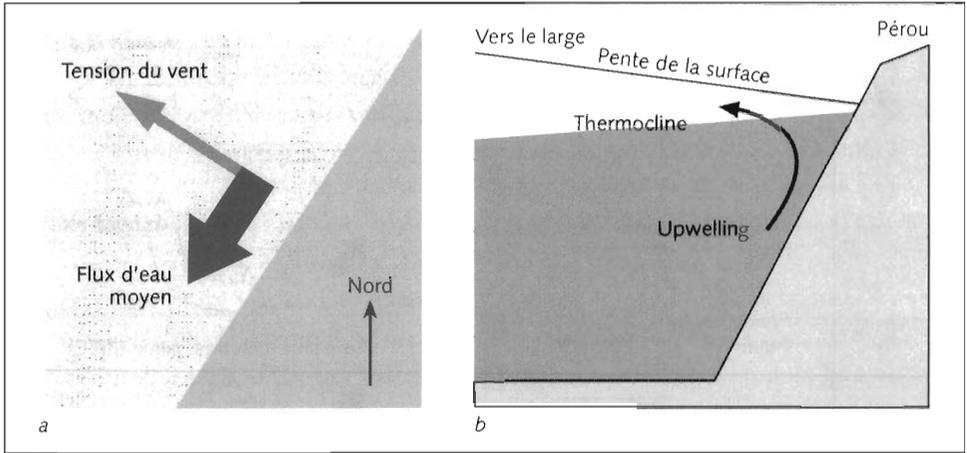


Figure 3.6

Remontées d'eau côtières ou *upwellings*.

a. Par friction, un vent soufflant parallèlement à la côte crée, dans l'hémisphère Sud, un transport moyen à sa gauche, à angle droit de la direction vers laquelle il souffle. Ainsi, en arrivant dans la zone des alizés au large des côtes de l'Équateur et du Pérou, le courant de Humboldt, qui se dirige vers le nord, est dévié vers l'est.

b. Dans ces conditions, les eaux de surface sont chassées vers le large, d'où une pente de la mer positive à partir de la côte. Pour compenser ce déficit, les eaux sous-jacentes, plus froides et riches en nutriments, remontent vers la surface.

de Californie et, en Afrique, sur les côtes du Maroc et de la Mauritanie au nord et de la Namibie au sud. Toutes ces régions ainsi fertilisées par des *upwellings* côtiers comptent parmi les plus poissonneuses du monde.

Les alizés entraînent vers l'ouest le courant équatorial sud, à cheval sur l'équateur. Vis-à-vis de la force de Coriolis, c'est une situation originale puisque les eaux de surface sont entraînées à droite (vers le nord) au nord de l'équateur et à gauche (vers le sud) au sud de l'équateur. Il y a donc, à l'équateur, divergence des eaux de surface et appel d'eau profonde, comme le long des côtes du Pérou. Au sein de cette langue d'eau froide équatoriale, la température passe de 19 °C à 20 °C près des Galapagos à plus de 26 °C à 180° de longitude. Le refroidissement superficiel par remontée éventuelle d'eaux profondes est d'autant plus difficile à l'ouest des océans que la couche superficielle chaude entraînée par le courant équatorial sud s'épaissit à l'ouest, rendant plus difficile la remontée des couches d'eaux froides de la base de la thermocline.

LES ONDES DANS L'OcéAN

Le terme « onde » est étroitement associé à l'océan puisqu'il signifie « eau » en français poétique et « vague » (*wave*) en anglais. Même à notre époque de télévision, de fibre optique, de radio, les ondes les plus aisées à observer sont toujours celles qui naissent sur l'eau quand on y jette une pierre et qui font « danser » le bouchon du pêcheur. Comme la plupart des systèmes physiques, l'océan et l'atmosphère propagent leurs perturbations par le biais d'ondes.

Quand des masses d'eau sont attirées par la Lune et le Soleil, une onde de marée naît qui se propage dans l'océan et s'amplifie en montant sur les plateaux continentaux et en pénétrant dans les mers littorales. Toute onde s'accompagne de mouvements de particules de fluide. Dans le cas d'une vague, il s'agit de mouvements circulaires dans le plan vertical sans déplacement de masse. Pour des ondes de grande longueur d'onde, des mouvements horizontaux entraînent un certain déplacement de masse si bien qu'elles prennent l'allure de véritables courants.

Avec la faible déviation des trajectoires aux basses latitudes, le changement de sens de la force de Coriolis à l'équateur et la présence de la thermocline à quelques dizaines de mètres sous la surface, l'océan équatorial constitue un excellent « guide d'ondes » facilitant la propagation d'un ébranlement ou d'une vibration. Il s'agit alors d'ondes de longueur d'onde de plusieurs centaines de kilomètres. Une tension provoquée en surface, par exemple par une variation du vent autour de l'équateur, génère deux types d'ondes :

- les *ondes équatoriales de Kelvin* (du nom du physicien sir William Thomson, lord Kelvin), ondes planétaires dont la longueur d'onde est très grande par rapport à la profondeur de la mer, se propagent uniquement vers l'est à des vitesses de l'ordre de deux cents kilomètres par jour. Ces ondes sont piégées à l'équateur, la force de Coriolis les y ramenant si elles ont des velléités de s'en écarter. Prenons l'exemple d'un renforcement des alizés ; il intensifie la divergence des eaux et provoque la remontée de la thermocline. Cette perturbation déclenche une onde de Kelvin d'*upwelling* qui suit le guide d'onde équatorial ; la remontée de la thermocline se propage vers l'est. En deux mois, l'onde de Kelvin générée au centre du Pacifique gagne la côte d'Amérique du Sud. A l'inverse, un affaiblissement des alizés ou un coup de vent d'ouest génèrent une onde de Kelvin de descente ou de *downwelling* qui propage vers l'est un approfondissement de la thermocline et, donc, une accumulation d'eaux chaudes.
- les *ondes de Rossby* (décrites en 1939 par le météorologue Carl-Gustav Rossby) ondes planétaires de grande longueur d'onde, existent à toutes les latitudes et se propagent uniquement vers l'ouest. Leur vitesse de déplacement dépend de nombreux facteurs parmi lesquels la longueur d'onde, la stratification de l'océan, la vitesse des courants auxquels elle se superpose et, surtout, la latitude. De telles

ondes se déplacent donc rapidement en région équatoriale mais, cependant, deux à trois fois moins vite que les ondes de Kelvin. Un an environ leur est nécessaire pour traverser tout le Pacifique. De même que les perturbations atmosphériques génèrent des ondes de Kelvin, elles produisent aussi et simultanément vers l'ouest des ondes de Rossby de sens contraire : à une onde de Kelvin d'*upwelling* correspond une onde de Rossby de *downwelling* et *vice versa*.

Lorsque ces ondes atteignent l'extrémité du bassin, elles se réfléchissent sur les côtes en changeant de nature puisqu'elles changent de sens de propagation. A l'est, les ondes de Kelvin réfléchies repartent vers l'ouest sous forme d'ondes de Rossby et, réciproquement, à l'ouest des bassins où les ondes de Rossby repartent vers l'est comme ondes de Kelvin.

Les déplacements verticaux de la thermocline au passage d'une onde (encart couleur p. 65) ont une amplitude de quelques dizaines de mètres, ce qui se traduit par une variation du niveau de la mer d'une dizaine de centimètres parfaitement décelable par les satellites.

En résumé, l'atmosphère transmet à l'océan des perturbations qui se propagent vers l'est et vers l'ouest sous forme d'ondes de descente et de remontée puis qui se réfléchissent aux bordures des bassins océaniques. A la différence de la perturbation atmosphérique qui s'évanouit au bout de quelques jours, la réponse océanique, par ce ballet ondulatoire, dure plusieurs mois. C'est donc bien l'océan qui, en fin de compte, pilote la perturbation. Ainsi peut-on proposer des scénarios de déroulement des différentes phases d'El Niño en suivant le parcours enchevêtré de ces ondes (chapitre 4, figure 4.3).

4 Comment fonctionne ENSO

LE COUPLE OCÉAN-ATMOSPHÈRE ET LE SCHÉMA DE BJERKNES

Tout ce qui gravite autour d'El Niño illustre à merveille la notion de système couplé que forment l'océan et l'atmosphère, chacun avec sa dynamique propre. La fluctuation d'une des deux composantes perturbe l'autre qui, en retour, accentue ou, au contraire, stabilise les fluctuations de la première. En décrivant les échanges entre océan et atmosphère dans le Pacifique, Bjerknes indique : « A un accroissement du gradient de pression à la base de la cellule de Walker correspond un renforcement des vents d'est le long de l'équateur et donc aussi de l'*upwelling* équatorial et, finalement, du contraste des températures de surface entre l'est et l'ouest du Pacifique équatorial. Cette réaction en chaîne montre que l'intensification de la cellule de Walker génère une augmentation du contraste thermique océanique qui, à son tour, active encore davantage la circulation atmosphérique. L'inverse se produit si l'on prend comme point de départ l'affaiblissement de la circulation de Walker. » Nous sommes au cœur d'un système à rétroaction positive qui tourne en boucle jusqu'à ce qu'une perturbation le fasse basculer sans que l'on sache qui de l'océan ou de l'atmosphère fut l'auteur de cette perturbation. C'est ce « pas de deux » décrit par Bjerknes entre la cellule de Walker et sa contrepartie océanique qui lie l'oscillation australe au gradient thermique est-ouest du Pacifique équatorial que l'on baptise ENSO : El Niño-Southern Oscillation qui consacre le mariage entre l'atmosphère et l'océan.

Tout indice caractérisant l'un des deux systèmes caractérise également l'autre. L'indice de l'oscillation australe ou SOI, différence de pression atmosphérique

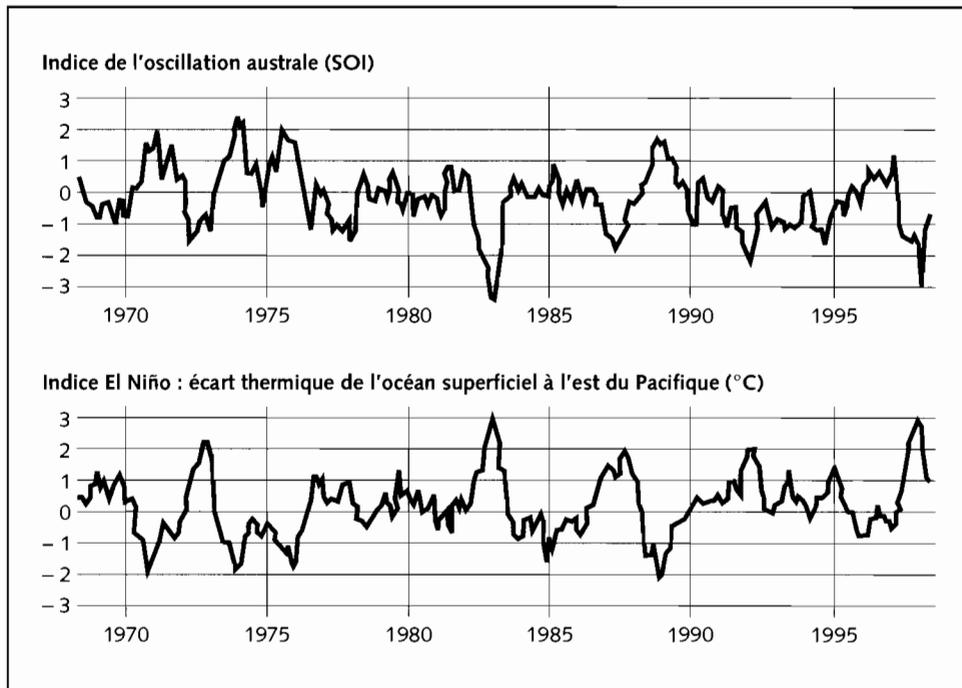


Figure 4.1
Évolution d'ENSO mise en lumière par l'indice de l'oscillation australe et l'indice El Niño de 1968 à 1998.

L'évolution de ces deux indices montre que le « cycle ENSO » a une période de deux à sept ans avec une moyenne de quatre ans. Les années 80 et 90 présentent une activité accrue, avec cinq El Niño (1982-1983, 1986-1987, 1991-1993, 1994-1995 et 1997-1998) et trois épisodes La Niña (1984-1985, 1988-1989 et 1995-1996). Durant ces quinze années se placent les deux El Niño majeurs du siècle (1982-1983 et 1997-1998) ainsi qu'un épisode El Niño pratiquement continu de 1991 à 1995.

L'indice de l'oscillation australe est la différence de pression atmosphérique au niveau de la mer entre Tahiti et Darwin. L'indice El Niño est l'écart en degrés par rapport à la température moyenne de surface à l'est du Pacifique.

entre Tahiti (17,5° S ; 149,6° O) et Darwin, en Australie (12,4° S ; 130,9° E), bénéficie de l'antériorité pour décrire l'état du système. Son évolution est généralement la réplique, pic à pic, de celle de l'anomalie de température de surface à l'est du Pacifique : aux pics positifs de l'oscillation correspondent les températures les plus froides des eaux de surface et réciproquement (figure 4.1). On prend donc également comme indice océanique l'anomalie de la température de surface du Pacifique Est entre 5° N et 5° S et 170° O et 120° O. Maintenant que le satellite Topex/Poseidon permet de mesurer à quelques centimètres près le niveau de

la mer, la différence de niveau entre les deux bords du Pacifique pourra également être utilisé comme indice ENSO.

INDICES ET ANOMALIES

Comme souvent en météorologie, c'est l'écart par rapport à la moyenne généralement prise sur les trente dernières années, que l'on appelle anomalie, qui sert de référence. C'est donc une moyenne « glissante » qui évolue en fonction des fluctuations climatiques à ces échelles de temps. Quand, à la télévision, un journaliste présente la « météo », il omet rarement d'indiquer si les températures sont conformes, supérieures ou inférieures aux « normales » saisonnières et de quel ordre de grandeur ; ce faisant, il fournit une indication d'anomalie. Le plus souvent, les valeurs se situent au-dessus ou au-dessous de la normale ; cela tient à ce que le climat défini sur une moyenne trentenaire représente une moyenne de différents types de temps et ne correspond pas obligatoirement au temps réel. Mieux vaut alors parler de valeur moyenne plutôt que de norme. Mais anomalie ne doit pas être confondue avec anormalité. Est anormal ce qui est aberrant, contraire aux lois et théories reconnues. L'anomalie, au contraire, peut être exceptionnelle mais « conforme à la loi ! » Au cours du temps, la science transforme d'ailleurs en simple anomalie, voire en normalité, ce qui était auparavant tenu pour anormal. L'anormal n'existe pas pour le scientifique qui connaît seulement les limites momentanées du savoir, limites qu'il repousse sans cesse, butant sur de nouveaux phénomènes aléatoires que les lois statistiques lui permettent de normaliser. A ce titre, El Niño, quelle que soit l'anomalie correspondante n'est pas anormal ; il constitue un élément naturel du système climatique. L'évolution de l'oscillation australe de 1968 à 1998, ou plus exactement de son anomalie, présente une succession de pics positifs et négatifs qui justifient bien l'expression d'« oscillation » choisie par Walker pour désigner ce jeu de bascule entre l'océan et l'atmosphère. Ces oscillations se retrouvent dans les températures de surface de la mer qui peuvent donc servir d'indice climatique avec trois situations types qualifiées d'El Niño, de La Niña et de « normale » correspondant à une valeur proche de zéro de l'anomalie de l'indice de l'oscillation australe (encart couleur p. 66).

EL NIÑO, LA PHASE CHAUDE D'ENSO

Pour décrire El Niño, nous partirons de l'indice de l'oscillation australe sans que cela ne signifie un rôle déclencheur de l'atmosphère.

Lorsque la valeur de l'indice de l'oscillation australe diminue, l'ensemble constitué par la cellule de Walker et son équivalent océanique s'affaiblit : l'intensité des alizés, du courant équatorial, des remontées côtières et de la divergence équatoriale diminuent (encart couleur p. 66). La situation peut même s'inverser : des vents d'ouest et un courant océanique portant à l'est apparaissent à l'équa-

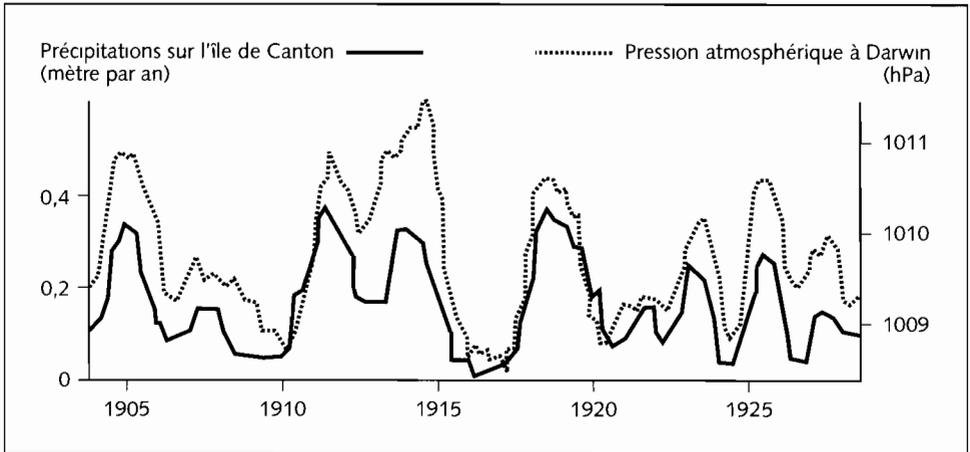


Figure 4.2

Évolution comparée des pluies sur l'île de Canton (2° S ; 175° E) dans l'archipel des Kiribati et la pression atmosphérique à Darwin.

En année El Niño, la « mare d'eau chaude » et donc la convection atmosphérique associée se déplacent vers l'est. Les précipitations sont fortes quand la pression atmosphérique est élevée au nord de l'Australie, signe d'El Niño.

teur, les remontées s'évanouissent. Plus rien ne retenant les eaux chaudes accumulées dans la région indonésienne, celles-ci s'écoulent vers l'est, entraînant avec elles la zone de convection atmosphérique donc les pluies (figure 4.2). La pente de la surface de la mer diminue également, son niveau montant à l'est et baissant à l'ouest (encart couleur p. 65). Tel est El Niño dont les manifestations décrites au Pérou et en Équateur par Pezet ou Murphy constituent seulement des signatures locales. Comme auraient pu dire les marxistes, c'est un « saut qualitatif brusque » qui fait basculer d'un système à l'autre.

Le contraste avec la situation habituelle est bien illustré par la carte des températures de surface (encart couleur p. 66) : il n'y a plus de minimum thermique le long de l'équateur et, dans le Pacifique Est, les températures s'élèvent de quatre à cinq degrés. Les échanges entre les deux fluides s'en trouvent bouleversés. La circulation de Walker est disloquée et la noria océanique affaiblie : le courant de Cromwell peut disparaître privant de sa source la divergence équatoriale. Cette situation est survenue, pour se limiter à une période récente, en 1972, 1977, 1983, 1986, 1992 et 1998, toutes ces années correspondant à des anomalies positives de température océanique et négatives de l'oscillation australe. L'extension de l'eau chaude le long de l'équateur accroît l'évaporation et le transfert d'énergie vers l'atmosphère : la cellule de Hadley est renforcée et, par voie de conséquence, le transfert de chaleur vers de plus hautes latitudes, notamment dans

l'hémisphère Nord. La ZITC qui est associée à la zone du maximum thermique océanique suit le mouvement et se déplace vers l'équateur.

LA NIÑA, LA PHASE FROIDE D'ENSO

Même si les pics positifs du diagramme d'évolution de l'indice de l'oscillation australe sont aussi nets que les pics négatifs et qu'y correspondent des anomalies négatives de température dans le Pacifique central et dans le Pacifique Est, scientifiques et médias se sont beaucoup moins intéressés aux épisodes froids. Il est vrai que, durant ces vingt dernières années, ils ont été moins fréquents que les épisodes chauds. Le terme La Niña, introduit par George Philander en 1986, a été popularisé seulement en 1997-1998 avec des vocables tels que : « sinistre sœur d'El Niño », « couple infernal El Niño-La Niña », « les enfants terribles », etc. Certains ont d'ailleurs proposé d'autres termes, comme « El Viejo » (Le Vieux) peu esthétique ou « Anti El Niño » inélégant et irrégulier en regard de l'origine d'El Niño.

Ce moindre intérêt est somme toute logique car, qualitativement, la situation climatique La Niña n'est pas différente de la situation dite normale comme le montrent les cartes de température de surface : dans les deux cas, l'*upwelling* équatorial est manifeste avec son minimum thermique le long de l'équateur. Seule différence dans ce domaine, les températures de surface sont significativement plus froides en phase La Niña. La Niña accentue donc seulement les tendances habituelles avec une intensification du fonctionnement de la cellule de Walker : renforcement des alizés, accumulation d'eau chaude à l'ouest du Pacifique, remontée d'eau côtière au large du Pérou, divergence équatoriale. La Niña provoque donc une augmentation des pluies sur le Pacifique occidental et sur le continent marin entre Pacifique et Indien. Le gradient thermique entre les deux rives du Pacifique s'accroît et des températures significativement plus basses apparaissent à l'équateur, d'où le qualificatif d'épisode froid. La Niña est une phase d'activation maximale d'ENSO, accentuant les traits climatiques dominants alors qu'El Niño peut être considéré comme une « panne » d'ENSO puisqu'il y a faillite de la cellule de Walker du Pacifique et du gradient océanique couplé. En d'autres termes, on ne peut renvoyer dos à dos les deux phénomènes : El Niño détruit ou inverse les traits climatiques dominants, La Niña pousse le système à ses extrémités. Les modèles expliquant la chronologie d'ENSO mettent en évidence une succession, avec des décalages plus ou moins importants, d'épisodes chauds et d'épisodes froids. Mais il ne serait pas plus juste de dire que La Niña 1996 a précédé El Niño 1997-1998 que de dire qu'elle a suivi El Niño 1995.

La transition entre El Niño et La Niña est parfois très rapide. Ce fut le cas en 1998-1999 avec une baisse de la température de surface du Pacifique équatorial en mai-juin 1998. L'évolution fut similaire et simultanée dans l'océan Indien,

ce qui entraîna une diminution des pluies dans la moitié sud de cette région et une augmentation dans la moitié nord. En quelques mois, l'Indonésie passa de la sécheresse et des incendies de forêts à de fortes pluies entraînant inondations et coulées de boue.

UN SCÉNARIO TYPE POUR ENSO ?

Pour qu'un phénomène soit prévisible, il faut qu'il se reproduise suffisamment à l'identique pour en déterminer les règles. En laboratoire, on peut répéter des expériences, établir des lois et en tester la validité en faisant varier, de manière contrôlée, les paramètres du phénomène. On ne peut évidemment pas mettre ENSO en laboratoire... bien que tester sur ordinateur des modèles alimentés par un nombre croissant de données de terrain constitue aussi une approche expérimentale.

La météorologie a progressé grâce aux réseaux d'observation mis en place depuis cent cinquante ans. Comme l'historique nous l'a rappelé, il n'existe pas, pour l'océan, de système international analogue à l'Organisation météorologique mondiale qui garantisse l'indispensable continuité des mesures. Celles qui concernent l'océan sont issues de programmes internationaux de recherche de durée de vie limitée et des réseaux météorologiques qui collectent principalement les températures de surface. C'est seulement depuis une dizaine d'années que l'on se préoccupe de mettre sur pied un véritable réseau d'observation des océans opérationnel sur le long terme. La Commission océanographique intergouvernementale de l'UNESCO s'efforce de convaincre ses États membres du bien-fondé d'une observation continue de l'océan aussi bien pour la prévision climatique aux échelles saisonnière et pluriannuelle, celles d'ENSO, que pour son évolution à plus long terme, en relation notamment avec l'accroissement de l'effet de serre. Ce n'est pas simple. D'abord par le coût d'une telle observation d'autant que les pays les plus fortunés s'estiment moins vulnérables aux aléas climatiques. Ensuite, parce que les décisions politiques dépendent plus directement d'échéances électorales que de l'évolution du climat. Enfin, parce que le réalisme d'une prévision climatique n'étant pas démontré, les politiques ne ressentent pas de sentiment d'urgence. Notons cependant qu'il est difficile d'en faire la démonstration sans un système d'observation systématique de l'ensemble climatique. Le réseau d'observations météorologiques et océaniques du programme de recherche Toga constitue l'amorce d'un tel maillage et il devient la source principale des progrès récents dans notre connaissance d'ENSO.

L'analyse comparée de l'évolution de six épisodes chauds survenus entre 1949 et 1980 (1951, 1953, 1957, 1965, 1969, 1972) a permis d'élaborer la version dite « canonique » d'El Niño qui visait à normaliser le phénomène pour le prévoir en calant son déroulement sur l'évolution annuelle « normale ». La pièce

La prévision d'El Niño - Le programme Toga

(encart couleur p. 66)

Lancé en 1985 pour une période de dix ans, le programme Toga (Tropical ocean global atmosphere) vise à relever un des défis scientifiques majeurs de cette fin de siècle, la prévision du climat. Toga s'est fixé trois objectifs :

- décrire l'évolution, dans le temps, du système couplé océan-atmosphère en zone tropicale et comprendre les mécanismes à l'origine des fluctuations d'une année sur l'autre ;
- élaborer des modèles de prévision des variations à l'échelle de temps de quelques mois à quelques années ;
- concevoir un système d'observation et de transmission des données pour une prévision opérationnelle.

Associé à des campagnes océanographiques internationales, Toga s'est aussi appuyé sur des réseaux :

- de bouées dérivantes émettrices qui mesurent la température des vingt

premiers mètres et décrivent les courants superficiels ;

- de soixante-dix bouées ancrées dans le Pacifique tropical entre 8° N et 8° S. Sont ainsi recueillies en permanence et transmises par satellite les conditions météorologiques de surface (vent, pression, température de l'air, rayonnement) et les conditions océaniques jusqu'à cinq cents mètres (température et, parfois, salinité et courants) ;
- de marégraphes pour le suivi du niveau de la mer ;
- de navires marchands mesurant la salinité de surface et larguant régulièrement des sondes mesurant la température jusqu'à cinq cents mètres de profondeur.

Le programme Toga a en outre bénéficié des observations satellitaires fournissant la température de surface de la mer, la vitesse et la direction des vents à sa surface et la topographie des océans.

se joue en cinq actes répartis sur deux années de juin de l'année précédant l'événement à juin de l'année qui le suit :

Acte 1. *Préliminaires*. Les alizés se renforcent à l'équateur, à l'ouest de la ligne de changement de date accentuant la pente de l'océan et l'accumulation d'eau chaude dans le Pacifique occidental. C'était, avant qu'elle reçoive ce nom, une situation type La Niña. Cette situation extrême, nécessairement instable, était considérée comme particulièrement sensible aux perturbations atmosphériques.

Acte 2. *Démarrage*. En octobre-novembre de l'année précédant l'événement, des coups de vent d'ouest surviennent dans la partie occidentale du bassin provoquant des anomalies de température de surface de la mer au voisinage du méridien 180°. Parallèlement une anomalie positive de température de surface s'observe près des côtes d'Amérique du Sud.

Acte 3. *Apogée*. Les anomalies de température s'accroissent le long des côtes du Pérou et de l'Équateur où elles culminent entre avril et juin. De là elles se propagent vers l'ouest le long de l'équateur ; elles atteignent leur maximum dans le Pacifique central entre août et décembre. Dans le même temps, en liaison avec le renforcement de la circulation de Hadley, la ZITC se déplace vers le sud.

Actes 4 et 5. *Transition et déclin*. A partir de septembre, le système évolue vers sa maturité qu'il atteint au premier trimestre de l'année suivante. Les tem-

pératures de surface retrouvent leurs valeurs habituelles à l'ouest alors qu'elles demeurent élevées dans le Pacifique central et dans le Pacifique oriental. C'est la période où les échanges avec les régions extra-tropicales de l'hémisphère Nord atteignent leur intensité maximale. L'anomalie décroît ensuite et le système retourne à la norme au second trimestre.

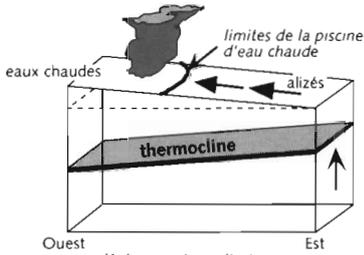
Ce scénario établit donc une chronologie des événements à partir des observations océaniques et atmosphériques disponibles. Il permet donc une prévision dès que les signes précurseurs sont détectés mais il ne préjuge ni des mécanismes ni de l'amplitude du phénomène. Il n'est donc pas explicatif et sa capacité prédictive dépend de la stabilité du scénario et de son respect par le couple océan-atmosphère. Publiée en 1982, cette chronologie des événements fut largement acceptée comme une description fiable conduisant à un épisode chaud. Mais la nature est facétieuse et a, parfois, l'humour cruel : au même moment naissait l'événement qui, par son ampleur et ses conséquences, allait devenir l'« El Niño du siècle », personne ne se doutant alors que l'épisode 1997-1998 pourrait lui ravir la vedette. Certains signes auraient pu alerter les savants, mais aucun ne l'a prévu car il était atypique, au moins pour trois raisons. D'abord, il ne fut pas précédé d'un renforcement des alizés et de l'accentuation corrélative de la pente de l'océan ; ensuite, il ne s'est pas déroulé en phase avec l'évolution saisonnière ; enfin, le réchauffement de l'océan ne s'est pas propagé d'est en ouest à partir des côtes d'Amérique du Sud mais d'ouest en est à partir du Pacifique central !

Quel est donc le degré de singularité de l'événement 1982-1983 par rapport à la longue série des événements répertoriés ? Sans remonter loin dans le temps, il apparaît que l'épisode chaud 1940-1941 a été similaire à celui de 1982-1983. Les épisodes suivants (1986-1987, 1992-1995, 1997-1998) furent évidemment étudiés avec minutie grâce aux nouveaux systèmes d'observation mis en place en région intertropicale dans le cadre du programme international Toga. Leur analyse confirma qu'un scénario type était un mirage ; seule constante, la manifestation locale à l'origine du nom, le réchauffement de la mer au large du Pérou et de l'Équateur qui se manifeste toujours à la même saison. Cette constatation entraîne une question supplémentaire : quelle relation existe entre le cycle saisonnier et El Niño ?

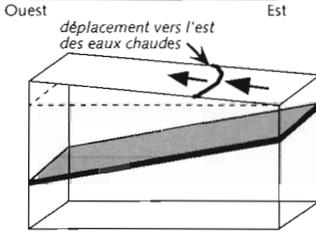
La version canonique a été une réalité entre 1950 et 1975. Pourquoi ne l'est-elle pas demeurée après ? Ceci entraîne d'ailleurs une ultime question : quelles sont les relations entre ENSO et les variabilités climatiques à long terme ? On ne peut en effet considérer ENSO comme un phénomène autonome à la dynamique indépendante du reste du système climatique auquel il imposerait sa loi. Pour répondre à ces interrogations, il est nécessaire de connaître les processus qui gouvernent ENSO, ce que ne permettent ni le schéma de Bjerknes ni la version canonique qui ne correspond qu'à une chronologie standardisée.

L'OSCILLATEUR RETARDÉ

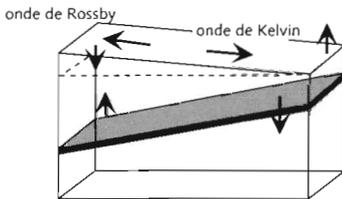
Bjerknes a élaboré un cadre cohérent pour les interactions entre l'océan et l'atmosphère à grande échelle. Il est à l'origine de tous les schémas de prévision d'El Niño. Mais, par lui-même, il n'indique pas la manière dont se déclenche le phénomène ni comment il cesse ou évolue vers la situation inverse La Niña. De plus, il s'agit d'un schéma synchrone où tous les éléments du système varient en phase : l'affaiblissement des alizés sur les côtes d'Amérique du Sud et dans tout le Pacifique aussi bien que le réchauffement océanique à la côte et le long de l'équateur. C'est un peu comme si, pour ENSO, la surface de l'océan constituait un système rigide analogue à une balançoire constituée d'une planche de bois où chaque extrémité oscille ou au fléau d'une balance. La transmission à l'océan des perturbations atmosphériques par le canal des ondes de Kelvin et de Rossby qui cheminent le long de l'équateur, se réfléchissent et interfèrent, l'une pouvant annuler les effets de l'autre est plus réaliste ; c'est le modèle de l'oscillateur retardé (figure 4.3). La grande étendue du Pacifique tropical permet en effet le déroulement complet de ce scénario qui dépend de la vitesse de ces ondes. Ainsi considéré, ENSO devient pratiquement un mode d'oscillation propre du Pacifique équatorial et, à ce titre, il est prédictible. Il le serait sans contestation si l'on pouvait le considérer comme isolé du reste du système climatique. Ce n'est pas le cas (chapitres 5 et 6), ce qui explique pourquoi il n'y a pas de version « standard » d'ENSO.



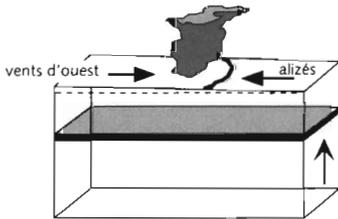
Habituellement, les alizés accumulent les eaux chaudes à l'ouest où l'évaporation est intense, ce qui déclenche convection atmosphérique et pluies. La thermocline est plus proche de la surface à l'est qu'à l'ouest.



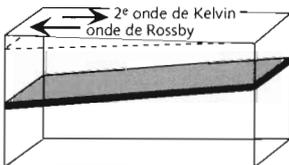
Parfois, les alizés faiblissent dans le Pacifique central et les eaux chaudes se déplacent vers l'est.



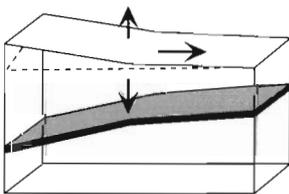
Cette perturbation engendre une onde de Kelvin se déplaçant vers l'est ; deux mois lui suffisent pour arriver au large des côtes d'Amérique du Sud. Elle induit en même temps une onde de Rossby qui s'éloigne vers l'ouest trois fois plus lentement que la précédente, atteignant le bord ouest du Pacifique six mois plus tard.



Sur son passage, l'onde de Kelvin élève le niveau de la mer et abaisse la thermocline tandis que l'onde de Rossby produit l'effet inverse. Cela conduit à l'état El Niño où surface de la mer et thermocline sont horizontales. La zone d'évaporation se situe vers le centre du Pacifique.



L'onde de Rossby se réfléchit sur le bord océanique indonésien, ce qui génère une seconde onde de Kelvin.



Cette onde remonte la thermocline sur son passage vers l'est et met fin, voire, si elle est assez intense, amorce l'épisode La Niña.

Figure 4.3

Le cycle ENSO expliqué par la théorie de l'oscillateur retardé.

Un schéma symétrique, à partir d'un renforcement des alizés, rendrait compte de la naissance, de la vie et de la disparition de La Niña.

5 A l'échelle de la planète

UN REGARD PLANÉTAIRE

Si, d'un seul regard, nous embrassons la bande comprise entre les tropiques du Cancer et du Capricorne, nous y observerions trois zones d'ascendance à la bordure occidentale des océans tropicaux, véritables chaudières déclenchant l'ascendance de l'air humide avec son cortège de cumulo-nimbus et trois zones de descente d'air sec, soulignées par les grands déserts. Chaque branche ascendante ou descendante concerne donc deux cellules de circulation adjacentes à la manière d'engrenages ; toute modification touchant l'une d'entre elles retentit sur les autres. Il y a donc un lien de continuité entre les trois océans qui, cependant, possèdent leurs caractéristiques propres. Le réchauffement de l'atmosphère par les terres, négligeable dans le Pacifique, tient une place plus importante dans l'Atlantique. Quant à l'océan Indien, soumis à l'alternance des moussons, il est fermé vers 25° N où il subit les effets de la chaîne himalayenne.

L'impact planétaire des fluctuations des circulations atmosphérique et océanique du Pacifique à l'échelle de quelques années, type ENSO, implique la prise en compte de variations à d'autres échelles de temps (chapitre 6). Ainsi, les cellules de circulation atmosphérique connaissent d'abord un déplacement saisonnier qui suit le maximum d'insolation, d'où l'alternance d'une saison humide et d'une saison sèche en région tropicale. Des évolutions à plus long terme ont également été mises en évidence. Dans les années 20, la pression moyenne de l'anticyclone des Açores s'est élevée de sept hectopascals alors qu'elle baissait de deux dans le Pacifique Sud. Cette dernière modification accompagne un déplacement des centres de haute pression de 115° O en 1915 à 105° en 1945 pour se stabi-

liser actuellement vers 95° O. Ceci conduit à une diminution de la fréquence des ouragans en mer des Caraïbes ainsi qu'au renforcement des alizés au large des côtes du Venezuela et de la Colombie. Cette moindre fréquence de cyclones entraîne un déclin des vents dominants de sud et d'ouest qui amènent en Amérique centrale l'humidité du Pacifique : la réduction des précipitations est ainsi de l'ordre de 70 % au Costa Rica.

Avec ce recul, il est possible d'analyser les modifications climatiques planétaires qui accompagnent le mouvement de balancier de l'oscillation australe et caractérisent ses épisodes chauds (El Niño) ou froids (La Niña). Celles qui sont liées à El Niño sont plus faciles à mettre en évidence car cet événement se manifeste souvent par un changement radical de climat alors que, durant La Niña, on assiste plutôt à un renforcement des traits habituels.

DU CÔTÉ DE L'ATLANTIQUE TROPICAL

Les régions tropicales du Pacifique et de l'Atlantique présentent des traits communs :

- présence d'une zone intertropicale de convergence où les alizés du nord et du sud confluent ;
- circulation atmosphérique suivant les cellules de Hadley et de Walker ;
- même répartition des températures de l'océan avec *upwellings* à la côte et à l'équateur ;
- similitude de la circulation océanique.

Une morphologie différente des bassins différencie pourtant nettement ces deux océans dans leurs relations avec l'atmosphère et leur variabilité climatique. L'océan Pacifique est obèse : large de dix-sept mille kilomètres à l'équateur, il est coupé de l'Arctique par le détroit de Béring et les îles Aléoutiennes. Beaucoup plus svelte, seulement large de six mille cinq cents kilomètres à l'équateur, l'Atlantique est totalement ouvert sur l'Arctique tout autant que sur l'Antarctique. Cette extension méridienne de l'Atlantique lui confère un rôle prépondérant dans les variations climatiques à long terme (de la décennie au millénaire) qui n'entrent pas dans notre propos.

En dépit de ces analogies, il n'y a pas, en Atlantique, l'équivalent exact du système ENSO du Pacifique pour deux raisons : l'étroitesse du bassin et l'impact, à l'est, du continent africain qui provoque un régime de mousson dans le golfe de Guinée. Entre la zone de convection au-dessus de la forêt amazonienne et celle qui surplombe la forêt équatoriale africaine, la cellule de Walker n'a guère d'espace pour se déployer. La branche ascendante se situe donc sur l'Amazonie et la branche descendante concerne l'ensemble de l'Atlantique du Nordeste brésilien au sud-ouest de l'Afrique dont les variations climatiques sont en phase. C'est l'inverse de la situation que connaît le Pacifique où les deux rives sont en opposition

de phase. Les distances à parcourir d'un bord à l'autre de l'Atlantique étant faibles, un mécanisme analogue à celui de « l'oscillateur retardé » ne peut se développer pour générer des oscillations analogues à celles d'ENSO dans le Pacifique. Effectivement, la variabilité des températures de surface est deux fois plus faible dans l'Atlantique équatorial que dans le Pacifique.

Les variations interannuelles du réchauffement de l'Atlantique ne proviennent donc pas principalement d'un déplacement vers l'est le long de l'équateur de masses d'eaux chaudes comme dans le Pacifique, mais d'une réponse de l'océan à un forçage atmosphérique, la fluctuation de la position de la ZITC. Les variations de température de l'océan superficiel liées au déplacement de l'équateur météorologique sont au moins aussi importantes que celles qui se produisent le long de l'équateur. On observe une bonne corrélation entre les anomalies de température au nord et au sud de l'équateur (signatures des anomalies de position de la ZITC) et les fluctuations pluviométriques sur le Nordeste brésilien. C'est la descente vers le sud, durant l'hiver boréal, de la ZITC qui apporte généralement la pluie sur le Nordeste brésilien, région connue pour son aridité avec des sécheresses extrêmes ou *secas*. Est-ce à dire que le régime hydrique de la partie nord-est du Brésil est indépendant d'El Niño ? Certainement pas ; rappelons d'ailleurs que 1877, année El Niño, vit une totale déficience des pluies. En effet, s'il n'y a pas de véritables El Niño atlantiques, les épisodes marqués El Niño-La Niña du Pacifique déclenchent des événements similaires dans l'Atlantique mais en opposition de phase. Détaillons à titre d'exemple la séquence des événements dans l'Atlantique en 1983-1984 lié au puissant El Niño de 1982-1983 suivi d'un épisode froid dans le Pacifique en 1984. A l'inverse du Pacifique, 1983 fut une année particulièrement froide dans l'Atlantique ; l'*upwelling* équatorial y fut très actif alors qu'en 1984, année chaude dans l'Atlantique, il s'évanouit pratiquement. En période El Niño (1983), la zone convective du Pacifique se déplace vers l'est, les vents de secteur est et de secteur ouest convergeant vers elle. A l'est de cette zone, les vents d'est se renforcent et, par continuité, les alizés de l'Atlantique attirés par la proximité inhabituelle de cette zone de convergence. Ce renforcement active la petite cellule de Walker atlantique et sa branche descendante sur l'océan Atlantique et le Nordeste brésilien qui connaît alors une période sèche. La situation s'inverse en 1984 : La Niña domine dans le Pacifique et, à son extrémité est, la zone de subsidence de la cellule de Walker devient plutôt une aire de divergence des vents qui a un effet répulsif pour les alizés de l'Atlantique. Ceux-ci faiblissent ; l'Atlantique passe en phase chaude favorable à la descente vers le sud de la ZITC, ce qui favorise les précipitations sur le Nordeste brésilien mais également sur les régions désertiques de la côte africaine en raison de l'étroitesse du bassin.

En résumé, ENSO influe sur l'Atlantique notamment le Nordeste brésilien. Dans cette région, la plupart des épisodes El Niño coïncident avec des années

sèches ; mais des années aussi sèches, voire plus sèches, prennent place en dehors des épisodes El Niño. Une approche statistique montre que El Niño du Pacifique explique seulement 10 % de la variance des précipitations du Nordeste. C'est peu mais suffisant pour basculer d'une sécheresse ordinaire à une aridité exceptionnelle. La corrélation entre l'indice ENSO et les précipitations sur le Nordeste brésilien est bien plus faible que celle qui existe entre cette pluviosité et la position de la ZITC.

Par commodité, on parle d'El Niño et de La Niña atlantiques mais ces épisodes ne correspondent pas à une oscillation propre de l'Atlantique ; ils sont gouvernés par ENSO. A une situation El Niño marquée dans le Pacifique correspond une situation type La Niña dans l'Atlantique et un épisode chaud atlantique se produit quand le Pacifique entre en phase froide. Cette relation n'a rien de systématique puisque seulement trois épisodes type El Niño ont été recensés dans l'Atlantique lors du dernier quart de siècle : 1963, 1968, 1984.

Cette opposition de phase entre les deux océans se matérialise également de manière spectaculaire par la fréquence des cyclones. En période chaude du Pacifique, l'activité cyclonique est réduite voire nulle dans l'Atlantique. Cela est dû à la modification du trajet des courants d'altitude, les courants-jets (ce sont eux qui retardent d'une heure les avions traversant l'Atlantique vers l'ouest) qui soufflent vers l'est à une dizaine de kilomètres d'altitude. Un cisaillement se produit entre ce courant-jet et les alizés qui portent à l'ouest, ce qui empêche l'extension verticale de la convection, condition indispensable à la maturation du cyclone. En période La Niña, l'activité cyclonique s'accroît au contraire sur l'Atlantique : le 24 septembre 1998, on pouvait y observer, fait exceptionnel, trois cyclones simultanés.

LE COUSINAGE D'EL NIÑO ET DE LA MOUSSON INDIENNE

Dans l'océan Indien, le signal climatique dominant est saisonnier : c'est le régime alterné de la mousson piloté par les variations saisonnières de pression sur le continent asiatique. Le terme mousson vient de l'arabe *mausim* qui signifie « saison » mais également « vent des épices et de la fécondité ». Sans jouer avec les moussons, jamais les Romains n'auraient entretenu, dès le début de l'ère chrétienne, des relations commerciales suivies avec l'Inde et la Chine. Les épices (poivre, muscade, girofle, gingembre, cannelle) en provenance d'Insulinde étaient, pour les Romains, des produits familiers. De Chine, de Ceylan, de l'Inde, les marchandises étaient transportées par des navires indiens ou persans utilisant la mousson jusqu'à l'entrée de la mer Rouge. Acheminées par voie de terre jusqu'à Antioche ou Alexandrie, elles traversaient ensuite la Méditerranée jusqu'à Ostie. Un an était nécessaire à ce périple, soit beaucoup moins que les voyages des Portugais qui, empruntant le cap de Bonne-Espérance, triplaient le trajet. Cette lenteur relative était compensée par l'importance de la flotte qui dépassait la centaine de

navires, les Romains ayant même ouvert un comptoir commercial à Virampatnam près de Pondichéry au sud-est de l'Inde. Cette route maritime prit le pas sur la route terrestre des caravanes contrôlée par les Parthes. Après la chute de l'Empire romain et l'essor de l'Islam, la route des Indes tomba, au VII^e siècle, aux mains des Arabes qui fondèrent des comptoirs aux Indes et jusqu'en Chine. Au XV^e siècle, la fermeture de la route terrestre de la soie par la dynastie Ming donna aux Maures le monopole du commerce entre l'Extrême-Orient et l'Europe. Sans la mousson, ces navigateurs n'auraient pu traverser la mer d'Oman à bord de rapides voiliers qui leur permettaient, l'été, de cingler vers l'Inde où ils allaient chercher sur la côte de Malabar les épices et, l'hiver, d'en revenir. Il fallut d'ailleurs attendre 1786 pour que, le premier, Antoine d'Entrecasteaux réussisse une traversée à contre-mousson entre Ceylan et la Chine.

En 1686, l'astronome anglais Edmond Halley indique, à juste raison, que cette inversion de direction est due aux différences de variation de température entre l'océan, où l'amplitude thermique est faible, et le continent où elle est très forte (figure 5.1). Plus exactement, ce sont les différences de pression induites par les variations de température qui en sont la véritable cause. Alors que sur l'océan la pression atmosphérique varie peu, les variations entre l'été et l'hiver sont considérables sur le continent. Pendant l'été de l'hémisphère Nord, les terres d'Asie se réchauffent considérablement, créant un centre de très basse pression relative vers lequel afflue l'air océanique chargé d'humidité et dispensateur de pluies bienfaisantes. L'arrivée de cette mousson du sud-ouest est célébrée car elle marque la fin d'une période de forte chaleur et de sécheresse. Le relief himalayen faisant barrière, les régions du nord de l'Inde subissent d'abondantes chutes de pluie, la région de Cherrapunji en recevant plus de onze mètres par an. Ces pluies persistent jusqu'à l'hiver de l'hémisphère Nord. Le refroidissement hivernal crée, sur le centre de l'Asie, un vaste anticyclone extrêmement puissant qui génère, du continent vers l'océan, une sorte de « brise de terre » géante et très sèche. Sur l'océan, l'air se charge d'humidité dont bénéficie le nord de l'Australie.

Dans l'historique, nous sommes partis de la « panne » meurtrière de la mousson de 1877 et du souci de Blanford et de Walker d'établir des relations permettant de la prévoir. L'oscillation australe nous a ensuite entraîné dans le Pacifique, principal moteur d'ENSO reléguant ainsi les variations de la mousson indienne aux marges d'un phénomène centré sur le Pacifique, considéré alors comme le véritable chef d'orchestre de la variabilité saisonnière interannuelle. Une corrélation statistiquement significative existe bien entre l'indice de l'oscillation australe et les anomalies de précipitation sur l'Inde pendant la mousson d'été ; elle associe El Niño (indice faible) à des moussons déficitaires et La Niña (indice élevé) à des moussons excédentaires. Il en résulte une oscillation des récoltes de riz de plus ou moins 20 %. Curieusement l'abondance des pluies de mousson est plus fortement

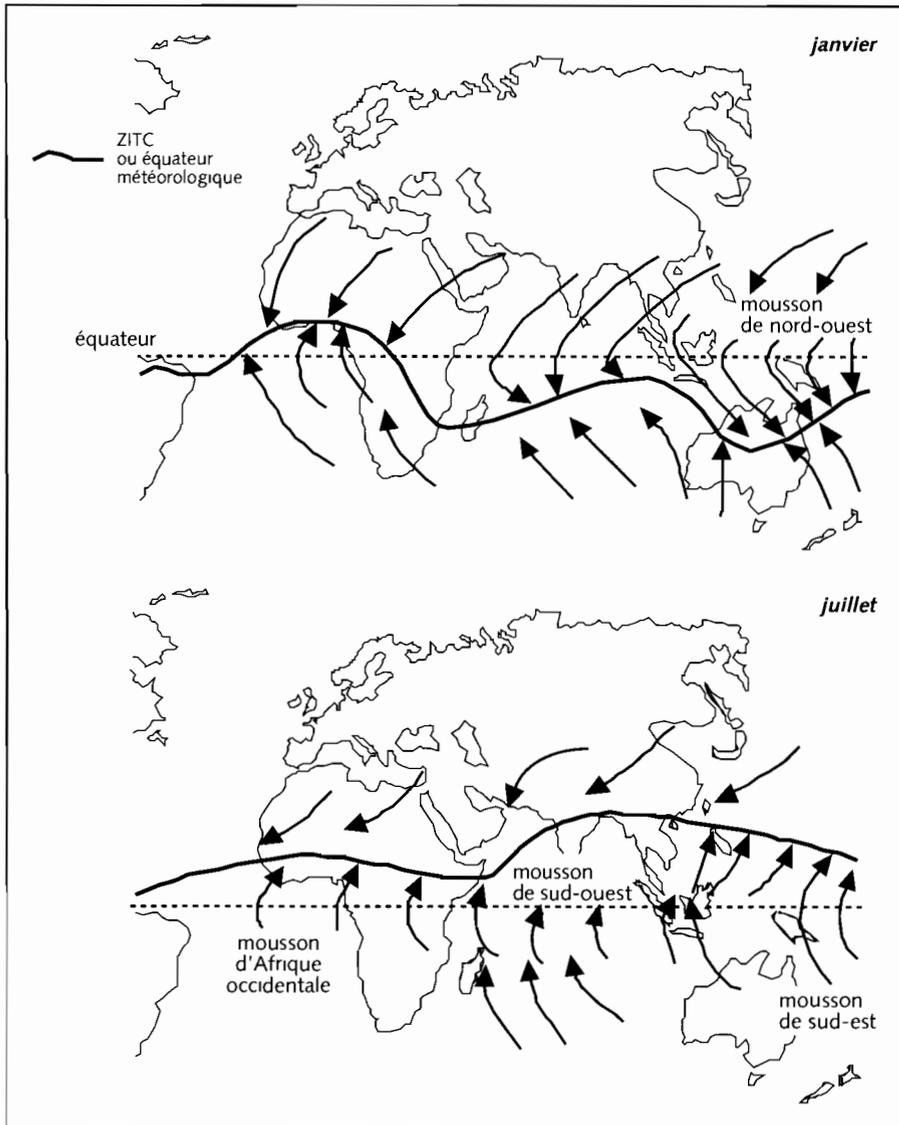
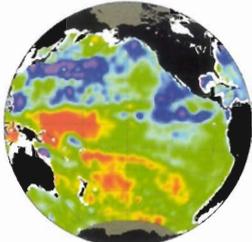


Figure 5 1

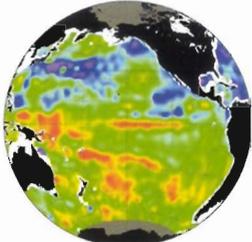
Le phénomène de la mousson.

Le renversement saisonnier des vents caractérise la mousson, surtout autour de l'océan Indien. Les alizés, entraînés par la migration de la zone de convergence intertropicale, changent de direction en traversant l'équateur où la force de Coriolis s'inverse.

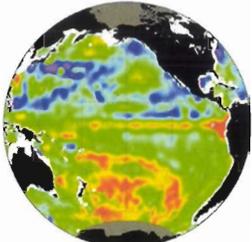
Durant l'été boréal, l'équateur météorologique et les vents associés migrent au nord de l'équateur géographique suivant la marche du Soleil. Se chargeant d'humidité et de chaleur au-dessus de l'océan Indien, ils assurent une forte pluviosité, notamment en Inde et en Indonésie. Le phénomène des moussons rappelle l'alternance quotidienne brise de terre-brise de mer puisqu'il est accentué par l'écart thermique entre continent et océan, particulièrement marquée dans l'Indien avec, au nord, la chaîne himalayenne.



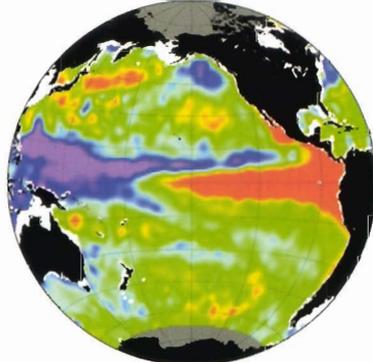
22 mars 1997



11 avril 1997

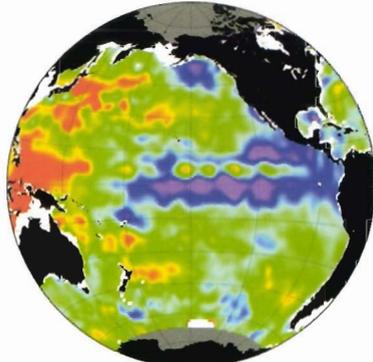


30 avril 1997



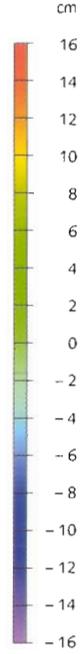
25 novembre 1997

El Niño



27 novembre 1998

La Niña



Propagation d'une onde de Kelvin le long de l'équateur, observée par le satellite Topex/Poseidon qui mesure le niveau de la mer.

Ce sont les anomalies de la hauteur de la surface de l'océan, exprimées en centimètres, qui sont représentées ici suivant les échelles portées sur la droite des images. Une anomalie positive d'environ 16 centimètres (en rouge) se déplace d'ouest en est le long de l'équateur. Proche des côtes indonésiennes le 22 mars 1997, elle se situe au centre du bassin le 11 avril et elle atteint la côte américaine le 30 avril.

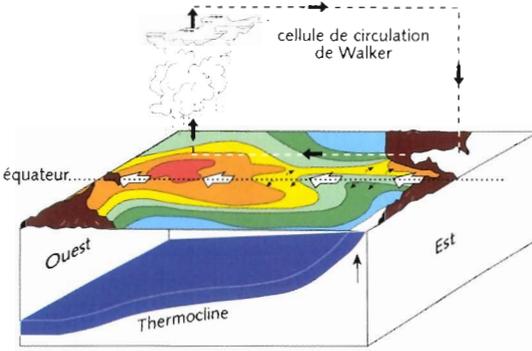
Anomalies du niveau de la mer dans le Pacifique, observées par le satellite Topex/Poseidon.

Les anomalies positives (surélévation) sont figurées en rouge, les anomalies négatives en bleu violet, suivant l'échelle indiquée sur la droite de la figure.

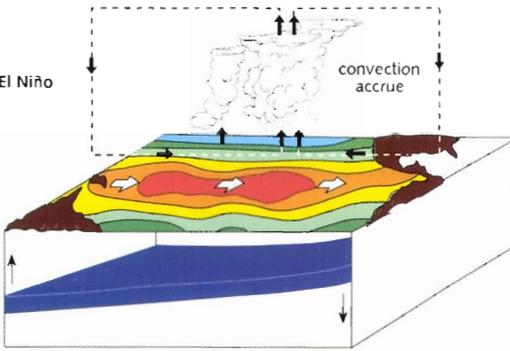
Le contraste entre les deux situations est saisissant dans la zone équatoriale où les anomalies positives et négatives s'inversent avec des différences du niveau de la mer supérieures à trente centimètres, tant à l'est qu'à l'ouest

Images aimablement fournies par le Laboratoire d'études en géophysique et océanographie spatiale (unité mixte du CNES, du CNRS et de l'Université Paul Sabatier de Toulouse)

Situation habituelle



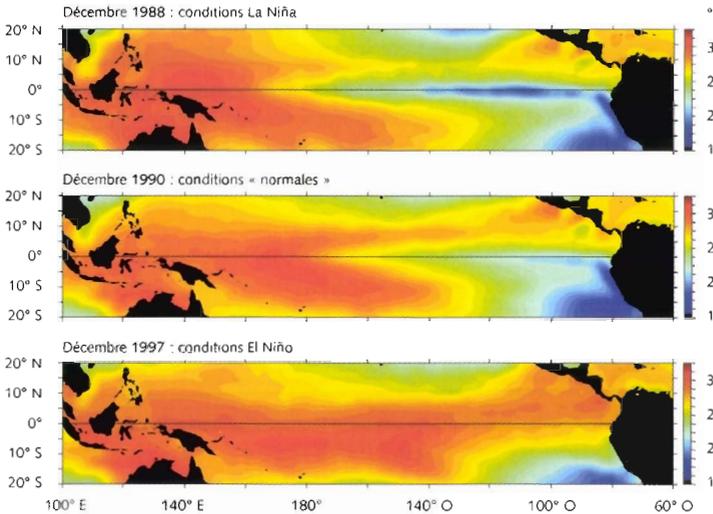
Épisode El Niño



Évolution du couple océan-atmosphère dans le Pacifique équatorial.

Habituellement, les alizés induisent une remontée d'eaux froides au large du Pérou et une accumulation d'eaux chaudes à l'ouest du bassin, élevant de cinquante centimètres à un mètre le niveau de la mer. En conséquence, la thermocline affleure la surface dans la région d'*upwelling* et se situe environ à deux cents mètres vers l'Indonésie. La circulation atmosphérique se caractérise par une forte ascendance au-dessus de l'Indonésie qui connaît de fortes précipitations alors que la descente de l'air entraîne des conditions arides entre l'île de Pâques et le continent sud-américain dans la région entre l'Équateur et le nord du Chili. Certaines années El Niño, le ralentissement des alizés entraîne un déplacement de la masse d'eau chaude et de la circulation atmosphérique associée vers le centre du Pacifique. La thermocline s'élève à l'ouest et s'approfondit à l'est.

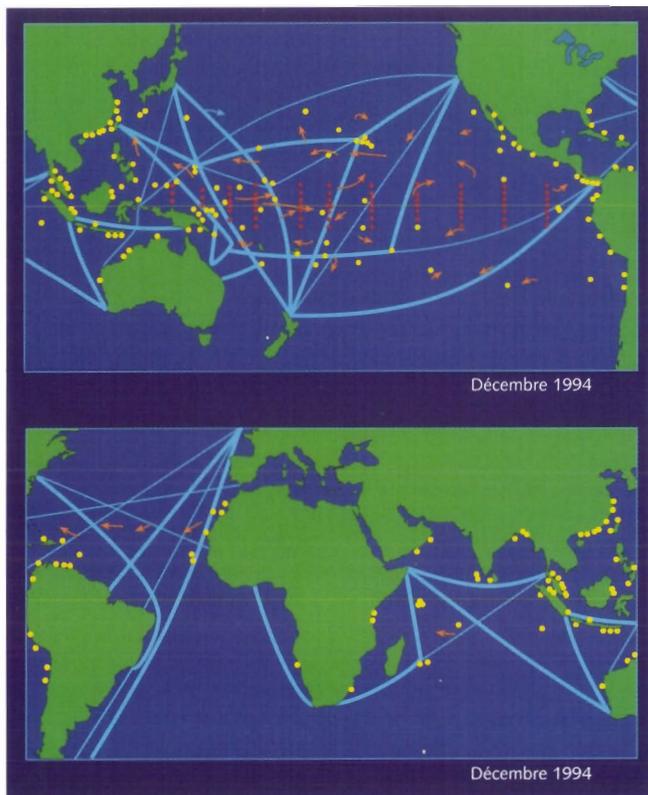
Images aimablement fournies par le NOAA/PMEL/TAO Project Office, Michael J. McPhaden, Directeur.



Cartes de températures de surface de l'océan Pacifique équatorial.

L'échelle colorée des températures est indiquée à droite de chaque carte. Il y a, qualitativement, similitude entre La Niña et les conditions normales avec un minimum thermique le long de l'équateur qui prolonge l'*upwelling* côtier. Rien de tel n'apparaît durant un épisode El Niño, où l'on observe une bande d'eau chaude le long de l'équateur d'un bord à l'autre du Pacifique.

Images aimablement fournies par le NOAA/PMEL/TAO Project Office, Michael J. McPhaden, Directeur.



Système d'observation *in situ* des océans tropicaux pendant le programme Toga (tropical ocean and global atmosphere).

losanges rouges → bouées ancrées

points jaunes → emplacements de mesure du niveau de la mer sur les îles et les continents

flèches rouges → bouées dérivant en surface

lignes bleues → routes de navigation de navires de commerce effectuant des mesures systématiques de température et de salinité.

Toutes les données sont transmises par satellites, lesquels constituent aussi de puissants moyens de mesure des principaux paramètres météorologiques et océaniques ainsi que du niveau de la mer. Les observations sont particulièrement denses dans le Pacifique considéré, avec ENSO comme le « meneur de jeu » de la variabilité climatique pluriannuelle.

Images aimablement fournies par le NOAA/PMEL/TAO Project Office, Michael J. McPhaden, Directeur.

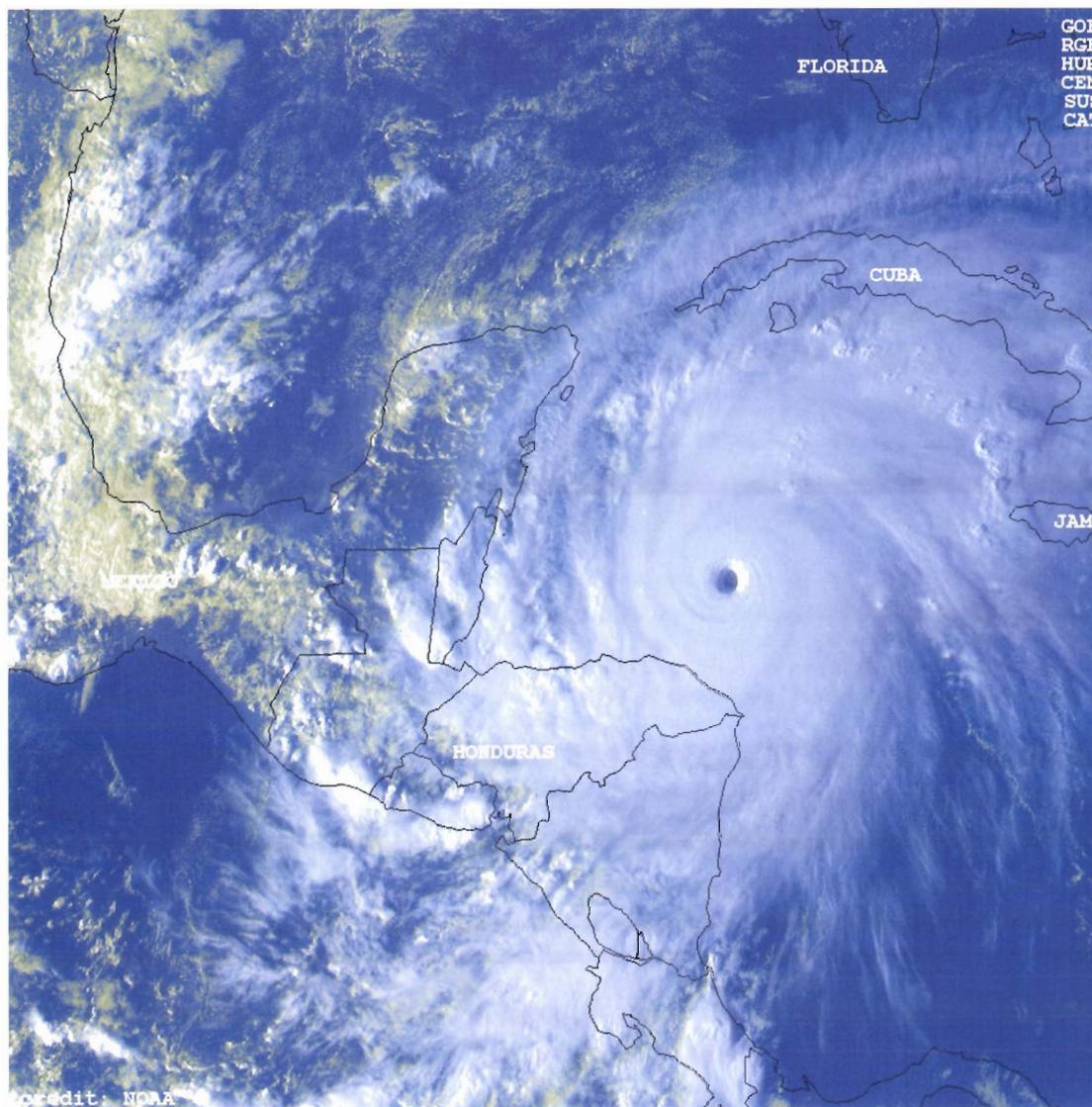
Machupicchu : des *andenes* (cultures en terrasses) construits par les Incas pour retenir l'eau de pluie.

Les peuples anciens se sont adaptés de différentes manières aux caprices du climat et aux difficultés de l'environnement.

Les vestiges archéologiques visibles sur cette photo illustrent le savoir-faire développé par les Incas en hydraulique agricole pour s'en accommoder et même tirer parti des pluies diluviennes qui, le plus souvent, accompagnent El Niño.



Photo : UNESCO/Roque Laurenza



Le cyclone Mitch vu par le satellite GOES 8 le 26 octobre 1998.

Après l'El Niño de 1997-1998, qui a été caractérisé par une très faible activité cyclonique dans l'Atlantique durant l'été 1997, le système évolue très rapidement vers une situation La Niña en été 1998 avec une reprise spectaculaire des cyclones. Le cyclone Mitch, l'un des plus violents du siècle, aborde ici l'Amérique centrale. Les vents y dépassent 300 km/h.

Image fournie par la NOAA, Satellites Services Division.

26OCT98 21:45 GMT
PH. 1,3,4
NAME MITCH
PRESSURE: 906 MB
SUSTAINED WINDS: 195 MPH
CATEGORY 5 HURRICANE



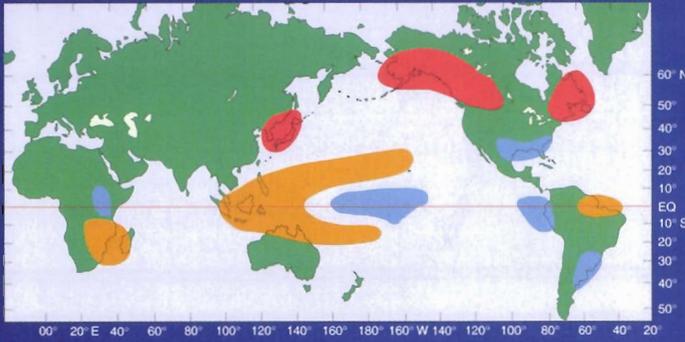
COLOMBIA



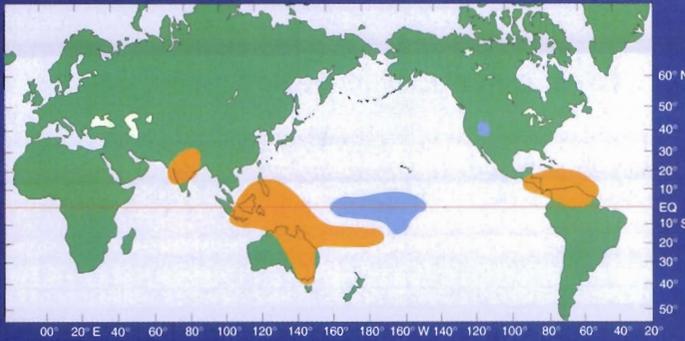
La pêche de l'anchois au large du Pérou. Pendant les épisodes El Niño, cette pêche industrielle est très affectée par la raréfaction de la ressource.

Photos aimablement fournies par Jürgen Alheit.

Hiver de l'hémisphère nord



Été de l'hémisphère nord



- anomalies climatiques chaudes
- anomalies climatiques sèches
- anomalies climatiques humides

Les effets climatiques d'El Niño à l'échelle de la planète.

De nombreuses modifications simultanées ou décalées touchent la température et la pluviosité sur toute la planète. Parmi les effets les plus constants, particulièrement marqués durant l'hiver boréal, on peut citer :

- sécheresse et vague de chaleur à l'ouest du Pacifique (« continent marin », Australie), en Amérique centrale, dans le Nord-est brésilien et au sud de l'Afrique;
- chaleur et fortes précipitations sur les zones côtières d'Amérique du Sud et dans le sud-est du Brésil;
- déplacement de l'activité cyclonique de la région indonésienne vers le triangle Hawaï-Polynésie-Cook et réduction de l'activité cyclonique en Atlantique tropical,
- affaiblissement de la mousson indienne.

Images aimablement fournies par le NOAA/PMEL/TAO Project Office, Michael J. McPhaden, Directeur.

Système d'observation *in situ* des océans tropicaux pendant le programme Toga (tropical ocean and global atmosphere).

Une des bouées ancrées dans le Pacifique équatorial pour mesurer en continu des paramètres météorologiques (les instruments de mesure sont visibles sur la bouée) et océanographiques jusqu'à 500 mètres de profondeur (les instruments de mesure sont disposés le long d'un câble suspendu à la bouée).

Images aimablement fournies par le NOAA/PMEL/TAO Project Office, Michael J. McPhaden, Directeur.





En haut : Une maison qui a été soulevée et déplacée.

En bas : Deux autobus embourbés sur une route couverte d'eau de pluie.

Résultat du passage du cyclone Fifi en 1974 au Honduras (période La Niña). Une des conséquences du changement climatique pourrait être l'accroissement de la fréquence et de l'intensité de tels phénomènes extrêmes. Pour bien comprendre les processus climatiques, océanographes et climatologues démêlent de mieux en mieux la complexité des relations entre l'océan et l'atmosphère.

Photos UNESCO/Michel Giniés.





En haut : Vue aérienne, prise le 28 février 1998 (période El Niño), du lac qui s'est formé temporairement dans le désert de Sétchura, département de Piura, nord du Pérou.

En bas : Le président Alberto Fujimori visite ce lac le même jour.

En période El Niño les rivières en crue inondent de très grandes surfaces, créant pour quelque temps de nouveaux lacs ou agrandissant considérablement ceux qui existent déjà.

Photos aimablement fournies par Miguel Carrillo/El Comercio-Pérou.

corrélée avec la température de surface du Pacifique équatorial central qu'avec l'indice de l'oscillation australe.

Il y a donc bien un lien entre les deux phénomènes. C'est dans cet esprit qu'a été organisé, sous l'égide de l'Organisation météorologique mondiale, de la Commission océanographique intergouvernementale et du Conseil international des unions scientifiques, le programme international Toga (encadré, p. 55) qui devait jeter les bases de la prévision climatique interannuelle. Ce programme avait pour champ de manœuvre quasi exclusif le Pacifique tropical. C'était une démarche logique, compte tenu de la nécessité de disposer, sur un temps suffisamment long par rapport aux fluctuations d'ENSO, des mesures nécessaires pour en comprendre les mécanismes. De ce point de vue « pacifico-centré » les résultats ont été fructueux mais qu'en est-il de l'objectif affiché : la prévision climatique pluriannuelle à l'échelle de la planète et non sur les seules rives du Pacifique ? Ou, en formulant quelque peu différemment la question : qu'apporte une meilleure connaissance du fonctionnement d'ENSO dans le Pacifique aux prévisions de mousson ? Les corrélations statistiquement significatives entre ENSO et la variabilité de la mousson n'ont pas été améliorées à l'issue de Toga et elles ne sont pas assez fortes pour que l'on puisse en faire un outil de prévision. Sur la période 1870-1991, vingt-deux années à mousson déficiente ont été recensées (sur cinquante-trois au-dessous de la moyenne) dont onze seulement correspondant à un épisode El Niño. A l'inverse, sur les dix-huit années nettement excédentaires (sur soixante et onze au-dessus de la moyenne), seules sept sont des années La Niña. Cet échec relatif rappelle celui des formules de prévision compliquées de Walker en dépit d'une bien meilleure connaissance actuelle de la physique des phénomènes et des progrès de la modélisation. Il faut se rendre à l'évidence : ENSO est loin d'expliquer la totalité de la variance de la mousson aux échelles interannuelles. Il ne suffit pas de prévoir ENSO pour prévoir la variabilité du climat en général et de la mousson en particulier.

Concernant la variabilité interannuelle du climat pour l'Atlantique et le Pacifique, nous nous sommes presque exclusivement intéressés à l'océan et à l'atmosphère. Il est impossible de raisonner ainsi pour l'Indien qui n'est qu'un « demi-océan » fermé à partir de 25° N par l'imposante masse asiatique qui s'impose ici comme un acteur de poids dans le jeu climatique. Il impose au système ses propres règles et ses échelles caractéristiques de variabilité. On passe ainsi de deux à trois joueurs, ce qui rend la partie différente et plus complexe. Pour bien la comprendre il est nécessaire de savoir comment l'atmosphère, l'océan et les continents communiquent entre eux. Ils le font en échangeant de la chaleur, de l'humidité et de la quantité de mouvement. Les principaux points de communication sont les interfaces entre l'océan et l'atmosphère d'une part, les continents et l'atmosphère d'autre part. L'atmosphère sert d'agent de liaison, de messenger, entre l'océan

tropical et le continent : ses mouvements et ses propriétés (le message qu'il transporte, donc la mousson) sont asservis à ces deux pôles (ses informateurs) et à leur variabilité. C'est un bon messenger puisque, son temps de réponse étant faible, il réagit rapidement aux fluctuations de ses « informateurs ». Comme pour l'Atlantique les variations interannuelles de la température de surface de l'océan Indien tropical sont beaucoup plus faibles que celles du Pacifique équatorial. Mais, à la différence de l'Atlantique, elles varient dans le même sens dans tout le domaine considéré, suivant de très près l'évolution de l'indice ENSO. A l'échelle de temps pluriannuelle, l'océan Indien est seulement une annexe de l'océan Pacifique qui suit le rythme des variations du réservoir d'eaux chaudes du Pacifique Ouest. Les variations d'intensité des pluies de mousson sont d'ailleurs bien mieux corrélées avec les variations de température de surface du Pacifique équatorial qu'avec celles de l'océan Indien. Ces corrélations sont cependant insuffisantes pour une prévision efficace à cause du troisième joueur : le continent asiatique, soumis aux influences climatiques extra-tropicales qui obligent à sortir de la vision régionale de la mousson qui prévalait et à prendre en compte, pour sa prévision, le système climatique dans son ensemble et ses diverses échelles de variabilité. La mousson et ENSO ont en commun le réservoir d'eaux chaudes indo-pacifique qui alimente par convection à la fois la cellule de Walker du Pacifique et les flux de mousson. C'est ce trait commun qui explique les corrélations significatives entre les indices ENSO et la mousson. Une telle corrélation souligne l'existence d'une liaison mais n'exprime pas nécessairement une relation de cause à effet. On retombe sur le problème de l'œuf et de la poule, et il faut admettre que, si les fluctuations d'ENSO se retrouvent dans celles de la mousson, on peut aussi bien dire que les variations de celle-ci ont une influence sur ENSO. Compartimenter le système climatique, ENSO d'un côté, mousson de l'autre, est utile pour analyser la physique des phénomènes. Cependant, cette approche réductionniste, étape nécessaire de la démarche scientifique, est insuffisante pour résoudre la variabilité du système climatique qui dépend aussi et peut-être même davantage de l'interactivité entre les deux systèmes et, aussi, de l'influence des régions extra-tropicales.

En 1953, Normand écrivait : « Il est tout à fait remarquable que les précipitations de la mousson indienne soient mieux reliées aux événements qui la suivent qu'à ceux qui la précèdent. Malheureusement pour l'Inde, l'oscillation australe entre juin et août, au maximum de la mousson, a de nombreuses corrélations significatives avec les événements ultérieurs et relativement peu avec les événements antérieurs. La mousson indienne apparaît donc comme un élément actif et non simplement passif du climat mondial plus efficace comme outil de prévision que comme événement à prévoir. Dans l'ensemble, le travail de Walker a ouvert des perspectives de prévision dans d'autres régions plutôt qu'en Inde. » Autrement

dit... retour à la case départ ou à peu près après le détour par ENSO et le programme Toga !

TÉLÉCONNEXIONS PLANÉTAIRES : LE PACIFIQUE NORD ET LE RESTE DU MONDE

La « téléconnexion » traduit les liens qui existent entre anomalies climatiques à grande distance les unes des autres. ENSO est en soi une téléconnexion qui lie les anomalies de pression atmosphérique entre Tahiti et Darwin par le canal de la cellule de Walker. De proche en proche, comme on l'a vu précédemment, on peut aussi parler de téléconnexion entre ENSO d'une part et la mousson indienne ou la pluviosité sur le Nordeste brésilien d'autre part. Les téléconnexions se traduisent nécessairement par des corrélations statistiquement significatives entre les anomalies concernées. Il ne suffit pas cependant qu'il y ait de telles corrélations entre deux phénomènes pour que l'on puisse parler de téléconnexion : il y faut en plus un mécanisme explicatif.

Le terme « téléconnexion », introduit par Anders Angström en 1935, a été ensuite mis quelque peu à l'index pour usage abusif : on peut toujours chercher des corrélations entre tout et n'importe quoi, et il est tentant d'en déduire automatiquement qu'il y correspond un lien physique, même si on ne le connaît pas, alors que la corrélation peut être purement fortuite. La simple corrélation risquait de tenir lieu de raisonnement et tout utilisateur de ce mot devenait un peu suspect de paresse intellectuelle. Nous avons, dans les paragraphes précédents, mais sans utiliser le mot, analysé les téléconnexions entre ENSO et les parties tropicales des océans Indien et Atlantique : celles qui sont principalement relayées par les cellules de Walker.

L'habitude est prise de réserver cette appellation aux interactions avec les régions extra-tropicales. La courroie de transmission des perturbations est alors la cellule de Hadley qui fonctionne dans un plan méridien (nord-sud). Un événement El Niño qui provoque un étalement de la réserve d'eaux chaudes sur toute la largeur du Pacifique équatorial provoque une descente vers l'équateur de la ZITC, une augmentation de la convection atmosphérique et donc une activation de la cellule de Hadley qui de proche en proche transfère plus d'énergie vers les hautes latitudes. La température de l'air dans la troposphère s'accroît et donc aussi le gradient thermique de l'équateur vers les hautes latitudes.

VERS LE PACIFIQUE NORD

Le transfert d'énergie de la cellule de Hadley vers les hautes latitudes s'effectue aussi sous forme ondulatoire, ce qui, périodiquement, accroît ou diminue les pressions atmosphériques vers le nord. Durant un El Niño, cela a pour effet, par exemple, de renforcer la zone de basse pression du Pacifique Nord (Aléoutiennes)

et de faciliter l'entrée d'air marin sur le nord-ouest des États-Unis et du Canada qui connaissent alors des hivers doux et humides. L'apport d'énergie supplémentaire dans la cellule de Hadley s'évacue aussi en partie dans la haute troposphère par le renforcement et l'extension vers l'est du jet-stream subtropical qui s'établit dans la zone de gradient thermique (lui aussi renforcé) qui limite, au nord, la cellule de Hadley. Ce jet-stream s'accompagne de grains et d'orages en hiver sur la Californie et le Mexique. C'est également son extension vers l'est qui limite la cyclogenèse sur l'Atlantique. Durant La Niña, le courant-jet subtropical s'affaiblit d'où une sécheresse sur le Mexique et le golfe du Mexique ainsi que le renforcement et l'accentuation de la fréquence des cyclones atlantiques.

L'exemple du sud des États-Unis d'Amérique montre cependant que beaucoup de précautions sont nécessaires avant de lier une modification en milieu tempéré à l'oscillation australe. L'hiver rude que connut le sud-est des États-Unis en 1976-1977 a ainsi été attribué à El Niño. On vit, en Floride, pendre aux branches des orangers des oranges couvertes de glace. Lors de l'épisode 1982-1983, au contraire, l'hiver fut le plus clément des vingt-cinq dernières années : la consommation énergétique diminua et les récoltes de céréales furent pléthoriques ! Cela montre la nécessité d'étayer les téléconnexions sur des bases physiques.

Le transfert d'énergie vers les hautes latitudes s'effectue également par la voie océanique beaucoup plus lente et, de ce fait, moins connue. Ainsi a-t-on repéré un réchauffement du Pacifique vers 40° N en 1993. Beaucoup d'océanographes s'accordent pour y voir un des effets du El Niño 1982-1983 ! Dans « El Niño, la phase chaude d'ENSO » (chapitre 4), nous avons seulement conté l'histoire de la bande intertropicale. Elle ne s'arrête pas là. Ainsi, quand le réchauffement atteint les côtes d'Amérique du Sud comme en 1982-1983, l'onde chaude de Kelvin chemine le long de la côte de l'Amérique Centrale puis de l'Amérique du Nord pour atteindre, trois mois plus tard, la latitude de 40° N. L'élévation du niveau marin y déclenche une onde de Rossby qui se déplace vers l'ouest en profondeur, très lentement, puisque sa vitesse est inversement proportionnelle au carré de la latitude. En 1991-1992, cette onde atteint les parages du Kuroshio qu'elle rejette vers le nord, ce qui entraîne un réchauffement supérieur à un degré qui perdure en 1992-1993. Cette perturbation se répercute sur l'atmosphère et donc sur les conditions météorologiques. Nouvelle pierre à l'édifice de la complexité climatique : y aurait-il une relation entre les crues du Mississipi de 1993 et El Niño 1982-1983 ?

LE RESTE DU MONDE

Au-delà, il est difficile d'employer le terme « téléconnection » au sens physique que nous lui avons donné. Les connaissances actuelles ne permettent en effet pas de relier des événements climatiques se déroulant en Europe et au Moyen-Orient

à l'oscillation australe. Il ne faut donc pas, comme cela s'est produit lors de l'épisode 1997-1998, comptabiliser dans les effets d'El Niño les inondations en Europe de l'Ouest (vingt-cinq morts, deux cents millions de dollars de dégâts) ou la vague de froid au Moyen-Orient (soixante-cinq morts, cinquante millions de dollars) dont rien, aujourd'hui, ne prouve une liaison avec El Niño. Il peut certes y avoir des corrélations plus ou moins significatives et fortuites avec le reste du monde qu'il faut se garder d'interpréter comme des conséquences d'ENSO : en période El Niño, toute anomalie climatique à travers le monde, qu'elle soit bénéfique ou catastrophique, ne doit pas être systématiquement comptée à charge d'El Niño qui, malgré son nom, n'a pas à jouer les boucs émissaires.

6 Peut-on prévoir ENSO ?

SUCCÈS ET ÉCHECS DE LA PRÉVISION

Les scientifiques ont toujours eu la tentation de prévoir El Niño avec, immanquablement, une probabilité d'erreur d'autant que, pour être efficace en termes socio-économiques, l'annonce d'El Niño ou de La Niña doit être faite plusieurs mois à l'avance. Une brochure australienne parue en 1991 indique : « Nous pouvons exprimer les chances que la pluie dépasse un certain seuil un mois donné. Mais une probabilité de 66 % de voir les précipitations dépasser cent millimètres signifie qu'une année sur trois nous prendrons une mauvaise décision. »

L'histoire des tentatives de prévision d'El Niño illustre la difficulté de l'exercice face aux caprices d'un phénomène climatique chaotique. C'est une histoire récente puisqu'elle débute en 1982 avec la version canonique, immédiatement mise à mal par l'événement 1982-1983 qui a été « manqué ». Un exemple parmi d'autres. Un enseignant d'une université américaine, se basant sur une corrélation étroite entre El Niño et les récoltes de blé dans l'Illinois, prédit une récolte abondante pour 1983 et la presse s'en fit l'écho ; malheureusement, la récolte atteint seulement la moitié de la normale, ce qui n'améliora pas le crédit des chercheurs.

Puis, avec Stephen Zebiak et Mark Cane de l'Université Columbia, les scientifiques connurent le succès en annonçant quelques mois à l'avance El Niño 1986-1987 en s'appuyant sur un modèle océan-atmosphère simple. Certains politiques leur emboîtèrent le pas, tel le Gouvernement éthiopien qui, convaincu par les météorologues, adapta la production agricole à une année El Niño qui se caractérise par un renforcement de la petite saison des pluies (mi-février à mi-mai) et

une faible pluviosité durant la grande saison des pluies (juin à septembre). Le gouvernement encouragea les fermiers à ensemer et à fertiliser au maximum pour la petite saison des pluies de manière à compenser les pertes qui résulteraient de la sécheresse estivale. Pour cette dernière, il conseilla de limiter les surfaces ensemençées et de semer des plantes à pousse rapide. Ce même modèle prédit le démarrage de l'événement de 1991. Le gouverneur du Cearà dans le Nordeste brésilien crut à cette prévision et prit les mesures pour limiter les effets de la sécheresse. Consigne fut donnée aux agriculteurs de semer des plantes à pousse rapide en environnement sec et des mesures préventives d'économie d'eau furent mises en œuvre dans la capitale Fortaleza. Bien que les pluies aient été réduites d'un tiers, la production céréalière atteignit plus de 80 % de ce qu'elle est en année normalement pluvieuse. Forts de ces succès, les auteurs suggèrent en 1991 non sans raison que le mécanisme d'El Niño était simple : « Le degré de précision obtenu pour la prévision en dépit du caractère frustré du modèle est parlant. Il suggère que le mécanisme responsable d'El Niño et, par extension, d'ENSO, est robuste et simple. S'il était complexe, délicat ou dépendant de détails à petite échelle, ce modèle ne marcherait pas. »

La Nature s'est peut-être sentie offensée par ce simplisme car elle s'est vengée à la première occasion. L'évanouissement d'El Niño attendu par les scientifiques fin 1992... s'évanouit ; l'événement chaud dura pratiquement quatre ans, scénario qui est tout sauf canonique et peu compatible également avec l'hypothèse de l'oscillateur retardé. Si les régions au large du Pérou et de l'Équateur connurent trois El Niño légers début 1992, début 1993 et fin 1994, entre 150 et 160° O au contraire, la température océanique demeura constamment au-dessus de la moyenne et l'on peut parler d'un El Niño continu de 1990 à 1995. Le Service national du climat des États-Unis d'Amérique, dont la prévision à long terme privilégie les changements de température du Pacifique, reconnaît les difficultés de sa mission : « L'El Niño qui se développe peut être qualifié... de surprise. Il est le troisième en quatre ans et toutes les prévisions ne l'ont pas vu arriver avant la fin de l'été 1994. » Ce modèle s'est également fourvoyé en 1997 et l'espoir qu'il avait fait naître a empêché de prêter une attention suffisante à des signes détectables six mois à l'avance et aux résultats d'autres modèles qui prenaient mieux en compte la complexité des relations entre l'océan et l'atmosphère. Non, la Nature n'aime pas la simplification et, à l'inverse de la citation précédente, elle est complexe, délicate et sensible aux petits détails. Néanmoins, l'événement 1997-1998 a été une aubaine pour les scientifiques car c'est le premier de cette intensité qui a bénéficié d'un réseau aussi complet et dense d'observations permettant d'en suivre l'évolution jour après jour. A défaut d'avoir su le prévoir dans sa phase de démarrage, quels enseignements peut-on en tirer ?

UN OPTIMISME MESURÉ

Les résultats des modèles qui couplent l'ensemble de la circulation générale atmosphérique et la dynamique océanique montrent que le Pacifique tropical est « prédictible » un an à l'avance si l'on ajuste périodiquement les modèles aux mesures fournies par les réseaux d'observations. La comparaison entre l'évolution des températures de surface du Pacifique équatorial et celles que prédisaient les modèles montre, rétroactivement, que le réchauffement qui s'amorça début 1997 pour culminer à la fin de la même année avait été prévu dès novembre 1996. C'est le respect scrupuleux de la méthode expérimentale qui a inhibé les scientifiques ; ils attendirent que les résultats du modèle simple, qui avait bien fonctionné auparavant, aient été complètement disqualifiés par les observations. A partir d'avril 1997, les prévisions de températures de surface pour les mois suivants se sont montrées satisfaisantes. Est-ce un progrès décisif ou faut-il n'y voir qu'une nouvelle facétie du phénomène qui démontre, à chacune de ses apparitions, qu'il est imprévisible ? A question embarrassante, réponse prudente. Les modèles ont incontestablement progressé ; ils peuvent prendre en compte toute la complexité du système océan-atmosphère et les moyens en place sont sans commune mesure avec ceux qui existaient avant Toga.

Ces modèles ont donc fourni un scénario satisfaisant de ce qui devait advenir en 1997, même s'ils en ont sous-estimé l'amplitude. Parallèlement, les observations du réseau ont montré que, dans l'ouest du Pacifique, le transfert de chaleur d'ouest en est le long de l'équateur était déjà amorcé à cent cinquante mètres de profondeur en septembre 1996 sans trace apparente en surface. Autrement dit, le scénario était-il sans doute amorcé depuis quelques mois lorsque les modélisateurs ont délivré leurs premières prévisions en novembre 1996. Les anomalies de température de surface, signature d'El Niño, sont apparues seulement en mars 1997. Eut-il été possible, avec ces mêmes modèles, de les prévoir un an plus tôt ? Pour l'instant la réponse est négative et il n'est pas impossible qu'elle le demeure dans la mesure où une faible modification des conditions initiales peut changer l'évolution du système. Or tout modèle ne fait qu'extrapoler, avec des techniques numériques sophistiquées, la dynamique du système. Si celui-ci n'évolue guère, on parle alors de situation de « blocage » et le prévisionniste est désarmé.

Comment prévoir qu'une situation qualifiée de normale et apparemment stable dans le Pacifique équatorial va évoluer vers un événement El Niño avant d'en avoir détecté les prémices ? Ou, plus délicat encore, comment prévoir, en pleine ascension vers El Niño, que le système évoluera quelques mois plus tard vers La Niña ou d'ailleurs l'inverse ? Ceci ramène au problème irrésolu des mécanismes déclencheurs d'El Niño et des divers indices qui en sont la trace. Or chaque événement a sa saveur propre qui le rend incomparable à tout autre. Faut-il en déduire qu'il y a des mécanismes déclencheurs différents ? Peut-être pas mais

il faut au moins admettre que leur succès dépend largement des conditions climatiques de leur apparition : variations saisonnières, variations décennales, bruit de fond atmosphérique, influence des régions extra-tropicales qui font qu'El Niño est inextricablement lié à l'ensemble du système climatique, d'où la difficulté de sa prévision.

Ainsi, le schéma de l'oscillateur retardé, s'il décrit la manière dont l'océan propage sous forme d'ondes l'énergie mécanique reçue de l'atmosphère est sans doute à son tour, disqualifié pour excès de simplisme. C'est une sorte de figure imposée à la nature qui, comme les patineurs, s'épanouit dans les figures libres. La version canonique de 1982 était une chronologie unique et calée sur le calendrier. Celle de l'oscillateur correspond, et c'est un progrès, à un processus unique indifférent au calendrier mais qui reflète un mode propre d'oscillation du bassin océanique de période voisine de dix-huit mois. Les trois vagues successives de 1991 à 1995 n'entraient manifestement pas dans ce schéma. Les observations de 1997-1998 ont validé le processus de base, la propagation des ondes de Kelvin, mais il ne fut pas conforme à la séquence idéale de l'oscillateur retardé. En effet, dans l'ouest du bassin, l'atmosphère a été le siège d'oscillations de quarante à cinquante jours de période induisant des coups de vents d'ouest. Chaque coup de vent fut accompagné d'une onde de Kelvin de « descente » dont la progression a été suivie grâce au satellite Topex-Poseidon et au réseau instrumenté mis en place à l'occasion du programme Toga. De tels événements se sont produits en décembre 1996, février, mai, août, octobre et novembre 1997. Cette succession d'ondes de Kelvin ne permet pas au scénario de l'oscillateur retardé de se mettre en place puisque, tous les deux à trois mois, la « partie » était relancée par un nouveau coup de vent d'ouest. Quand, à partir de mai 1998, la situation s'inverse vers une Niña modérée, nul ne peut dire si ce fut suivant le scénario de l'oscillateur retardé après un ultime coup de vent d'ouest.

Au risque d'être démenti par le prochain événement, El Niño, ou du moins l'apparition des anomalies de température de surface qui le caractérisent et leur évolution, peut être prévu plusieurs mois à l'avance grâce aux modèles numériques qui couplent océan et atmosphère et aux observations *in situ* qui permettent un calage régulier des modèles sur l'océan réel. Mais cela ne répond pas à l'attente d'une prévision de l'ampleur des perturbations climatiques qui toucheront telle ou telle partie du monde. Les relations statistiques entre les indices d'ENSO et le temps qu'il fera dans les régions tropicales ne sont pas assez fortes pour en faire des instruments de prévision opérationnelle. Les exemples du Nordeste brésilien et de la mousson indienne nous ont instruit à ce sujet. Ainsi, en référence aux indices de l'oscillation australe et de la température de surface de l'océan, les événements 1982-1983 et 1997-1998 sont d'importance comparable ; ils n'ont pourtant pas eu les mêmes conséquences. En 1997-1998, l'Australie a certes connu

un déficit pluviométrique mais qui n'eut rien de comparable avec la sécheresse sévère de 1982-1983 et la mousson sur l'Inde a été pratiquement normale durant l'été 1997. A l'inverse, le Kenya et le sud de la Somalie ont connu, d'octobre 1997 à janvier 1998, les pluies les plus abondantes depuis au moins 1961. La perspective d'une prévision des variations climatiques régionales liées à ENSO à partir d'indices simples comme la pression atmosphérique ou la température de surface de l'océan correspond à une idéalisation du phénomène « régentant » la variabilité climatique sans être perturbé par le reste du système climatique. Il faut y renoncer. El Niño et La Niña doivent rentrer dans le rang : celui de l'incontournable complexité du système climatique qui ne peut se laisser réduire à quelques recettes simples et décrire à partir de quelques indices, aussi intégrateurs soient-ils. Pour prévoir les impacts climatiques, il n'y a pas d'autres solutions que de recourir aux modèles couplant l'océan et l'atmosphère qui ont permis, rétroactivement, de prévoir l'événement 1997-1998 quelques mois à l'avance et sont expérimentés pour prévoir la variabilité du climat dans n'importe quelle région du monde. Ces modèles banalisent ENSO dont la seule singularité tient à ce que l'amplitude de la variabilité est particulièrement forte, et donc peut être plus facilement prévisible dans les régions tropicales que dans le reste du monde. Il devient alors impropre de parler des « conséquences » d'El Niño car il est, lui-même, le résultat de cette variabilité qu'il ne pilote pas plus que ne le fait la mousson. Tous ces événements sont interactifs et l'indice de l'oscillation australe est un indicateur de la variabilité de l'ensemble du système climatique. Face à cette complexité, parler des mécanismes déclencheurs d'El Niño est une commodité permettant, dans une chronologie des événements, de détecter des indices annonciateurs. Cela n'interdit cependant pas la prévision puisque les modèles sont eux-mêmes des constructions dynamiques qui simulent l'évolution du couple océan-atmosphère à partir d'une situation initiale à laquelle ils appliquent les lois de la dynamique des fluides pour déterminer les états suivants. Ils n'ont pas besoin, pour fonctionner, de chaînes causales explicites.

En conclusion, la prévision d'ENSO avec quelques mois d'avance est réaliste, mais, en raison des interactions multiples et de son caractère hautement chaotique, cette prédictibilité ne va pas au-delà d'un cycle. La prévision des variations climatiques demeure embryonnaire ; elle passe par une amélioration des modèles. Mais ces modèles ne peuvent rien s'ils ne sont alimentés par des données d'observation du monde réel. S'il existe, pour les besoins de la prévision météorologique, des systèmes opérationnels d'observation de l'atmosphère, rien de comparable n'est en place pour l'océan qui est pourtant le meneur de jeu aux échelles de temps des variations climatiques. Les réseaux expérimentaux d'observation (Toga) ont fait preuve de leur efficacité et les satellites d'observation, comme Topex-Poseidon, de leurs performances. Il faut leur donner une suite opération-

nelle faute de quoi, on ne pourra jamais prétendre à la prévision climatique. Il est vrai que mener de manière permanente des observations océaniques *in situ* ne constitue pas une mince affaire, à la différence de l'atmosphère où les principaux paramètres nécessaires aux prévisions (température, pression, humidité, vent) sont mesurés à partir des plates-formes stables que sont les continents et les îles. Pour pénétrer l'océan et y conduire les mesures nécessaires (température, salinité, courants), il faut des plates-formes variées : navires, mouillages instrumentés, engins automatiques, flotteurs instrumentés dérivant en surface et dans les couches profondes et transmettant les informations par satellite, etc. Passer à la phase opérationnelle implique des moyens d'une autre échelle compte tenu du coût des installations, de leur relève et de leur maintenance en milieu hostile. C'est bien à cela que visent l'Organisation météorologique mondiale et la Commission océanographique intergouvernementale qui s'efforcent de convaincre les États de mettre en place un Système mondial d'observation des océans.

LES IRRÉGULARITÉS D'EL NIÑO

Il y a deux sources principales d'irrégularité qui font d'ENSO un phénomène oscillatoire rebelle à toute normalisation : le cycle des variations saisonnières et le bruit de fond atmosphérique. La version canonique d'ENSO calque le déroulement d'un événement El Niño sur le cycle saisonnier. L'oscillateur retardé en fait un mode d'oscillation propre du Pacifique équatorial dont, une fois déclenché, le déroulement est indépendant du cycle saisonnier. Quant aux observations du programme Toga, elles montrent que ni l'asservissement au cycle saisonnier ni l'indépendance totale à son égard ne correspond à la réalité.

Le déroulement d'ENSO dépend bien des variations saisonnières, ce qui explique en partie son comportement chaotique et limite sa prédictibilité. Dans l'analyse précédente d'ENSO, phénomène pluriannuel de forte amplitude, nous avons négligé les variations saisonnières parce que légères dans la bande équatoriale. Dans le Pacifique, l'écart de température de surface entre un événement chaud et un événement froid dépasse parfois 6 °C alors qu'habituellement il demeure inférieur à 2 °C sur un cycle annuel « normal ». Même masquées en périodes extrêmes (El Niño, La Niña), ces variations demeurent. En hiver et au printemps de l'hémisphère Nord, les alizés diminuent le long de l'équateur, l'intensité de l'*upwelling* équatorial faiblit et la température de surface, agent du couplage entre l'océan et l'atmosphère, moteur d'ENSO, augmente. L'inverse se produit à la saison opposée. Le cycle saisonnier module donc ENSO et peut même le déstabiliser et rendre son évolution chaotique.

Le temps de réaction différent des deux composantes du système climatique intervient également. Aux échelles météorologiques l'atmosphère est presque indifférente à l'océan. L'inverse n'est pas vrai et l'océan, gérant des variations aux

échelles climatiques, n'est pas indifférent aux fluctuations de l'atmosphère aux échelles météorologiques plus courtes. Ce sont ces fluctuations que l'on qualifie de « bruit » par comparaison avec le bruit de fond que, dans une assemblée un peu agitée, l'orateur doit dominer. Sur une période suffisamment longue, le bruit atmosphérique semble aléatoire. Il peut cependant se renforcer suffisamment pour transmettre à l'océan un signal qui se propage sous forme d'ondes et peut déclencher un événement El Niño ou perturber son évolution. Ainsi en est-il de ces coups de vent d'ouest qui surviennent parfois à l'ouest du Pacifique équatorial et qui ont été proposés comme déclencheurs d'El Niño et, en se répétant en 1996-1997, ont contribué à l'originalité de l'événement.

L'effet du bruit atmosphérique varie d'ailleurs lui-même avec les saisons et les coups de vent d'ouest ont plus de chance d'être des déclencheurs d'ENSO à un moment du cycle saisonnier qu'à un autre. Ces deux sources d'irrégularité sont donc liées, ce qui renforce la non-linéarité du système et le risque d'une évolution chaotique moins prédictible.

LE PASSÉ POUR PRÉVOIR L'ÉVOLUTION À LONG TERME

Les températures de surface du Pacifique équatorial ont été particulièrement élevées dans la décennie 1980-1990 ; corrélativement, les valeurs négatives de l'indice de l'oscillation australe dominant durant la même période. Calculées sur la période 1950-1988, les anomalies de l'indice de l'oscillation australe ont été négatives durant 36 % du temps entre 1950 et 1975 et, ensuite, durant 62 %. L'importance des événements 1982-1983 et 1997-1998 et la durée anormale de l'événement 1991-1995 constituent des marques incontestables d'un changement de régime déjà noté avec le passage de la version canonique caractéristique de la période 1945-1975 à la variabilité des situations ultérieures. Est-ce la marque d'une variabilité décennale normale ou faut-il y voir la trace de l'accroissement de l'effet de serre et du réchauffement global que l'on observe depuis une centaine d'années avec une élévation de l'ordre de 0,6 °C ? Ce réchauffement a marqué une pause entre 1940 et 1975 pour reprendre de plus belle et de manière continue ensuite (0,3 °C depuis 1975). Coïncidence ? Certains avancent que l'élévation de la température de l'air serait induite par le réchauffement de l'océan provoqué par le changement de régime ; d'autres, à l'inverse, voient ce changement de régime comme une conséquence du changement global. La question n'est pas résolue ; elle ne peut l'être si l'on ne connaît pas la variabilité d'ENSO à l'échelle décennale. Seule la connaissance de l'histoire d'ENSO au cours des siècles passés peut nous éclairer. Or cette reconstitution est ardue même si trois types d'informations sont disponibles :

- les mesures directes des paramètres caractéristiques (pression atmosphérique, température de surface, précipitations) ou « mesures instrumentales » ;

- une évaluation indirecte de ces paramètres à partir des propriétés de milieux dont l'évolution ou la croissance dépendent des propriétés climatiques locales : coraux, arbres, glaciers qui enregistrent cette variabilité climatique ;
- les informations documentaires laissées par ceux qui ont été témoins, victimes ou parfois bénéficiaires de ces événements.

On doit la première chronologie complète à William Quinn qui a utilisé les informations depuis l'arrivée des Espagnols en Amérique du Sud. Avec ses collaborateurs, il a ainsi publié, en 1992, une chronologie des événements El Niño depuis 1497 classés suivant leur force : modéré, fort, très fort. Ils ont ainsi recensé cent vingt-quatre événements jusqu'en 1987 soit environ un tous les quatre ans. Ils ont étendu ces observations jusqu'à la conquête arabe en 622, par l'analyse des crues annuelles du Nil enregistrées au Caire, partant de l'idée que ces crues étaient largement déterminées par le Nil Bleu et la rivière Atbara venant des monts d'Éthiopie, eux-mêmes dépendant du flux de mousson, donc de l'oscillation australe.

Par cette reconstitution, El Niño s'insinue dans les péripéties plus ou moins anecdotiques des conquêtes espagnoles. Par exemple, descendre de Panama pour atteindre Lima au Pérou n'était pas une mince affaire, vents et courants étant contraires. Il fallait plusieurs mois, voire plus d'une année. En tout cas, la durée du trajet avait certainement marqué les esprits comme en témoigne le rapport d'un capitaine d'un navire qui embarqua en 1748 à Paita avec sa jeune épouse pour Callao où il arriva père d'un garçon né pendant le voyage et qui savait lire ! Il est vraisemblable que ce sont les aléas commerciaux et non la météorologie qui expliquent la longueur de ce voyage. Parfois, le voyage était en revanche très rapide : à peine vingt-six jours de Panama à Lima en 1568 pour le père Ruiz Portillo qui bénéficia de vents portant de manière inhabituelle au sud. Or Quinn classe cette année comme une période de fort El Niño. On retrouve également la trace d'ENSO dans les péripéties des galions espagnols qui, après un rendez-vous avec les navires venant de Californie et du Pérou, faisaient voile d'Acapulco vers Manille portés par les alizés. Le retour s'effectuait par les latitudes tempérées où dominent vents et courants d'ouest. Les archives du port de San Francisco révèlent toutefois que certains voyages tournèrent à la catastrophe : le galion venant de Lima rencontrait alors un temps bouché et un courant chaud venant du nord (El Niño) et pouvait rater le rendez-vous. Ensuite, les navigateurs, au lieu des alizés portants, devaient affronter des vents d'ouest contraires ; les vivres venaient à manquer et les équipages étaient décimés par le scorbut. Alexandre von Humboldt raconte la mésaventure d'un capitaine de galion, don Josef Arosbide. Soucieux d'éviter les embuscades des corsaires britanniques, il entreprit de rallier Manille à Callao par la route directe. La chance était avec lui et il n'eut pas à lutter contre les alizés qui avaient laissé la place à des vents faibles mais plutôt favorables ; il fit la route en quatre-vingt-dix jours grâce à El Niño, celui

de 1791 étant réputé fort par Quinn. Malheureusement pour lui, Arosbide voulut renouveler cet exploit au voyage suivant ; après avoir vainement lutté contre les alizés, il fut obligé de remonter vers le nord pour reprendre la route normale. Manquant de vivres, il relâcha au port de San Blas où il mourut de fatigue et de chagrin.

Plus importante sans doute pour l'histoire, est la question suivante : Francisco Pizarro eut-il El Niño comme allié ? C'est ce que pense Quinn à la lecture du rapport de Francisco Xeres, secrétaire de Pizarro lors de l'expédition 1531-1532 qui allait conduire le conquistador à la conquête de l'empire inca et mener son chef Atahualpa à la mort. Quinn note d'abord que, parti de Panama en janvier 1531, Pizarro atteignit San Matteo près de l'équateur en treize jours alors que, lors du voyage précédent, deux années avaient été nécessaires ! Parti de San Miguel de Piura au nord du Pérou en septembre 1532, il arriva à Cajamarca où il tendit son guet-apens à Atahualpa en novembre 1532 après avoir traversé sans difficulté un pays de rivières en crue, phénomène inhabituel en cette saison. Cette version romancée a été contestée à partir d'une analyse critique des textes originaux et également d'une reconstitution plus exacte des références géographiques. Ainsi, Louis Ortlieb conclut-il en 1999 : non, il n'y a pas eu d'El Niño en 1531-1532. Si nous avons insisté sur cet exemple, c'est parce qu'il montre la difficulté à reconstruire une chronologie fiable d'événements climatiques à partir d'écrits soumis à la subjectivité de l'auteur d'abord, du lecteur ensuite. Ortlieb a ainsi remis en cause la chronologie de Quinn puisqu'il en exclut vingt-cinq événements et en introduit sept nouveaux. Il est difficile, dans ces conditions, de mener une étude fiable de la variabilité d'El Niño au cours de l'histoire.

Peut-on espérer mieux avec des méthodes scientifiques plus rigoureuses permettant une évaluation indirecte de paramètres climatiques ? Chaque anneau de croissance des arbres représentant une année, la datation est aisée et permet de remonter le temps de la périphérie vers le centre. Certains conifères de l'ouest des États-Unis permettent ainsi de remonter de trois cents à quatre cents ans ; on peut même remonter à mille ans avec les arbres morts que restitue l'archéologie. La croissance annuelle est représentative des conditions climatiques locales ; elle croît avec la température et l'humidité. On peut donc analyser l'épaisseur des anneaux et en tirer des informations sur les variations climatiques annuelles au cours de la vie de l'arbre. Cette dendrochronologie est d'autant plus sensible que les variations climatiques sont contrastées, comme c'est le cas dans les zones semi-arides. C'est surtout dans le sud-ouest des États-Unis et le nord du Mexique reliés à ENSO par téléconnection que les études ont été conduites.

Les coraux permettent aussi une telle approche car leur squelette calcaire comporte des stries de croissance permettant de remonter dans le temps sur plusieurs centaines d'années avec même parfois une résolution saisonnière. La teneur

en certains éléments chimiques du squelette ou leur composition isotopique dépendent de la température de la mer, des précipitations et de la productivité. Les analyses chimiques et isotopiques des coraux permettent donc une reconstitution de l'histoire du milieu qui les abrite. Les îles et atolls du Pacifique, des Galapagos à l'Indonésie, permettent ainsi de jalonner le Pacifique équatorial, domaine d'ENSO. On a ainsi confirmé que les variations de température de surface dans l'est n'étaient que partiellement représentatives d'ENSO. Autrement dit, l'El Niño originel tel qu'il se manifeste sur les côtes sud-américaines n'est pas complètement représentatif d'ENSO ! Des anomalies significatives de température de surface à l'ouest et de l'indice de l'oscillation australe n'ont pas toujours une signature thermique sur les côtes américaines.

Les glaciers constituent une troisième archive. Chaque année, les précipitations y créent une nouvelle strate dont les propriétés (épaisseur, teneur en particules, composition isotopique de l'oxygène) sont également caractéristiques des conditions climatiques qui régnaient lors de la formation de chaque couche. Des carottes de près de deux cents mètres prélevées dans les glaciers des Andes soumises à l'influence conjuguée du Pacifique et de l'Atlantique racontent l'histoire du climat depuis mille cinq cents ans.

Avec l'ensemble de ces enregistrements, auxquels on peut ajouter l'histoire des crues du Nil, on dispose ainsi d'un lot précieux d'archives climatiques mais qu'il est difficile d'interpréter, si l'on souhaite les utiliser quantitativement pour évaluer la variabilité d'un phénomène climatique comme El Niño. Les difficultés sont multiples et communes à ces différents types d'enregistrements. Il faut d'abord être capable de passer des propriétés archivées aux paramètres climatiques (température, précipitations), ce qui implique une relation solide entre les premiers et les seconds. Or cette relation, qui traduit des processus physiques, chimiques et biologiques, n'est ni simple ni univoque : plusieurs états climatiques différents peuvent laisser la même empreinte dans les archives. Il faut, en outre, réaliser des étalonnages en comparant les données d'archives avec des mesures instrumentales des paramètres climatiques qui leur soient contemporaines. On ne peut donc mener cet étalonnage que sur des périodes récentes (après 1850) pour lesquelles de telles mesures existent. De plus, chaque archive a une signification essentiellement locale et il faut s'assurer qu'elle représente bien le climat régional par référence encore à la période actuelle. Enfin, en supposant les précédents problèmes résolus, une archive déterminée raconte sa propre version de la variabilité locale du climat et dévoile une facette particulière mais incomplète d'ENSO et les étalonnages font implicitement l'hypothèse que les relations entre ENSO et les climats locaux sont constants. On sait que ce n'est pas le cas et c'est même l'un des aspects de la variabilité d'ENSO que l'on cherche à connaître. Il y a donc une certaine contradiction entre les hypothèses de base, qui impliquent une certaine

constance des phénomènes, et l'objectif : déterminer sa variabilité. C'est pourquoi les conclusions de ces études sont généralement prudentes. Ainsi, d'une analyse comparative entre les informations documentaires historiques, les résultats de la dendrochronologie sur le Mexique et le Nouveau-Mexique et les analyses d'une carotte prélevée sur le glacier de Quelccaya dans les Andes péruviennes, Joël Michaelsen et Lonnie Thompson se sont-ils contentés de conclure que, depuis 1600, il était vraisemblable que la variabilité d'ENSO n'avait guère varié et qu'il y avait quelque évidence de périodes de forte activité ENSO aux débuts des XVIII^e et XX^e siècles et de moindre activité au début du XIX^e ! Pour progresser, il faut trouver les moyens de synthétiser les différents enregistrements pour restituer la totalité de la complexité d'ENSO. Nous ne sommes pas suffisamment avancés pour raconter la variabilité d'ENSO et en déduire si la tendance actuelle, c'est-à-dire l'accentuation des épisodes El Niño, résulte d'un réchauffement global et encore moins pour jouer les prophètes en extrapolant son évolution.

7 El Niño au banc des accusés

DE LA DIFFICULTÉ DE L'APPROCHE SOCIO-ÉCONOMIQUE

Nous traiterons ici des conséquences socio-économiques pour des perturbations climatiques incontestablement associées à la variabilité interannuelle du Pacifique. Pour déterminer objectivement ces conséquences et leur coût il faudrait dresser un bilan global des coûts et bénéfices correspondant à cette anomalie climatique et définir une « anomalie économique » par rapport à une norme, comme cela a été réalisé pour les paramètres climatiques. En effet, l'excès d'honneur fait par la presse à El Niño conduit à lui attribuer les conséquences néfastes d'un bon nombre d'anomalies climatiques. Or des « anomalies économiques positives » existent aussi quand El Niño apparaît : douceur du climat et pluies sur les côtes d'Amérique du Sud, ce qui favorise la végétation (des fleurs poussent dans le désert d'Atacama !), diminution de l'activité cyclonique en Nouvelle-Guinée, aux Philippines, au Japon ainsi que dans les parages du golfe du Mexique, douceur du climat d'hiver en Amérique du Nord, etc. Cette vision objective est utopique pour plusieurs raisons. Personne n'est en mesure ou n'a intérêt à comptabiliser les effets bénéfiques des variations climatiques au nom de l'adage médiatique : « bonnes nouvelles, pas de nouvelles ». Ensuite, les populations qui subissent les dégâts ne bénéficient pas en même temps des retombées positives. Enfin, les compagnies d'assurance, sources d'informations intéressantes, ne sont comptables que des catastrophes. Aussi, examiner les conséquences de la variabilité climatique uniquement à travers le prisme des catastrophes, au-delà de l'intérêt médiatique, correspond bien à une réalité économique. Mais il faut se garder de confondre les

coûts qu'elles engendrent avec un bilan global du poids économique réel de la variabilité du climat.

Un autre écueil apparaît dans l'approche économique. Les bilans prennent en effet seulement en compte les coûts de remplacement de ce qui a été perdu ou détruit. Ils sont donc incomparablement plus élevés dans les pays industrialisés que dans les pays en développement. Ils ne reflètent donc pas, loin de là, la totalité des préjudices.

Pour bénéficier de sources d'informations fiables et récentes, nous avons dû en partie pratiquer aussi cette approche du type « catastrophes naturelles ». Dans ce domaine, le risque et son coût dépendent de deux facteurs : le phénomène lui-même, plus ou moins intense (l'aléa), et la vulnérabilité, c'est-à-dire le degré de fragilité des infrastructures et des organisations économiques et sociales là où se produit la catastrophe. Ainsi un tremblement de terre de même intensité entraîne quelques victimes en Californie alors qu'il peut tuer des milliers de personnes au Caire ou en Arménie. Lorsque la catastrophe survient, son coût est automatiquement imputé à l'aléa en oubliant la vulnérabilité. Les exemples sont nombreux : constructions en zone inondable emportées à la première crue, pratiques forestières et culturales en Indonésie qui conduisent à déclencher des incendies quand la sécheresse due à El Niño les attise. Il faut donc se garder de conclure que l'accroissement du coût des catastrophes naturelles correspond à une augmentation de leur fréquence ou de leur intensité.

EL NIÑO, LE PACIFIQUE ET SES ABORDS

Certains événements climatiques planétaires sont systématiquement associés à El Niño (encart couleur p. 68) car ils sont directement liés aux modifications de la circulation atmosphérique du Pacifique :

- *sécheresse et vague de chaleur* à l'ouest du Pacifique intertropical, qui est souvent le siège de fortes précipitations : le « continent marin » (Indonésie, Malaisie, Nouvelle-Guinée) et l'Australie orientale : le nord du Victoria et les villes de Melbourne et Sydney, le Queensland, la Nouvelle-Galles du Sud, grande région de production agricole, et une partie des Territoires du Nord ;
- *chaleur et fortes précipitations* entraînant des inondations sur les zones côtières d'Amérique du Sud généralement sèches voire arides : avant tout le Pérou et l'Équateur mais également la partie amazonienne de la Bolivie, la côte Pacifique en Colombie et le nord du Chili ;
- *activité cyclonique* se déplaçant de l'ouest du bassin vers le triangle Hawaii-Polynésie-Cook qui en est le plus souvent à l'abri ainsi qu'une fréquence accrue de cyclones originaires du Pacifique touchant l'Amérique centrale, notamment le Mexique.

Le continent marin, généralement siège de l'ascendance de l'air et des précipita-

tions associées, connaît la sécheresse durant El Niño. En février 1983, El Niño a renforcé une période de sécheresse touchant le Sud-Est australien et entraînant des feux de brousse. On vit ainsi un nuage de poussière monstrueux s'étendre sur Melbourne : « Il arriva silencieusement et une obscurité soudaine envahit la ville ; des gens crurent que c'était la fin du monde. L'atmosphère au-dessus des têtes était parfaitement calme et le terrifiant nuage de poussière, haut de mille mètres et d'un demi-million de tonnes de poussière, persista pendant plus d'une demi-heure : Melbourne ne respirait plus. » En 1997-1998, rien d'équivalent ne s'est produit dans cette partie de l'Australie. Cette sécheresse affecte également l'Indonésie, facilitant la progression d'incendies et touchant l'agriculture : en 1983, cette sécheresse est survenue à un moment où ce pays avait atteint l'autosuffisance alimentaire, exportant même du riz. L'exemple indonésien illustre à merveille l'idée précitée qu'une catastrophe naît de la conjonction d'aléas naturels et d'inconséquences humaines. La sécheresse extrême qu'a connue l'Indonésie à l'automne 1997 et au printemps 1998 explique l'ampleur des feux de forêts et de tourbe qui ont empoisonné l'air d'une partie de l'Asie du Sud-Est, de la Malaisie aux Philippines en passant par Singapour et l'Indonésie. Mais jamais deux millions d'hectares de forêts n'auraient brûlé si l'anarchie ne régnait dans l'exploitation forestière. Les grandes compagnies forestières tracent au bulldozer de véritables « boulevards » pour les flammes et incendient des parcelles pour y planter des palmiers à huile très prisés.

Sur l'autre rive du Pacifique, la position particulièrement basse de la ZITC durant El Niño accentue les précipitations en Équateur, au Pérou et dans les pays voisins. Ainsi, des pluies incessantes atteignant parfois quinze centimètres par jour entraînent inondations et coulées de boue au Pérou. Le 15 février 1998, le Rio Piura, déjà mis en lumière en 1891 (chapitre 2), déborde, entraînant le sol détrempé. « Soudain, nous avons été entourés de partout. Alors ma maison s'est complètement abattue », déclare Ipanaqué Silva, paysan du village de Chato Chico. Les eaux d'inondation se déversèrent dans le désert côtier de Sechura formant un lac de cent soixante kilomètres sur quarante et d'une profondeur de trois mètres, le second en importance du Pérou ! Ces conditions humides touchent également une partie de l'Amérique du Sud puisque l'Uruguay, le Paraguay et l'Argentine sont concernés. À l'inverse, toute l'Amérique centrale connaît une période de sécheresse.

La Bolivie et la Colombie, en position intermédiaire entre ces aires climatiques connaissent des effets mixtes. En Bolivie, les hautes terres et leurs vallées sont affectées par la sécheresse durant la première récolte de céréales alors que des précipitations intenses touchent les aires amazoniennes. En Colombie, chaleur et sécheresse persistantes affectent le Nord-Ouest et les Andes, ce qui entraîne des feux de forêts et un rationnement de l'électricité d'origine hydraulique. Dans le

même temps, quelques régions de la côte Pacifique et, à l'intérieur, les provinces de Caquetà et Putumayo subissent pluies et inondations.

EL NIÑO, VEDETTE MÉDIATIQUE

L'éruption du volcan mexicain El Chichón en 1982, l'épisode El Niño de 1982-1983, la catastrophe nucléaire de Tchernobyl en 1986 ont, en peu d'années, démontré que les phénomènes naturels ou anthropiques ne connaissent pas de frontières. Les retombées du nuage radioactif de Tchernobyl ont affecté l'Europe, les cendres de l'éruption d'El Chichón, comme celles de l'Agung indonésien en 1963 ou du Pinatubo philippin en 1991, ont abaissé d'un quart de degré la température moyenne de la planète en réduisant le flux solaire sur les océans et les continents.

Récemment, l'attention des médias s'est focalisé sur le couple El Niño-La Niña d'autant plus que, parfois, la politique s'en est mêlée. Ainsi au Pérou, les opposants au président Alberto Fujimori lui reprochent d'utiliser ce cataclysme pour gagner quelques points de popularité. En Californie, l'année 1997, la meilleure depuis 1950 en termes de qualité de l'air, est interprétée de différentes manières. Pour le *San Francisco Chronicle*, cela est dû à El Niño qui a permis un été frais et venteux, évitant la formation de brouillard. La vision du *Mercury News* diffère ; sans nier l'effet bénéfique d'El Niño, le quotidien de la Silicon Valley met l'accent sur les efforts de l'État en matière de réduction de la pollution, notamment grâce à un nouveau carburant. Les titres de la presse montrent que ces événements sont associés à l'idée de catastrophe, les retombées bénéfiques étant constamment omises : « Les climatologues comprennent mieux "l'enfant terrible" du Pacifique » (*Le Monde*), « Folles pluies sous les tropiques » (*Le Nouvel Observateur*), « Jusqu'où ira El Niño ? » (*VSD*), « Le calamiteux retour de "l'Enfant Jésus" » (*Le Figaro*), « El Niño a provoqué une des plus grandes catastrophes naturelles du siècle » (*Le Monde*), « El Niño attise le brasier de l'Asie » (*Libération*), « Comment El Niño embrase le Pacifique » (*Le Point*), « Après El Niño, La Niña. Les enfants terribles du climat » (*Sciences & Avenir*), « Des maladies transmissibles pourraient flamber dans le Pacifique » (*Le Quotidien du Médecin*), « El Niño, le courant fou qui détraque le climat » (*Science & Vie*), « El Niño, La Niña : Nature's vicious cycle » (*National Geographic*).

Internet a permis de suivre, au jour le jour, l'aventure 1997-1998. Le pic de l'indice de l'oscillation australe, atteint en février 1998, correspond à un maximum de cent vingt articles en un mois sur Internet. L'évolution de l'épisode chaud est soulignée par les titres qui montrent également une annonce trop précoce de la fin d'El Niño :

El Niño couve dans le Pacifique tropical *ENN* 18 juin

Préparez-vous à l'Enfer El Niño *ABC News* 14 octobre

El Niño est-il en train de s'évanouir ? *CNN* 9 décembre
 El Niño n'ira pas plus loin *MSNBC* 14 janvier
 El Niño culminera dans les semaines à venir *The Irish Times* 4 février
 Il continue à progresser *ABC News* 1^{er} mars
 El Niño perdue comme une fièvre légère *San José Mercury News* 3 mai
 Au revoir El Niño ; bonjour La Niña *Los Angeles Times* 27 juin

CONSÉQUENCES ÉCONOMIQUES ET HUMAINES

Dans son ouvrage consacré aux impacts d'El Niño sur le climat et la société, Michael Glantz a interviewé des scientifiques, notamment César Caviedes, enfant de Valparaiso. Son premier souvenir d'El Niño est l'état de santé catastrophique de milliers d'oiseaux privés de nourriture durant l'épisode de 1957. Seul, un petit nombre d'initiés reliaient alors cette situation à une anomalie océanique au large des côtes du Pérou. Pour Caviedes, devenu océanographe, El Niño signifie maintenant : variations de la température de surface, anomalies de la pluviosité, réduction ou accroissement des champs de pression, indice de l'oscillation australe, télé-connection, etc. Mais il ne peut se détacher des impacts humains sur les plus défavorisés : pêcheurs et aquaculteurs du Pérou, populations rurales des *sertaos* ou zones semi-arides du Nordeste brésilien, éleveurs de lamas de l'Altiplano, agriculteurs et riverains du Paraná, gardiens de troupeaux de l'Afrique subsaharienne ou bergers de la lointaine Australie.

QUELQUES PLEURS SUR L'ANCHOIS DU PÉROU ?

Captures d'anchois et El Niño

En termes d'impact climatique, les El Niño se suivent et ne se ressemblent pas. Il en est de même pour les captures d'anchois (figure 7.1) dont la chute spectaculaire après l'événement 1972-1973 est à l'origine de la « diabolisation » du phénomène. Les captures ont en effet chuté de plus de dix millions de tonnes en 1971, soit près du quart de la pêche mondiale, à un million et demi seulement en 1973. El Niño était le coupable désigné, non sans argument d'ailleurs puisqu'il atténue ou arrête l'*upwelling* côtier, coupant les anchois de leur source d'alimentation. Tout n'est cependant pas si simple et un détour du côté du réseau trophique s'impose.

Quand l'être humain est passé de la chasse et de la cueillette à l'agriculture et à l'élevage, il s'est intéressé uniquement aux végétaux ou aux animaux herbivores. Tout échelon trophique supplémentaire représente en effet une perte de 90 % de la matière organique : une tonne de fourrage donne cent kilogrammes de viande, etc. A la recherche de protéines marines, l'homme pratique essentiellement la pêche, l'aquaculture demeurant encore marginale. Une bonne partie des espèces qu'il capture se situe au troisième, voire au quatrième échelon trophique :

par exemple le thon se nourrit de petits poissons qui ont consommé du zooplancton lui-même nourri de plancton végétal. Dans les régions de remontée, les poissons pélagiques planctonophages dominent. A la différence des sardines, qui consomment exclusivement du zooplancton, les anchois se nourrissent, du moins au stade juvénile, directement le phytoplancton, d'où le rendement élevé du réseau trophique péruvien.

En une année, dans l'*upwelling* du Pérou, vingt-sept tonnes d'anchois environ sont élaborées par kilomètre carré. Cette efficacité présente un revers : une sensibilité extrême du réseau trophique aux fluctuations de l'environnement. Quand l'apport de nitrates et de phosphates cesse, la production primaire, puis celle des poissons partiellement phytophages comme l'anchois chutent considérablement. Ceux-ci laissent alors la place à d'autres espèces comme la sardine, d'où une diminution du rendement. L'écosystème des côtes péruviennes n'élabore plus alors qu'une tonne de matière vivante par kilomètre carré sous forme de poisson. D'environ quatre millions de tonnes entre 1974 et 1976, les captures baissèrent à un million et demi et, ce, jusqu'en 1985. Après cette date, la croissance reprit et les captures ont atteint des chiffres comparables à la période d'avant 1972 (près de dix millions de tonnes en 1994) en dépit des épisodes chauds de 1986-1987 et de 1992-1995. Même l'El Niño du siècle (1982-1983), qui a pourtant amené en 1984 les captures à leur minimum avec une pêche de vingt-trois mille tonnes seulement, n'a pu empêcher, deux années plus tard, la remontée de la pêche à trois millions et demi de tonnes.

La pêche et les fluctuations à long terme

El Niño n'est-il qu'un épiphénomène qui se greffe sur une variabilité à plus long terme dont il renforce ou limite les effets ? On retrouve la même interrogation que précédemment à propos des interactions entre les différentes échelles de variabilité et, particulièrement, l'influence des variations décennales sur l'étrange variabilité d'El Niño. Ce phénomène relativement constant des années 45 jusqu'au milieu des années 70 (la version canonique) devient ensuite beaucoup plus chaotique. Il est tentant de relier la stagnation des captures d'anchois du milieu des années 70 au début des années 90 à ce changement de régime d'ENSO qui, durant la même période, a connu une prédominance des anomalies négatives de l'indice d'oscillation australe (chapitre 6). C'est ce que font Eleuterio Yanez et ses collaborateurs qui observent, sur la même période, un léger réchauffement de la température sur les côtes du Pérou et du Nord-Chili et une augmentation importante des captures de sardines. De moins de cent mille tonnes annuelles jusqu'en 1975 les prises de sardines au Pérou passent à plus de un million de tonnes à partir de 1978 pour dépasser trois millions entre 1988 et 1991. Il est remarquable de noter qu'en 1984 suite au El Niño 1982-1983, alors que les captures d'anchois

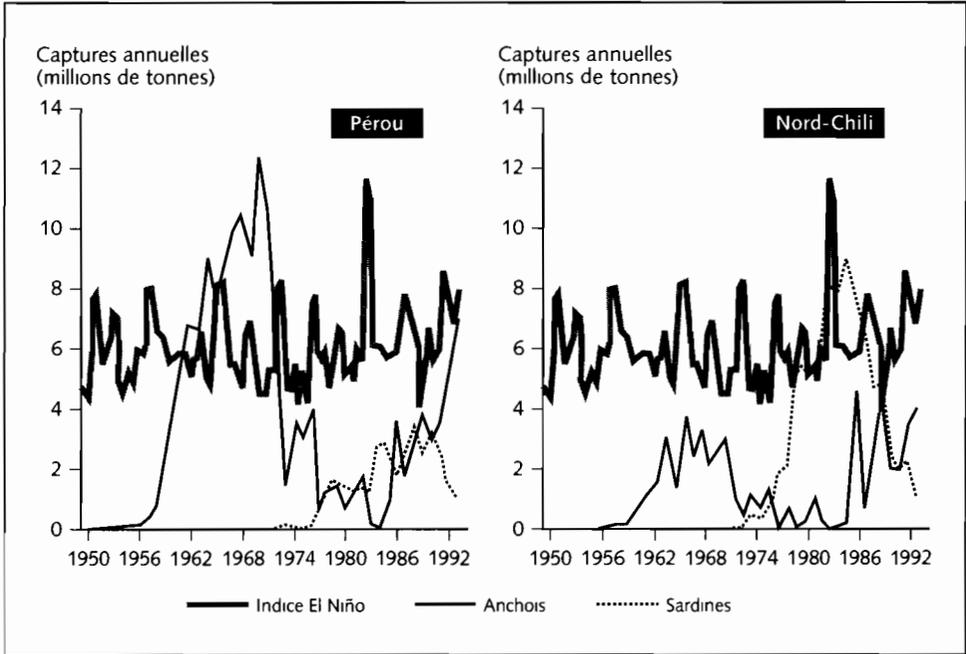


Figure 7 1

Effets d'El Niño sur la pêche de l'anchois et de la sardine au large des côtes d'Amérique du Sud.

La mort de myriades d'oiseaux de mer qui se nourrissent des anchois constitue l'image mythique d'El Niño. La chute spectaculaire des captures après l'événement 1972-1973 a ancré cette idée scientifiquement fondée car, durant un épisode chaud, l'*upwelling* fertilisant est ralenti voire arrêté, ce qui retentit sur le réseau trophique.

L'évolution comparée de l'indice El Niño et des captures d'anchois (*Engraulis ringens*) et de sardine (*Sardinops sagax*) de 1950 à 1992 montre que ce propos doit être pour le moins nuancé. La pêche dépend en effet aussi de fluctuations à long terme de l'environnement, de l'effort de pêche et de l'amélioration spectaculaire des techniques de capture. L'anchois, dont les juvéniles consomment directement du phytoplancton, est favorisé par une activation de la remontée alors que le recrutement de la sardine, consommatrice exclusive de zooplancton, est optimal quand les eaux sont moins froides. Même quand il pénalise la pêche, El Niño favorise une élévation de la biodiversité avec l'apparition de nouvelles espèces tropicales. On observe également un intérêt croissant pour les captures de sardines au Pérou mais surtout au Chili où elles ont atteint huit millions de tonnes par an vers 1985.

atteignent leur minimum (vingt-cinq mille tonnes !), les prises de sardines doublent pour atteindre près de trois millions de tonnes !

Il est donc logique de parler d'une compétition entre l'anchois, favorisé par une activation des remontées d'eaux froides, et des espèces, principalement la sardine, dont le recrutement est optimal quand les eaux sont plus chaudes et l'*upwelling* moins intense. Pour la pêche industrielle, le résultat n'est évidemment pas identique car les périodes « froides » avec la dominance des anchois sont beaucoup plus rentables que celles où la sardine et d'autres espèces plus élevées dans le réseau trophique l'emportent. Ainsi, l'écosystème de l'*upwelling* côtier du Pérou-Chili dépend-il largement des fluctuations climatiques aux échelles décennales. Il faut en tenir compte pour comprendre l'impact réel d'El Niño sur la pêche.

Durant une période « froide », l'écosystème est plus rentable car la chaîne trophique est courte ; revers de la médaille, il est beaucoup plus fragile car pratiquement monospécifique. Quand El Niño survient, les anchois s'efforcent de retrouver un biotope plus favorable en fuyant l'invasion d'eau chaude ou en plongeant vers des eaux plus froides. Dans tous les cas ils échappent aux engins de pêche et les captures s'effondrent. D'autre part le tarissement de l'*upwelling* crée des conditions délicates pour le développement des larves et juvéniles ; le recrutement diminue fortement et donc, momentanément, le stock. Les conséquences économiques ne sont évidemment pas négligeables, mais la situation se rétablit assez rapidement. Miguel Carranza a d'ailleurs noté, dès 1998 dans la période post-El Niño, une remarquable apparition de juvéniles d'anchois qui montre la vitesse à laquelle le système biologique réagit.

Durant une période « chaude », la pêche est moins rentable, mais une telle situation assure une plus grande diversité spécifique des espèces pélagiques et démersales. Non phytophages, elles dépendent moins directement des fluctuations de la production primaire et de l'*upwelling* et peuvent donc plus aisément amortir les perturbations qu'El Niño apporte à l'écosystème. C'est ce que prouve la faible sensibilité des captures de sardines au Pérou à un événement aussi marqué qu'El Niño 1982-1983.

La nature ne gagne jamais sur tous les tableaux : à un système productif et rentable correspond aussi un risque élevé ; à un système plus diversifié et moins rentable, un risque beaucoup plus faible. Même si cela ne satisfait pas aux critères actuels de rentabilité, on peut avancer qu'El Niño compense la perte momentanée de productivité par un accroissement de diversité biologique. C'est cette diversité renouvelée, leur permettant de découvrir et de pêcher de nouvelles espèces tropicales, que les marins de Paita ont saluée en donnant au phénomène ce nom devenu mythique d'El Niño. De toute manière, El Niño, qui ne peut être tenu pour responsable de la baisse durable des captures après 1973, est peut-être indispensable à la bonne santé d'un écosystème. Celui-ci aurait du mal, dans un

contexte de pêche intensive, à se maintenir dans la quasi-monospécificité caractéristique des épisodes froids si, de temps à autre, un peu de diversité ne lui était apporté grâce à El Niño.

ENSO ET LE CYCLE DE L'EAU

L'oscillation australe entraîne, avant tout, des modifications importantes du cycle de l'eau. Or l'eau, qu'elle vienne à manquer ou qu'elle provoque des inondations, est bien le fléau majeur, directement ou par le biais des maladies associées.

A partir de cent ans de données (1890-1989), l'IRI (International Research Institute for climate prediction) a analysé les anomalies de pluie durant les vingt années les plus chaudes (El Niño), les vingt les plus froides (La Niña) comparé aux vingt années « normales ». Une dizaine d'emplacements dans le monde ont été inventoriés, certains ne pouvant, à notre avis, être incontestablement rattachés à l'aire d'influence d'ENSO. Nous nous limiterons donc à quelques exemples clairement rattachés à ce phénomène.

La région indonésienne prise en compte est très vaste puisqu'elle couvre plus de sept millions de kilomètres carrés, de 10° S à 5° N et de 100° E à 150° E. Les résultats ne laissent pas planer de doute : neuf fois sur dix, la pluviosité entre juin et novembre est déficitaire en année El Niño. Dans quatre cas sur vingt, ce déficit atteint ou dépasse six centimètres par mois, dans sept autres cas, il dépasse trois centimètres. Les données sont encore plus parlantes pour La Niña puisque, dans tous les cas, les pluies sont excédentaires ; une fois sur deux, l'excédent dépasse trois centimètres par mois. En zone tropicale, l'Afrique est affectée essentiellement par la sécheresse dans l'Ouest africain, le Sahel et le sud de l'Afrique. Pour le Sahel, El Niño 1982-1983 et surtout l'épisode 1972-1973 ont aggravé une sécheresse récurrente depuis 1968. En 1982-1983, la sécheresse a surtout touché l'Afrique du Sud et le Zimbabwe, pays exportateurs de céréales : l'Afrique du Sud dut importer des États-Unis d'Amérique un million et demi de tonnes de blé et le Zimbabwe fit appel à l'aide internationale pour éviter la famine. Ces pays souhaitent donc plutôt une année La Niña !

En règle générale, les régions touchées par la sécheresse pendant El Niño connaissent de fortes pluies durant La Niña, celles qui bénéficient d'hivers doux durant l'épisode chaud connaissent des conditions rigoureuses durant La Niña, etc. La Niña, épisode « froid », contrebalance les effets d'El Niño sur le cycle de l'énergie. La Niña entraîne une élévation de la pluviosité en Asie du Sud-Est, notamment pendant la mousson de sud-ouest, au nord et au nord-est de l'Australie, sur le sud de l'Afrique, le nord de l'Amérique du Sud, dont le Nordeste brésilien, en Amérique centrale et sur les îles Hawaii. A l'inverse, elle génère un climat plus sec qu'habituellement dans les îles équatoriales du Pacifique central, à l'est de l'Afrique, durant la petite saison des pluies, le long du golfe du Mexique,

au sud-ouest des États-Unis et au nord du Mexique ainsi que dans certaines régions du sud de l'Amérique du Sud.

Particulièrement sensibles aux effets dévastateurs des cyclones, les Américains investissent beaucoup pour leur prévision. C'est particulièrement vrai pour ceux d'origine atlantique, les plus fréquents, ce qui les conduit à s'intéresser à La Niña qui favorise l'activité cyclonique dans cet océan. Ainsi, en 1995, onze cyclones ont touché le territoire américain, dont Marilyn qui dévasta les îles Vierges et Opal la Floride. Le cyclone Linda qui aborda le Mexique en septembre 1997 avec des vents dépassant largement trois cents kilomètres par heure est un des plus importants en termes d'énergie transportée jamais recensé. Les données de la NOAA portant sur quatre-vingt-dix-huit années, dont vingt-trois années El Niño et quinze La Niña, sont parlantes : en moyenne 1,04 cyclone touche les États-Unis en épisode chaud, 1,61 en année neutre et 2,23 en année La Niña.

Les perturbations du cycle de l'eau provoquent aussi chez l'être humain et les animaux des troubles de santé, telles les affections respiratoires ; les consultations décuplent en Malaisie après les incendies gigantesques de la forêt indonésienne. La plupart du temps, ce sont les maladies infectieuses à transmission vectorielle (paludisme, fièvre de la vallée du Rift) ou diarrhéiques (choléra et shigellose) qui « flambent » car le développement larvaire des vecteurs du paludisme est favorisé dans les régions inondées. Certaines données de l'Organisation mondiale de la santé illustrent nos réserves sur ces bilans. Ainsi, elle indique que, durant l'épisode 1997-1998, les cas de paludisme ont atteint des valeurs très élevées en Bolivie, en Colombie, en Équateur, au Pérou et au Venezuela et qu'ils ont été multipliés par quatre à cinq au Pakistan et à Sri Lanka. Or dans ces dernières régions de mousson, une année El Niño se caractérise généralement par une baisse des précipitations, donc du paludisme. On impute donc à El Niño le fait que, cette année-là, il n'a pas, *a priori*, entraîné de baisse de la mousson comme il aurait dû le faire !

On peut également citer la maladie de la vallée du Rift qui touche bétail et humains dans la corne de l'Afrique ; toute inondation entraîne l'éclosion de moustiques *Aedes* infectés par le virus. En 1997-1998, les pertes en bétail furent très élevées et l'on dénombra 90 000 personnes atteintes et plus de 200 morts au nord-est du Kenya et au sud de la Somalie. Les épidémies de choléra et d'autres maladies diarrhéiques s'aggravent aussi bien lors d'inondations qu'en période de sécheresse car elles sont très sensibles à la contamination de l'eau. Le Pérou a dénombré près de 17 000 cas, dont 150 décès lors d'El Niño 1997-1998, mais le bilan est encore plus lourd dans la corne de l'Afrique avec 40 000 cas et plus de 2 000 décès en Tanzanie en 1997. Les autres pays de cette région ont été également affectés : 17 200 cas (555 décès) au Kenya, 6 814 (252) en Somalie. Pour le premier trimestre de 1998, le Kenya a déjà enregistré plus de 10 000 cas, dont 507 décès, et l'Ouganda 110 335 cas, dont 525 décès.

QUELQUES DONNÉES SOCIO-ÉCONOMIQUES

A PROPOS DES ÉPISODES 1982-1983 ET 1997-1998

Les deux épisodes chauds de 1982-1983 et 1997-1998 ont conduit à des études intensives de leurs impacts socio-économiques, notamment par des organismes internationaux dans l'orbite de l'UNESCO. Les compagnies d'assurance ont également joué un rôle important. Cela ne conduit pas à un bilan scientifique très objectif : d'abord parce que les conséquences positives sont négligées, ensuite parce que ces bilans incluent des événements dont la relation avec ENSO paraît contestable ou, du moins, insuffisamment prouvée.

L'événement 1982-1983, qualifié parfois d'« anomalie anormale ! » car la branche ascendante de la cellule de circulation atmosphérique s'est déplacée de huit mille kilomètres, a fait deux mille victimes et ses dégâts sont estimés à soixante-cinq milliards de francs. El Niño a en effet provoqué des cyclones en Polynésie et à Hawaï. Il a entraîné des inondations en Bolivie, en Équateur, au nord du Pérou, à Cuba et aux États-Unis (golfe du Mexique). Il est, enfin, à l'origine d'épisodes de sécheresse à l'origine de la chute des récoltes (maïs au Zimbabwe) et de gigantesques incendies qui ont touché l'Afrique du Sud, le sud de l'Inde, Sri Lanka, les Philippines, l'Indonésie, l'Australie, le sud du Pérou, l'ouest de la Bolivie, le Mexique et l'Amérique centrale.

L'épisode chaud 1997-1998 a fait plus de deux mille morts et provoqué des dommages estimés à cent soixante milliards de francs ; il n'est pas certain que ce coût soit comparable à celui de 1982-1983, les bases de calcul étant différentes. Pour situer son importance, indiquons que l'impact moyen des aléas climatiques est de deux cent cinquante milliards de francs par an, certains jugeant ces chiffres sous-estimés. Pour relativiser le coût d'El Niño 1997-1998, indiquons que les inondations exceptionnelles de Chine, qui ne sont pas prises en compte dans ce bilan car leur liaison à l'oscillation australe reste à prouver, ont entraîné à elles seules plus de cent soixante milliards de francs de dégâts.

Les remboursements par les compagnies d'assurance constituent une autre manière d'approcher des catastrophes naturelles. Tous les records ont été battus en 1998 : trois cent cinquante événements, plus de vingt-deux mille victimes, près de cinq millions de sans-abri, cent cinquante milliards de francs de dégâts. Les assureurs réagissent d'ailleurs plus rapidement que les scientifiques ! Pour eux, cet El Niño a été moins dévastateur que celui de 1982-1983, qui demeure donc l'événement du siècle, et l'augmentation de la fréquence de phénomènes dévastateurs avec le réchauffement climatique est probable.

Une parenthèse s'impose à propos des catastrophes « naturelles ». Les phénomènes géologiques entraînent 40 % de la mortalité (séismes : 34 %, éruptions volcaniques : 5 %, glissements de terrain : 0,08 %, tsunamis : 0,001 %). Le reste est dû aux caprices climatiques et, avant tout, aux cyclones, responsables de 60 %

des victimes ; les autres phénomènes météorologiques, inondations hors cyclones, tempêtes et orages, vagues de froid ou de chaleur ont un impact mineur. Ce terme de catastrophe naturelle est ambigu. D'abord parce que les activités humaines influencent parfois le déclenchement de phénomènes que l'on qualifie de « naturel » ; le réchauffement climatique en constitue un bon exemple. Ensuite et surtout parce que la gravité des impacts sociaux dépend du niveau de vulnérabilité social. Pays industrialisés et pays en développement ne sont pas à égalité ; la vie « n'a pas de prix » dans les pays pauvres, comme le soulignent les deux premières lignes du tableau suivant à propos de l'épisode 1997-1998. Le coût des dégâts est estimé à trente-trois milliards de francs aux États-Unis et à moins d'un milliard en Afrique. En revanche, plus de treize mille victimes sont dénombrés en Afrique et moins de six cents aux États-Unis.

Tableau 7 1
Conséquences socio-économiques d'El Niño 1997-1998

	Afrique	Asie	Indonésie et Australie	Amérique du Nord	Amérique centrale et Amérique du Sud
Coût ¹	0,6	19,8	26,7	33	90
Mortalité	13 325	5 648	1 316	559	858
Morbidité	107 301	124 647	52 209	non estimé	25 696
Déplacés	1 357 000	2 555 000	1 443 000	410 000	363 000
Surfaces touchées ²	190 755	1 544 701	2 812 480	12 315 600	5 640 786

1. En milliards de francs
2. En hectares

Sur les dix sinistres les plus coûteux depuis 1995, neuf concernent les pays industrialisés d'Amérique du Nord et d'Europe : les États-Unis (ouragan Fran en septembre 1996, blizzard au nord-est en janvier-février 1996 et en janvier 1998, tornades sur le Midwest en mai 1998), le Royaume-Uni (inondations en avril 1998, tempête en décembre 1997, neige et inondations en janvier 1998), le Canada (pluies verglaçantes en janvier 1998) et l'Europe centrale (inondations en juillet-août 1997). Un seul autre figurant au « palmarès », l'inondation en Chine durant l'été 1998, concerne d'autres pays.

8 Perspectives

A travers l'histoire parallèle d'El Niño et de l'oscillation australe, c'est celle de la prévision du climat que nous avons rencontrée, prévision dont la qualité ne cesse de progresser en dépit de ses échecs ou, plutôt, en partie à cause d'eux. Plus la science du climat progresse, plus sa « clientèle » est exigeante ! Il en va d'ailleurs de même pour la prévision météorologique ; la plainte déposée par des agriculteurs français contre les services météorologiques, au motif qu'ils n'avaient pas su prévoir l'intensité d'un orage, n'est-elle pas une sorte d'hommage au savoir-faire habituel de Météo France ?

Le défi d'une prévision fiable plusieurs mois à l'avance pour chaque région du globe est difficile à relever, car le climat de la Terre s'accommode mal d'une étude séparée de ses composantes : l'atmosphère, l'océan, les continents et les fleuves, la cryosphère et la biosphère, y compris l'être humain. Chacune d'elles se caractérise par ses propriétés physiques, chimiques et biologiques ainsi que par sa dynamique propre, mais les agents du système climatique ignorent les frontières.

L'eau, principal agent du transfert d'énergie, est fournie à l'atmosphère par l'évaporation à la surface des océans et des terres et par l'évapotranspiration des plantes. Sa condensation donne naissance aux précipitations, qui alimentent les océans, les continents, le monde vivant, les glaciers et calottes polaires. Le dioxyde de carbone, qui permet l'élaboration par photosynthèse de la matière vivante, est également un gaz à effet de serre produit généreusement par les activités humaines, ce qui peut entraîner un réchauffement de la planète. Il s'échange par des processus physiques, chimiques et biologiques entre tous les milieux où il se rencontre sous forme dissoute, gazeuse, particulaire, minérale ou organique.

Prévoir le climat implique non seulement la connaissance de la dynamique propre de chacun des compartiments climatiques, mais aussi celle de leurs interactions, ce que l'on appelle « couplage ». Le modèle idéal de prévision du climat doit donc coupler les différents compartiments sans oublier les activités de l'être humain, acteur important du changement climatique. Encore ne faut-il pas oublier le Soleil, fournisseur initial d'énergie, dont l'intensité varie, ni les interactions de la Terre avec les autres éléments du système solaire qui perturbent sa trajectoire.

L'étude d'objets complexes dépend des outils dont la science dispose. L'être humain, dans sa conception du monde, et singulièrement de la planète qui l'héberge, est asservi à ses sens et à leurs extensions que sont les moyens d'observation qu'il élabore. Le scientifique privilégie donc les phénomènes qui se déroulent à des échelles de temps et d'espace accessibles aux moyens disponibles dans une démarche qualifiée souvent, avec mépris, de « réductionniste ». N'en déplaise aux chantres de la complexité, c'est pourtant à l'observation et à l'analyse des mécanismes simples que l'on doit d'identifier des systèmes complexes comme objets de science et non de mythologie. Mais ces moyens d'observation, qui lui imposent leurs propres échelles d'espace et de temps, dotent également le scientifique d'ocillères, et il est parfois enclin à qualifier d'erreur de mesure ce qui contrarie ses concepts. Le passage du El Niño des pêcheurs de Paita à ENSO puis à l'ensemble du système climatique planétaire à toutes ses échelles de variabilité est un exemple de cette complexification croissante qui a accompagné plus qu'elle n'a piloté les progrès des techniques d'observation directe jusqu'à la révolution spatiale.

L'histoire d'ENSO, à chacune de ses étapes, renvoie inmanquablement à la question suivante : le système climatique est-il prévisible ? Vouloir répondre à cette question conduit inéluctablement à cette seconde interrogation : a-t-on les moyens de connaître suffisamment le système climatique pour simuler son évolution aux diverses échelles de temps et d'espace pour la mise en place d'un système opérationnel de prévision ? Pour y répondre, les chercheurs construisent des modèles qui, avant de devenir des outils de prévision, constituent des instruments d'expérimentation sur le fonctionnement du système climatique. Construits sur les « lois » qui gouvernent la dynamique des compartiments climatiques et leurs échanges, ils permettent, à partir d'une situation donnée du système, de simuler son devenir. Avec un tel outil, le chercheur peut tester le comportement du système océan-atmosphère après avoir par exemple introduit une modification de la température de surface du Pacifique équatorial ou de l'indice de l'oscillation australe, ou bien encore élaborer les scénarios climatiques en cas de doublement de la teneur en gaz à effet de serre d'ici à la fin du siècle prochain, etc.

Pour que ce jeu soit fécond, il est nécessaire que les lois qui servent à l'éla-

borer soient connues. Ce terme de « loi » indique seulement des relations mathématiques entre des paramètres, déduites de mesures en laboratoires ou d'observation *in situ* qui s'améliorent quand progressent ces techniques. Les simulations réalisées avec les modèles permettent d'ailleurs de tester l'impact de ces améliorations sur la qualité du modèle. La seule véritable validation des simulations est la confrontation avec la réalité qui implique des réseaux d'observation adaptés aux échelles spatio-temporelles visées. Modèles et systèmes d'observation sont donc indissociables.

Des modèles climatiques couplant l'atmosphère et l'océan existent déjà. Leur extension aux autres éléments du système, comme la cryosphère et les surfaces terrestres, dépend principalement de la capacité de calcul des ordinateurs ; ne cessant de croître, elle ne constituera plus, à brève échéance, un obstacle. Quant aux réseaux d'observations, il s'agit « simplement » d'un problème de coût ! Les moyens satellitaires ont révolutionné l'observation de la Terre et, particulièrement, de son système climatique. Qui ne ressent l'unicité de ce système en observant les images des satellites météorologiques et les animations où l'on voit les systèmes nuageux, tourbillons enchevêtrés, se faire et se défaire dans leur course autour du globe ? A partir d'instruments embarqués sur satellite, on peut mesurer sur l'ensemble de la planète l'essentiel des facteurs climatiques : température et humidité de l'air, vitesse et direction du vent, température de la surface de la mer, variations des courants marins (altimétrie satellitaire), température et humidité des sols, production primaire marine et terrestre, extension et pouvoir réfléchissant des glaces de mer, etc. De plus, la localisation précise et la transmission de données par satellite permettent de multiplier à travers le monde les stations automatiques de mesure des facteurs climatiques : stations fixes ou mobiles (à bord de navires ou d'avions) ou encore dérivant au gré des courants marins en surface aussi bien qu'en profondeur.

Ces systèmes ont été expérimentés depuis les années 80 dans le cadre du Programme mondial de recherche sur le climat, qui correspondait encore à une approche analytique du climat. Certaines opérations concernaient un seul des compartiments du système (la circulation océanique pour l'expérience WOCE — *world ocean circulation experiment*) ou bien une échelle temporelle de variabilité déterminée (Toga évoqué dans cet ouvrage). La modélisation possible du système climatique et les nouveaux moyens d'observation permettent au Programme mondial de recherche sur le climat de passer à un niveau de complexité supérieur en lançant l'étude de la variabilité aux échelles décennales (CLIVAR), qui couple océans, atmosphère, terre et cryosphère pour déboucher sur une prévision opérationnelle. Ce n'est certes pas encore un système climatique unique, car les interactions subtiles de la biosphère et du climat sont encore laissées à la charge d'autres programmes. Il s'agit néanmoins d'une étape importante, car ce programme asso-

cie les activités de recherche et les préoccupations opérationnelles de prévision. C'est d'ailleurs ainsi qu'à progressé la météorologie pour atteindre une prévision à sept jours et expérimenter maintenant une prévision à deux semaines. La clef tient à la mise en place de systèmes d'observation à long terme, singulièrement pour l'océan : moyens spatiaux, bouées dérivantes, campagnes répétitives de navires, etc.

Dans cette globalisation du système climatique, que reste-il d'ENSO et de ses épisodes paroxysmiques El Niño et La Niña ? D'abord une meilleure connaissance d'une échelle de variabilité climatique en phase avec le rythme des activités humaines et donc cruciale. Privilégier cette échelle de temps entre aussi dans la logique scientifique. En effet, plus on vise des échéances lointaines et plus longues doivent être les séries d'observation ; quelque intéressantes qu'elles soient, les données paléoclimatiques (cernes des arbres, glaciers, sédiments, coraux) qui permettent de reconstituer les climats du passé ne peuvent pallier l'absence de séries actuelles d'observation à long terme. L'échelle de temps d'ENSO permet au scientifique de tester rapidement la qualité des prévisions issues des modèles et de les faire ainsi progresser. Enfin, l'amplitude des perturbations climatiques qui lui sont associées fait qu'ENSO, même intégré à la complexité du système climatique, touche trop directement les activités humaines pour qu'on l'oublie : El Niño et La Niña feront certainement encore parler d'eux !

Pour en savoir plus

- Les humeurs de l'océan. *Pour la science* (Paris), octobre 1998.
- El Niño, La Niña — Nature's vicious cycle. *National Geographic* (Washington D.C.), mars 1999.
- Arntz, W. E. et Fahrbach, E. 1991. *El Niño — Klimaexperiment der Natur. Physikalische Ursachen und biologische Folgen*. Bâle, Birkhäuser-Verlag. 264 p. (aussi en espagnol, voir ci-dessous).
- Arntz, W. E. et Fahrbach, E. 1991. *El Niño : experimento climático de la naturaleza*. Mexico, Fondo de Cultura Económica. 312 p. (aussi en allemand, voir ci-dessus).
- Bigg, G. R. *The oceans and climate*. Cambridge, Cambridge University Press.
- Chapel, A. *et al.* 1996. *Océans et atmosphère*. Paris, Hachette.
- Fierro, A. 1991. *Histoire de la météorologie*. Paris, Denoël.
- Gautier, Y. 1995. *Catastrophes naturelles*. Paris, Presses Pocket.
- Glantz, M. 1996. *Currents of change. El Niño's impact on climate and society*. Cambridge, Cambridge University Press.
- Glantz, M. ; Katz, R. et Nicholls, N. 1987. *The societal impacts associated with the 1982-1983 worldwide climate anomalies*. Boulder, CO, NCAR-UNEP.
- Graedel, T. E. et Crutzen, P. J. 1997. *Atmosphere, climate and change*. New York, NY, Scientific American Library.
- Jacques, G. 1996. *Le cycle de l'eau*. Paris, Hachette.
- Kandel, R. 1998. *Les eaux du ciel*. Paris, Hachette.
- Philander, G. 1983. ENSO phenomena. *Nature* (Londres), 302.
- Philander, G. 1986. Predictability of El Niño. *Nature* (Londres), 321.
- Philander, G. 1990. *El Niño, La Niña and the Southern Oscillation*. San Diego, CA, Academic Press.

- Rasmussen, E. 1984. The ocean/atmosphere connection. *Oceanus* (Woods Hole, MA), 27.
- Rasmussen, E. et Wallace, J. M. 1983. Meteorological aspects of ENSO. *Science* (Washington D.C.), 222.
- Rochas M. et Javelle J.-P. 1993. *La météorologie, la prévision numérique du temps et du climat*. Paris, Syros.
- Sadourny, R. 1994. *Le climat de la Terre*. Paris, Flammarion.
- The Open University. 1989. *Ocean circulation*. Oxford, Pergamon Press.
- Voituriez, B. 1992. *Les climats de la Terre*. Paris, Presses Pocket.
- Wyrтки, K. 1976. Predicting and observing El Niño. *Science* (Washington, D.C.), 191.

Glossaire

Alizés

Composante de la circulation atmosphérique s'établissant autour des **anticyclones** subtropicaux. Centrés autour de 15° de latitude, ces vents soufflent de NE dans l'hémisphère Nord et de SE dans l'hémisphère Sud. Les alizés des deux hémisphères confluent à la **zone intertropicale de convergence** ou équateur météorologique.

Anthropique

Résultant de l'activité humaine.

Anticyclone

Zone de haute pression atmosphérique.

Anticyclonique

Qualifie un mouvement horizontal tourbillonnaire de l'atmosphère ou de l'océan qui s'effectue dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère Nord (en sens contraire des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère Sud) autour des zones de haute pression.

Atmosphère

Enveloppe gazeuse qui entoure les planètes. L'atmosphère de la Terre se compose d'azote (77 %), d'oxygène (21 %), d'argon (1 %), de vapeur d'eau, de dioxyde de carbone et d'autres gaz en faible quantité. Les phénomènes météorologiques et climatiques se déroulent dans les basses couches de l'atmosphère : la troposphère (du sol à sept kilomètres aux pôles et à vingt kilomètres à l'équateur) et dans la stratosphère qui culmine à une cinquantaine de kilomètres.

Autotrophe

Organisme qui élabore sa propre matière vivante seulement à partir d'éléments inorganiques, par chimiosynthèse ou photosynthèse.

Benthique

Vivant au fond des océans.

Biocénose

Communauté d'organismes végétaux et animaux qui occupent une surface ou un volume donnés, c'est-à-dire un **biotope**. On peut donc écrire : biocénose + biotope = **écosystème**.

Biodiversité voir Diversité**Biomasse**

Quantité de matière vivante présente à un instant donné dans un espace ou un volume donnés.

Biotope

Surface (ou volume) aux caractéristiques physiques et chimiques uniformes occupée par une espèce, ou plus généralement, une communauté (**biocénose**) particulière.

Calottes glaciaires

Grands glaciers polaires qui recouvrent actuellement le Groenland et l'Antarctique. En période glaciaire, dans l'hémisphère Nord, la calotte glaciaire recouvre le Canada, le nord des États-Unis et l'Eurasie.

Carnivore

Animal qui dépend principalement ou uniquement d'autres animaux pour sa nourriture.

Cellule (ou circulation) de Hadley

Circulation atmosphérique méridienne marquée par l'ascendance d'air chaud et humide (**convection**) au-dessus de la **zone intertropicale de convergence** et par sa subsidence au-dessus des aires de haute pression subtropicales où se situe la ceinture des grands déserts.

Cellule (ou circulation) de Walker

Circulation atmosphérique de la région équatoriale marquée par l'ascendance d'air chaud et humide (**convection**) au-dessus des zones de basse pression situées à l'ouest des océans en zone intertropicale et par sa subsidence au-dessus des aires de haute pression arides à l'est de ces océans.

Contre-courant équatorial

Courant marin dirigé vers l'est situé entre les **courants équatoriaux Nord et Sud**, le long de l'équateur météorologique.

Convection

Mouvement vertical d'une masse d'air ou d'une masse d'eau résultant d'une instabilité de densité en général d'origine thermique. Dans un fluide chauffé, la par-

tie la plus chaude s'élève, la plus froide descend de part et d'autre créant une cellule de circulation. Les mouvements de convection engendrent convergences et divergences.

Convergence et Divergence

La convergence est une zone de confluence, la divergence une zone de séparation entre deux masses d'air ou deux masses d'eau. Se déroulant dans un plan horizontal, convergences et divergences entraînent des mouvements verticaux de compensation.

A l'interface océan-atmosphère, une convergence des vents (ZITC par exemple) entraîne une ascendance de l'air à la base de la cellule de circulation. Une convergence des eaux superficielles entraîne, au contraire, une plongée des eaux car on se situe alors au sommet de la cellule de circulation océanique.

Coraux

Anthozoaires benthiques existant sous forme individuelle ou coloniale sécrétant du carbonate de calcium dans leur squelette. Dans certaines conditions, ces animaux composent des récifs, en association avec des algues calcaires.

Courant de Cromwell ou sous-courant équatorial

Courant coulant vers l'est le long de l'équateur au sein de la zone de gradient thermique (**thermocline**) en sens inverse du **courant équatorial Sud** de surface.

Courant de Humboldt

Nom donné au courant marin coulant du sud vers le nord le long des côtes d'Amérique du Sud. Encore appelé « courant du Pérou ».

Courants équatoriaux Nord et Sud

Courants marins entraînés vers l'ouest par les **alizés** respectivement de l'hémisphère Nord et de l'hémisphère Sud.

Courant-jet ou jet-stream

Courants violents qui se propagent dans les couches supérieures de la troposphère.

Cyclone

Zone de basse pression peu étendue des régions tropicales dans laquelle l'air s'engouffre en tourbillonnant avec des vents dépassant deux cents kilomètres par heure (voir **cyclonique**).

Cyclonique

Qualifie un mouvement horizontal tourbillonnaire qui s'effectue en sens inverse des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère Nord (dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère Sud) autour des zones de basse pression.

Dendrochronologie

Méthode de datation à partir des anneaux de croissance des arbres. Les variations d'épaisseur de ces anneaux permettent la reconstitution des variations climatiques.

Divergence voir Convergence

Diversité

La diversité spécifique correspond au nombre d'espèces rencontrées dans une subdivision de l'environnement ou à un indice exprimant le type de répartition des individus au sein des espèces. On parle également de diversité biotique ou, maintenant, de biodiversité pour exprimer la variété des modes de vie et des environnements.

Downwelling

Plongée d'eau de surface, notamment dans les régions océaniques de **convergence**.

Échelon trophique

Niveau d'alimentation de la chaîne trophique. Les végétaux constituent le niveau inférieur (**production primaire**) suivi des herbivores puis d'une série de **carnivores** aux niveaux supérieurs.

Écosystème

Unité fonctionnelle formée des organismes (**biocénose**) et des facteurs de l'environnement (**biotope**) d'une aire ou d'un volume spécifique.

Effet de serre

Réchauffement de l'atmosphère terrestre résultant de l'absorption par des composés comme la vapeur d'eau ou le dioxyde de carbone du rayonnement infrarouge émis par la surface de la Terre. Cet effet naturel assure à la Terre une température moyenne de 15 °C. Les activités humaines accroissent cet effet de serre et peuvent ainsi modifier le climat.

El Niño

Initialement, courant marin chaud superficiel dirigé vers le sud se développant parfois au large des côtes d'Amérique du Sud (Équateur-Pérou). Maintenant ce terme désigne l'épisode « chaud » d'ENSO caractérisé par un indice de l'**oscillation australe** fortement négatif et des températures océaniques anormalement chaudes à l'équateur et à l'est du Pacifique ainsi qu'un affaiblissement de la **cellule de Walker**.

ENSO = El Niño Southern Oscillation

Oscillation de la pression atmosphérique entre la zone de haute pression du Pacifique central et la zone de basse pression de la région indopacifique. Cette oscillation est couplée aux variations de la température de surface de l'océan Pacifique équatorial.

Équateur météorologique *voir* zone intertropicale de convergence

Équatorial

Relatif à l'équateur. Région proche de l'équateur.

Floraison planctonique

De taille microscopique, le **phytoplancton** se développe très rapidement dans des conditions favorables. Pouvant doubler sa **biomasse** chaque jour, il peut atteindre des concentrations de plusieurs millions de cellules par litre d'eau de mer, formant des eaux colorées.

Force de Coriolis

Force de déviation exercée sur tout mobile en mouvement. Elle est engendrée par la rotation de la Terre autour des pôles. La force de Coriolis s'exerce perpendiculairement à la vitesse du mobile, à droite dans l'hémisphère Nord, à gauche dans l'hémisphère Sud.

Gaz à effet de serre

Gaz qui, en raison de sa forte capacité d'absorption du rayonnement infrarouge, contribue fortement à l'**effet de serre** (vapeur d'eau, dioxyde de carbone, etc.). Les activités humaines produisent de tels gaz, notamment le dioxyde de carbone, le méthane, les chlorofluorocarbones et accroissent ainsi l'**effet de serre**.

Géostrophique

Qualifie l'approximation selon laquelle le gradient horizontal de pression équilibre la **force de Coriolis**. La méthode géostrophique est une méthode de calcul des courants basée sur cette approximation.

Glaciaire (épisode, période)

Période durant laquelle les hautes et moyennes latitudes sont recouvertes de glaciers continentaux. Le pléistocène, la plus récente des divisions du quaternaire, représente la dernière période de glaciation. Les périodes glaciaires durent environ cent mille ans et se répètent tous les cent vingt mille ans depuis au moins un million d'années.

Guano

Du péruvien *huano*. Matière constituée par les amas de déjections d'oiseaux marins. C'est un engrais azoté puissant.

Intertropical

Appartenant à la zone comprise entre les deux tropiques, incluant donc la zone équatoriale, d'où l'ambiguïté du terme.

Interglaciaire (épisode, période)

Courtes périodes du quaternaire, de quinze à vingt-cinq mille ans, séparant deux périodes glaciaires et durant lesquelles la Terre connaît un climat plus chaud.

La Niña

Épisode « froid » d'ENSO durant lequel l'indice de l'oscillation australe (SOI) est fortement positif. S'observent parallèlement une activation de la **cellule de Walker** du Pacifique et un refroidissement marqué des eaux de surface dans le Pacifique est et près de l'équateur, ce qui correspond à une activation de la remontée d'eau côtière et de la divergence équatoriale.

Modèle

Simulation d'un phénomène naturel. Il peut être physique (modèle réduit) ou mathématique, utilisant des équations pour traduire les phénomènes. Ceux qui sont utilisés en climatologie et en océanographie sont des modèles mathématiques que l'on résout par des simulations numériques.

Mousson

Nom donné à des vents saisonniers (dérivé du mot arabe pour saison : *mausim*). Ce terme fut appliqué à l'origine aux vents au-dessus de la mer d'Arabie qui soufflent de sud-est en été et de nord-est en hiver.

Onde

Perturbation se déplaçant à la surface ou au sein d'un milieu à une vitesse qui dépend des propriétés de ce milieu.

Ondes de Kelvin

Ondes océaniques générées par des perturbations atmosphériques et qui se propagent d'ouest en est le long de l'équateur.

Ondes de Rossby

Ondes qui se propagent d'est en ouest dans l'atmosphère et dans l'océan. Leur vitesse dépend de la stratification du milieu et diminue en même temps que la latitude croît.

Oscillateur retardé

Théorie proposée pour expliquer le déroulement des épisodes El Niño-La Niña à partir d'interférences, le long de l'équateur, entre les **ondes océaniques de Kelvin** et de Rossby.

Oscillation australe voir ENSO**Pélagique**

Qualifie le milieu de pleine eau et la vie qui s'y déroule. Le pelagos comprend le **plancton** et l'ensemble des organismes nageurs (céphalopodes, poissons, mammifères, etc.) qui forment le necton.

Phytophage

Animaux consommateurs de végétaux. Surtout employé pour les animaux aquatiques consommateurs de **phytoplancton** (**zooplancton**, poissons, voire mammifères telle la baleine à fanons).

Phytoplancton

Plancton végétal formé d'organismes microscopiques photosynthétiques dont la taille est comprise entre moins de un millièmètre et un millièmètre.

Plancton

Organismes vivant dans la pleine eau (milieu **pélagique**) dont les déplacements sont faibles comparés à celui des masses d'eau.

Production primaire

Quantité de matière vivante produite par des organismes **autotrophes** (producteurs primaires) par unité de surface (ou de volume) et unité de temps.

Quantité de mouvement

Grandeur physique (produit de la masse par la vitesse) qui se conserve dans les échanges d'énergie cinétique entre des corps qui interfèrent. L'entraînement des

courants marins par le vent correspond à un transfert de quantité de mouvement de l'atmosphère à l'océan.

Recrutement

Dans une pêcherie, désigne la phase et la quantité de poissons qui passent à un stade où leur taille permet leur exploitation.

Réseau trophique

Ensemble des organismes d'un **écosystème**, des producteurs primaires aux échelons les plus élevés de la chaîne alimentaire. Flux de matière et d'énergie entre ces différents maillons, de l'échelon **autotrophe** aux herbivores et aux différents échelons de carnivores.

Sels nutritifs ou nutriments

Éléments chimiques indispensables à la photosynthèse aquatique. Le terme est souvent réservé aux éléments dont la concentration constitue parfois un facteur limitant. Le terme est donc synonyme, dans les eaux, de l'ensemble des formes inorganiques de l'azote, du phosphore et du silicium.

Southern Oscillation Index = SOI

Indice qui caractérise l'évolution de l'oscillation australe (voir **ENSO**). Il s'agit de la différence de pression atmosphérique au niveau de la mer entre Tahiti et Darwin (Australie).

Subtropical

Situé vers 30° de latitude, juste au nord du tropique du Cancer et au sud du tropique du Capricorne.

Surpêche

Pêche excessive à tel point que les juvéniles n'arrivent plus à reconstituer les stocks.

Tectonique des plaques

Théorie suivant laquelle la lithosphère (croûte terrestre) est fracturée en plaques qui se déplacent les unes par rapport aux autres, entraînées par les courants de convection du manteau. La majorité de l'activité sismique et volcanique se situe dans les zones frontières entre les plaques.

Téledétection

Étymologiquement « détection à distance ». Utilisé actuellement pour les méthodes faisant appel à des capteurs embarqués à bord d'avions ou, plus souvent, de satellites (téledétection spatiale).

Thermocline

Le suffixe *-cline* désigne une couche où les propriétés physiques ou chimiques présentent un fort gradient. La thermocline est donc la zone de forte variation de la température de la mer en fonction de la profondeur ; elle sépare la couche homogène chaude de surface des couches profondes froides.

Toga = tropical ocean global atmosphere

Programme de recherche international qui s'est déroulé de 1985 à 1995 pour étudier les processus qui lient les océans tropicaux, particulièrement le Pacifique, au climat de la planète.

Topex-Poseidon

Satellite franco-américain lancé en 1992 qui mesure les variations du niveau de la mer au centimètre près.

Topographie de surface de la mer

Carte du niveau de la mer par rapport à une surface géométrique de référence. L'altimètre de **Topex-Poseidon** permet d'élaborer de telles cartes.

Transmission vectorielle (maladies à)

Maladies transmises à l'homme par l'intermédiaire d'organismes (insectes par exemple) qui lui injectent virus ou parasites. Le paludisme, l'onchocercose, la trypanosomiase sont des maladies à transmission par des vecteurs.

Tropical

Appartenant aux régions voisines des tropiques qui sont situés à 23,27° de latitude.

Upwelling = remontée d'eau

Phénomène océanique de remontée d'eau. Synonyme de « remontée d'eau », ce terme s'utilise surtout, en français, pour désigner le phénomène côtier où les eaux de surface sont chassées vers le large et remplacées, à la côte, par des eaux « profondes » relativement froides et riches en **nutriments**. Au large, quand des vents ou des courants provoquent une ascendance de l'eau profonde, le terme **divergence** est généralement préféré.

ZITC = zone intertropicale de convergence = équateur météorologique

Zone où confluent les alizés des deux hémisphères. Elle se situe, en moyenne, cinq degrés au nord de l'équateur géographique. Sa position varie avec les saisons puisqu'elle se déplace vers le nord durant l'été boréal. Elle correspond aussi, dans un plan nord-sud, à un maximum de température de l'eau de mer superficielle.

Zooplancton

Plancton animal comprenant des organismes dont le cycle de vie se déroule totalement dans le milieu pélagique et d'autres qui y passent seulement la phase larvaire.

Entre une myriade d'articles scientifiques auxquels il n'a pas accès et les éditoriaux parfois tapageurs et toujours succincts des journaux, le public avide de connaissances ne peut savoir ce que cache El Niño. Quelque chose d'irrationnel apparaît d'ailleurs dans la manière dont les médias, parfois même des scientifiques, personnifient ce phénomène naturel sous les traits d'un événement maléfique.

Par un langage simple et grâce à une perspective historique, *El Niño, réalité et fiction* explique et démystifie le climat et ses variations à l'échelle la plus sensible pour l'humanité, celle de la décennie.

Le lecteur découvrira qu'El Niño et La Niña représentent les stades extrêmes d'un élément normal du fonctionnement de la machine climatique, régulée par le couple que forment l'océan et l'atmosphère. Puis il se familiarisera avec ses rouages dans cet immense océan qu'est le Pacifique où océan et atmosphère redistribuent l'excès de calories reçu du soleil en zone intertropicale. De là il sera naturellement entraîné à l'échelle planétaire, les auteurs démêlant ce qui est lié à El Niño et les effets qu'il est pour le moins prématuré de lui attribuer alors que les médias ont tendance à le placer au banc des accusés. Alors il sera temps de dresser le bilan des réussites et des échecs des scientifiques et peut-être même de défendre la science, qui se voit tenir rigueur de manquer maintenant de l'assurance qu'on lui reprochait naguère !

Ce titre est le troisième édité dans la collection COI Forum Océans et vise à informer le lecteur non spécialiste au sujet de ce phénomène naturel d'un impact mondial.



Bruno Voituriez, directeur de recherches à l'IRD, est océanographe physicien. Il a travaillé sur les mécanismes physiques et chimiques qui contrôlent la production biologique dans les écosystèmes océaniques tropicaux, notamment les *upwellings* côtiers et la divergence équatoriale. Il a également contribué au développement des programmes de recherche océanographique internationaux sur le climat (TOGA, WOCE), dont il a été en France le coordinateur. Il est actuellement directeur du Centre de recherche halieutique méditerranéenne et tropicale de Sète (France).

Guy Jacques, directeur de recherches au CNRS de la France, est un écologiste marin. Il a contribué à l'étude de la production primaire et de l'écosystème pélagique, tant en Méditerranée qu'en milieu tropical, puis dans l'océan Austral. Depuis une dizaine d'années, il s'est investi dans l'information scientifique vers le grand public et les enseignants avec, notamment, la publication d'ouvrages sur les écosystèmes marins, océans et atmosphère, et le cycle d'eau.

ISBN 92-3-203649-5



9 799232 036499

