

El Niño : le phénomène et ses conséquences

Préambule

En 1997-98, de nombreuses catastrophes climatiques se succédèrent et furent attribuées à El Niño. De sombres nuages voilèrent le ciel Indonésien pendant de longs mois, le Nordeste brésilien connut de graves émeutes, des cyclones violents frappèrent en Amérique centrale. Mais le malheur des uns fait le bonheur des autres, car suite aux fortes pluies qui s'abattirent sur la côte Californienne, les marchands de pneu et de parapluie firent fortune... Que recouvre vraiment ce nom d'El Niño ? Quelles sont vraiment les anomalies climatiques dont il est responsable ? Peut-on prévenir les catastrophes qu'il déclenche ? La suite de cette présentation présentera l'histoire de ce phénomène complexe, décrira l'état des connaissances actuel grâce à l'avancée des observations et de leur compréhension, et abordera les enjeux de la prévision climatique.

I - Quelques éléments d'histoire

Le nom même d'El Niño a une histoire qu'il est intéressant de connaître. El Niño, l'enfant en espagnol, désigne en fait un événement climatique qui se produit en décembre, aux environs de Noël. La côte orientale d'Amérique du Sud est désertique. Elle est longée par le courant de Humboldt remontant du sud, et les vents qui remontent aussi vers le nord le long de Cordillères des Andes, poussent les eaux de surface vers le large. Cet appel d'eau vers le large est compensé par des remontées d'eau froide. En début d'hiver, les vents faiblissent, le courant froid diminue et des intrusions d'eaux équatoriales venant du nord parviennent à se glisser le long de la côte. Ce courant chaud, appelé El Niño, charrie des noix de coco et autres fruits exotiques vers les côtes de l'Equateur et du Pérou ; c'est la manne de Noël. Il s'établit en début d'hiver et disparaît rapidement après quelques semaines. Mais certaines années, les eaux froides ne reviennent pas et l'océan reste désespérément chaud. De bénéfique, la situation devient catastrophique car des trombes d'eau ravagent les régions littorales, ravinant les terrains et produisant des glissements de terrain, les eaux chaudes persistant le long de la côte s'appauvrissent en éléments nutritifs, les écosystèmes marins, puis terrestres sont durement affectés : la pêche, ressource très importante pour les populations locales, s'effondre ; l'industrie du guano, elle-même dépendante des oiseaux de mer, est également lourdement touchée. Pérou, Equateur, et même Chili subissent de plein fouet un temps inhabituel, pluvieux et chaud, pendant plusieurs mois successifs. Le nom d'El Niño a progressivement été associé à la persistance calamiteuse des conditions chaudes de Noël.

Au 20^{ème} siècle, El Niño est l'un des phénomènes les plus étudiés par les océanographes. C'est une anomalie de courant océanique, affectant toute la côte d'Amérique du Sud, avec des anomalies de température de la mer pouvant atteindre 6° C pendant plusieurs mois. Des enregistrements sont effectués le long de la côte pour cerner le comportement de cette anomalie. Son démarrage est difficile à déceler, car elle s'installe comme le signal saisonnier, qu'elle amplifie progressivement. Une explication locale est cherchée et on pense bien sûr à la rupture dynamique de la situation de remontée d'eau froide, dite « upwelling », liée

aux vents côtiers. Seulement voilà, les observations semblent indiquer que le vent souffle toujours de façon favorable à l'upwelling. Donc, dynamiquement, les remontées s'effectuent toujours, mais elles ramènent en surface des eaux chaudes. L'explication ne put être trouvée par une dynamique locale, il fallait considérer l'océan Pacifique dans son ensemble et trouver une interprétation plus globale du phénomène.

Lors de son séjour aux Indes, Walker fut fasciné par le phénomène de la Mousson dont l'arrivée conditionne toute la saison agricole des pays d'Asie du Sud-Est. Planter au bon moment, juste avant le début de la mousson, est vital pour assurer les ressources suffisantes pour nourrir les populations de l'Inde et de la Chine. Si la Mousson démarre trop tôt, les terrains inondés ne sont plus aptes à être semés ; trop tard, les jeunes plants se sont desséchés. Rechercher des indices météorologiques permettant d'anticiper l'arrivée de la mousson a été et continue d'être une préoccupation majeure. Walker fit un recensement de toutes les données de pression au sol sur le pourtour de l'océan Indien, et étendit les analyses du côté Pacifique. Et il découvrit un phénomène appelé « Oscillation Australe ». L'Oscillation Australe désigne une anomalie majeure de la circulation atmosphérique, couvrant la moitié du globe. Sa première signature est sur le champ de pression de surface. Simultanément, la pression augmente dans une vaste région centrée sur le Nord de l'Australie, alors qu'elle diminue dans tout le Pacifique Sud Est. Quand cette anomalie s'installe, les vents d'alizés faiblissent dans le Pacifique Sud, les pluies convectives du Pacifique occidental diminuent, et les nuages migrent vers le Pacifique central et Est.

Ce n'était pas un « prédicteur » de la mousson, mais il s'agissait du phénomène atmosphérique associé au El Niño des océanographes et le couplage de grande échelle entre l'océan et l'atmosphère fut longuement discuté et décrit par Bjerknes.

Le système océan-atmosphère sur le Pacifique connaît plusieurs états d'équilibre. La situation dite normale est celle où les vents d'alizés soufflent depuis les anticyclones tropicaux, situés vers 20° Nord et Sud, dans la partie orientale du Pacifique, pour converger dans la région de dépression située à l'ouest du Pacifique équatorial. L'air sec des tropiques se charge progressivement d'humidité. Arrivé dans la région de basse pression, sur un océan très chaud, l'air chargé d'humidité monte et le refroidissement créé par cette ascension provoque la condensation de l'humidité. Cette transformation dégage de l'énergie thermique, en quantité suffisante pour accélérer verticalement l'ascension des masses d'air, alors que se produisent de fortes pluies. La région occidentale du Pacifique est appelée « Warm Pool », ou réservoir d'eau chaude, et il s'y produit une forte activité convective avec des nuages possédant des enclumes gigantesques, à plus de 10 km d'altitude. Arrivées en altitude, les masses d'air se déplacent alors vers l'est, en perdant le peu d'humidité qui leur reste, et elles descendent (« subsident ») dans les centres de haute pression tropicale. Les masses d'air décrivent donc une grande boucle, dont la cellule zonale (vent d'est en basse altitude, vent d'ouest dans la haute troposphère) est appelée cellule de Walker, alors que les boucles méridiennes (vent vers l'équateur dans les basses couches, vers les pôles en haute altitude) s'appellent les cellules de Hadley. Cette circulation atmosphérique est associée à une configuration spécifique des eaux de surface de l'océan Pacifique. Les alizés entraînent les eaux de surface chaudes vers l'ouest. Il y a donc une forte accumulation d'eaux chaudes dans l'ouest, au détriment de l'est : la surface de l'océan est inclinée, le niveau de la mer est 60 cm

plus haut à l'ouest qu'à l'est. L'océan réagit à ce champ de pression de surface en modifiant sa structure interne et il imprime une déformation inverse dans la région dite de thermocline, qui est la zone séparant les eaux de surface chaudes, des eaux profondes froides. La thermocline s'enfonce vers 150-200 m à l'ouest, alors qu'elle affleure vers 30-50 m à l'est. Cette configuration est très importante car elle explique pourquoi l'océan se refroidit très efficacement à l'est. Dès que le vent provoque dynamiquement le phénomène d'upwelling, que ce soit en soufflant vers l'équateur le long de la côte d'Amérique du Sud, ou vers l'ouest le long de l'équateur, les remontées verticales entraînent les eaux situées vers 50 m en surface, et la température chute. La température équatoriale peut tomber à moins de 23° C au large des îles Galapagos, alors qu'elle avoisine les 30° C au large de la Nouvelle Guinée. Les atmosphériciens trouvent dans ce gradient thermique océanique le moteur des circulations d'Hadley-Walker, et les océanographes trouvent dans les alizés le moteur de l'ajustement dynamique océanique : c'est un système couplé de grande échelle.

Mais le système peut brutalement s'enrayer : les alizés chutent en réponse à l'écroulement du gradient de pression pendant une anomalie positive de l'oscillation Australe, les eaux chaudes de l'ouest Pacifique envahissent tout le bassin, la thermocline s'enfonce rapidement le long de la côte d'Amérique du Sud, El Niño s'installe. Ce nouvel état, uniformément chaud dans l'océan tropical, avec peu de vent dans l'atmosphère, et des distributions inversées de pluies et sécheresse, s'installe pour de longs mois.

II - Etat des connaissances

El Niño, mais peut-être est-il plus juste de l'appeler ENSO (El Niño Southern Oscillation), désigne le phénomène d'anomalie climatique interannuelle dont l'emprise spatiale couvre la moitié de la planète, dont l'amplitude est le mode de variabilité le plus fort à l'échelle globale, et dont la persistance s'étend sur près d'une année.

Dans sa phase culminante, sa structure océanique se caractérise par un réchauffement de forme triangulaire, dont le sommet est située sur l'équateur, au niveau de la ligne de changement de date et dont la base s'étend de 10° N à 20° S. De part et d'autre de cette anomalie positive, se forment des anomalies froides, principalement dans les régions ouest tropicales, appelées anomalies en fer à cheval. La structure d'anomalie atmosphérique correspond à une région d'anomalie de pression positive, centrée sur la nouvelle Guinée, couvrant tout l'océan Indien, jusqu'à la ligne de changement de date, alors qu'une anomalie de pression négative, centrée aux environs de l'île de Pâques occupe tout le Pacifique est, jusqu'aux côtes Américaines. Pour caractériser ENSO, deux indices climatiques ont été sélectionnés. Le premier, dit Niño3, désigne l'anomalie de température de surface de la mer dans la région s'étendant entre 5° N et S, de 90° W à 150° W. C'est l'indice « océanique », qui renseignera sur l'état de l'océan de surface. On le complète par un indice de circulation atmosphérique, dit l'indice d'Oscillation Australe (SOI), qui mesure l'anomalie de différence de pression de surface entre la région de Darwin et celle du Pacifique Sud-Est.

Les séries temporelles de ces deux indices sont fortement corrélées, en opposition de phase. Une anomalie climatique se produit tous les 3 à 5 ans, avec parfois de longues périodes sans anomalie marquante. Récemment, un événement de forte

amplitude a eu les échos de la presse : 1997-98 ; le dernier El Niño (2002-03) a été à peine mentionné. Les événements se suivent et ne se ressemblent pas ; cependant, on peut noter que les plus forts événements du dernier siècle ont eu lieu lors des dernières décennies (1982-93 et 1997-98).

El Niño est un événement d'anomalie qui persiste pendant près d'une année, avec une histoire particulière. Il a fallu beaucoup de travail de compilation de données pour qu'océanographes et atmosphériciens se mettent d'accord pour décrire la série d'événements qui se produit lors de chaque anomalie. On considère qu'El Niño démarre par une anomalie de vent d'ouest, soufflant sur une anomalie d'eaux chaudes, dans le Pacifique central, le long de l'équateur, au printemps. Cette anomalie chaude océanique se propage vers l'est, et enfonce la thermocline lors de sa progression. Son impact est de freiner les refroidissements de surface (ce qui favorise le réchauffement équatorial), et cet effet est amplifié lorsque le signal percute la côte. Ce réchauffement des eaux de surface affaiblit le gradient thermique, et donc diminue l'intensité des alizés, ce qui amplifie encore l'anomalie thermique dans la partie centrale-est. Ce phénomène d'amplification culmine en fin d'année (la saison de pleine maturité s'étend entre Décembre et Février). Puis le phénomène décroît d'amplitude et disparaît complètement au printemps. En 1997-98, El Niño fut suivi en 1998 d'une période de fort refroidissement de surface le long de l'équateur, associé à de forts alizés. Cette phase froide intense, apparaissant comme une amplification du signal saisonnier habituel, est appelée La Niña, parfois considérée comme l'anomalie opposée à El Niño ; cependant, elle est loin de posséder toutes les caractéristiques inverses de l'anomalie chaude.

Depuis quand existe El Niño ? La mesure physique de la températures de surface de la mer permet de remonter sur un peu plus d'un siècle, la pression au sol sur 150 ans. Ensuite, il faut utiliser d'autres méthodes basées sur l'enregistrement de la température par la croissance dans le monde vivant, ou par des enregistrements sédimentaires. L'analyse de têtes de corail permet de remonter il y a plus de 14 000 ans. Et il semble qu'El Niño existait déjà. Son amplitude est certainement variable, sa structure aussi. Mais sa fonction a certainement été identique au cours des siècles : El Niño est un phénomène qui assure une redistribution d'énergie entre les tropiques et l'équateur, ainsi qu'entre les hémisphères. Quand il s'installe, l'énergie est redistribuée d'ouest en est dans l'océan, et seule la frontière orientale est alors à même d'assurer le transport méridien de chaleur mais l'océan chaud n'absorbe que peu d'énergie. Il est « fermé » avec une réponse thermique locale et très peu de dynamique. Dans l'atmosphère, toute la circulation se concentre vers un centre de convergence unique dans le Pacifique central. La cellule de Walker s'effondre alors que les cellules d'Hadley du Pacifique s'amplifient.

III - Observer El Niño

Les enjeux liés à la compréhension d'El Niño ont contribué à révolutionner l'observation du système climatique. Le premier point à prendre en considération, c'est qu'un phénomène d'une telle ampleur et complexité requiert les ressources de plus d'une nation. El Niño a été identifié comme un point clé pour la compréhension du système climatique par le Programme Mondial de la Recherche sur le Climat et

un projet de grande envergure a été lancé (TOGA : Tropical Ocean and Global Atmosphere) qui a rassemblé la communauté internationale de 1985 à 1994.

Les opérations de grande envergure ont été lancées pendant ces dix années et elles ont débouché sur le premier réseau d'océanographie opérationnel, c'est-à-dire fonctionnant en continu, avec transmission des informations en temps réel. Ce fut une révolution dans la discipline car la lourdeur des campagnes de terrain par bateau et le coût des infrastructures ralentissaient l'échange des données, jusqu'à plusieurs années.

Le cœur du réseau TOGA dans l'océan Pacifique s'appuie sur un réseau de 70 mouillages de surface, ancrés au fond de l'océan, tous les 15° le long de l'équateur, à 8°, 5°, 2° de part et d'autre de l'équateur et l'équateur même. Ces bouées sont équipées de capteurs aériens qui mesurent la pression, l'humidité, la température de l'air, le vent, le rayonnement solaire, et d'une chaîne de capteurs thermiques océaniques. Certaines sont même équipées de capteurs de salinité, ainsi que d'un courantomètre à effet Doppler qui permet d'assurer un suivi du profil de courant dans les premiers 100 m. Tout cet appareillage est indispensable pour décrire les propriétés physiques de l'interface entre l'océan et l'atmosphère et donc l'évolution du couplage en temps réel. Dans les eaux tropicales de surface, le principal problème est la corrosion des instruments. Deux visites par an permettent de remplacer les pièces défectueuses et de maintenir le matériel en état de marche. L'océan Pacifique tropical est ainsi mis sous haute surveillance et la moindre anomalie détectée est transmise et analysée dans la journée. Le coût de cette surveillance est considérable puisque deux navires océanographiques se relaient à temps plein pour assurer la maintenance du réseau. Cependant, les gains assurés par la prévision avancée d'El Niño ont été jugés suffisants pour justifier cet investissement.

Ce réseau de bouées est complété par d'autres réseaux très complémentaires : le réseau de marégraphie, qui suit l'évolution du niveau de la mer à l'échelle globale à partir de capteurs de pression sous-marins installés dans les îles du Pacifique (malheureusement la distribution des îles est très inhomogène, et le rail équatorial, notamment dans la partie centrale et est, est absent de mesures), et les lignes de bateaux marchands assurent des mesures de profils thermiques le long des voies commerciales de navigation (ce qui rend également ce réseau très inhomogène).

La révolution des dernières décennies en océanographie a eu lieu avec les premiers satellites altimétriques qui ont permis de suivre l'évolution du niveau de la mer au cm près. La bascule du niveau de la mer a été vue en direct avec TOPEX-POSEIDON en 1991-92 et en 1997-98, ainsi que toute la structure méridienne du signal (qui échappe aux marégraphes). L'observation spatiale a également été très profitable pour assurer le suivi de la température de surface des océans, des conditions de vent à la surface, et plus récemment, des précipitations en mer. Voir globalement le Pacifique a modifié certaines idées de mécanisme, qui avaient été contraintes par la faible densité des mesures anciennes.

De nouveaux enjeux apparaissent avec l'exploration de la structure interne océanique. On cherche à s'affranchir des bateaux, lents et coûteux à déplacer dans les régions d'intérêt, et de nombreuses études sont faites pour développer des capteurs autonomes, permettant de se déplacer automatiquement depuis la surface jusqu'à de grandes profondeurs, et de transmettre les informations par satellite lors

de leur émergence en surface. C'est l'enjeu du projet ARGO, qui vise à couvrir l'océan mondial de sondes autonomes de température et de salinité et dont la réalisation est en cours.

IV - Comprendre El Niño

L'observation intense des années TOGA et la richesse des réseaux mis en place ont accéléré la compréhension du phénomène El Niño et rapidement repoussé les limites de connaissance vers de nouvelles frontières.

Bjerknes avait émis le concept d'équilibre à grande échelle entre l'océan et l'atmosphère. Restaient encore à identifier les mécanismes qui permettent la transmission de l'information d'une région à l'autre dans des délais compatibles avec le développement de l'anomalie. Dès la fin des années 70, on pressentit le rôle que pouvaient avoir les ondes. Le formalisme mathématique des ondes océaniques dites équatoriales fut développé en détail et ses multiples implications permirent d'élaborer des théories pour El Niño. La vérification de cette théorie fut aussi un argument fort pour justifier la mise en place du réseau de bouées TOGA. Les enregistrements depuis lors n'ont fait que confirmer l'existence de signaux se déplaçant rapidement le long de l'équateur.

Sans détailler la théorie des ondes équatoriales, il est utile d'en rappeler quelques points forts. L'océan équatorial est fortement stratifié, avec des eaux chaudes en surface, une thermocline serrée vers 100 m où la température chute très rapidement. De plus, c'est dynamiquement une région particulière puisque c'est la région où la vitesse d'entraînement liée à la rotation terrestre est maximale, et le paramètre dit de Coriolis, qui caractérise les propriétés locales liés à la rotation terrestre, y change de signe. Il est positif au nord de l'équateur, et négatif au sud. Ces propriétés confèrent à la région océanique équatoriale un rôle de guide d'onde : toute perturbation se produisant au voisinage de l'équateur déclenche des ondes dont les trajectoires énergétiques convergent vers l'équateur. Le signal reste confiné entre 300 km nord et sud et se propage soit vers l'est, sur vers l'ouest.

Plus simplement, on identifie deux grands modes de propagation : le mode de propagation vers l'est, dit « onde de Kelvin », qui propage toute déformation de pression interne à l'océan à près de 3 m/s, en déformant sur son passage le courant zonal et la thermocline. Lorsqu'une anomalie de vent d'ouest souffle au centre du Pacifique, elle crée une convergence locale des eaux de surface sur l'équateur, ce qui enfonce brutalement la thermocline. Ce signal, appelé downwelling, se propage vers l'est en enfonçant progressivement la thermocline sur son trajet, et atteint la côte en un mois. Tout le long de son trajet, se produit un léger réchauffement de surface puisque l'enfoncement de la thermocline freine le mélange des eaux de surface avec les eaux froides sous-jacentes. Lorsque l'onde percute la côte, une partie se réfléchit et revient vers l'ouest, l'autre partie se sépare sous forme de deux fronts d'onde côtiers, qui se propagent vers les pôles (ce qui explique l'extension de l'anomalie d'eau chaude vers les pôles, le long de la côte d'Amérique). A la côte même, ce phénomène double l'amplitude d'enfoncement de la thermocline et intensifie le réchauffement local.

L'anomalie de vent d'ouest ne se contente pas de ce front d'onde vers l'est. Elle engendre aussi un signal vers l'ouest, dont la structure est plus complexe. Le long de

l'équateur même, il s'agit toujours d'un enfoncement de la thermocline, traduisant la convergence des masses d'eau, mais cette fois-ci il ne s'agit plus de convergence créée par un front de courant zonal. La convergence provient d'un afflux d'eau méridien, qui s'enroule dans le sens cyclonique (sens inverse des aiguilles d'une montre au nord de l'équateur, sens des aiguilles d'une montre au sud), autour d'une zone de remontée de la thermocline (zone de basse pression océanique) située vers 3° N. Une cellule symétrique se produit au sud de l'équateur, et ce doublet cyclonique, qui alimente l'équateur au détriment des régions situées juste au nord et au sud, se propage vers l'ouest, à une vitesse de l'ordre du m/s. Il s'agit d'une onde particulière, très importante pour de nombreux phénomènes géophysiques, appelée onde de Rossby. Cette onde se propage jusqu'à la frontière occidentale de l'océan Pacifique, elle s'y réfléchit et revient sous forme d'une onde de Kelvin vers l'est. Mais cette fois-ci, il ne s'agit plus d'une onde de downwelling, associée à un enfoncement de la thermocline, mais c'est une onde d'upwelling, qui remonte la thermocline. Nous sommes là face à un processus de rétroaction négative, qui s'oppose à la perturbation qui l'a créée. C'est ce mécanisme de rétroaction négative qui est à la base de la théorie principale expliquant le cycle de vie d'El Niño : la théorie de l'oscillateur retardé.

Rappelons les ingrédients principaux de cette théorie. El Niño est composé de deux parties distinctes. Dans la région centrale et est de l'océan Pacifique, El Niño est une anomalie couplée entre océan et atmosphère. Une anomalie initiale chaude se propage très rapidement vers la côte, par onde de Kelvin de downwelling, celle-ci contribue au réchauffement local des eaux sur son trajet, et intensifie encore cette anomalie de réchauffement lors de sa réflexion. Ces anomalies chaudes dans l'est affaiblissent les alizés, ce qui amplifie l'anomalie de vent initiale, et engendre de nouvelles ondes de Kelvin. En fait, on observe alors une amplification quasi-simultanée du réchauffement des eaux de surface, d'une montée du niveau de la mer, d'un enfoncement de la thermocline, et des anomalies de vents d'est, qui se propage depuis le centre de l'océan Pacifique jusqu'à la côte, amenant des nuages chargés d'humidité vers les régions désertiques.

Alors que se produit cette amplification couplée à l'est, la région du Pacifique ouest se comporte de manière très différente. C'est une région chaude très homogène en température, où la thermocline est profonde. Elle est progressivement traversée par plusieurs fronts d'onde de Rossby (les ondes de Rossby associés aux anomalies de vent, et les ondes de Rossby associées à la réflexion des ondes de Kelvin sur la côte américaine). Ces fronts d'onde se propagent très efficacement vers l'ouest, mais n'engendrent aucune signature de température de surface (les gradients horizontaux et verticaux de température sont trop faibles), seul champ auquel est sensible l'atmosphère ; dynamiques de l'océan et de l'atmosphère sont découplées. Les ondes de Rossby affluent vers la frontière ouest, se réfléchissent et concentrent leur énergie pour créer du signal de type Kelvin, upwelling, qui revient rapidement vers l'est, et érode petit à petit le réchauffement El Niño. Ce mécanisme d'érosion progressive détruit en quelques mois l'anomalie de réchauffement et amène la fin d'El Niño.

Les ondes océaniques ont été proposées, puis identifiées dans les observations comme acteur majeur dans le scénario d'El Niño. Leur temps de propagation à travers le bassin permet d'expliquer le calendrier de l'anomalie. Lorsque le démarrage d'un El Niño est identifié, le déroulement de sa séquence est bien anticipé. Il reste cependant un certain nombre d'interrogations :

1. la réelle capacité de la frontière occidentale à réfléchir les ondes,
2. sur leur amplitude,
3. et surtout sur l'origine de l'anomalie initiale, qui déclenche le processus.

1. La théorie de la réflexion d'onde est basée sur l'existence d'un mur méridien qui s'oppose à toute pénétration. Si la côte Américaine peut vérifier efficacement les conditions aux limites imposées par la théorie, c'est loin d'être le cas à l'ouest, où l'océan Pacifique se termine dans un chapelet d'îles largement ouvert vers l'océan Indien. Il a fallu raffiner la théorie, accepter des réponses dissymétriques (pour représenter la dissymétrie des frontières)... Si la capacité de réflexion par la frontière ouest a été contestée, il est néanmoins apparu que l'atmosphère ne restait pas si inerte que cela dans l'ouest, et que des ondes de kelvin d'upwelling pouvaient être directement engendrées par les anomalies de forçage atmosphérique.

2. La théorie de l'Oscillateur retardé donne un El Niño dont l'amplitude est fixée par le temps de croissance de l'instabilité dans l'est. Cette amplitude est alors constante. Or les El Niño ont de très fortes fluctuations d'amplitude. On peut distinguer deux classes différentes de processus qui pourraient modifier cette amplitude. Les phénomènes de haute fréquence, depuis l'échelle synoptique de l'événement météorologique, jusqu'à l'échelle du cycle saisonnier, induiraient des perturbations, considérées comme bruit, qui perturberaient l'amplitude d'El Niño, et lui donneraient un caractère chaotique. A l'autre extrémité du spectre, les fluctuations lentes de la thermocline océanique, liées à des ajustements de masse océanique entre l'équateur et les tropiques, pourraient engendrer des variations d'amplitude d'El Niño de basse fréquence.

3. Enfin, demeure le questionnement fondamental sur le ou les phénomènes qui sont à l'origine de l'anomalie initiale. La théorie de l'oscillateur retardé fait osciller le système entre un état chaud, puis un état froid, en affectant à l'océan le rôle prépondérant pour assurer les transitions de cycle, et en supposant que l'atmosphère répond de manière symétrique à un océan chaud ou froid. C'est loin d'être le cas, et la complexité de la réponse de l'atmosphère, liée en particulier à la non-linéarité des processus de changement de phase de l'eau, dissymétrise fortement les réponses en anomalie chaude ou froide. Une grande partie de la communauté ne voit plus El Niño comme un oscillateur, mais comme un condensateur, qui se charge lentement, et qui se décharge très rapidement sous forme d'un El Niño suite à une impulsion liée par exemple à une succession de coups de vents d'ouest dans l'atmosphère.

V - Prévoir El Niño et ses impacts

A la fin du programme TOGA, une grande partie de la communauté était très optimiste sur le potentiel de prévision d'El Niño. La théorie de l'Oscillateur retardé était considérée comme établie. Les premiers essais de prévision ont été réalisés suivant deux types d'approche. La première est la méthode statistique. Les corrélations entre plusieurs variables sont établies par différentes méthodes statistiques et définissent les meilleurs prédicteurs possibles d'El Niño. L'autre approche, qui va être décrite avec plus de détails, est l'approche dynamique. Elle est basée sur le comportement, en mode de prévision, d'un système d'équations représentant le comportement dynamique du système couplé, donc évoluant dans le temps. De nombreux systèmes couplés conceptuels présentent un comportement

ressemblant à l'oscillateur retardé et ont obtenu des scores de prévision relativement corrects sur la période des années 80.

Ce qui différencie un exercice de prévision d'un exercice de modélisation, c'est la prise en considération de l'information des observations initiales par une procédure d'analyse. Une série d'états initiaux est engendrée par différentes méthodes d'analyse et la simulation est ensuite prolongée sur plusieurs mois, sans information complémentaire (c'est-à-dire suivant les lois de conservation de la quantité de mouvement et de l'énergie décrites par le système d'équations choisi). Ceci permet de réaliser un ensemble de trajectoires dont on calcule la moyenne statistique qui est alors considérée comme la trajectoire la plus probable du système. Cette trajectoire permet de prévoir l'évolution de l'anomalie El Niño à trois, six, douze mois d'avance. La qualité de la prévision dépend du modèle d'évolution, du modèle d'analyse et des observations elles-mêmes. La technique d'analyse peut être de niveau très varié. Elle peut aller d'une simple considération des champs de vent observés pour contraindre l'état initial de l'océan, à une véritable assimilation des champs physiques observés pour déterminer la complète structure interne de l'océan.

Les premières prévisions d'El Niño furent réalisées avec les modèles d'évolution assez simplifiés, et l'initialisation ne prenait en compte que le champ de vent de surface déterminé par le réseau des navires marchands. Assez performantes jusqu'en 1997, la prévision du El Niño de 1997-98 fut un échec retentissant et il fut alors montré que la connaissance seule du vent était imparfaite et pouvait conduire à des erreurs importantes de prévision. Seul le modèle couplé du Centre Européen fut capable de suivre le démarrage de l'anomalie dès la fin d'année 1996, et ce succès fut imputé à son système d'assimilation océanique qui permettait de tenir compte de l'énorme capacité thermique emmagasinée en sub-surface dans la partie ouest du bassin, ce qui créait des conditions favorables au déclenchement d'une anomalie.

L'enjeu de la prévision d'El Niño ne porte pas que sur l'occurrence de l'événement lui-même. De nombreuses catastrophes lui sont attribuées directement autour du Pacifique tropical, comme les fortes pluies sur la côte occidentale américaine, la sécheresse en Indonésie, et l'Australie (ce qui accroît les risques d'incendie). Plus loin encore, El Niño est associé à la sécheresse du Nordeste Brésilien, aux inondations en Tanzanie et toute une chaîne d'événements lui est associée à travers le continent nord américain. Ces chaînes de réaction sont liées à des structures de variabilité appelées téléconnexions qui lient entre elles différentes régions du monde. Elles existent dans les différentes régions tropicales par l'intermédiaire des cellules d'Hadley et de Walker. Et toute une série d'anomalies climatiques est attribuée aux événements El Niño de forte amplitude. Certaines téléconnexions qui lient les régions équatoriales aux latitudes tempérées sont bien identifiées (par exemple la « PNA » - Pacifique North America – téléconnexion lie le Pacifique équatorial ouest au continent nord américain par une suite de perturbations) mais d'autres sont beaucoup moins bien identifiées. En fait, beaucoup de catastrophes sont sans doute abusivement attribuées à El Niño, et seuls les plus forts sont capables d'affecter le climat à des milliers de kms.

Prévoir les impacts d'anomalies climatiques engendrées par El Niño permet d'en prévenir les effets et d'avertir utilement les populations touchées. En affectant les conditions climatiques, El Niño exerce des impacts sur les récoltes, en quantité et en maturité, ce qui affecte le marché des matières premières. Cyclones et tempêtes

dévastent certaines côtes tropicales, inondations et crues affectent les habitations et les infrastructures, et favorisent également la propagation de certaines épidémies en permettant des foyers d'éclosion de moustiques. Des mesures peuvent être prises en irrigation, en planning des plantations, en développement d'infrastructure et le gain sur les dommages justifie le coût du système de prévention.

D'autres impacts touchent l'océan, non seulement dans sa dynamique et sa physique, mais aussi sa biologie. La couverture d'eau chaude créée par El Niño est hélas rapidement épuisée en éléments nutritifs et les eaux équatoriales réputées riches en plancton et faune aquatique s'appauvrissent rapidement allant jusqu'à faire disparaître certains écosystèmes marins ; les oiseaux de mer sont également durement touchés et les espèces rares des îles Galapagos ont été mises en péril par les événements récents.

VI - Au delà d'El Niño

Si El Niño est le phénomène interannuel de plus grande ampleur, il n'est cependant pas le seul phénomène climatique responsable de toutes les anomalies qui frappent durement les sociétés humaines, et le système océan-atmosphère connaît de nombreux autres dérèglements. Les autres régions tropicales connaissent de fortes anomalies. A l'automne 1997, de fortes anomalies ont sévi dans l'océan Indien, la région équatoriale orientale s'est brusquement refroidie, alors que des eaux chaudes envahissaient les régions occidentales. Les vents habituellement d'ouest en est le long de l'équateur se sont renversés, et les précipitations se sont déplacées d'ouest en est pour inonder les côtes est africaine. Cette anomalie de forte amplitude s'est développée conjointement à El Niño et la question de la dépendance entre ces deux modes de variabilité a été soulevée. Il semble qu'une variabilité intrinsèque à l'océan indien, appelée anomalie zonale de l'océan Indien, puisse exister indépendamment mais des El Niño de forte amplitude semblent avoir la capacité d'entrer en résonance avec les autres bassins équatoriaux. L'océan Atlantique équatorial connaît une anomalie très similaire à El Niño mais d'amplitude et de persistance plus faible. Les eaux chaudes envahissent le Golfe de Guinée et anomalies de précipitation se manifestent de part et d'autre de l'océan. Un autre mode de plus basse fréquence s'ajoute à cette variabilité. Il s'agit d'un mode dipolaire qui fait osciller la température au nord et au sud de l'équateur en opposition de phase. Les mécanismes en sont peu connus. L'océan Atlantique est difficile à cerner car il semble peu probable que des modes intrinsèques forts s'y maintiennent. En revanche, il subit les influences des latitudes tempérées et notamment de l'Oscillation Nord Atlantique, qui affecte les régions nord de l'Atlantique.

Identifier progressivement les différentes formes de variabilité représente une tâche ardue et difficile. Les signaux se superposent, et rendent difficile l'attribution et la détection de chaque signal.

Une difficulté supplémentaire provient de l'évolution du climat lié à l'action de l'homme . Le climat se réchauffe lentement et cette évolution lente s'imprime dans El Niño. Est-ce que les amplitudes fortes des événements récents sont liés au changement climatique ? Est-ce que le changement climatique se manifeste au travers de modifications lentes des modes de variabilité ? quels sont les liens entre ces phénomènes ? Le système terrestre est dans une position d'équilibre fragile et

notre connaissance actuelle n'est pas encore suffisante pour appréhender les conséquences possibles de nos actions.

VII - Conclusions

El Niño, le phénomène d'anomalie climatique le plus intense à l'échelle interannuelle, a suscité d'intenses recherches dans la communauté internationale et l'action convergente des recherches internationales a permis de faire émerger le premier réseau d'océanographie opérationnelle. Ces données, recueillies en temps réel, alimentent les systèmes d'analyse et permettent la prévision des anomalies climatiques entre 3 et 6 mois à l'avance.

Ce succès est lié à l'effort considérable de connaissance sur les mécanismes qui sous-tendent cette anomalie. Le rôle des ondes océaniques a été mis en évidence dans les différentes phases de l'anomalie, la force du couplage océan-atmosphère et les mécanismes complexes qu'elle met en jeu ont été peu à peu identifiées et mis en équation. Il demeure cependant des zones d'ombre sur lesquelles se penche la communauté de recherche.

Une question intrigante concerne le rôle de l'atmosphère dans l'initiation des anomalies, en particulier par l'intermédiaire de sa variabilité synoptique à intrasaisonnière. A-t-elle un rôle actif et déterminant sur le déclenchement des anomalies ? la question n'est pas encore élucidée.

Une autre interrogation porte sur la variabilité lente d'El Niño. Quels en sont les mécanismes ? s'agit-il d'une redistribution interne océanique qui modifie les caractéristiques intrinsèques de l'anomalie ? Faut-il considérer l'ajustement de la circulation atmosphérique ?

Quels sont les impacts d'El Niño à l'échelle globale ? quels sont les liens entre les trois océans tropicaux ? entre le Pacifique et les latitudes tempérées ? comment le Pacifique exerce-t-il une action à distance dans les autres régions ?

Et quel sera El Niño dans le prochain siècle ? Participera-t-il activement à rééquilibrer le déséquilibre énergétique lié aux activités humaines ? Sera-t-il particulièrement modifié pendant la phase de réchauffement pour revenir plus tard à des valeurs plus modérées ?

Toutes ces questions sont ouvertes aujourd'hui et stimulent les besoins de connaissance. Il faudra bien la collaboration de l'ensemble de la communauté internationale pour combler peu à peu les déficits de connaissance et consolider la prévision de notre avenir climatique.

Quelques références

Sites internet

http://www.clivar.org/publications/other_pubs/clivar_transp/index.htm

<http://www.atmos.washington.edu/gcg/RTN/rtnt.html>

<http://www.pmel.noaa.gov/tao/elnino/nino-home.html>

<http://www.ifremer.fr/lpo/vulgarisation/elnino/elnino.html>

En français :

Delecluse P., 1997 : El Niño, le retour d'une énigme d'eau et de vent. Science et Vie Hors Série, 198, mars 1997, 84-93.

Yves du Penhoat et Gérard Eldin : El Niño et l'Oscillation Australe. Dossier Hors-série **Pour la Science**, Octobre 1998.

Delecluse P., 1998 : Heurs et malheurs de la prévision d'El Niño. **La Recherche**, n°307, mars 1998.

Jérôme Vialard et Brice Quenouille : El Niño, le courant fou qui détraque le climat. **Science et vie**, Novembre 1997.

Livres

Currents of change : El Niño's impact on climate and society, Michael H. Glantz, Cambridge University Press, 1996

El Niño, La Niña and the Southern Oscillation, S.G.H. Philander, Academic Press, International Geophysics Series 46, 283pp, 1990.