

## Les grands écosystèmes mondiaux d'upwelling

Quatre grands écosystèmes d'upwelling bordent les façades Ouest des grands continents. En Atlantique, il s'agit des écosystèmes du Courant du Benguela dans l'hémisphère Sud (sud de l'Angola, Namibie, Afrique du Sud) et du courant des Canaries dans l'hémisphère Nord (Maroc, Mauritanie, Sénégal et Gambie). Dans le Pacifique, il s'agit du courant de Humboldt dans l'hémisphère Sud (Pérou et Chili) et du courant de Californie dans l'hémisphère Nord (USA et nord du Mexique). Ce dernier n'est pour l'instant étudié que marginalement par l'IRD et ne sera pas présenté ici. Les écosystèmes d'upwelling fournissent plus de 40 % des captures des pêcheries mondiales alors qu'ils représentent moins de 3 % de la surface de l'océan. Les upwellings sont provoqués par des vents qui induisent des remontées d'eaux profondes, froides et chargées en sels minéraux. Ils sont à l'origine d'une production biologique forte mais soumise à d'importantes fluctuations inter-annuelles et inter-décennales. Actuellement, ces écosystèmes supportent les effets du changement climatique et ceux de la réorganisation des pêcheries mondiales, qui peuvent aboutir à d'importantes modifications dans leur organisation. Leur gestion doit également se concevoir dans le cadre plus large de l'aménagement des zones côtières qui les bordent.

L'IRD et ses partenaires conduisent une recherche à la fois intégrée et comparative. Intégrée car elle prend en compte le climat et l'environnement physique, les écosystèmes et les pêcheries. Comparative car afin de mieux comprendre le fonctionnement de ces écosystèmes par la mise en évidence de leurs similarités et de leurs différences, elle utilise les mêmes outils de recherche : télédétection, analyses statistiques, modélisation, systèmes d'information géographiques... dans les trois zones d'upwelling des courants du Benguela (Côte Ouest de l'Afrique australe), Canaries (Côtes de l'Afrique de l'Ouest) et Humboldt (Pacifique Sud, côtes du Chili et du Pérou).

### Trois écosystèmes comparables

Sous l'action des vents issus des centres de haute pression (anticyclones) localisés aux latitudes moyennes sur les océans, une résurgence de surface (ou upwelling) d'eau froide profonde et riche en sels nutritifs se développe sur les plateaux continentaux. Son intensité est modulée par la force et la direction du vent, par la topographie de la côte et du plateau continental et par les caractéristiques océaniques environnantes.

En effet, l'arrivée de sels nutritifs dans la couche de surface éclairée par le soleil (zone photique) permet le développement de nombreux organismes phytoplanctoniques qui sont à la base de ce qui est communément dénommé la chaîne alimentaire. Cette chaîne, supposée aller du phytoplancton aux prédateurs supérieurs en passant par le zooplancton, d'autres invertébrés, des mollusques et les poissons, est en fait un réseau trophique maillé et complexe.

Dans chacune de ces régions, le vent joue un rôle majeur dans la dynamique des processus physiques, bio-géochimiques et écologiques. Les chaînes trophiques partagent également des propriétés communes. Aux échelons intermédiaires, on rencontre un nombre limité d'espèces pélagiques côtières (sardine, sardinelle, anchois...) très abondantes et intensément exploitées. Elles jouent un rôle central dans le fonctionnement de l'écosystème.

Les zones d'upwelling sont spatialement très hétérogènes avec une mosaïque de structures comme les fronts séparant les eaux froides côtières des eaux chaudes situées plus au large, les plumes, les filaments et les tourbillons. Ces structures sont le support principal des échanges entre zone côtière et large ; elles jouent un rôle majeur dans le couplage entre processus physiques et biologiques. D'autres variables telles que profondeur et largeur des plateaux continentaux semblent également déterminer la présence de zones favorables à la rétention des éléments abiotiques et biotiques.

Dans les systèmes d'upwelling, des grandes variations de recrutement de poissons dans les pêcheries apparaissent. Elles sont dues aux fluctuations de mortalité au cours des premiers stades de vie des poissons, et par là doivent être essentiellement associés à la variabilité climatique. La survie de ces stades est pour l'essentiel reliée à des structures hydrodynamiques qui, dans certaines strates spatio-temporelles, favorisent la rétention, l'enrichissement et la concentration du plancton et de l'ichtyoplancton. Comprendre la dynamique de ces structures est essentiel pour mettre en place les modèles couplant les processus physiques et biologiques afin de simuler des processus écologiques comme la dynamique de la reproduction et le succès du recrutement.

Les fluctuations d'abondance des stocks de poissons pélagiques traduisent des changements importants de structure et de fonctionnement dans les écosystèmes d'upwelling. Des mortalités importantes ont été observées à des niveaux trophiques supérieurs (oiseaux, mammifères marins, grands poissons prédateurs) en réponse à la diminution d'abondance de leurs proies. Les effets à des niveaux trophiques inférieurs peuvent aussi être mis en évidence du fait de la diminution de la prédation par les poissons pélagiques sur les espèces planctoniques, entraînant à leur tour des modifications de l'ensemble du réseau trophique. A titre d'exemple, au récent phénomène El Niño est associé un changement d'abondance relative

à deux espèces d'anchois. Des alternances à plus long terme d'espèces dominantes sont observées dans la plupart des écosystèmes d'upwelling, telle que l'alternance entre sardine et anchois dans les courants de Humbolt, du Benguela et du Kuroshio au large du Japon.

## Trois écosystèmes différents

### Le courant du Benguela

Le long de la côte Ouest de l'Afrique australe, l'upwelling du Benguela se singularise des autres systèmes d'upwelling par ses deux frontières responsables d'intrusion d'eau chaude : au nord, par le front Angola-Benguela et au Sud, par le courant des Aiguilles qui constitue la terminaison du courant de Bord-Ouest de l'Océan Indien. Pour pondre, les sardines (*Sardinops sagax*) et anchois (*Engraulis encrasicolus*, ex *E. capensis*) migrent vers le Banc des Aiguilles, où des eaux chaudes transportées par le courant des Aiguilles créent un environnement fortement stratifié. Les œufs et larves sont ensuite rapidement transportés vers le Nord par un courant côtier. En quelques jours, ils atteignent la région d'upwelling de la côte Est et un nombre d'entre eux sont transportés vers le large par les courants liés au vent, ce qui constitue une source de mortalité. Un mécanisme de rétention permet aux autres individus s'agrèger dans les eaux côtières.

Les autres sources de mortalité des premiers stades de vie ne doivent pas être négligées. Il s'agit en particulier de celles liées au jeûne des larves et à la prédation sur les œufs et larves. Une semaine après l'éclosion, les larves doivent s'alimenter. Leurs capacités natatoires étant alors réduites, elles ont besoin non seulement d'une densité de proies élevée et de tailles convenables (micro-zooplancton pour l'essentiel), mais aussi de conditions de turbulence optimales. Une turbulence trop forte désagrège les essaims de plancton et entrave la capture de proies.

La modélisation fine des courants et de la production primaire doit apporter un éclairage nouveau sur ces problématiques. Bien que la productivité primaire de l'écosystème du Benguela semble globalement excédentaire, elle peut être déficitaire dans certaines strates spatio-temporelles telles que celle du Banc des Aiguilles ou de la partie hauturière de la nourricerie, lors de la saison de reproduction. Dans ces conditions, des oasis de nourriture peuvent être trouvées dans les grands tourbillons du large, à la rencontre de différents courants et masses d'eau. La faible productivité du Banc des Aiguilles engendre une compétition sévère pour la nourriture de millions de tonnes de reproducteurs qui s'y trouvent concentrés lors de la saison de ponte. Ceci favorise le cannibalisme parental et la prédation des œufs et larves par les autres espèces.

Ce phénomène reste difficile à modéliser en l'absence de données mensuelles spatialisées de distribution des poissons mais devra faire l'objet d'un effort de quantification.

L'écosystème du Benguela peut se subdiviser en deux sous-écosystèmes du nord (sud de l'Angola et Namibie) et du sud (ouest et sud de l'Afrique du Sud) séparés par la cellule permanente d'upwelling de Lüderitz, la plus puissante au monde. En Afrique du Sud, les données de pêche historiques suggèrent un effondrement du stock de sardine à la fin des années 1960 suivi d'une récupération lente, alors qu'un premier niveau d'effondrement était observé en Namibie à la même période, aggravé à la fin des années 1970. La biomasse du stock namibien est depuis cette date restée à un niveau très bas. S'agit-il d'un processus environnemental ou bien d'une surexploitation qui est au cœur de ces effondrements ? La structure et dynamique de l'écosystème du sud Benguela semble varier de façon progressive depuis plus de trois décennies alors que le nord Benguela a connu une réorganisation profonde de son fonctionnement sous ce qu'il est courant d'appeler un « changement de régime ». Aujourd'hui, le nord Benguela est dominé par les méduses et les poissons se nourrissant de détritus (Gobbies). Les poissons pélagiques sont devenus peu abondants et les pêcheries de la plupart des espèces commerciales (Merlus et Chinchards) menacées.

Les raisons de ce changement de régime aux conséquences désastreuses pour le développement et le maintien des activités de pêches restent aujourd'hui hypothétiques, bien que l'on suspecte fortement une interaction entre environnement et exploitation.

### Le courant des Canaries

On distingue trois grandes régions dans l'écosystème du courant des Canaries :

- La côte nord marocaine avec un upwelling saisonnier en été ;
- La côte sud marocaine et Nord Mauritanienne (désert du Sahara) avec un upwelling permanent ;
- La côte sud mauritanienne et du Sénégal avec un upwelling en hiver.

La partie sud du système est caractérisée par une variabilité saisonnière extrême, avec une alternance entre un écosystème sous influence tropicale en été et un écosystème sous l'influence d'un upwelling côtier en hiver. Cette alternance s'accompagne en été d'une migration jusqu'à 20°N d'espèces à affinité tropicale (thonidés) et en hiver d'une

extension vers le sud de l'habitat des espèces tempérées comme la sardine *S. Pilchardus*.

Le système des Canaries présente une proportion unique de plateaux larges au Sud alors que les régions de bord Est, à cause de leur jeunesse géologique, sont généralement caractérisées par des plateaux étroits. Une correspondance a été observée entre la localisation des principales zones de ponte et les régions où le plateau s'élargit. Cette association serait le résultat de processus physiques se développant sur les plateaux larges et peu profonds qui limiteraient les échanges entre la bordure côtière et le domaine hauturier.

Les pêcheries de l'Afrique de l'Ouest sont étudiées depuis plusieurs décennies par l'IRD et ses partenaires. Les écosystèmes du courant des Canaries étaient dominés par les poissons démersaux de grande taille qui ont été rapidement surexploités. Dans la partie sud de la région, l'adaptabilité de la pêche artisanale lui a permis de tirer profit de la migration saisonnière de nombreuses espèces (balancement entre saison d'upwelling et période chaude dominée par des influences tropicales). Sur une plus longue période, l'histoire des pêcheries ouest-africaines semble avoir été épargnée par des effondrements brutaux comme ceux rencontrés dans les autres systèmes. Un taux d'exploitation moindre jusqu'aux années 1980 et l'importance de la variabilité saisonnière pourraient avoir contribué à cette résilience relative. Trois pays ont vu une croissance rapide et imprévue des stocks de poulpes dans les années 1970. Cette pêcherie de poulpe est devenue, en valeur, une des composantes essentielles des pêcheries ouest-africaines. Ce changement d'espèces a été interprété comme résultant de l'absence de contrôle du haut vers le bas de la chaîne trophique, suite à la surexploitation des espèces démersales et qui a favorisé le développement de leurs espèces proies à vie courte, tel le poulpe (ou bien encore les crevettes et les poissons pélagiques. Plus au nord, les éléments ayant conduit à un déplacement vers le sud l'activité de la flotte de senneurs exploitant la sardine restent encore largement inconnus : déplacement du stock ou meilleure rentabilité économique au sud ? Devant le désert du Sahara, le déclin brutal de l'exploitation dans cette région dans les années 1990 suite au départ des flottilles de chalutiers des pays du bloc soviétique constitue un exemple unique de réduction de l'effort de pêche. La région du Sahara sera donc, en sus de celle de l'upwelling du Sénégal, une zone de recherche privilégiée pour l'étude des interactions physique-biologie.

### **Le courant de Humboldt**

Le système du courant de Humboldt avec ses cellules d'upwelling permanent au Pérou, ou saisonnier, le long des côtes chiliennes, est de loin le plus productif en poisson. Avec moins de 1% de la surface de l'océan mondial il fournit 15 à 20% des captures maritimes mondiales (jusqu'à près de 20 millions de tonnes par an pour le Pérou et le Chili réunis). Une seconde particularité réside dans la présence d'une zone très faible en oxygène, très étendue, très intense et superficielles. Une dernière particularité de ce système est d'être placé sous l'influence directe du mécanisme ENSO (El Niño Southern Oscillation).

Des scientifiques ont proposé l'hypothèse selon laquelle, au lieu d'affecter négativement les populations de poissons, les événements ENSO pourraient être le secret de l'extrême productivité en poisson de cet écosystème. Contrairement à ce qui a été longtemps admis, les phénomènes El Niño n'ont pas systématiquement un effet négatif sur l'anchois et positif sur la sardine. L'impact de ces phénomènes ne peut être interprété qu'en prenant en compte l'ensemble du système, à des échelles de temps et d'espace très diverses.

Diverses hypothèses ont été proposées pour expliquer les alternances entre anchois et sardine. Ces hypothèses sont reliées à des mécanismes intervenant à différentes échelles spatio-temporelles et intègrent entre autres des variations du climat, des conditions océanographiques, des communautés planctoniques (en abondance et structure de taille), du comportement des poissons et de la surface des habitats disponibles. Les grandes fluctuations de biomasse semblent devoir être reliées à la fois à des taux d'exploitation élevés ciblés sur quelques espèces de l'écosystème et à des changements environnementaux. Les variations d'abondance dépassent largement les seuls anchois et sardine et c'est l'ensemble de l'écosystème (calmar géant, Munidae, Myctophidae, etc.) qui présente des variations à différentes échelles.

Le rôle des fluctuations climatiques présentant une période d'environ 50 ans a été le sujet de nombreuses études dans les systèmes de courants de Californie et du Humboldt. Cela implique de se focaliser sur les variations à échelle décennale du type ENSO.

### **Modélisation, SIG, observations acoustiques... une panoplie d'outils et de méthodes**

Les recherches océanographiques, dans le domaine du vivant en particulier, ont longtemps ignoré ou sous-estimé la composante géographique ou spatiale. Ceci pour plusieurs raisons : le domaine d'étude est immense, opaque pour l'œil humain et pendant longtemps seule les observations à l'aide d'un moyen de déplacement lent et coûteux (le bateau de recherche) étaient disponibles. De plus les moyens de représentation et d'analyse spatiale étaient peu développés. Cette situation a changé de façon spectaculaire au cours des deux dernières décennies avec les avancées suivantes :

- Les satellites nous permettent maintenant d'observer la surface de la mer sur de très grandes étendues et de façon

quasi instantanée. On peut en déduire non seulement la température de surface, mais aussi des indications sur la richesse en phytoplancton (couleur de l'eau), la circulation (hauteur de l'eau ou altimétrie) et l'intensité des vents de surface (scattérométrie).

- La mise à contribution des navires marchands pour la prise de mesures en mer (profils de température et de densité pour le moins) c'est accentuée au point que les bases de données couvrent pratiquement toute la planète, même si les grandes routes de navigation restent les mieux échantillonnées.

- Des mouillages fixes et engins dérivants (certains faisant le «yoyo» pour échantillonner dans le plan vertical) transmettent en permanence leur données à des satellites, lesquels les renvoient vers les centres de recherche.

- La technologie satellitale permet également d'équiper les bateaux de pêche commerciale du système VMS ou Vessel Monitoring System. Ainsi on pourra reconstituer la trajectoire du bateau et en déduire ses zones de pêche.

- Certains animaux bénéficient aussi de cette technique lorsqu'ils sont équipés de capteurs-enregistreurs permettant de connaître leur position géographique, laquelle est transmise par satellite. Ceci peut avoir lieu à n'importe quel moment pour les oiseaux marins. Pour les mammifères marins c'est uniquement lorsqu'ils font surface pour respirer ou lorsqu'ils se trouvent à terre dans les colonies (phoques, otaries). A partir des données ainsi récoltées et retransmises par satellite, les chercheurs peuvent suivre les déplacements des animaux, connaître leur zones d'alimentation, la profondeur de leurs plongées et quantifier les interactions avec les pêcheries. Lorsque la position des bateaux est également suivie par satellite (VMS) on peut alors suivre en parallèle les déplacements des animaux et des bateaux.

- Les bateaux de recherche moderne sont dotés d'instruments acoustiques permettant d'échantillonner de grand volume d'eau, non seulement au-dessous du bateau (sondeur vertical) mais aussi autour de lui (sonar latéral ou omnidirectionnel). Certains de ces instruments permettent de connaître la topographie du fond, d'autres la distribution des poissons et dernièrement celle du zooplancton. Des bouées fixes ou dérivantes sont maintenant équipées de tels appareils.

- Les progrès informatiques permettent de nos jours de modéliser la circulation et la productivité des océans en trois dimensions. Certains de ces modèles sont même capables d'assimiler une partie des données présentées ci-dessus pour améliorer leur capacité de prédiction en temps quasi réel (océanographie opérationnelle). Ces modèles sont à la fois des outils de simulation et d'expérimentation qui permettent d'établir les équilibres hydrodynamiques, de tester des hypothèses scientifiques, d'explorer le champ des possibles et enfin d'étudier des scénarios climatiques.

- D'autres types de modèles simulent le déplacement passif ou actif des organismes, en couplant (ou non) les modèles physiques décrits ci-dessus à des modèles biologiques.

- L'informatique permet également la représentation graphique et dynamique des données d'origines diverses ainsi que leur analyse spatialisée à l'aide des systèmes d'information géographique (SIG). Ainsi on pourra représenter et étudier de façon spatialisée les liens entre les différentes composantes de l'écosystème : facteurs physiques, plancton, poissons, oiseaux, mammifères et pêcheurs.

Contact auteur : **Pierre Fréon** [[pierre.freon@ifremer.fr](mailto:pierre.freon@ifremer.fr)]