
Simulateur de migration de civelles dans l'estuaire de la Gironde

Patrick Lambert, Eric Rochard et Pierre Elie

La compréhension de la migration estuarienne des civelles d'anguille (*Anguilla anguilla*) constitue actuellement un enjeu écologique, économique et scientifique important compte tenu de l'apparente diminution du stock continental estimée par les données issues de la pêche commerciale (Castelnaud *et al.*, 1995).

L'enjeu de ce programme de recherche est de définir les bases biologiques d'une gestion raisonnée du stock continental d'anguille. En particulier, la détermination du nombre d'individus qui rentrent dans l'estuaire (et donc dans le bassin versant) est une information primordiale pour relativiser l'impact de la pêche et des autres activités anthropiques. De manière à pouvoir quantifier ces entrées à partir de la principale source d'information disponible, à savoir les déclarations de capture des pêcheurs professionnels, il importe de bien comprendre les mécanismes de la migration de ces poissons.

Du fait de la complexité du phénomène à observer (il s'agit d'une migration mer-fleuve couplée à une fin de métamorphose) et de l'impossibilité de reproduire en laboratoire les conditions naturelles d'une migration en estuaire, l'exploration du champ du possible à l'aide de simulations semble être une voie d'investigation complémentaire des travaux menés sur le terrain (Jolivet et Pavé, 1993).

Après mise au point et validation par rapport au réel, ce simulateur est destiné à devenir un élément d'aide à la décision publique par le test de

scénarios réalistes (décalage des dates d'ouvertures de la pêche, succession de saisons météorologiques rigoureuses).

La modélisation individus-centrés complète l'approche phénoménologique classique, la plus souvent adoptée dans les différentes modélisations de la migration des civelles recensées par Lambert (1995) et dont le principe est de modéliser les données directement observables d'un système (encadré 1).

Un simulateur basé sur une approche individus-centrés permet, en les organisant, de synthétiser, et de confronter les connaissances acquises sur un sujet, que ce soit sur le terrain ou en laboratoire. Comme tout simulateur, il permet de progresser dans la compréhension du phénomène en testant des hypothèses (Jolivet et Pavé, 1993) et éventuellement de réaliser quelques prévisions en fonction de scénarios.

La démarche retenue pour l'étude des migrations de civelles est classique en modélisation :

1. définition des objectifs par rapport aux lacunes de connaissance et aux besoins de gestion ;
2. synthèse bibliographique des connaissances sur le phénomène biologique (Elie et Rochard, 1995) et des tentatives de modélisation (Lambert, 1995) ;
3. recensement des données de terrain disponibles ;
4. expérimentation et études complémentaires (Debenay, 1995) ;
5. conception et réalisation d'un prototype de simulateur ;
6. calage par rapport aux données de terrains

**Patrick Lambert,
Eric Rochard
et Pierre Elie**
Cemagref
BP 3
33611 Gazinet Cedex

Encadré 1

Les modèles individus-centrés

Afin de sonder l'infiniment complexe, il est possible de construire des mondes artificiels ressemblant à notre réalité. Il ne s'agit pas de représenter le monde tel qu'il est mais tel qu'il pourrait être ou, plutôt, tel que nous le comprenons ou nous l'imaginons. Dans ces univers virtuels, il est possible de réaliser les expériences les plus diverses. Cette approche doit donc être considérée comme un accompagnement de la recherche plus classique. A terme, et sous réserve d'une validation correcte avec le réel, elle peut être un des éléments du processus décisionnel comme test de scénario.

Le principe de cette modélisation est que chaque acteur est représenté sous la forme d'une entité informatique dotée d'une autonomie, capable d'agir localement en réponse à des stimuli ou à des échanges d'informations avec d'autres agents (Bousquet, 1994). Elle correspond à une approche mécaniste du fonctionnement d'un système (Le Page, 1995) et est à même de répondre à la volonté de compréhension des phénomènes complexes. Ce type de modélisation cherche avant tout à intégrer les mécanismes sous-jacents gouvernant le système afin de parvenir à le décrire dans sa globalité. La réalisation informatique d'un tel simulateur fait appel à la programmation orientée-objet, cette technique étant adaptée à la représentation, d'une part, de processus basés sur des comportements individuels et, d'autre part, d'une hétérogénéité spatiale.

Terminologie assez vague, les modèles individus-centrés sont à rapprocher des systèmes multi-agents et de l'intelligence artificielle distribuée. Pour en savoir plus sur cette approche, on peut recommander le livre de synthèse de Ferber (1995) : *Les systèmes multi-agents. Vers une intelligence collective*. Comme exemple d'application dans le domaine de l'halieutique, on peut citer les thèses de Le Page (1996) et de Bousquet (1994), mais les exemples d'application ne se limitent aux poissons...

7. exploitation du simulateur
8. mise en évidence des lacunes
9. retour au point 1. si des lacunes ont été mises en évidence ;
10. tests de sensibilité ;
11. tests de scénarios.

Actuellement, les étapes 1 à 8 ont été parcourues, et nous insisterons, dans cet article, sur les phases 5, 6 et 7.

Le simulateur

■ Le principe du simulateur : des caractéristiques du milieu couplées au comportement migratoire

Le simulateur individus-centrés de migration de civelles en estuaire repose sur le couplage entre les fluctuations spatio-temporelles des caractéristiques du milieu estuarien et le comportement migratoire d'un individu en cours de migration.

A ces deux éléments principaux viennent s'ajouter, dans le simulateur, deux autres agents : le pêcheur qui exerce un prélèvement pour réaliser des profits et le scientifique dont l'objectif est de visualiser les différents aspects du phénomène.

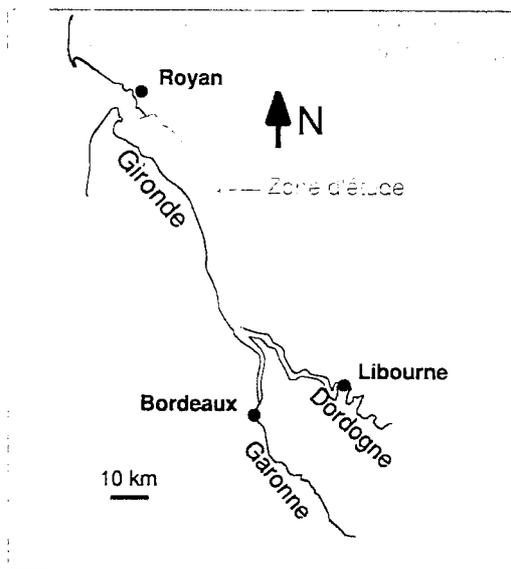
■ Le décor et les acteurs de la simulation

La zone de migration en Gironde

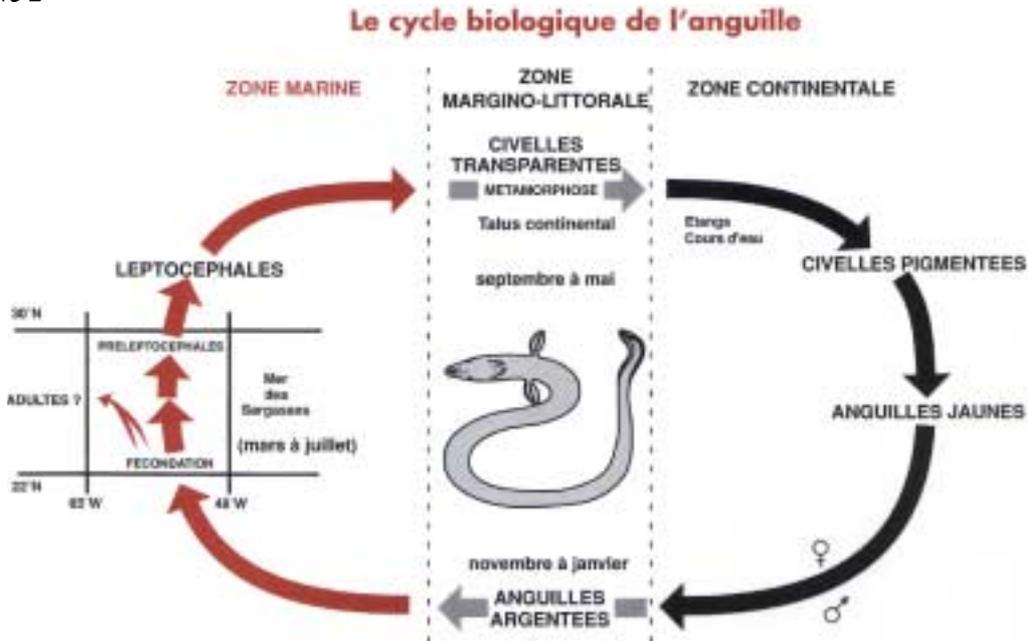
La partie marine de l'estuaire de la Gironde qui constitue le cadre physique dans lequel nous avons réalisé ce simulateur mesure 70 km de long pour 11 km de large et 6 mètres de profondeur moyenne (figure 1). Seule la moitié droite de l'estuaire correspondant à la rive directrice de la migration a été modélisée.

Il convient de noter que la marée dynamique remonte au-delà de cette zone.

Figure 1. - Localisation de la zone d'étude



Encadré 2



Nom commun : Anguille.

Nom latin : *Anguilla anguilla* L. 1758

Position systématique : classe des Osteichthyens, super ordre des téléostéens, famille des anguillidae.

Description : de forme allongée anguilliforme, une nageoire dorsale et une nageoire anale allongée, en continuité avec la caudale. Absence de nageoire pelvienne. Le site d'implantation de la nageoire dorsale et le fait que la mâchoire inférieure dépasse la supérieure la distinguent du congre. Coloration brun verdâtre, mucus très abondant, fente branchiale verticale et de petite taille en avant des nageoires pectorales.

Taille subadulte : 30-40 cm pour les mâles, 40-60 cm pour les femelles (maximum 1,50 m pour 6 kg)

Age à la reproduction : à partir de 5 ans pour les mâles, 3 à 4 ans plus tard pour les femelles.

Aire de répartition : Sur les côtes atlantiques du Maroc à la Scandinavie, ensemble des cours d'eau de l'Europe de l'Ouest.

Cycle écologique : seul grand migrateur amphihalin thalassotoque (qui se reproduit en mer) d'Europe de l'Ouest, l'anguille se reproduit en profondeur dans la mer des Sargasses, aire de ponte présumée. Les larves leptocéphales issues de la reproduction sont amenées sur nos côtes par le gulf stream en 7 à 11 mois. A la limite du talus continental en août-septembre, les larves leptocéphales translucides se métamorphosent en civelles qui se pigmentent, remontent les estuaires et colonisent ensuite les eaux continentales. En Gironde, elles pénètrent du début de l'automne au début du printemps. Après au minimum 3 à 5 ans passés en eau douce, la croissance s'arrête avec la métamorphose en anguille argentée (dos noirâtre, ventre argenté, œil agrandi, tube digestif en voie d'atrophie...) et les adultes dévalent les rivières en direction de la mer. Les femelles mesurent alors de 0,45 à 1,00 m et les mâles moins de 0,50 m. On connaît encore peu de choses sur la phase marine de l'anguille argentée et son lieu de reproduction exact.

Position dans l'écosystème : la civelle reprend son alimentation à un stade bien particulier et l'anguille subadulte se nourrit d'invertébrés benthiques (crevettes blanches et grises...) et de poissons.

Exploitation : par la pêche aux engins (amateurs et professionnels) et par la pêche de loisir. Cette espèce est exploitée à la fois au stade alevin et au stade subadulte.

Position dans l'écosystème : prédateur opportuniste à partir du stade anguilllette, elle a de nombreux prédateurs au stade civelle.

Pathologie : cette espèce est parasitée depuis une dizaine d'années par un parasite d'origine asiatique dont une partie du cycle se réalise dans la vessie gazeuse de l'anguille. Pour accomplir son cycle, le parasite perce la membrane de la vessie qui cicatrise mais finit par être profondément modifiée. Il est à craindre que ces modifications ne permettent pas aux géniteurs de s'adapter aux grandes profondeurs qu'ils doivent supporter lors de leur migration de reproduction. Les taux de parasitisme dans le bassin Gironde-Garonne-Dordogne se situent à plus de 80 %.

Abondance : au niveau de l'ensemble de son aire de répartition européenne, l'espèce a tendance à se raréfier.

Problème : globalement, depuis plusieurs années, les captures de civelles et d'anguilles sont en baisse. Les obstacles à la migration anadrome ont fortement réduit l'aire de répartition continentale de l'espèce. Elle fait l'objet d'une pêche intensive et mal contrôlée au stade civelle comme aux stades anguille jaune et anguille argentée.

Au niveau de l'unité de stock (l'Europe), on n'est pas en mesure de relativiser l'impact des différentes pressions anthropiques. On tente actuellement de progresser sur ce point en travaillant sur de petits bassins versants (lac de Grand Lieu par exemple) et en effectuant des bilans entrée (civelles) - sorties (mortalités, prédation, pêche et dévalaison des anguilles argentées).

La zone estuarienne, écotone entre la mer et les eaux douces, est une zone hétérogène. En effet, sa morphologie est variable (variations de l'ordre du kilomètre dans le cas des grands estuaires avec un pas de temps annuel ou pluriannuel). Les fluctuations des masses d'eau en présence sont saisonnières (pas de temps journalier ou hebdomadaire). Le cycle nyctéméral (variations horaires) et les variations liées aux flux de marée (à l'échelle de l'heure et du kilomètre) constituent également une source de la variabilité. Enfin, les crues introduisent des variations aléatoires.

Un tel environnement peut être simulé par une succession d'arrangements spatiaux de différents fragments plus homogènes d'habitats (Le Page, 1995), appelés cellules ou « patchs ».

Une base de connaissance sur les civelles et leur comportement (encadré 2)

Ce simulateur s'appuie sur une importante base de connaissances dont les éléments concernant la migration anadrome de la civelle en zone estuarienne ont récemment fait l'objet d'une synthèse (Elie et Rochard, 1995).

La migration en zone soumise à l'influence des marées repose sur une utilisation préférentielle, par les civelles, du courant de flot pour migrer vers l'amont et sur un comportement de recherche d'abris lors du jusant.

La civelle dans sa phase de migration peut donc être considérée comme un agent réactif. Ses déplacements sont bloqués, par exemple, pour des températures inférieures à 4-4,5 °C.

Par ailleurs, la période de migration estuarienne correspond à la fin d'une phase de métamorphose et précède une phase de sédentarisation. Le comportement de la civelle doit donc être considéré comme évolutif au cours du temps. Par exemple, son caractère lucifuge varie avec l'augmentation de sa pigmentation.

Les pêcheurs

Les pêcheurs, agents de type cognitif, définissent des stratégies de pêche pour adapter et orienter leur effort de pêche aux conditions de leur environnement (besoin d'argent, captures des jours précédents, conditions météorologiques).

Ils exercent ensuite un prélèvement d'animaux sur le stock accessible (civelles dans la masse d'eau).

Les scientifiques

Les scientifiques dénombrent les civelles présentes dans une cellule ou un groupe de cellules et ayant éventuellement une propriété particulière (stade pigmentaire par exemple). Ainsi, ils peuvent calculer le nombre de civelles contenues dans toutes les cellules de surface de l'estuaire par pas de temps, les additionner par jour et les comparer aux valeurs des captures, par jour de pêche, issues de la pêche professionnelle.

Les scientifiques suivent également le déplacement d'une civelle particulière au cours de la traversée de l'estuaire, ce qui revient à simuler une opération de pistage.

Enfin, ils mettent en relation des caractéristiques des civelles en fonction d'autres paramètres, telle l'évolution de la taille moyenne au cours de la saison.

Sans influence directe sur la migration des civelles, c'est au travers de l'action de ces agents que l'on visualise les phénomènes sous différents angles : ils font partie intégrante du simulateur

Le simulateur « fait migrer » des civelles

■ Définition d'un monde virtuel

Nous avons défini, pour représenter le système estuarien : 1 cellule « océan », 16 cellules estuariennes réparties en 2 couches symétriques, 8 en surface et 8 au fond, et 1 cellule « rivière ».

La couche de surface correspond aux cellules soumises à l'influence des courants de marée, la couche de fond à des cellules protégées des courants.

Le choix du nombre de cellules par couche est la conséquence du choix *a priori* de sa longueur égale à la distance qu'une civelle peut parcourir en moyenne lors d'un cycle de marée (en Gironde, un flot dure un peu plus de 5 heures et la vitesse moyenne durant le flot est de l'ordre de 0,5 m/s soit un déplacement potentiel de 10 km par marée).

Chaque cellule estuarienne possède des caractéristiques physiques, température et vitesse de courant, mises à jour à chaque pas de calcul.

A cet effet, et sans en attendre un modèle physique de l'estuaire performant, des interpolations

linéaires et logistiques à partir de mesures ponctuelles ont été réalisées pour estimer la température et la vitesse du courant en différents points de l'estuaire au cours du temps.

Une population de 10 000 civelles virtuelles a été implémentée. Ce ne sont pas de vraies civelles mais plutôt des images correspondant à la façon dont on se les représente dans le modèle. Dans le texte, elles seront nommées CIVELLES.

Chaque CIVELLE possède des caractéristiques constantes au cours de la simulation :

- une date d'arrivée dans la cellule océan, tirée suivant une loi gaussienne centrée, en général, sur le 1^{er} février, 95 % des individus arrivant entre décembre et mars ;
- un seuil thermique, tiré suivant une loi normale de moyenne 6 °C et d'écart type 2 °C ;
- un taux de mortalité égal pour chaque CIVELLE.

L'âge d'une CIVELLE et son appartenance à une cellule de l'estuaire sont mises à jour à chaque pas de calcul.

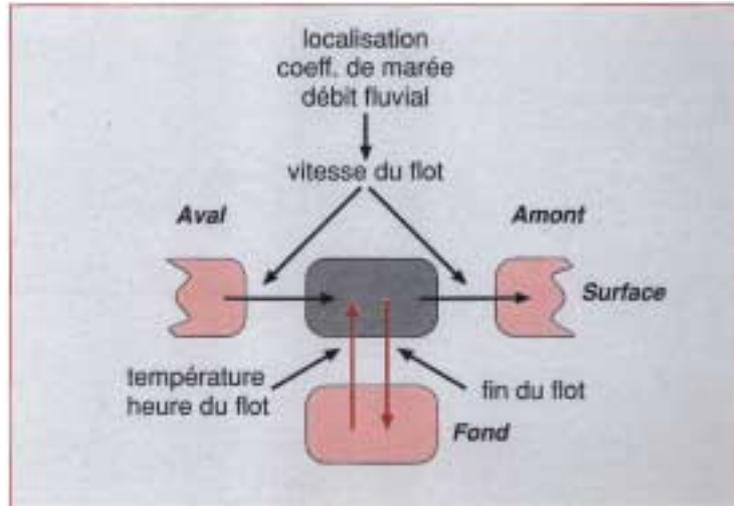
Chaque CIVELLE migre ensuite de cellule en cellule, depuis la cellule « océan » jusqu'à la cellule « rivière », selon des actions élémentaires explicites (implémentées sous forme de méthodes) traduisant notre connaissance actuelle du comportement de cette écophase.

A chaque pas de temps horaire, en fonction de ses caractéristiques propres et des caractéristiques de la cellule dans laquelle elle se trouve, une CIVELLE peut éventuellement réaliser une de ces actions élémentaires :

- migrer vers la cellule de surface ;
- migrer vers la cellule immédiatement en amont ;
- migrer vers la cellule de fond ;
- mourir.

A titre d'exemple, une CIVELLE peut migrer vers la cellule immédiatement en amont :

- si elle est dans une cellule de surface,
- si la vitesse dans la cellule où elle se trouve, est strictement positive (flot) ;
- et si sa variable stochastique (nombre aléatoire tiré à chaque fois que la méthode est sollicitée) est inférieure à la probabilité de passage dans la cellule amont (définie par le rapport entre la vitesse du flot et la longueur de la cellule).



La température n'intervient que dans la méthode « migrer vers la cellule de surface » : une CIVELLE ne peut quitter le fond et prendre le courant de flot que si la température de l'eau est supérieure à son seuil thermique individuel de migration.

▲ Figure 2. – Schéma des déplacements d'une CIVELLE et action des principaux paramètres sur ces flux

Systématiquement, toutes les CIVELLES redescendent dans les cellules de fond à la fin de chaque flot.

Aucun déplacement latéral ou vers l'aval n'est actuellement possible dans le simulateur alors que, dans la réalité, il n'est pas exclu qu'il puisse y en avoir.

Les déplacements d'une CIVELLE et l'action des principaux paramètres sur ces flux sont résumés par la figure 2.

A l'heure actuelle, aucun agent pêcheur n'a encore été incorporé dans le simulateur. On cherche donc à visualiser le phénomène de migration en considérant les impacts anthropiques comme négligeables.

Les premiers essais de simulation ont été réalisés pour la saison 1987-1988, année pour laquelle nous disposons des paramètres environnementaux nécessaires aux calculs et d'un bon suivi de la pêche de civelles sur cette zone (Rochard, 1992).

Le calage se fait par comparaison entre le cumul journalier des abondances calculées par le modèle dans certaines cellules et les indices d'abondance issus des déclarations journalières.

Figure 3. -
Trajet simulé d'une
CIVELLE dans l'estuaire
virtuel de la Gironde
(La surface des cercles
est proportionnelle au
temps de séjour
de la CIVELLE dans la
cellule)

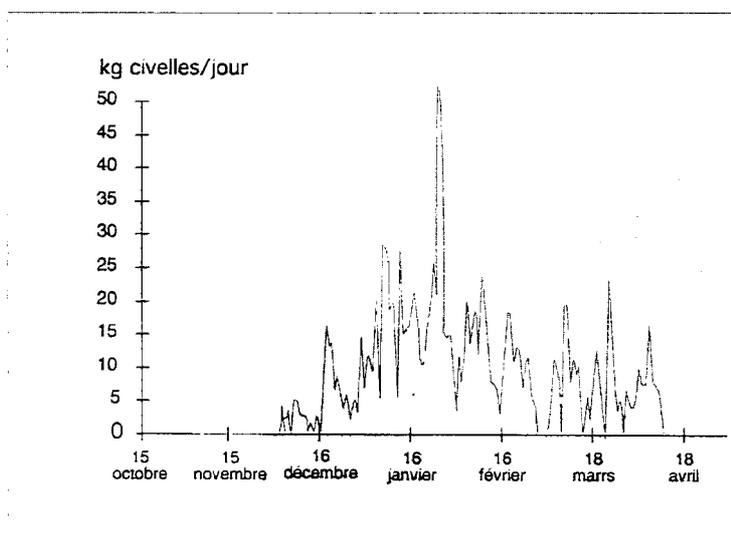
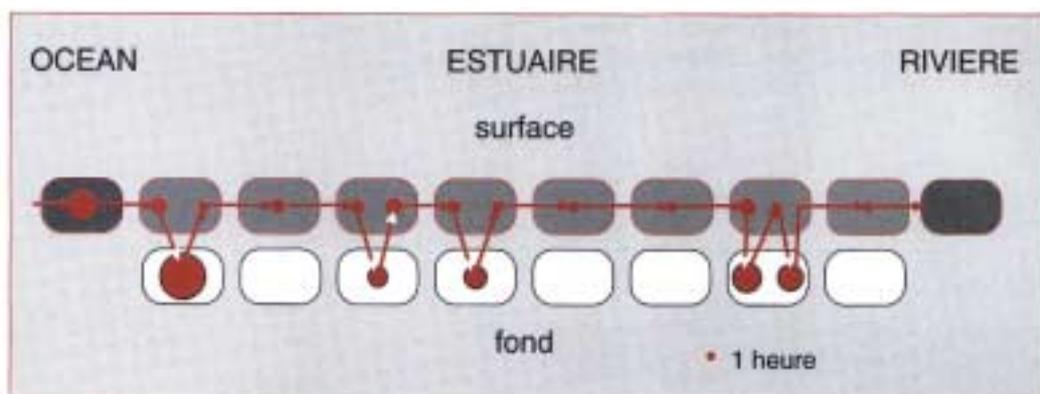


Figure 4. -
Courbes d'abondance
issues de la simulation
(en nombre de CIVELLES
comptées par jour
dans une cellule), pour
trois cellules de surface
de l'estuaire

Les premiers résultats du simulateur

Les premiers résultats obtenus concernent l'évolution de l'abondance des civelles dans les différentes cellules estuariennes et l'influence du seuil thermique sur la durée de la traversée de la zone estuarienne.

La simulation du trajet d'une CIVELLE

La figure 3 illustre le fonctionnement du simulateur. Elle symbolise le déroulement de la migration estuarienne d'une CIVELLE, la durée de séjour dans chaque cellule ayant été représentée par un cercle de surface proportionnelle au temps. L'examen de ces trajectoires montre que la durée du séjour dans une cellule est variable en fonction de sa localisation et du moment d'arrivée de la CIVELLE dans la cellule « océan ». La durée moyenne de la traversée estuarienne

simulée, pour les conditions environnementales testées, est de 175 heures, ce qui est cohérent avec les résultats d'expériences de marquage (Cantrelle, 1981) ou de suivi de « vagues de migration » effectuées sur le même site (Rochard, 1992).

On remarque également qu'une CIVELLE ne passe pas nécessairement dans chaque cellule de fond.

Estimation de l'abondance dans chaque cellule

Les courbes d'abondance dans chaque cellule de surface (figure 4) ont été calculées en cumulant l'ensemble des trajectoires individuelles. On remarque tout d'abord que ces courbes sont encore proches de la loi normale utilisée pour définir les arrivées dans la cellule « océan » ; la déformation induite par les méthodes de migration actuelles reste donc faible. Par ailleurs, les densités plus faibles calculées pour la cellule amont peuvent s'expliquer par le resserrement vers l'amont de l'estuaire, ce qui entraîne une augmentation des vitesses de courant, et donc, une durée de séjour plus faible des civelles dans les cellules amont. Enfin, le décalage des pics entre cellules aval et cellules amont est en accord avec le temps moyen de traversée constaté sur le terrain.

Comparaison des résultats avec les captures des pêcheurs professionnels

Les courbes d'abondance dans les cellules de surface peuvent être comparées à la série des déclarations de captures journalières d'un pêcheur, en supposant que ces captures soient négligeables par rapport au stock présent dans la cellule.

Ce calage n'est pas satisfaisant puisque la courbe issue du modèle ne permet pas de mettre en évidence la bimodalité de la tendance observée dans

la série chronologique des indices d'abondance issue de la pêche (figure 5) (Rochard, 1992).

Influence du seuil thermique de migration sur la durée de transit

L'évolution du temps de traversée en fonction de la date d'arrivée des CIVELLES dans la cellule « océan » (figure 6) montre une ségrégation entre les CIVELLES avec un seuil thermique faible qui migrent pendant environ 175 heures et celles possédant un seuil plus élevé (supérieur à 7 °C), qui sont bloquées par des températures faibles et qui, par conséquent demeurent plus longtemps dans l'estuaire.

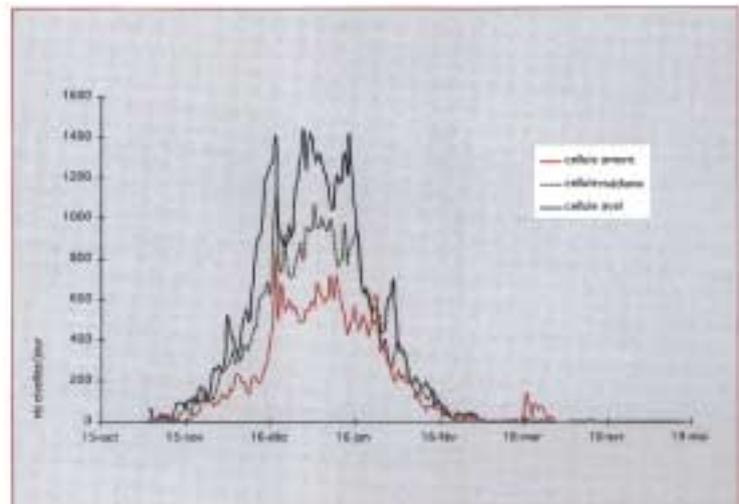
Discussion des premiers résultats

Dans la version actuelle du simulateur, pourtant extrêmement simple, il est possible d'analyser les conséquences du mode d'action retenu pour la température. La distribution normale du seuil thermique de chaque CIVELLE conduit à une ségrégation entre un groupe d'individus qui migre rapidement et un groupe d'animaux bloqué plus ou moins longtemps en fonction de sa date d'arrivée par rapport au coup de froid. Cette différence de comportement entraîne une mortalité estuarienne dépendant de la température alors que le taux de mortalité individuel est constant. On peut, par ailleurs, se demander si ce mode d'action de la température (ou ce même mode d'action mais pour un autre paramètre, exogène ou endogène) n'induit pas la sédentarisation en estuaire de la partie du stock de CIVELLES qui migre lentement.

Ces premiers résultats nous ont aidé dans la définition des points qui feront l'objet d'études plus précises à l'avenir.

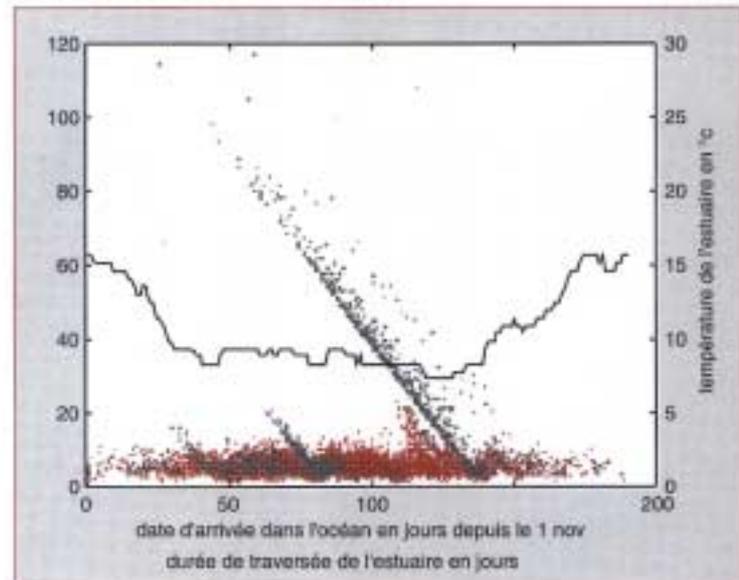
La cinétique de montée des civelles dans la masse d'eau au cours d'un flot ainsi que l'influence du cycle nyctéméral sur leur comportement migratoire ont fait l'objet d'une expérimentation importante (Debenay, 1995) qui est actuellement en cours d'analyse plus approfondie.

Par ailleurs, un projet de recherche, mené en collaboration avec une équipe de physiologistes du Muséum d'histoire naturelle de Paris portant sur l'évolution de la distribution du taux de thyroxine des individus au cours d'un cycle de marée et pendant une saison, semble prometteur, entre autres pour la compréhension de la sédentarisation en estuaire d'une partie des civelles. De même, la réflexion sur la notion d'âge des civelles (en termes



▲ Figure 5. – Évolution des captures moyennes journalières des pêcheurs professionnels de la Gironde au cours de la saison 1987-1988

Figure 6. – Temps mis par une civelle pour traverser l'estuaire en fonction de sa date d'arrivée dans la cellule « océan » [en gris civelle dont le seuil thermique est supérieur à 7 °C, en rouge inférieur à 7 °C]



de stade pigmentaire) doit être poursuivie de manière à rendre évolutif au cours du temps le comportement de la civelle.

L'adaptation d'un nouveau modèle hydraulique de l'estuaire de la Gironde (Jarrigue, 1995), en collaboration avec le département de mathématiques

appliquées de l'université de Bordeaux, devrait améliorer la pertinence des calculs des vitesses de courants de l'estuaire.

Un point délicat, il reste l'arrivée des civelles devant l'estuaire (patron de migration), qui doit faire l'objet d'une revue critique de la bibliographie existante et d'une tentative d'extraction de cette information à partir des séries chronologiques issues de la pêche professionnelle (Rochard, 1992 ; Gascuel *et al.*, 1995).

Discussion sur la méthode : des avancées théoriques intéressantes

Très satisfaisant au niveau conceptuel, ce type d'approche repose sur une théorie idiosyncrasique selon laquelle tous les individus diffèrent par leur perception, leurs comportements et leur physiologie, ceci résultant d'une combinaison unique d'influences génétiques et environnementales (Huston *et al.*, in Le Page, 1995).

Il s'agit d'un type de modélisation relativement accessible dû principalement au parallélisme entre objet du programme et agent du modèle, la traduction des différents comportements se faisant alors naturellement (Le Page, 1995). Cette accessibilité facilite l'interdisciplinarité en offrant la possibilité d'organiser, dans un cadre unique, des résultats issus de disciplines différentes.

Par ailleurs, le recours à la programmation orientée-objet permet de rendre le modèle très évolutif puisque la modification d'un comportement ou la prise en compte d'un nouveau paramètre peut se faire facilement (principe d'héritage, création d'une nouvelle méthode).

Par contre, de par son absence de cadre mathématique rigoureux, ce type de modèle reste relativement difficile à ajuster aux données réelles.

La recherche et l'intégration de nouvelles informations mesurables sur le terrain peuvent faciliter ce calage. Par exemple dans notre cas, les structures en taille (ou en stades pigmentaires) observées pourraient être comparées avec celles issues de la modélisation. La stratégie de pêche pourrait également être modélisée, ce qui permettrait de tenir compte du biais introduit par la pêche.

De plus, la comparaison avec d'autres types de modèles plus globaux (modèle à flux, réseau de neurones...) permet d'identifier les éléments du modèle les plus influents sur les résultats.

Même, si l'ajustement reste délicat, la réflexion engendrée par la mise au point de ce simulateur permet de faire progresser la connaissance sur la migration estuarienne des civelles par une « exploration du champ du possible » (Le Page, 1995).

Par ailleurs, la mise en évidence des points de faiblesse de la connaissance acquise sur le sujet (lacunes, concessus...), par l'utilisation du simulateur incite à la poursuite des recherches, à la réalisation d'expérimentations pour vérifier, confirmer ou préciser les modes de déroulement du phénomène.

Il n'est pas surprenant que ce type de modélisation connaisse actuellement un engouement important se traduisant par des applications sur les pêches artisanales du delta central du Niger (Bousquet et Cambier, 1993), sur les pêcheries lagunaires sénégalaises (Le Fur, 1995) ou sur la dynamique chaotique des populations de petits pélagiques (Le Page, 1995). Des applications sont envisagées sur la dynamique des peuplements lacustres alpins. On peut également imaginer, au sein du Cemagref appliquer ces techniques à la répartition des peuplements à l'échelle d'un tronçon (micro-habitat), d'un lac de plaine, voire d'un bassin versant. □

Cet article a fait l'objet d'une communication écrite au séminaire interne inter-chercheurs « Les modèles au Cemagref. Formulation, validation, pertinence ». 12-13 octobre 1995.

Résumé

La migration des civelles d'anguille dans l'estuaire est étudiée sur le terrain ainsi qu'à l'aide d'un modèle « individu-centré ». Le simulateur de migration crée repose sur le couplage entre une discrétisation spatio-temporelle des caractéristiques du milieu et les comportements individuels d'une population de civelles en cours de migration. Le calage du modèle se fait principalement par comparaison qualitative avec les indices d'abondance issus des déclarations journalières faites par les pêcheurs professionnels. Le modèle a fourni des éléments sur la migration et sur l'influence de la température sur le temps de transit en estuaire.

Abstract

The migration of elvers to estuaries is studied on the ground as well as using an "individual-based" model. The migration simulator developed is based on the association between empirical space and time relations of the characteristics of the environment and the behaviour of an individual glass eel during migration. The model is fitted mainly by qualitative comparison with the statistics taken from the daily declarations by professional fishermen. The model has provided information on migration and influence of the temperature on the time of transit into the estuaries.

Bibliographie

- BOUSQUET, F., CAMBIER, C., 1993. L'intelligence artificielle au service des pêches artisanales, *Orstom Actualités*, n° 40, 8-12.
- BOUSQUET, F., 1994. Des milieux, des poissons, des hommes : étude par simulations multi-agents. Le cas de la pêche dans le delta central du Niger, *Thèse de doctorat*, Université Claude Bernard - Lyon 1., 175 p
- CANTRELLE, I., 1981. Etude de la migration et de la pêche des civelles *Anguilla anguilla* L. 1758 dans l'estuaire de la Gironde, *Thèse de doctorat* de 3ème cycle, Cemagref de Bordeaux, Div. A.L.A./ Université de Paris VI, 237 p.
- CASTELNAUD, G., GUERALT, D., DESAUNAY, Y., ELIE, P., 1995. Production et abondance de la civelle en France au début des années 90., *Bull. Fr. Pêche et Pisc.*, n° 335, 263-288.
- DEBENAY, B., 1995. Première analyse de l'évolution des densités de civelles au cours du flot dans l'estuaire de la Gironde, *Rapport de maîtrise*. Université de Bordeaux I-Cemagref, 11 p.
- ELIE, P., et ROCHARD, E., 1995. Migration des civelles d'anguilles (*Anguilla anguilla* L.) dans les estuaires, modalité du phénomène et caractéristiques des individus, *Bull. Fr. Pêche et Pisc.*, n°335, 81-98
- FERBER, J., 1995. Les systèmes multi-agents, Vers une intelligence collective, InterEditions, 522 p.
- GASCUEL, D., FEUNTEUN, E., FONTENELLE, G., 1995. Seasonal dynamics of estuarine migration in glass eels (*Anguilla anguilla*). *Aquat. Living Resour.*, 8, 123-133.
- JARRIGUE, P., 1995. Un modèle mathématique d'écoulement estuarien avec bathymétrie. application aux transferts de polluants en Gironde, *Thèse de doctorat*, Université de Bordeaux I., 269 p.
- JOLIVET, M., PAVE, A., 1993. L'environnement : un champ de recherche en formation. *Natures-Sciences-Sociétés*, n° 1(1), 6-20.
- LAMBERT, P., 1995. Synthèse des concepts de modélisation du phénomène de migration des civelles d'*Anguilla anguilla* en estuaire. *Bull. Fr. Pêche et Pisc.*, n°335, 99-110.
- LE FUR, J., 1995. Modelling adaptive fishery activities facing fluctuating environments : an A.I. approach. *AI Applications*, vol 9, n°1, 85-97.
- LE PAGE, C., 1995. Variabilité environnementale et structuration spatiale de la reproduction. in GASCUEL D., DURAND J.-L. et FONTENEAU A, Les recherches françaises en évaluation quantitative des ressources et des systèmes halieutiques, 127-139.
- LE PAGE, C., 1996. Biologie des populations et simulation individus-centrées, *Thèse de doctorat* de l'université Paris VI, 154 p.
- ROCHARD, E., 1992. Mise au point d'une méthode de suivi de l'abondance des amphihalins dans le système fluvio-estuarien de la Gironde, application à l'étude écobiologique de l'esturgeon *Acipenser sturio*, *Thèse de doctorat*, Université de Rennes II/ Cemagref, 315 p.