

Deuxième partie

Contributions

Chapitre 3

Écosystèmes

Sommaire

3.1	Introduction	48
3.2	Distribution dynamique à l'aide de mécanismes d'intelligence collective	50
3.3	Modélisation de l'écoulement et détection d'organisation	51
3.3.1	Représentation particulière	51
3.3.2	Détection des organisations	54
3.3.3	Gestion des organisations	55
3.3.4	Changement d'échelle	63
3.4	Simulation du biotope et de la biocénose	68
3.4.1	Modèle hybride holarchique compartimental	69
3.4.2	Ontologie du modèle	73
3.4.3	Mise en œuvre et résultat	77
3.4.4	Détection et gestion des organisations	84
3.4.5	Changement d'échelle	86
3.5	Conclusion	91

3.1 Introduction

Ce travail de recherche s'intéresse à la modélisation des systèmes complexes naturels et plus particulièrement aux écosystèmes en tant que lieu d'interactions d'entités hétérogènes évoluant sous forme organisée dans un environnement possédant lui-même ses propres structures internes et dynamiques capables de rétroagir sur les entités.

Les écosystèmes sont nombreux et variés, avec chacun des spécificités. Nous nous intéressons plus précisément à l'estuaire de la Seine. Celui-ci est défini géographiquement comme allant du barrage de Pose jusqu'à la Manche. Il est holarchique et auto-organisé, comme tout écosystème, ainsi que très anthropomorphisé. Sa qualité de système ouvert par contre s'incarne d'une manière assez spécifique. De par sa nature en effet, l'écoulement du fleuve et la force des marées sont au cœur des flux de matière et d'énergie d'origine extérieurs à celui-ci. A ces flux s'ajoutent des polluants solubles ou transportés, à l'influence certaine sur la trajectoire de l'écosystème. C'est un des écosystèmes où les écoulements de fluides ont un rôle des plus primordiaux.

Nous cherchons à formaliser des modèles conceptuels pour appréhender ces systèmes naturels et donc les représenter dans leur complexité, mais aussi pour élaborer des outils prédictifs de simulation. Différents niveaux de description, appelés encore échelles, apparaissent naturellement au cours de l'évolution dynamique de ces systèmes et en permettent la représentation sous une forme hiérarchique qui les organise de manière structurale.

Afin de réaliser des simulations réalistes, il est primordial de pouvoir les déployer sur des réseaux informatiques distribués permettant une répartition des calculs. Les algorithmes proposés sont bio-inspirés et prennent appui sur des modèles d'intelligence collective ou en essaim, notamment en s'inspirant du comportement des insectes sociaux.

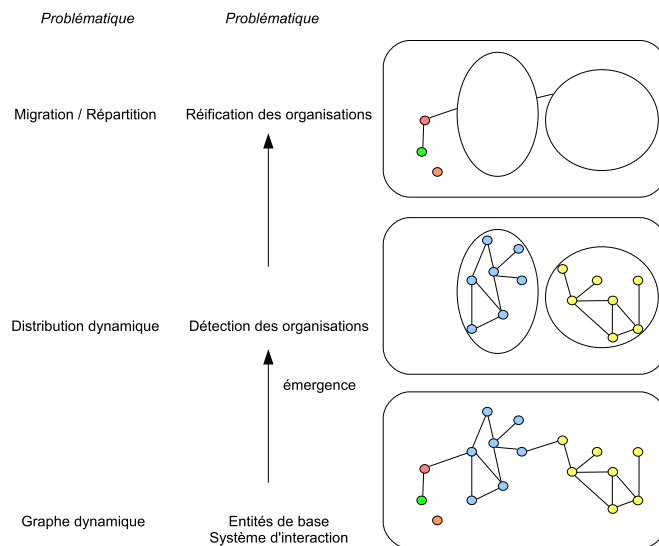


FIG. 3.1 – Modèle organisationnel émergent et implémentation associée

La modélisation mise en œuvre est développée à partir des méthodes particulières, elle permet de dégager par identification dynamique, des structures cohérentes et dynamiques qui s'y forment puis de les réifier dans la simulation sous forme d'entités globales

interagissantes [16, 29, 28, 30, 31, 32, 35, 33, 34, 36, 38, 39, 5, 7]. Cette représentation conceptuellement distribuée permet alors de modéliser par des descriptions locales des interactions du fluide catalyseur de formations émergentes, avec d'autres entités de nature variées physico-chimiques ou biologiques pour des études de contamination ou encore pour des études en halieutique. Nous formalisons des couplages entre des modèles particuliers et des modèles individus-centrés, aptes à décrire des boucles de rétroaction. Une spécification de modèle hiérarchique hybride compartimental a été définie et permet d'intégrer à la fois des approches individus-centrées pour la représentation d'espèces animales aquatiques et des descriptions analytiques globales de certains constituants d'un compartiment dont l'hypothèse de construction consiste à les représenter avec des lois globales, voire analytiques (concentration d'oxygène, quantité de lumière dans un compartiment du modèle, par exemple). L'élaboration d'une ontologie précisant les bases d'un modèle écologique du type producteur-consommateur-décomposeur nous permet de construire des modèles généraux qui peuvent être utilisés par des spécialistes, écologues, géomorphologues, ... pour pouvoir fournir des outils de simulation pertinents, capables de gérer par eux-mêmes les organisations émergentes qui se développent, évoluent ou qui peuvent disparaître en cours de simulation.

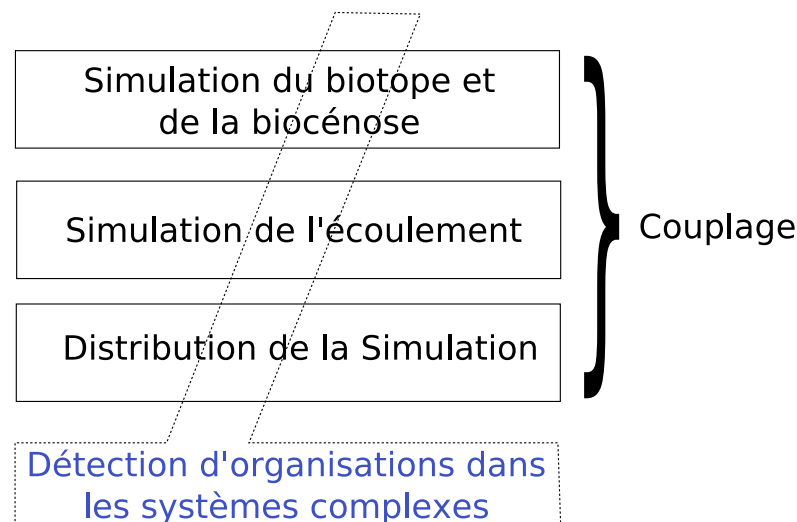


FIG. 3.2 – Projet de recherche global

Afin de pouvoir réaliser des simulations à grande échelle, nous avons donc dégagé trois orientations principales :

- La distribution dynamique de simulation grâce aux organisations émergentes au niveau du code de calcul ;
- La modélisation du fluide porteur et des structures émergentes avec changement d'échelle afin de réduire la complexité ;
- La modélisation du biotope et de la biocénose à l'aide de modèle mixte permettant une modélisation globale des grandeurs physiques par exemple et une modélisation plus fine centrée sur les individus.

Ce travail est un résultat en perpétuelle évolution assuré par un système constitué principalement des entités : Antoine, Cyrille, Damien, Frédéric, Guillaume, Sylvain et Pierrick. Des nombreuses interactions, les thèses d'Antoine, Guillaume et Pierrick et le mémoire de Sylvain ont émergé. Ils ont assuré la morphogénèse, Cyrille, Frédéric et moi-même la morphostase. Nous abordons maintenant la phase adulte, espérons que le flux de matière et d'énergie³⁰ permettra d'entretenir le système.

3.2 Distribution dynamique à l'aide de mécanismes d'intelligence collective

Nous développerons plus loin cette contribution dans un chapitre à part entière (cf. 4) qui traitera du problème plus général de la détection d'organisations par des techniques de collaboration et de compétition. Néanmoins fixons en quelques lignes les objectifs et la méthode. Notre volonté est de montrer, ici, l'articulation entre la distribution dynamique, la modélisation du fluide porteur de la dynamique et la modélisation du biotope et de la biocénose.

En quelques années, dans le domaine de l'informatique distribuée et parallèle, les paradigmes de grilles et de grappes sont passés du stade de concept théorique à celui de la réalisation effective. De nombreux projets ont vu le jour mettant en évidence la faisabilité et l'utilité d'une telle approche, tant du point de vue scientifique qu'économique. Le principal objectif de ces nouveaux environnements distribués est d'offrir un ensemble de services parmi lesquels figurent le calcul et le stockage à grande échelle. Dans ce contexte une bonne méthode de répartition de charge alliant performance et tolérance aux pannes peut se révéler cruciale pour la bonne marche du système.

Nous nous sommes donc intéressés à la définition et la mise en œuvre d'algorithmes offrant des capacités d'adaptation aptes à répondre aux variations numériques et structurales des environnements distribués. C'est dans ce cadre que nous abordons notamment la distribution physique de systèmes complexes décentralisés, à base d'objets actifs ou d'agents, à grande échelle comme des écosystèmes naturels. Ces systèmes présentent des caractères comportementaux hautement dynamiques. Des communications peuvent apparaître entre des groupes d'entités puis disparaître et se restructurer en de nouvelles organisations au cours d'une même simulation. Dans un tel contexte le comportement de l'application peut être vu comme un «écosystème computationnel» analogue aux écosystèmes biologiques ou économiques. Nous abordons donc le problème sous l'angle des systèmes complexes en particulier pour les aspects d'auto-organisation [11, 9, 40, 20, 2, 43, 18, 31].

La répartition dynamique s'effectue par un module d'observation récupérant des données et informations significatives et critiques du système complexe modélisées par un graphe (dynamique). Des algorithmes d'intelligence collective dégagent des indications de formations émergentes de clusters tout en respectant des contraintes de répartition de charge et offrent leurs conseils à l'application.

³⁰Faut il le préciser, les bourses se font rares et il est difficile d'engager alors dans la voie de la recherche de jeunes chercheurs.

3.3 Modélisation de l'écoulement et détection d'organisation

Simuler un écosystème suppose d'avoir modélisé les flux de matières et d'énergies qui le traversent. Un des flux important dans un écosystème estuarien, est l'écoulement fluide, nous nous sommes donc intéressés à sa modélisation.

Afin de pouvoir nous intéresser à plusieurs niveaux de description d'un fluide, nous nous sommes attachés à pouvoir détecter et réifier des organisations qui pouvaient apparaître lors de la simulation. Le modèle de base que nous utilisons est basé sur des vortex élémentaires dans un écoulement en deux dimensions³¹. Ce modèle est mathématiquement équivalent aux équations de Navier-Stokes. Il repose sur une méthode dite particulaire. À la différence des méthodes classiques qui travaillent en coordonnées eulériennes et où les vitesses sont estimées, à chaque pas de temps, à des positions fixes qui correspondent aux nœuds d'un maillage, les méthodes particulières s'appuient sur une discrétisation du domaine qui consiste à représenter l'écoulement par un ensemble de particules distinctes en interaction et en nombre fini [Léonard, 1980]. Ces particules sont portées par l'écoulement qu'elles caractérisent : il s'agit alors d'une résolution lagrangienne. Ces méthodes présentent l'avantage de ne pas engendrer de diffusion numérique, comme cela peut se produire sur des méthodes de maillage. Même si dans les deux catégories de méthodes, il s'agit bien d'approcher des équations de comportement global de l'écoulement, à savoir les équations de Navier-Stokes, les méthodes particulières se traduisent finalement par une formulation centrée sur les individus - les particules fluides discrétisant le fluide - et sur leurs interactions mutuelles.

Nous nous intéressons à la détection d'organisations de même nature mais d'un niveau de description plus élevé : on va donc garder une formulation mathématique homogène pour conserver une équivalence à Navier-Stokes. Pour détecter les organisations, on va utiliser une méthode de triangulation de Delaunay puis un calcul d'enveloppe convexe et enfin chercher l'ellipse associée (cf. fig. 3.3). Une fois le tourbillon détecté, un agent le représentant va être créé, au sens des systèmes multiagent. Cet agent est basé sur un automate d'écorésolution [Ferber, 1995]. Ses perceptions et ses actions, ou plus généralement en fait les règles qui le régissent, sont modélées par les impératifs mécaniques de la structure qu'il représente, d'une manière somme toute téléologique.

3.3.1 Représentation particulaire

La méthodologie retenue est donc de résoudre numériquement les équations de Navier-Stokes, capables de modéliser des écoulements fluides avec une précision qui est plus limitée par les méthodes de discrétisation retenues, qu'elles engendrent nécessairement, que par le modèle analytique lui-même. L'expression analytique de ces équations est celle des écoulements fluides visqueux incompressibles. Elle s'écrit de la manière suivante :

³¹Cette hypothèse pourrait sembler illégitime, néanmoins l'épaisseur des fluides est généralement négligeable par rapport à leur étendue.

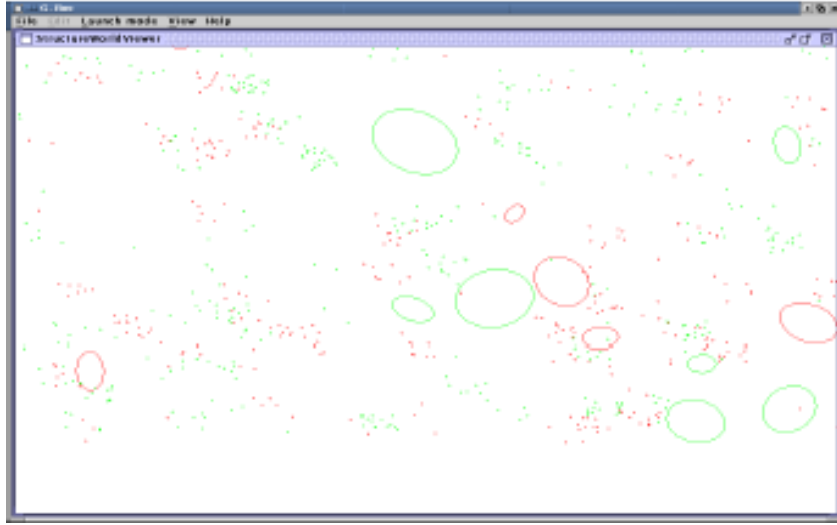


FIG. 3.3 – Simulation de l'écoulement avec détection de structure.

Les points rouges et verts sont les particules vortex, la couleur figurant le sens de leur rotation. Les ellipses rouges et vertes représentent les structures de fluides détectées et réifiées.

1. Équation de conservation de la masse :

$$\text{Div} \vec{U} = 0 \quad (3.1)$$

2. Équation d'évolution de la quantité de mouvement :

$$\frac{D\vec{U}}{Dt} = \frac{1}{\rho} \text{grad}P + \nu \Delta \vec{U} + \vec{F} \quad (3.2)$$

avec $\vec{U} = \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}$ la vitesse du fluide; P la pression; ν la viscosité cinématique; \vec{F} les forces extérieures par unité de masse (force de pesanteur en particulier); $\frac{D\phi}{Dt} = \frac{\partial\phi}{\partial t} + u\frac{\partial\phi}{\partial x} + v\frac{\partial\phi}{\partial y}$ dérivée particulaire d'une fonction scalaire ou vectorielle ϕ qui suit le mouvement du fluide;

On discrétise ensuite en un ensemble de n particules $(P_i)_{1 \leq i \leq n}$ de position $(\vec{X}_i)_{1 \leq i \leq n}$, de vitesse $(\vec{U}_i)_{1 \leq i \leq n}$ et de rotationnel $(\vec{\Omega}_i)_{1 \leq i \leq n}$ qui traduit l'aptitude des particules à tourner sur elles-mêmes. Un ensemble suffisamment dense de telles particules décomposant artificiellement le fluide permet de représenter avec précision son écoulement.

Pour calculer à chaque instant t , pour chaque particule la portion de la vitesse qui vient de l'action des autres particules, nous utilisons la formule suivante [Chorin, 1973, Léonard, 1980] :

$$\vec{U}_p(\vec{X}_i, t) = \frac{1}{2\pi} \sum_{j \neq i} \vec{\Omega}_j \wedge \frac{(\vec{X}_i - \vec{X}_j)}{\|\vec{X}_i - \vec{X}_j\|^2} \quad (3.3)$$

Si l'ensemble des particules est transporté par un écoulement global de vitesse moyenne $(\vec{U}_\infty)(t)$, alors la vitesse de la particule i , correspond à la somme de la vitesse de l'écoulement global et de la vitesse induite par les autres particules en rotation dans le domaine :

$$\vec{U}(\vec{X}_i, t) = \vec{U}_p(\vec{X}_i, t) + \vec{U}_\infty(t) \quad (3.4)$$

Sous l'hypothèse où le fluide n'est pas visqueux, l'étude de l'écoulement se ramène à une convection simple de ces particules et il n'y a pas de diffusion. Les particules «glissent» alors les unes sur les autres, et leur vorticité est constante au cours du temps :

$$\vec{\Omega}_i(t) = \text{Cste} = \vec{\Omega}_i(0) \quad (3.5)$$

On obtient alors la position des particules par intégration de leur vitesse :

$$\frac{d\vec{X}_i}{dt} = \vec{U}(\vec{X}_i, t) \quad (3.6)$$

On peut utiliser pour cela une méthode d'Euler ou une méthode de Runge-Kutta d'ordre 4, par exemple. Le calcul de la vitesse de la formule (3.3) devient singulier si les positions des particules i et j sont très proches. Il est alors nécessaire d'utiliser une fonction de régularisation. L'équation 3.3 devient alors :

$$\vec{U}_p(\vec{X}_i, t) = \frac{1}{2\pi} \sum_{j \neq i} \vec{\Omega}_j \wedge \frac{(\vec{X}_i - \vec{X}_j)}{\sqrt{\|\vec{X}_i - \vec{X}_j\|^4 + \epsilon^4}} \quad (3.7)$$

avec ϵ un petit paramètre dont la valeur peut être prise comme étant voisine de $h^{3/4}$, h étant la distance minimale entre deux particules voisines.

On peut également appliquer le modèle particulaire dans le cas des fluides visqueux, les particules «frottent» alors les unes sur les autres et changent de vorticité au cours du temps. On calcule la diffusion de vorticité entre les particules, supposée nulle sinon. On recalcule alors à chaque pas de temps les nouvelles valeurs de Ω_i en intégrant l'équation différentielle :

$$\frac{d\vec{\Omega}_i}{dt} = \frac{\sum_j (V_i \vec{\Omega}_j - V_j \vec{\Omega}_i) e^{-\frac{\|\vec{X}_i - \vec{X}_j\|}{4\pi\nu(\Delta t)}}}{4\pi\nu(\Delta T)^2} \quad (3.8)$$

avec $(V_i)_{1 \leq i \leq n}$ volumes associés aux particules. Si l'on considère le fluide incompressible, ce qui est notre cas, ils sont constants.

Nous avons donc maintenant une modélisation de l'écoulement . Les particules représentent les entités de notre simulation, cette représentation présente l'avantage d'être distribuée et également nous allons pouvoir par la suite éventuellement prendre en compte les interactions entre l'écoulement et des entités vivantes.

3.3.2 Détection des organisations

Au cours de la simulation apparaissent des organisations dans le flux, que nous allons tenter de détecter et représenter. Expliquons au préalable l'origine du phénomène physique.

Dans presque tous les écoulements de fluide de la turbulence apparaît, sauf lorsque la viscosité est trop importante, le frottement domine dans ce cas. Ainsi, comme on l'a vu précédemment (cf. 3.3.1) la dynamique de l'écoulement est déterminé par le rotationnel de la vitesse, ce qui correspond à l'aptitude, dans notre représentation, de chaque particule à tourner sur elle-même. Chaque particule à sa propre vitesse de rotation (et sens) qui reste constante (cf. eq. 3.5). A l'échelle microscopique cela semble chaotique en particulier près d'un obstacle par exemple, mais dès que l'on change de résolution, l'écoulement semble s'organiser et on voit apparaître des structures cohérentes tourbillonnaires. Au niveau atmosphérique l'allée de Von Karman (cf. photo 2.3) en est un exemple très démonstratif. Comment se forme ces structures tourbillonnaires? Imaginons que deux courants se croisent (cf. figure 3.4(a)), au niveau de l'état initial deux points voisins ont des vorticités proches. L'état turbulent est créé par le croisement des deux courants, car deux points proches peuvent avoir des vorticités différentes. La turbulence se développe (cf. figure 3.4(b)), les particules de vorticité différentes se mélangent et favorisent l'apparition de structures tourbillonnaires (cf. figure 3.4(c)).

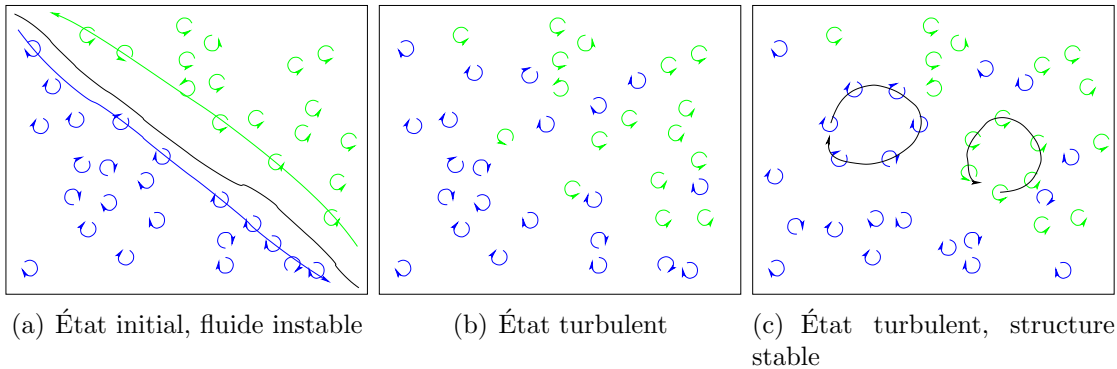


FIG. 3.4 – Formation de tourbillons dans un écoulement turbulent.

Pour détecter les structures nous utilisons une triangulation de Delaunay sur l'ensemble des particules, puis à l'aide de cette triangulation nous recherchons l'arbre de recouvrement de poids minimum, ensuite suivant des critères ontologiques des arcs sont supprimés (cf. figure 3.5). On transforme ainsi l'arbre en forêt et on calcule alors l'enveloppe convexe de chaque arbre constituant la forêt. Cette identification revient alors à rechercher le minimum de la somme des carrés des distances algébriques entre chaque point de l'enveloppe convexe et l'ellipse.

$$D(A) = \sum_{i=1}^n F(A, X_i)^2 \quad (3.9)$$

où $F(A, X) = ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f = 0$ est l'équation de l'ellipse, $X_i = (x_i, y_i)$ est un

point de l'enveloppe et $A = (a, b, c, d, e, f)$. Nous ajoutons une condition supplémentaire entre les coefficients pour que le système puisse être résolu, comme l'un des deux critères suivants :

- le critère de Gander [Gander et al., 1994] : $a + c = 1$
- le critère de Fitzgibbon [Fitzgibbon et al., 1996] : $4ac - b^2 = 1$

Certaines enveloppes ne sont pas conservées car elles présentent une surface par trop différente de celle de l'arbre qu'elles entourent. Des critères de compacité (densification des points de l'enveloppe convexe) sont utilisés. Finalement, l'excentricité de l'ellipse est calculée afin de supprimer celles qui sont trop aplaties et non conformes aux tourbillons naturels dont la forme optimale est le cercle. Nous calculons ensuite une ellipse approchée pour chaque enveloppe conservée. Nous ne détaillons pas ici, les algorithmes utilisés et les différentes améliorations apportées, on pourra se reporter à [73, 80], .

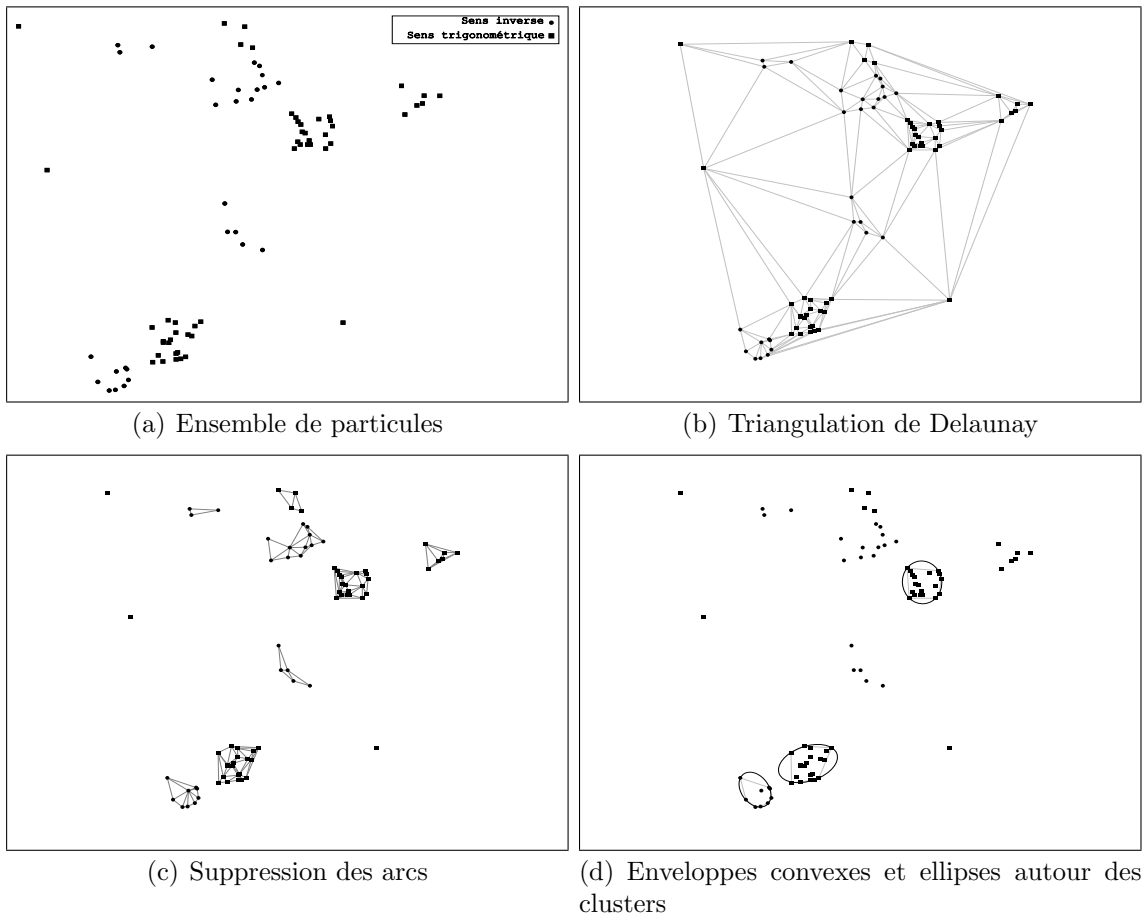


FIG. 3.5 – Détection des structures tourbillonnaires dans un écoulement turbulent

3.3.3 Gestion des organisations

Les structures détectées vont être réifiées et réintroduites dans la simulation, elles doivent de ce fait répondre à un certain nombre d'impératifs. Ainsi, il est nécessaire

qu'elles se comportent avec une certaine cohérence par rapport aux lois physiques propres à ce genre de phénomène et dans le même temps, elles auront des interactions bien précises avec le reste du fluide, aussi bien les particules de base que les autres tourbillons émergés. Elles feront preuve d'une certaine autonomie ce qui les distingue des particules constituant leur environnement. Cette autonomie est en particulier liée à la possibilité de se renforcer ou de s'affaiblir à causes des interactions et de maintenir une «membrane »(l'ellipse).

Au niveau de la physique les organisations détectées sont considérées comme des «grosses» particules, on peut donc calculer leur position, leur vitesse et leur vorticité par les équations 3.3, 3.4 et 3.6. Cela définit donc la partie du comportement régit par l'écoulement. Les structures tourbillonnaires vont devoir gérer leur stabilité en se renforçant, c'est-à-dire en absorbant des particules élémentaires, en s'affaiblissant en réduisant leur frontière et relâchant des particules élémentaires. Cette partie comportementale est gérée par un transducteur incarnant une description de type éco-agent [Ferber, 1995, Drogoul and Dubreuil, 1992].

Un transducteur est une machine abstraite qui peut être représentée à l'aide d'un graphe orienté. On part d'un sommet initial et on passe d'un sommet à l'autre en lisant sur une bande d'entrée un symbole, en allant ensuite sur le sommet prévu pour le symbole lu et pour l'état dont on part, et on écrit sur une bande de sortie un symbole d'un autre alphabet. Pour nos structures cela correspond à une action sur leur propre  tat. On définit, un traducteur de la façon suivante :

- Un alphabet fini Σ ;
- Un semi-anneau (K, \oplus, \odot) ;
- Q un ensemble fini d' tats ;
- $I : Q \rightarrow K$ l'ensemble des  tats initiaux ;
- $T : Q \rightarrow K$ l'ensemble des  tats finaux ;
- $\delta : Q \times \Sigma \times Q \rightarrow K$ une fonction de transition ;

Le 5-uplet $(\Sigma, Q, I, T, \delta)$ est un automate à multiplicité.

Soit Π un alphabet, $P(\Pi^*)$ l'ensemble des polynômes à coefficients entiers de mots du langage généré par Π , un transducteur est un automate à multiplicité dont le semi-anneau est $(P(\Pi^*), \oplus, \odot)$, avec \oplus correspondant à l'union et \odot à la concaténation.

Si l'on reprend le modèle d'éco-agent, il nous faut définir quatre  tats internes : la satisfaction, la fuite, la recherche de satisfaction et la recherche de fuite. Il nous faut également fixer des actions élémentaires de satisfaction ou de fuite et une fonction de perception des agents g neurs (c'est à dire les agents qui empêchent l'agent courant d'être satisfait ou de fuir) et enfin une fonction d'agression d'autres agents. Pour chacun de nos tourbillons nous appelons :

- Les  tats internes de l'éco-agent :
 - (S)  tre satisfait, état final ;
 - (SS) rechercher la satisfaction, état initial ;
 - (F) fuir ;
 - (SF) rechercher la fuite.
- Les fonctions de perceptions :
 - (A)  tre attaqué ;

- (I) percevoir des gènes.
- Les actions élémentaires :
 - (TF) fuir ;
 - (TS) se satisfaire ;
 - (TA) attaquer les agents.

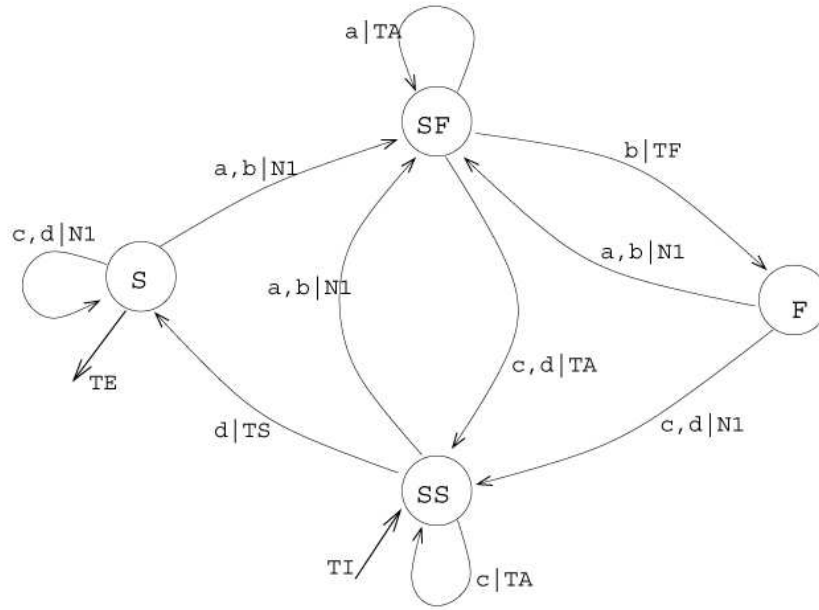


FIG. 3.6 – Transducteur codant un comportement d'éco-résolution

Soit donc le transducteur $(\Sigma, Q, I, T, \delta)$ suivant avec :

- $\Sigma = \{a, b, c, d\}$ l'alphabet d'entrée des perceptions, $a = (A, I)$, $b = (A, \bar{I})$, $c = (\bar{A}, I)$, $d = (\bar{A}, \bar{I})$;
- $\Pi = \{TA, TF, TS, TI, TE, N0, N1\}$ l'alphabet de sortie des actions élémentaires TI , TE , $N0$ et $N1$ sont des actions vides, elles n'ont pas de sens au niveau de l'éco-résolution ;
- $Q = \{S, SS, F, SF\}$ l'ensemble des états du transducteur ;
- $I : Q \rightarrow \Pi^*$ défini par $I(SS) = T1$ et $I(S) = I(F) = I(SF) = N0$;
- $T : Q \rightarrow \Pi^*$ défini par $T(S) = TE$ et $T(SS) = T(F) = T(SF) = N0$;
- δ défini par le transducteur de la figure 3.6.

Nous allons maintenant détailler les perceptions et les actions de nos structures.

Percevoir des gènes

Une structure perçoit des gènes, si une autre structure est suffisamment proche et se déplace dans la direction de la première. On définit la zone de perception autour de l'ellipse, c'est une homothétie de celle-ci d'un rapport plus grand que 1. On cherche alors une éventuelle intersection entre cette plus grande ellipse et les ellipses dont on veut savoir si elles gênent. On regarde également la direction de déplacement de la structure si elle

n'est que dans la zone d'interaction ; si les structures se touchent la perception de gêne est automatique (cf. figure 3.7).

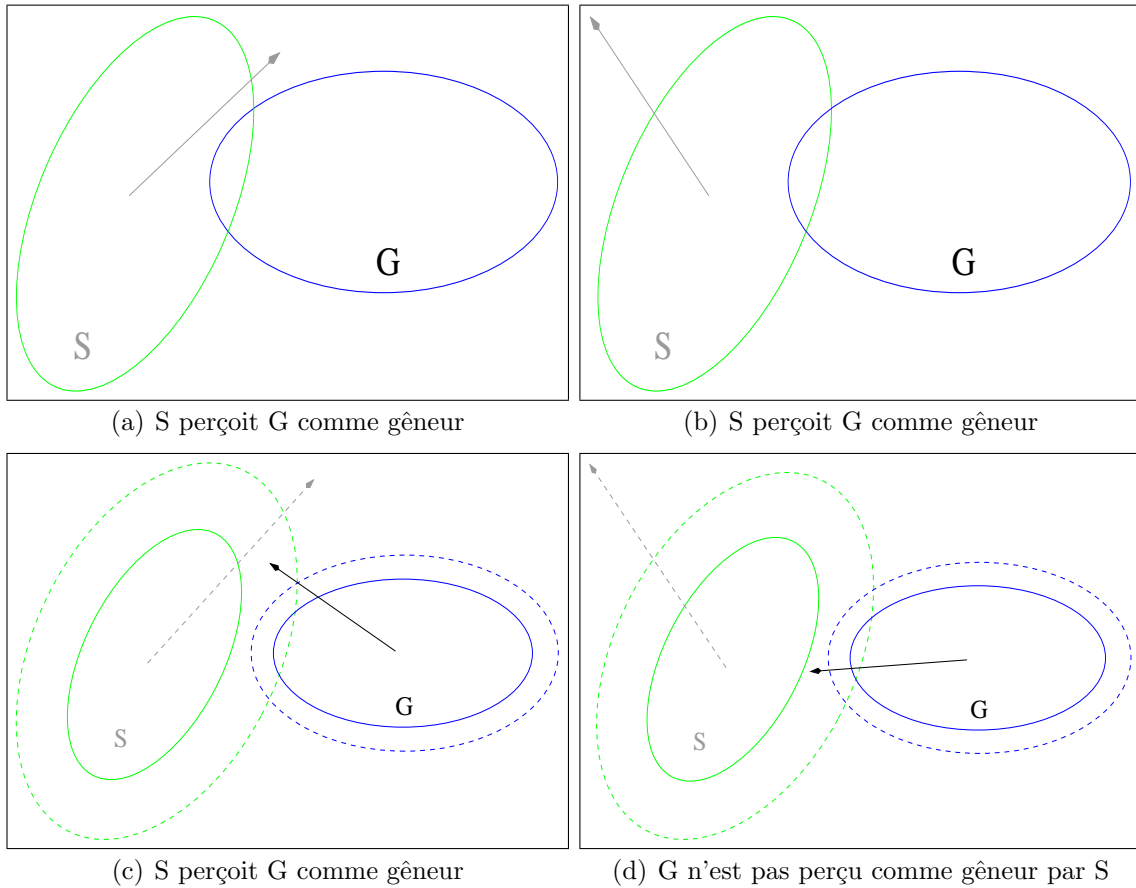


FIG. 3.7 – Différents cas de perception de gêne

Agresser d'autres structures

Cette action consiste simplement à envoyer un message d'agression à une structure qui a plus tôt été perçue comme gêneuse et de rotationnel opposé, ce qui pourra alors enclencher son action de fuite.

Fuir

Si la structure fuit, c'est qu'elle a été agressée, c'est-à-dire qu'un tourbillon de rotationnel opposé est proche d'elle et sur une trajectoire d'intersection. Pour gérer plus finement l'interaction mécanique, on génère donc de plus petits tourbillons (cf. figure 3.8) voire des particules qui nous permettront de calculer le résultat de cette proximité.

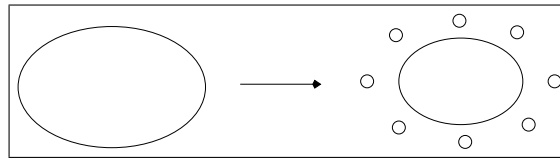


FIG. 3.8 – Fuite d'un tourbillon

Se satisfaire

Les structures détectées subissent les interactions des tourbillons et des particules, elles ne gardent pas une forme constante dans le temps. Elles peuvent se déformer, grossir ou diminuer voire disparaître. Nous avons déjà traité la décroissance par le comportement de fuite au niveau de l'automate d'écoulement, il nous reste à traduire la croissance. Cela correspond à la satisfaction. Cela s'effectue de deux manières :

- En agrégeant des particules de base ;
- En s'agrégeant avec une autre structure géométrique de même rotationnel.

Voyons tout d'abord le premier de ces deux cas. Si notre structure a dans son voisinage des particules de même rotationnel, ceci signifie probablement que la structure du fluide à laquelle notre tourbillon est censé correspondre est plus large que celui-ci. Il devra alors altérer sa forme pour se conformer de nouveau à la structure. Nous commençons par discrétiser l'enveloppe de l'ellipse, c'est-à-dire à générer des particules régulièrement espacées sur le pourtour de l'ellipse. Nous considérons alors les particules situées à l'intérieur de la zone de perception du tourbillon (incluant donc les particules récemment générées sur la frontière). On effectue une triangulation de ces particules et on détermine les arbres de recouvrement ayant pour racine les particules situées sur l'ellipse. On enlève les arcs trop longs ou reliant des particules de sens de rotation opposés. On s'intéresse de nouveau aux triangles dont les sommets sont au sein d'un même arbre (cf. figure 3.9).

On élimine enfin certains des amas obtenus en fonction de critères de compacité [80, 73]. Dans l'exemple figure 3.9, on rejettera ainsi les deux amas du haut et gardera celui de gauche. Il nous faut en effet éviter de déformer excessivement le tourbillon pour quelques particules, ainsi que de gêner celles qui pourraient donner un autre tourbillon voisin. Celui-ci, s'il s'éloigne, suivra alors sa vie de structure. S'il reste, il finira par fusionner avec le tourbillon lorsqu'il se satisfera lors d'une étape ultérieure.

Un tourbillon peut également fusionner avec ses voisins, en effet si deux tourbillons de même rotationnel entre en collision (cf. figure 3.10) on tente de les fusionner.

Pour chacune des deux structures, nous générons des particules sur la frontière de l'ellipse, afin de la discrétiser, et nous prenons toutes les particules se trouvant dans les zones d'interactions des deux structures, puis, nous calculons la triangulation de Delaunay sur cet ensemble de particules, comme le montre la figure 3.11.

Ensuite, à partir de la triangulation de Delaunay, nous recherchons des structures cohérentes denses suivant le processus expliqué précédemment. Nous pouvons avoir deux cas de figure :

- Un seul cluster a été trouvé (celui qui représente la fusion des deux structures) ;
- Aucun ou au moins deux clusters ont été trouvés.

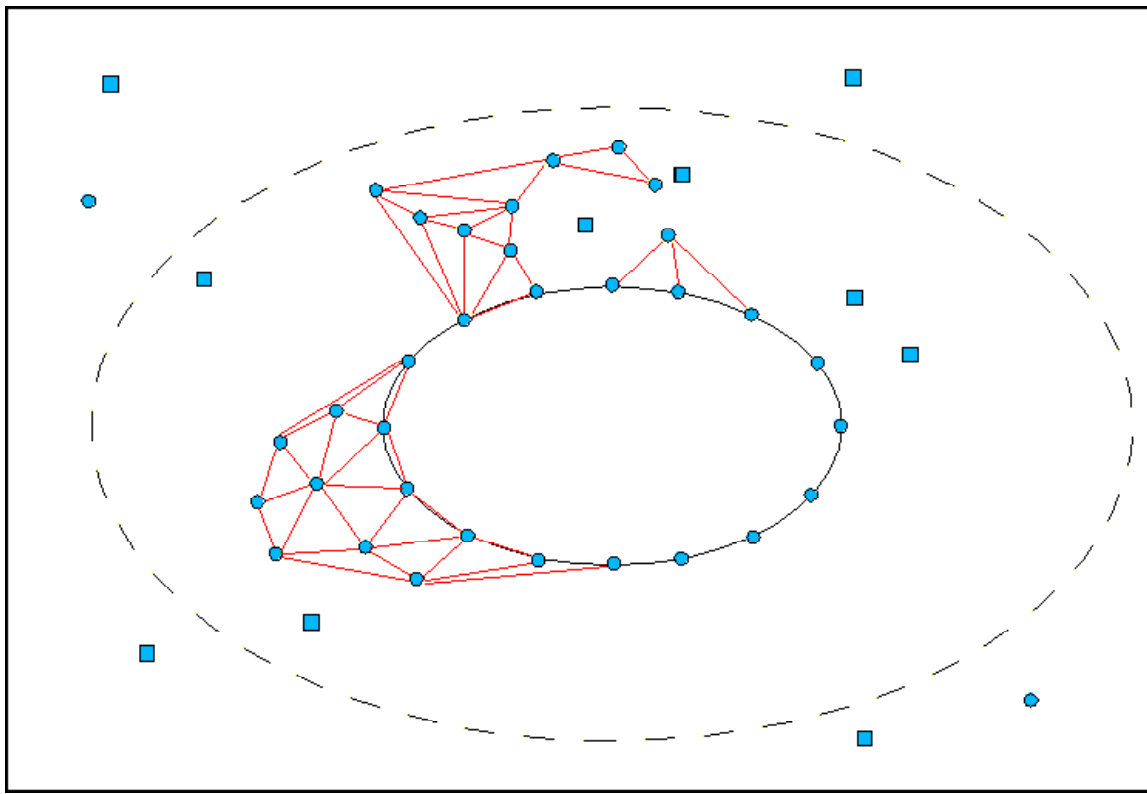


FIG. 3.9 – Agrégation de particules à une structure

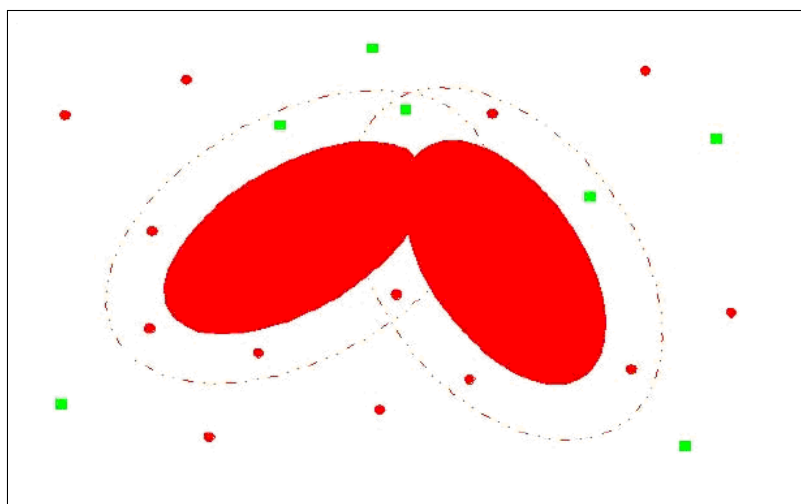


FIG. 3.10 – Collision entre deux tourbillons

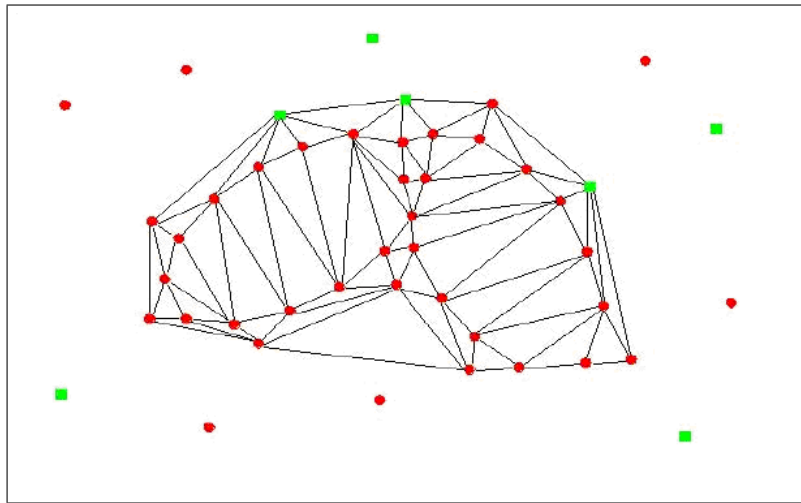
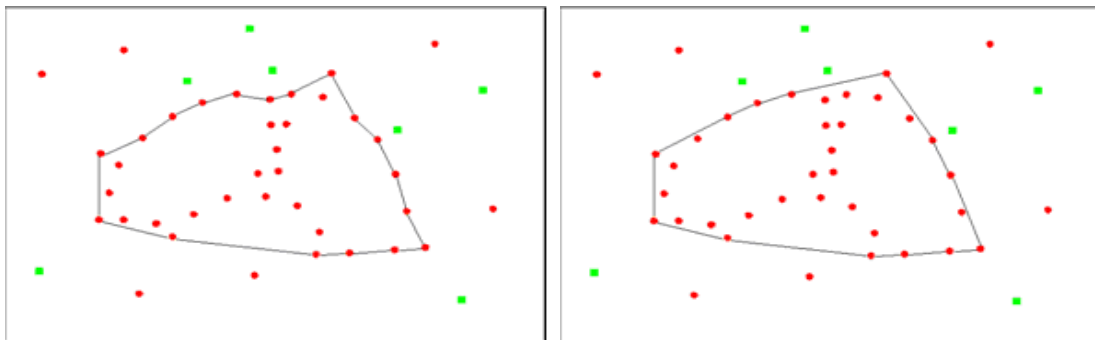


FIG. 3.11 – Triangulation de Delaunay sur deux structures en collision

Comme le montre la figure 3.12, nous calculons l'aire de l'ensemble des triangles issus de la triangulation de Delaunay et l'aire de l'enveloppe convexe. Sur cet exemple, nous pouvons remarquer que le rapport des deux aires va être assez proche de 1.



(a) Enveloppe

(b) Enveloppe convexe

FIG. 3.12 – Différents cas de perception de gêne

Ce cluster est formé des particules générées sur la frontière de chaque ellipse et peut aussi contenir des particules de même rotationnel que les structures se trouvant dans l'une des deux zones d'interactions. Enfin, à partir de l'enveloppe convexe du cluster, nous faisons une identification par une ellipse. Nous obtenons ainsi une nouvelle structure dont la vorticité est la somme des vorticités des deux structures et des particules absorbées. Les particules se trouvant dans les deux zones d'interactions des structures en collision qui n'ont pas été absorbées constituent les particules voisines de la nouvelle structure.

Voyons à présent ce qui se passe si on a trouvé aucun ou au contraire au moins deux clusters. Dans ce cas, l'ensemble composé des particules générées sur la frontière de chaque ellipse ne représente pas une nouvelle structure cohérente dense en formation. Nous

considérons donc ces deux structures comme entrant en conflit. Ainsi chaque structure applique-t-elle l'action «Fuir» jusqu'à ce qu'elles ne soient plus en collision.

Lois de la physique

Nous gérons donc la stabilité de notre structure ainsi que sa frontière, qu'en est-il de sa physique ? Elle se déplace comme une particule de vorticité placée au centre de l'ellipse (intersection des diamètres). Elle tourne autour de ce centre à une vitesse angulaire égale à la vorticité. Les particules voient donc ces tourbillons comme des particules, et leur trajectoire en est affectée en fonction des lois de Biot Savart que nous avons déjà évoquées.

Les interactions tourbillons, particules sont un peu plus compliquées. Nos structures absorbent les particules de même sens de rotation qu'elles et les lois de Biot Savart font que le vortex a tendance à repousser les particules de rotationnel opposé, mais elles ne garantissent en rien l'absence de contact, en particulier si la structure a un grand diamètre par rapport à sa vorticité. Si une particule tournant dans le sens opposé pénètre un tourbillon, on la dissipe et on baisse la vorticité du vortex d'autant. Cela conduisant éventuellement à sa dissipation.

Nous gérons dans la simulation certains obstacles non fluides, ceux-ci sont étanches et indéformables. Les obstacles implémentés sont soit plans (bord d'un écoulement par exemple) soit elliptiques, parce que ce sont les formes les mieux étudiées dans la littérature. Les obstacles ont une zone d'interaction qui les entoure, d'une manière tout à fait similaire à celle des tourbillons (cf. figure 3.13). Quand une entité porteuse de vorticité (particule ou structure) pénètre dans cette zone, l'obstacle génère une particule virtuelle, de vorticité de même valeur absolue mais de signe contraire à celle de l'entité entrante, située au symétrique par rapport au bord de l'obstacle de ce porteur de vorticité entrant (pour les structures on suppose une vorticité concentrée en son centre : c'est par rapport à celui-ci qu'on génère la particule virtuelle). L'introduction de ces particules virtuelles correspond à la matérialisation de la condition aux limites sur l'obstacle qui doit satisfaire à une composante normale (   la frontière) nulle pour la vitesse.

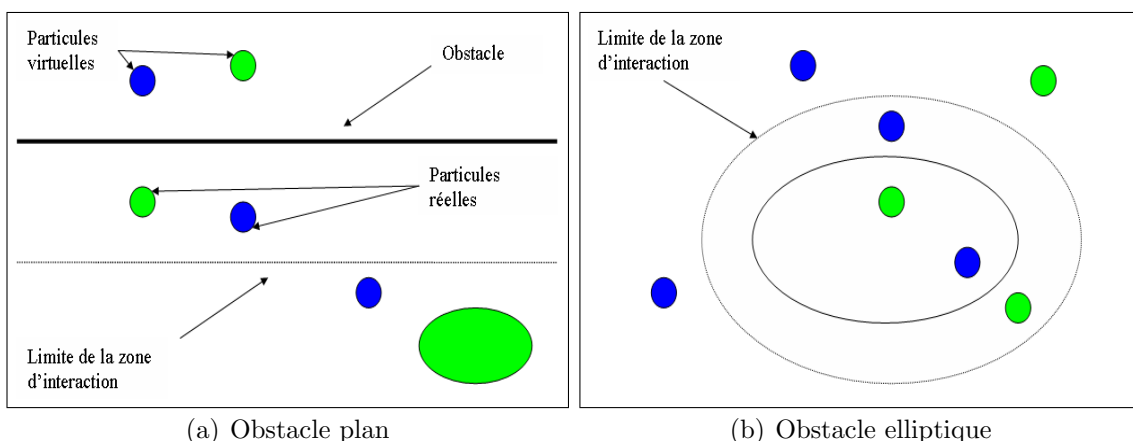


FIG. 3.13 – Obstacles

Un tourbillon g  n  rera comme on l'a dit une particule virtuelle importante destinée à

le repousser. Si néanmoins il reste sur une trajectoire de collision avec l'obstacle, celui-ci le fera fuir (au sens de l'éco-agent). Ceci se produit néanmoins peu souvent, les lois de Biot Savart faisant que deux particules proches de rotationnels opposés annulent la composante de leur vitesse colinéaire au vecteur qu'elles forment. Ainsi par exemple si une particule s'approche de l'obstacle plan, sa composante normale au plan sera annulée : la particule ou la structure auront ainsi tendance à «rouler» sur le plan. On observe la même chose sur un obstacle elliptique.

3.3.4 Changement d'échelle

Dans notre simulation, on peut considérer que deux types de changement d'échelle existent :

- Le premier qui consiste à agréger des particules en tourbillon ;
- et le second au sein des structures réifiées, qui consiste à les satisfaire ou les faire fuir comme on l'a précédemment décrit.

L'objectif de ces changements d'échelle est à la fois une meilleure compréhension du phénomène en cherchant les régularités mais également une réduction du coût de calcul. Nous avons donc couplé à l'algorithme de base un algorithme de code en arbre [Hernquist, 1987]. De plus le problème plus général de modélisation d'écosystème, nous laisse penser que cette méthode est généralisable aussi bien au niveau de l'écoulement qu'au niveau biotope. La perception doit donc pouvoir se faire au travers de cette représentation.

N-Tree

Si dans un premier temps on considère uniquement la physique, les particules et les structures peuvent être organisées de façon hiérarchique selon leur situation dans l'espace. Pour calculer l'interaction des N entités sur une entité x , on trie alors les entités voisines suivant leur distance et on regroupe les entités lointaines en structures plus massives afin de diminuer le nombre d'interactions à calculer. Les interactions individuelles ont donc lieu uniquement très localement et les autres sont approchées par une structure placée au barycentre de l'ensemble et interagissant comme la somme globale des interactions des particules la constituant. La hiérarchie est représentée sous la forme d'un arbre, ce type de méthode est à rapprocher des méthodes rapides particulières [Greengard and Rokhlin, 1987].

Maintenant au niveau de la simulation et de l'ensemble de ses entités, on cherche à permettre à ces dernières de percevoir leurs alentours d'une manière plus rapide que proportionnelle au carré du nombre total d'entité de la simulation. La représentation hiérarchique semble adaptée également, mais nous l'avons généralisée sous la forme *N-trees*. Pour fixer les idées commençons par un exemple. Soit un ensemble de particules $A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, L, M, O, P$ situées dans le plan de la façon figurant figure 3.14 cela peut être représenté hiérarchiquement sous la forme d'un arbre comme sur la figure 3.15.

La construction en est simple, les particules sont les feuilles de l'arbre et les nœuds divisent le plan. Ainsi le plan 1 (le nœud 1) est divisé en 4 parties 1.1...1.4 qui sont elles même éventuellement subdivisées ...

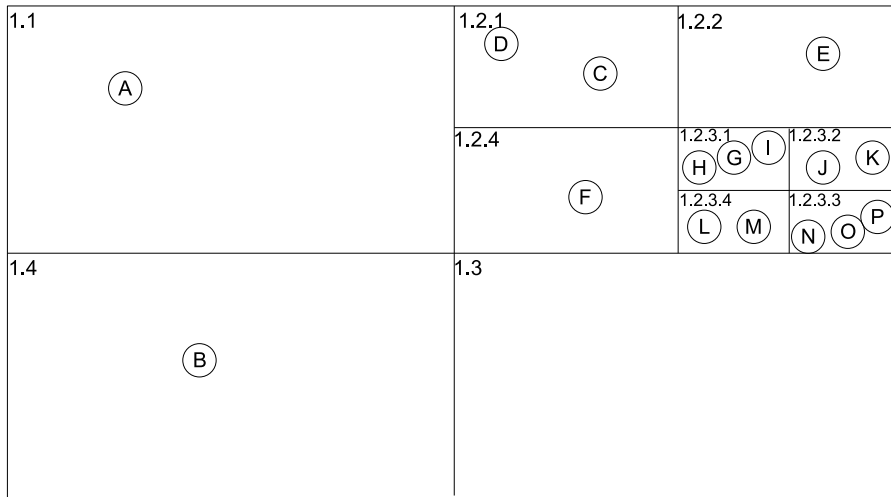


FIG. 3.14 – Division du plan sous la forme d'un 4-Tree de l'ensemble de particules

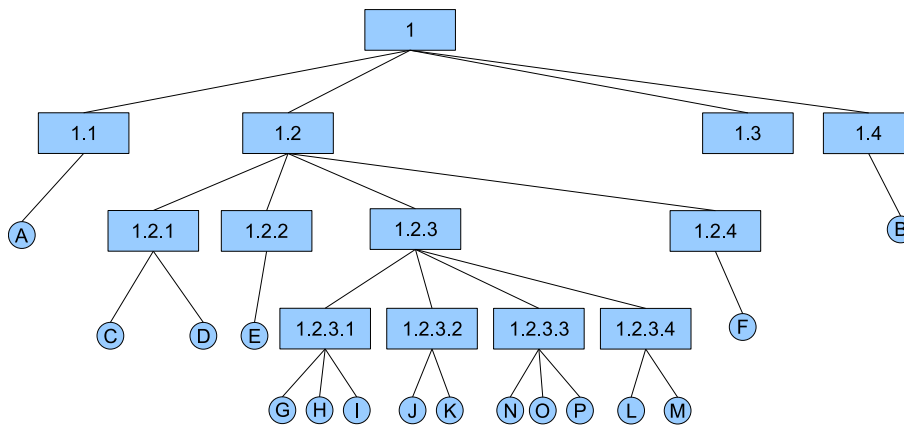


FIG. 3.15 – 4-Tree de l'ensemble de particules

Les N-trees sont une version adaptative de ces 4-trees. L'espace de simulation va être ainsi découpé en grilles imbriquées les unes dans les autres. Les nœuds de l'arbre hébergent chacun un certain nombre d'entités de la simulation, en fonction des coordonnées spatiales de celles-ci. Lorsqu'un certain seuil de population d'un nœud est atteint, on divise celui-ci en un certain nombre de sous-nœuds et inversement si la densité est trop faible on réduit l'arbre en supprimant des nœuds.

On peut voir une capture d'écran affichant ces grilles figure 3.16. On y devine la racine qui recouvre tout l'espace de simulation. En son sein on distingue des zones peu peuplées à gauche, dont les cases sont grandes, alors qu'une densité de particules en spirale entraîne une bien plus grande densité de cases autour du centre.

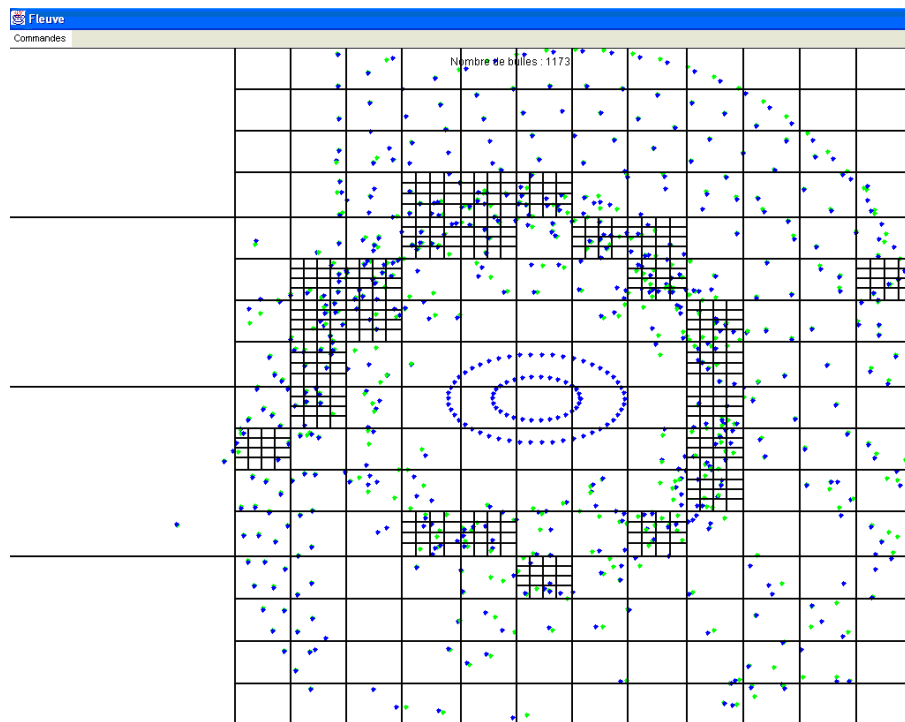


FIG. 3.16 – Exemple de N-Tree

Tant qu'une entité ne change pas de case, la gestion au tour par tour de celle-ci par le N-tree est peu coûteuse, puisque ne dépendant pas d'autres entités. Cette partie est donc de complexité algorithmique linéaire par rapport au nombre d'entités. Quand une entité change de case, il faut la ré-attribuer à une nouvelle case, ce qui se fait en un temps proportionnel à la hauteur de l'arbre.

Nous l'avons déjà dit on cherche à l'aide de ces N-trees à permettre aux entités de percevoir leurs alentours d'une manière rapide. Prenons pour nous en convaincre l'exemple d'une particule qui aurait besoin de connaître les particules «suffisamment» proches d'elle. La méthode brutale consiste en calculer la distance la séparant de toutes les particules, puis de ne conserver que celles qui soient à une distance inférieure à une certaine borne. La méthode que nous proposons consiste à rechercher les particules qui sont dans des cases suffisamment proches. On a alors un tri sur bien moins d'élément à faire. Concrètement, la

particule demande à la case qui la prend en charge de chercher ses particules voisines, en lui fournissant une définition numérique de ce voisinage. La case transmet alors la demande à la racine, qui recherche par subdivision les cases dont le centre est suffisamment proche de la particule. La recherche est rapide, car non seulement il y a un ordre de magnitude entre le nombre de cases et celui de particules, mais aussi parce que la subdivision élimine des branches entières de cases qui n'auront jamais à être explorées. La réponse est par contre heuristique, puisqu'elle dépendra de la finesse des cases. Néanmoins, plus l'entité a de voisines, plus la réponse est précise (car alors les grilles seront plus finement subdivisées), ce qui correspond à ce qu'on cherche. La figure 3.17 illustre ce procédé, dans un écoulement peu dense. La particule rouge plus grosse au centre du disque noir est la particule dont on cherche le voisinage. Le disque noir est l'ensemble des points du plan situés à moins de la distance recherchée. Les particules rouges sont celles estimées «suffisamment proche» par l'algorithme.

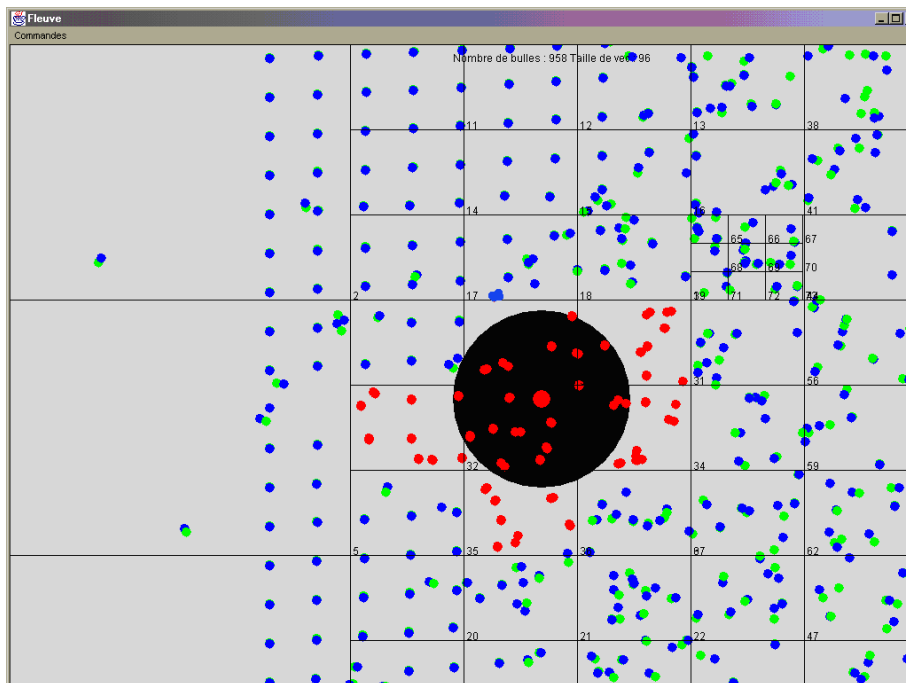


FIG. 3.17 – Voisinage à l'aide d'un N-Tree

Détection de structure dense

Que ce soit au niveau de la physique et ou niveau du vivant, les lieux où de nombreuses entités sont en présence sont des lieux où se produisent de nombreuses interactions et qui voient éventuellement des organisations émerger. La méthode que nous avons présentée précédemment peut permettre de mettre en évidence de tels phénomènes (cf. figure 3.18)

On cherche donc à identifier des groupes relativement compact d'entités denses dans l'espace de simulation, ou bien encore d'entités situées dans des régions de l'espace où les entités sont plus nombreuses que dans les régions les entourant. Une méthode intuitive

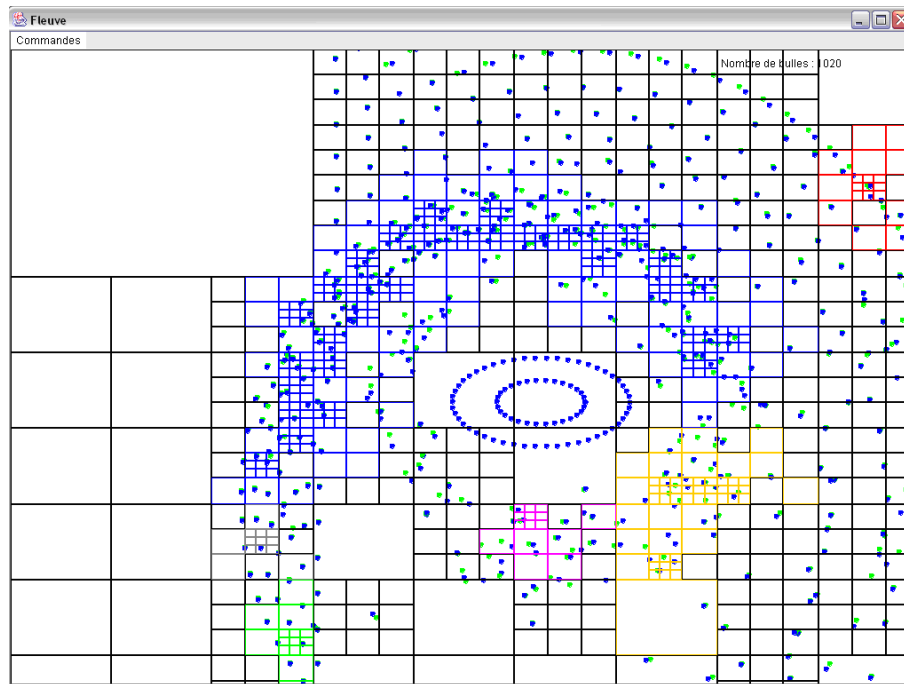


FIG. 3.18 – Détection de structure dense à l'aide d'un N-Tree

serait de rechercher les gradients de densité lorsqu'on en a besoin : on lui a préféré une méthode répartissant le travail sur la gestion au tour par tour de la simulation, plutôt que lors d'un pic de calcul. À chaque création de grille, celle-ci est inscrite dans une courbe de niveau correspondant à sa hauteur dans l'arbre. On se souvient de plus qu'une plus grande densité en entités de simulation entraîne une plus grande densité de grille : ces grilles sont donc plus hautes dans le N-tree. On a alors immédiatement les données de répartition de densité dans l'espace que l'on souhaite : les populations les plus denses sont dans les feuilles des courbes de niveau les plus hautes. Cela ne suffit bien sûr pas : toutes les entités appartenant à une population de même densité ne sont pas nécessairement membre d'une même organisation. On peut avoir des pics de densité simultanément à différents endroits de l'espace de simulation. Il reste ensuite à regrouper les entités au sein de leur courbe de niveau par leur proximité spatiale relative, grâce à un algorithme de clustering hiérarchique par agglomération adapté à la situation . Toujours à des fins d'efficacité, c'est la notion de distance de perception précédemment décrite qui est utilisée.

Cette détection de zone dense ou non dense nous permet de savoir s'il faut lancer la détection ou non de structures tourbillonnaires.

3.4 Simulation du biotope et de la biocénose

Tansley en 1935 définit un écosystème³² comme un système d'interactions qui s'établit entre la biocénose (l'ensemble des êtres vivants) et le biotope (leur milieu de vie). [Frontier and Pichet-Viale, 1998] traduisent cela par :

$$\text{Ecosystème} = \text{Biotope} \otimes \text{Biocénose}$$

Ils proposent \otimes (produit tensoriel) pour remplacer $+$, cette notation impliquant l'existence d'interactions entre les éléments ainsi liés.

Un écosystème est caractérisé par les points suivants :

- *Vision statique.* Les espèces ne sont pas réparties au hasard. Il existe des regroupements d'espèces animales et d'espèces végétales en fonction des paramètres abiotiques (non vivant) du milieu.
- *Temporalité.* Ces regroupements ne sont pas fixes et immuables dans le temps, ils évoluent et correspondent à des stades différents, aboutissant théoriquement à un climax³³, état final d'une succession écologique.
- *Interactions.* Les espèces végétales et animales ne sont pas «juxtaposées» au sein d'une association, des interactions (nombreuses) existent entre elles : chaînes alimentaires ; interactions abiotiques et biotiques.
- *thermodynamique (+ information).* Tous les liens entre abiotique et biotique sont quantifiables sur une base énergétique.

Il nous semble clair que pour modéliser un écosystème, il faut prendre en compte la dimension de système complexe. Les représentations centrées sur les individus (IBM) semblent bien adaptées. Elles permettent à la fois d'identifier des comportements typiques, les interactions et les organisations émergentes, le tout se développant dans un environnement vecteur des flux. Néanmoins si cette approche est riche et prometteuse, elle doit faire face à des aspects contraignants. En effet si un niveau de description fin peut sembler adéquat pour simuler le phénomène dans sa diversité, il peut rendre le modèle inexploitable. Une simplification trop grande, quant à elle, conduit à un modèle compréhensible, computable mais déconnecté du phénomène réel. De plus les données issues du monde réel sont souvent «non spatialisées» et agrégées, il peut donc être nécessaire d'utiliser à la fois des données globales et individuelles au niveau d'une simulation. C'est pourquoi notre approche est multi-niveaux et utilise des représentations mixtes (analytique et IBM). Nous modélisons à la fois des populations et des individus. La notion de compartiment ou environnement est présente et constitue des parties d'un même écosystème liées par des flux

³²«*But the more fundamental conception is, as it seems to me, the whole system (in the sense of physics), including not only the organism-complex, but also the whole complex of physical factors forming what we call the environment of the biome - the habitat factors in the widest sense. It is the systems so formed which, from the point of view of the ecologist, are the basic units of nature on the face of the earth. These ecosystems as we may call them are the most various kinds of sizes. They form one category of the multitudinous physical systems of the universe, which range from the universe as a whole down to the atom*» [Tansley, 1935].

³³État le plus stable dans les conditions existantes.

de matière et d'énergie. Les populations et les individus évoluent à des niveaux de description dans ces compartiments. Ils interagissent entre-eux et avec leur environnement, sont influencés par les caractéristiques propres de celui-ci qui rétroagit.

3.4.1 Modèle hybride holarchique compartimental

Afin d'éclairer notre propos, nous allons tout d'abord présenter différents concepts utilisés en écologie. Le premier concerne une classification usuelle en écologie des divers éléments qui constituent la biocénose des écosystèmes. Celle-ci se base en fait sur le rôle qu'occupe une espèce dans la dynamique globale de l'écosystème et plus particulièrement sur ce qu'elle consomme et ce qu'elle produit. Cette vision est bien sûr orientée pour mettre en avant la production des matières cruciales dans le fonctionnement d'un écosystème.

On peut ainsi diviser les espèces d'un écosystème [Frontier and Pichet-Viale, 1998] en trois catégories (cf. figure 3.19) :

1. *Les producteurs* : ce sont les espèces responsables de la production d'oxygène dans l'écosystème (que ce soit par photosynthèse ou chimiosynthèse³⁴). Ils produisent notamment leur propre matière organique à partir de matière inorganique et consomment des sels minéraux. On classe, par exemple, dans cette catégorie le phytoplancton.
2. *Les consommateurs* : ce sont les espèces qui se nourrissent de matière organique afin de constituer leur propre biomasse. Ils libèrent notamment de la sapromasse³⁵. On y trouve la majorité des prédateurs.
3. *Les décomposeurs* : ce sont des espèces qui produisent des sels minéraux en consommant de la biomasse ou de la sapromasse. On trouve dans cette catégorie les populations de bactéries qui décomposent la matière organique en suspension via des réactions chimiques à base d'enzyme.

On voit ici que la description est cyclique puisque les producteurs, les consommateurs et les décomposeurs sont liés par des relations de dépendance les uns vis-à-vis des autres, suivant ce qu'ils consomment et produisent. Cette classification n'est malgré tout pas suffisante ni complète mais constitue un moyen de cataloguer les espèces que l'on étudie vis-à-vis de leur activité. D'autres classifications existent s'attelant à mettre en valeur d'autres spécificités des divers constituants de la biocénose mais prennent en compte la nature de l'écosystème alors que celle que nous avons retenue s'applique à tout type d'écosystème et est basée sur la nature des interactions. Dans les écosystèmes aquatiques, on trouve notamment comme critère la position dans la colonne d'eau (benthos³⁶, supra-benthos³⁷...).

³⁴Production de matière organique par oxydation de substances minérales sans énergie solaire.

³⁵Matière organique morte et en voie de décomposition.

³⁶Organismes vivants en relation étroite avec le fond aquatique.

³⁷Ensemble des organismes à capacité natatoire capables d'évoluer dans la couche d'eau adjacente au fond.

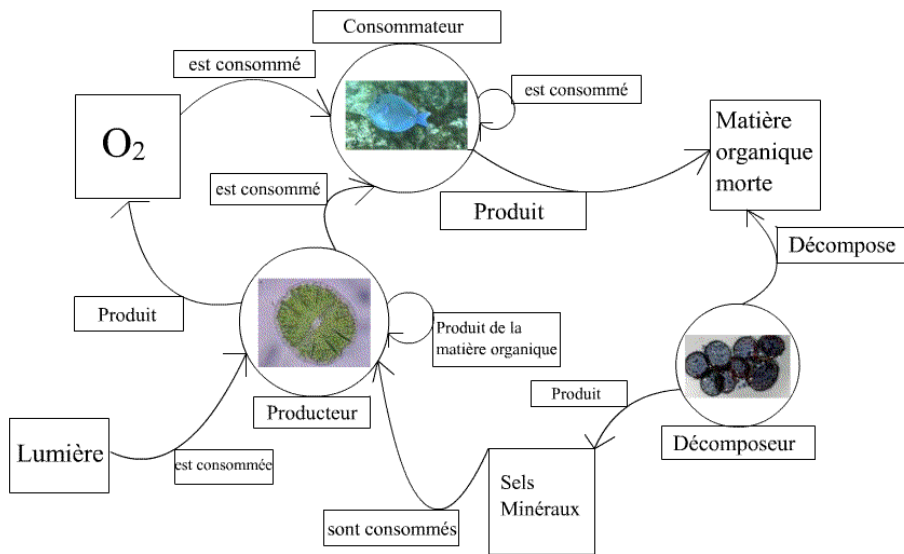


FIG. 3.19 – Les producteurs-consommateurs-décomposeurs et les relations les unissant

Les individus ont un état individuel souvent appelé *i-state*. Ces états sont en fait des descripteurs représentant les caractéristiques des individus d'une population ainsi les *i-states* les plus usuels sont le poids, l'âge, la taille.... Le choix d'un *i-state* dépend évidemment de l'étude que l'on souhaite mener. Le concept d'*i-state* a lui même induit celui de *p-state* [D. L. DeAngelis, 1992] ou état populationnel. Un *p-state* est donc toute caractéristique donnée d'une population. On constate donc, immédiatement, que les *i-states* et les *p-states* lient différents niveaux de description et vont nous permettre d'effectuer du changement d'échelle. Nous réinterprétons les deux notions de la façon suivante :

- Les *i-states* sont des descripteurs d'individus. Afin de passer de ces états à l'état de la population même, il suffit d'effectuer une somme pondérée de tous les *i-states* des individus ou classes d'individus de la population.
- Les *p-states* respectent l'hypothèse de mixage parfait d'une population. Ils représentent donc des valeurs moyennes ou correspondent à la somme des états de leurs individus. Un passage simple des *p-states* aux *i-states* consiste donc à attribuer à chaque individu une valeur moyenne dépendant de l'effectif de la population et de la valeur du *p-state*.

Par analogie et pour les besoins de notre représentation, nous introduisons également des *e-state* descripteurs de l'environnement (luminosité, taux divers, ...).

Une fois ce formalisme adopté, notre modèle d'écosystème se base sur les caractéristiques suivantes :

- Un système multi-niveaux : nous avons introduit longuement la notion de système précédemment (cf. 2.1), mais complétons en remarquant qu'un partitionnement des écosystèmes en terme de compartiments est souvent possible (cf. figures 3.20 et 3.21).

Chaque compartiment a alors ses caractéristiques propres mais liées aux autres car

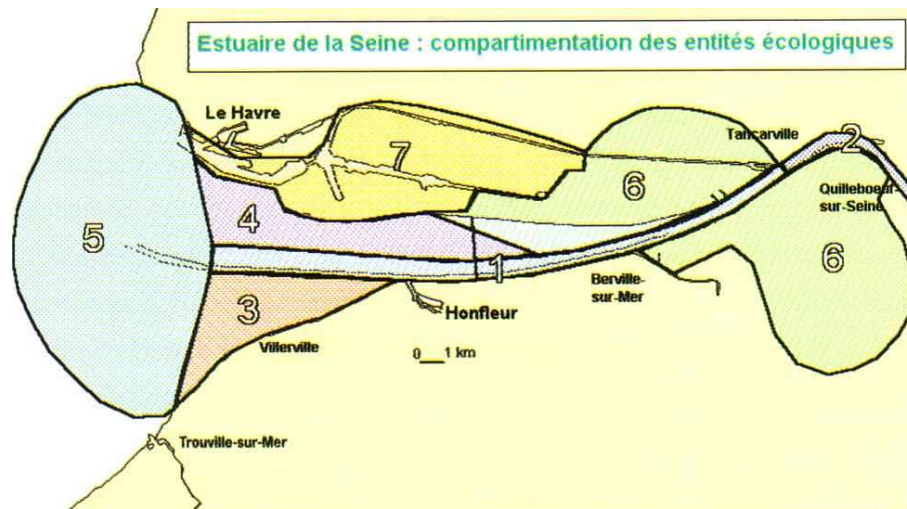


FIG. 3.20 – Les divers compartiments de l’estuaire de la Seine (d’après [Guézennec, 2000])

ils échangent des flux variés et partagent des dynamiques communes et fortement corrélées. Partant de ces constats quatre niveaux se dégagent, trois niveaux fixés a priori et un a posteriori :

1. Le niveau individuel : il constitue le grain le plus fin de notre modèle et se situe au niveau de l’individu (élémentaire) ou super-individu (agrégation d’individus) en tant qu’entité discrète.
2. Le niveau compartimental : il constitue un grain intermédiaire où l’on fixe des conditions environnementales particulières. C’est le niveau des **e-states** et **p-states**. On peut constater que cette notion s’étend de manière plus globale à celle d’environnement. En effet, un compartiment est juste une partie d’un écosystème présentant un **e-state** dont la valeur se différencie de celle des environnements voisins. Nous considérerons cet état comme homogène dans le compartiment et nous confondrons volontairement compartiment et environnement. Par exemple si on considère un écosystème aquatique on pourra le scinder en deux environnements en fonction de la luminosité, une zone permettant la photosynthèse et l’autre non.
3. Le niveau de l’écosystème : grain le plus gros, où interviennent les **e-states** les plus globaux. Il est à noter qu’un écosystème englobe des compartiments mais aussi des écosystèmes ce qui permet d’introduire récursivement des phénomènes environnementaux à des échelles temporelles ou spatiales particulières.
4. Le niveau système : contrairement aux niveaux précédents, celui-ci est fixé a posteriori et il constitue celui où l’on place les entités émergentes généralement obtenues à partir de **p-states** plus locaux.

Chacune de ces échelles agit bien sûr à une temporalité différente. Les variations des **i-states** étant généralement simulées sur un temps plus court que celui des

p-states et des phénomènes extérieurs agissant sur les e-states.

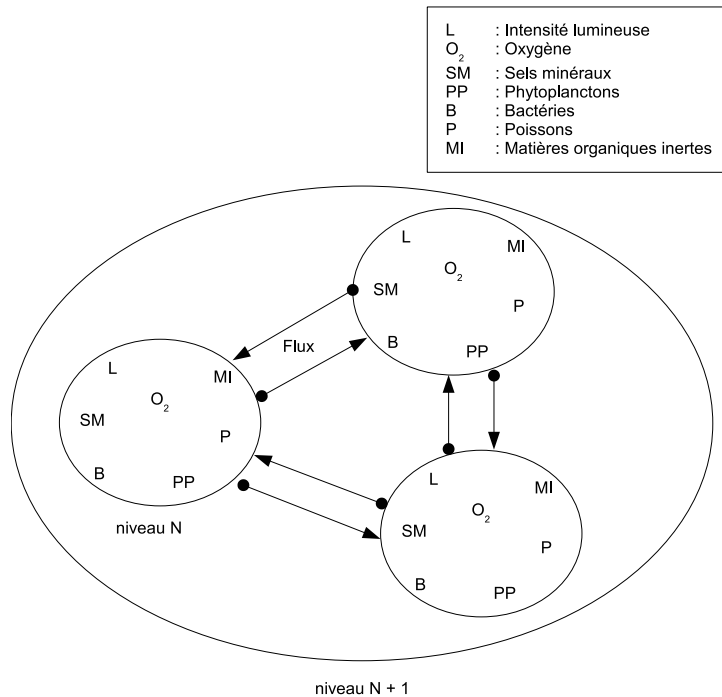


FIG. 3.21 – Écosystème holarchique composé de trois compartiments

Les différents concepts intégrés dans l'ontologie sont donc :

- Une description holarchique : nous considérons les interactions entre les éléments de tous les niveaux de notre système de façon holarchique. Chaque holon est à la fois un tout et une partie. Ainsi qu'il s'agisse de l'écosystème, d'un e-state, d'un individu ou d'une population, nous parlerons d'holon et modéliserons les possibles interactions entre chacun des niveaux qui, de toute façon, se répercutent de manière directe ou indirecte sur le reste du système.
- Un modèle hybride : chaque holon a des comportements qui traduisent en fait son évolution propre et ses interactions avec les autres holons. Ces comportements ne sont rien d'autres que des règles ou des lois traduisant sa dynamique. Au niveau des e-states, p-states et systèmes, on trouve des lois de type équationnel. Au niveau des individus, on trouve majoritairement des règles mais aussi des lois pour l'évolution des super-individus si nécessaire.
- Ouverture des systèmes : en introduisant à la fois les compartiments, les écosystèmes d'une part et les comportements d'autre part, notre modèle est en phase avec la notion d'ouverture puisqu'il permet de la retranscrire soit directement en modélisant des interactions entre les e-states des compartiments soit en influençant la dynamique des e-states de l'écosystème traduisant alors son interaction avec le monde extérieur.
- Diverses représentations de l'espace : la spatialisation du modèle dépend du niveau où l'on se place. L'espace physique, c'est-à-dire celui qui entre en jeu pour les in-

teractions locales, est placé au niveau individuel, on peut alors utiliser un espace global ou en tant que donnée de nos éléments. Les compartiments sont situés les uns par rapport aux autres suivant un espace topologique. On détaille donc les compartiments qui sont en relation et la nature de cette relation (surface d'échange, ...). Enfin, l'espace en général (c'est-à-dire sa configuration complète) est placé au niveau de l'environnement.

3.4.2 Ontologie du modèle

Pour définir notre ontologie correspondant au modèle d'écosystème hybride holarchique, nous avons utilisé Protégé [Protégé team, 2000]. Elle se base sur les concepts généraux suivants, que nous venons de décrire :

1. les holons ;
2. les modèles de comportements ;
3. les éléments spatiaux ;
4. les éléments temporels ;
5. les composants d'écosystème ;
6. les chaînes et réseaux.

Nous allons reprendre, maintenant chacun d'entre-eux.

Les holons

La classe holon (cf. figure 3.22) est atomique dans notre description elle est non décomposable. Un holon entretient des interactions directes ou indirectes avec d'autres holons.

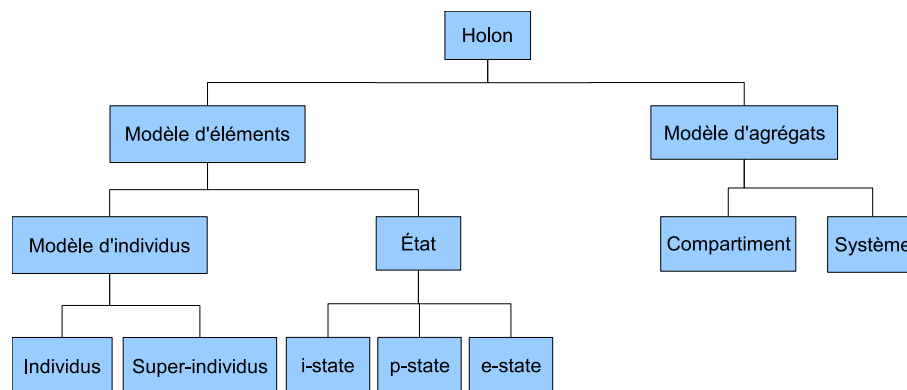


FIG. 3.22 – Classe holon

Deux classes héritent de la classe holon :

- Modèles d'éléments : le concept associé est celui d'un holon qui est un tout fini et non morcelable du point de vue du modèle. Il n'est pas utile ou envisageable de le décomposer en d'autres holons pour modéliser son évolution. Ils constituent les éléments les plus petits que l'on peut modéliser et apparaissent donc à l'échelle la plus fine d'observation de notre modèle. Ils se subdivisent en :

- ▷ Modèle d'individu : qui correspond à la représentation d'un être vivant décrit de manière discrète par un ensemble de **i-state**. Elle se subdivise en deux classes distinctes :
 - Individu : représente un individu discret en tant que tel.
 - Super-individu : ils sont semblables à des individus hormis qu'ils regroupent un certain nombre d'individus représentés alors de manière continue. Leurs états sont en fait une somme pondérée des états des individus qui les composent. De même, leurs comportements s'appliquent à la valeur des états plutôt qu'à un état en particulier. Ils présentent des comportements sous forme de lois ou de règles.
- ▷ Les états : ce sont des grandeurs caractéristiques, c'est-à-dire une valeur décimale représentant la quantité d'un élément ou d'une matière donnée (oxygène, carbone, ...) que l'on ne veut modéliser que par un objet mathématique ou autre... Cela englobe les notions de **i-states**, de **p-states** et **e-states** qui sont ses sous-classes.
- ▶ Modèles d'agrégats : ce sont des éléments dont la cohérence globale est évidente lorsque l'on se place à un niveau d'observation approprié mais qui sont faits de diverses parties (d'autres instances de classe héritant de holons en général). Ils ont à la fois des caractéristiques propres (**p-state** ou **e-state**) et des constituants (modèle d'individu). Ainsi ils présentent des liens de cardinalité (1-n) vers leurs parties qui sont de type Modèle d'agrégat ou Modèle d'élément (excepté **i-state**). On trouve plusieurs types qui constituent les sous-classes de cette catégorie :
 - ▷ Compartiments ou environnements : les compartiments sont des entités spatialisées, cohérentes suivant certaines caractéristiques. Ils mettent en jeu des constituants qui sont des modèles d'individus. Ces constituants influent et sont influencés par les caractéristiques du compartiment.
 - ▷ Systèmes : un système qualifie le rassemblement d'un ensemble de holons. Communément, c'est un ensemble de holons dont les dynamiques particulières aboutissent à une dynamique globale à une échelle d'observation plus élevée, celle du système. On peut donc les rassembler en une méta-entité émergente appelée système. Les critères de cohésion d'un système peuvent être multiples. Cela peut être un comportement commun comme dans le cas d'un banc de poissons ou des actions qui en se combinant aboutissent à un phénomène à un niveau d'observation supérieur comme dans le cas de structures émergentes. Dans nos applications, un système sera plus particulièrement un ensemble d'individus en interaction quasi isolé du reste des autres individus.

Modèles de comportement

Un modèle de comportement permet de définir l'évolution des états d'un holon. Cela peut très bien être une loi ou une règle qui sont fonctions de divers critères. Ceci orientera d'ailleurs leur classification. On trouve donc par exemple des modèles de comportements :

- Internes : ils ne prennent pas en compte l'extérieur mais juste les états d'un holon ;
- Externes : ils nécessitent une perception puis une action avec un élément du voisinage du holon. Leurs rapports avec les autres concepts de l'ontologie sont retranscrits par

la figure 3.23.

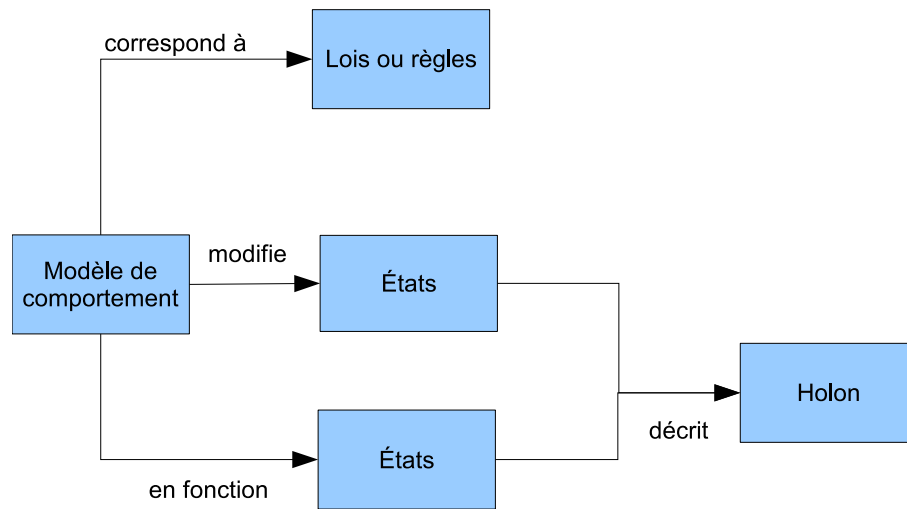


FIG. 3.23 – Rapport d'un modèle de comportement avec les autres concepts de l'ontologie

L'espace

Les holons peuvent être éventuellement situés et la notion d'espace est au centre de la notion de compartiment ainsi que de celle de modèle d'individu.

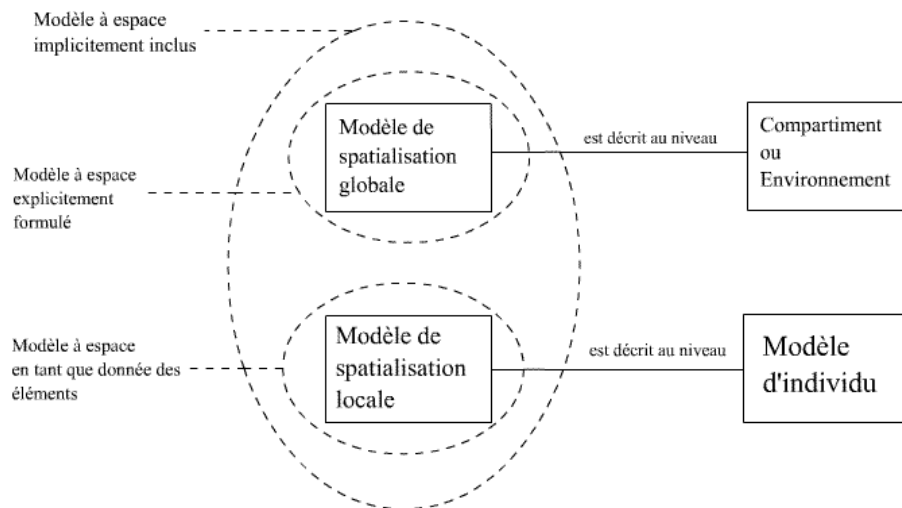


FIG. 3.24 – Placement des modèles d'espace dans notre ontologie

Nous plaçons l'espace à deux niveaux dans notre ontologie (cf. figure 3.24) :

- Modèles de spatialisation globale : on classe ici l'ensemble des abstractions d'espace qui sont utilisées en modélisation d'écosystèmes. Suivant les cas (type d'environnement) et les niveaux d'observation, les outils varient beaucoup. On trouve par

exemple l'espace continu, la grille, le voisinage... On classe ici les modèles d'espaces globaux. Cette spatialisation est décrite au niveau des environnements ou des compartiments ;

- Modèles de spatialisation locale : on classe ici les outils permettant de repérer une entité dans un espace particulier. Cette notion est connexe à la notion de modèle de spatialisation globale mais se rapporte aux individus. On trouve de même ici les espaces en tant que donnée d'un élément. Cette spatialisation est située au niveau des individus.

Les modèles de spatialisation nous permettent également de définir un voisinage.

Le temps

On introduit deux notions qui correspondent principalement aux notions temporelles fondamentales en écologie (cf. figure 3.25) :

- Date : estampille un instant précis et ponctuel dans notre modèle et dans une simulation et permet de situer un événement dans une chronologie.
- Période : laps de temps entre deux dates. On stocke aussi bien une durée que la manière de représenter la succession des dates de cette période. Cela permet de se focaliser sur les périodes significatives (phases, cycles ...).

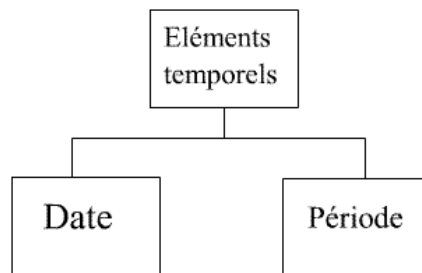


FIG. 3.25 – La classe éléments temporels et ses classes filles.

Les composants de l'écosystème

Cela permet de classer chacun des individus d'une simulation suivant leur rôle dans l'écosystème. On reprend ici le modèle général de Producteur-Consommateur-Décomposeur. On trouve donc trois sous-classes des composants d'écosystèmes :

- Les producteurs : espèces qui se caractérisent par une production de matière organique à partir de matière non organique. Comme on l'a décrit auparavant, il s'agit principalement des organismes responsables de la photosynthèse ou de la chimiosynthèse. Pour les différencier, il suffit d'observer ce qu'ils consomment et ce qu'ils génèrent sans même se soucier de leur comportement ;
- Les consommateurs : espèces produisant de la matière organique de manière hétérotrophe ;
- Les décomposeurs : espèces produisant entre autres des sels minéraux par décomposition de la matière organique présente dans leur environnement (par digestion

la plupart du temps). Ils participent à la décomposition de la nécromasse. Parmi ceux-ci, on peut citer les bactéries marines, les champignons...

L'intérêt réel de cette partie de l'ontologie est de permettre aux utilisateurs de démarrer l'instanciation de leur problème concret. Cette partie est incrémentable suivant la vision du spécialiste. Elle constitue ainsi une branche de l'ontologie destinée à permettre aux écologues d'amorcer le passage de leur cas réel à un modèle tout en pouvant réintroduire les concepts nécessaires à leurs études.

Les chaînes ou réseaux d'interactions

Un concept particulier introduit dans notre ontologie est celui de chaîne. Il représente en fait un réseau qui lie les holons entre eux en se basant sur un lien particulier les concernant. La classe chaîne est directement liée avec les instances de la classe composants d'écosystème et décrit plus particulièrement les liens représentant des interactions qui sont mis en valeur par ces classes.

Méta-modèle d'écosystème

Lorsque l'on instancie l'ontologie par rapport à un cadre d'étude concret, on obtiendra des modèles, agencés les uns par rapport aux autres à divers niveaux de description, correspondant aux éléments et entités de l'étude donnée. On obtient ainsi un modèle correspondant à cette étude et qui respecte les concepts de modélisation d'un écosystème que nous avons fixé. Nous avons défini un méta-modèle d'écosystème déclinable en modèle particulier suivant le problème considéré. Ainsi l'instanciation

- D'un holon, d'un modèle d'individu, d'un modèle d'agrégat et d'un modèle d'éléments n'est pas possible, ce sont des classes abstraites.
- De la classe individu ou super-individu ne donne pas un individu mais un modèle individu-centré correspondant aux individus d'une espèce de notre problème concret. Ce modèle d'individu d'une espèce respecte nos présupposés.
- D'un **p-state** ou **e-state**, nous donne un modèle permettant de représenter une population ou un état environnemental. Cela peut être par exemple un entier pour une population avec une évolution logistique (choisie lors de la sélection de ses modèles de comportement).
- De la classe Compartiment nous donne ainsi un modèle d'environnement décrit avec certains **e-state**, **p-state** et un modèle d'espace.
- etc ...

3.4.3 Mise en œuvre et résultat

Premier exemple

Nous avons proposé un modèle d'écosystème et par le biais d'une ontologie, créé un médium capable de communiquer celui-ci et surtout de l'appliquer à des problèmes concrets. Les modèles produits par l'instanciation de cette ontologie doivent eux-mêmes être mis en simulation afin de suivre l'évolution des divers phénomènes et entités mis en jeu. C'est le rôle de l'implémentation, le choix de définir une API java qui s'appuie sur le concept

d'objet actif migrable a été fait, en utilisant ProActive [Baude et al., 2000], pour plus d'informations on pourra consulter [77].

Le modèle et la simulation ont été étudiés afin de mettre clairement en évidence l'influence des interactions indirectes entre espèces d'un écosystème par le biais de leur environnement. Nous avons donc considéré un cas mettant en jeu uniquement deux espèces, l'une de proies (le phytoplancton) et l'autre de prédateurs (des poissons).

Pour cela, le problème est modélisé en utilisant un unique compartiment et obéissant aux règles suivantes :

- Le plancton croît en fonction de la photosynthèse et aboutit à la production de plancton supplémentaire une fois un certain niveau atteint.
- Les poissons se déplacent, ont un comportement de prédation qui leur permet de manger toutes proies dans leur rayon d'action à chaque pas de temps et ont une probabilité de mort. Chaque prédation provoque l'augmentation de leur biomasse. Ils se reproduisent une fois une certaine biomasse atteinte (et baissent alors leur biomasse).
- On utilise un compartiment ayant un taux de O_2 et une luminosité.

Ce problème est volontairement simple afin de pouvoir le comparer avec une modélisation de type Lotka-Volterra si l'on néglige les interactions locales. On a donc le système suivant :

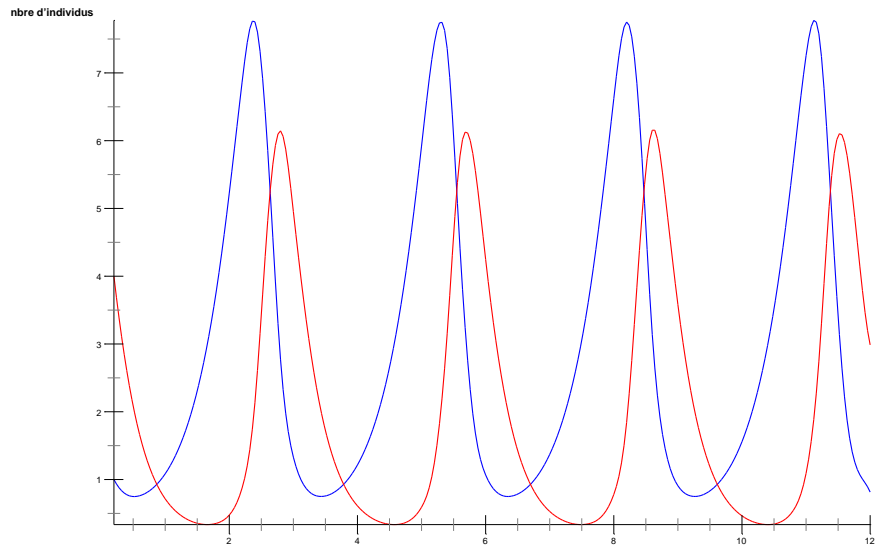
$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = aX - bXY \\ \frac{dY}{dt} = -cY + dXY \end{cases} \quad (3.10)$$

Qui conduit aux dynamiques bien connues en fonction des valeurs de a , b , c et d :

1. Prélèvement trop fort : extinction de la population de plancton et mort consécutive de celle de poisson ;
2. Prélèvement trop faible : croissance quasi exponentielle des deux populations ;
3. Prélèvement et reproduction équilibrés : phase entre les maxima et les minima des effectifs de planctons et de poissons (voir figure 3.26).

Avec notre modèle on aboutit quasiment aux mêmes dynamiques que celle du modèle différentiel, cependant on observe un phénomène de spatialisation. En effet, il arrive qu'un amas de plancton se trouve isolé alors que la prédation est trop forte. Il peut permettre alors au compartiment de retrouver une dynamique de croissance du plancton. Au cas où les prédateurs ne parviennent pas assez rapidement à trouver cet amas, ils disparaissent. Sinon, ils peuvent à nouveau se nourrir et ainsi de suite jusqu'à une éventuelle extinction définitive du système.

Nous avons ensuite introduit un facteur limitant la consommation en oxygène. Ainsi à chaque pas de temps les poissons doivent respirer, et s'ils n'y parviennent pas, leur biomasse est baissée de manière significative augmentant leur probabilité de mort si elle atteint un niveau trop bas.



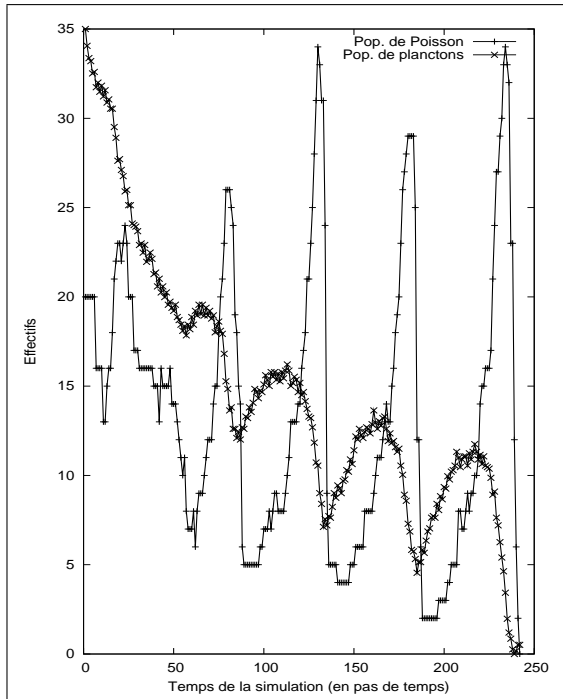
La courbe bleue représente les proies et la rouge les prédateurs. $a = 2, b = 1, c = 3, d = 1$ et $X(0) = 1, Y(0) = 4$.

FIG. 3.26 – Tracé classique d'un modèle proie-prédateur de type Lotka-Volterra montrant la phase entre effectif de proies et de prédateurs.

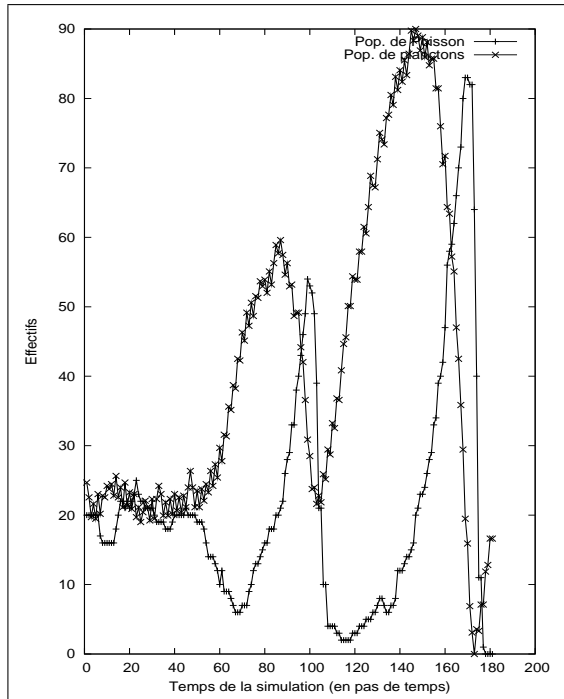
Les résultats que nous obtenons sont présentés sur les courbes 3.27(a), 3.27(b) et 3.27(c), en fonction du prélèvement des prédateurs.

Ces trois résultats peuvent s'expliquer de la manière suivante :

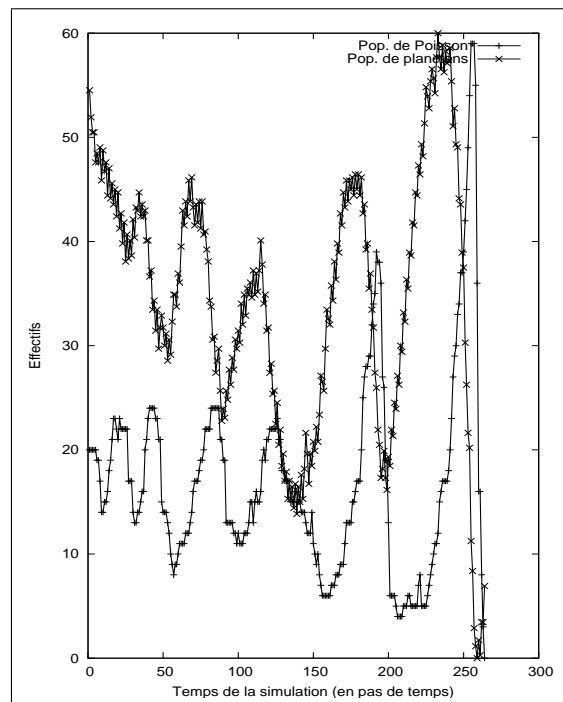
1. dans le premier cas (figure 3.27(a)), on constate que le prélèvement nettement trop élevé est contrebalancé par la rétroaction due au facteur limitant qu'est l'oxygène. Toute baisse trop critique du plancton entraîne à terme une baisse par mort due à l'asphyxie des poissons. Ceci permet alors à des foyers de plancton de se redévelopper ce qui induit alors une nouvelle expansion de la population de poissons. Malgré tout, on constate que chaque oscillation du phénomène induit une baisse du nombre moyen de plancton jusqu'à l'extinction. La perpétuelle baisse initiale de l'effectif de plancton vient d'une période où les poissons épuisent l'oxygène de leur compartiment et ne subissent donc pas la rétroaction ;
2. dans le deuxième cas (figure 3.27(b)), on constate que le système parvient à se maintenir dans un premier temps où production d'oxygène et oxygène déjà présent initialement dans le compartiment suffisent aux proies. Ensuite, on observe une chute de l'effectif de la population de poissons. Celle-ci provient de l'entière consommation de l'oxygène du milieu qui ne peut pas être contrebalancée par la production trop faible d'oxygène par le plancton. En découle une croissance exponentielle du plancton. Celle-ci induit un enrichissement très élevé du milieu en oxygène permettant alors un redéveloppement critique de la population de poissons. La prédation



(a) Prélèvement trop élevé.



(b) Prélèvement correct mais production de ressources critiques insuffisantes pour la proie.



(c) Prélèvement et production de ressource équilibrés

FIG. 3.27 – Modèle proies-prédateurs spatialisé avec une contrainte environnementale.

devient alors trop élevée entraînant finalement l'épuisement du système malgré une oscillation similaire au premier cas ;

3. dans ce cas, les données sont équilibrées (figure 3.27(c)). Les fluctuations sont d'ordre spatiale. Le système se maintient mais s'épuise à cause d'une explosion de la population de poissons et donc probablement de rencontres trop fréquentes entre proies et prédateurs.

Deuxième exemple

L'exemple que nous allons maintenant développer est un écosystème constitué de trois compartiments et trois espèces liées par des relations de prédation, de consommation et de production. Il étudie l'effet d'un *e-state* sur l'évolution simultanée de trois compartiments en relation. Il y a trois populations, deux de poissons et une de phytoplancton, dont l'activité et les relations sont résumé par les figures 3.28(a) et 3.28(b).

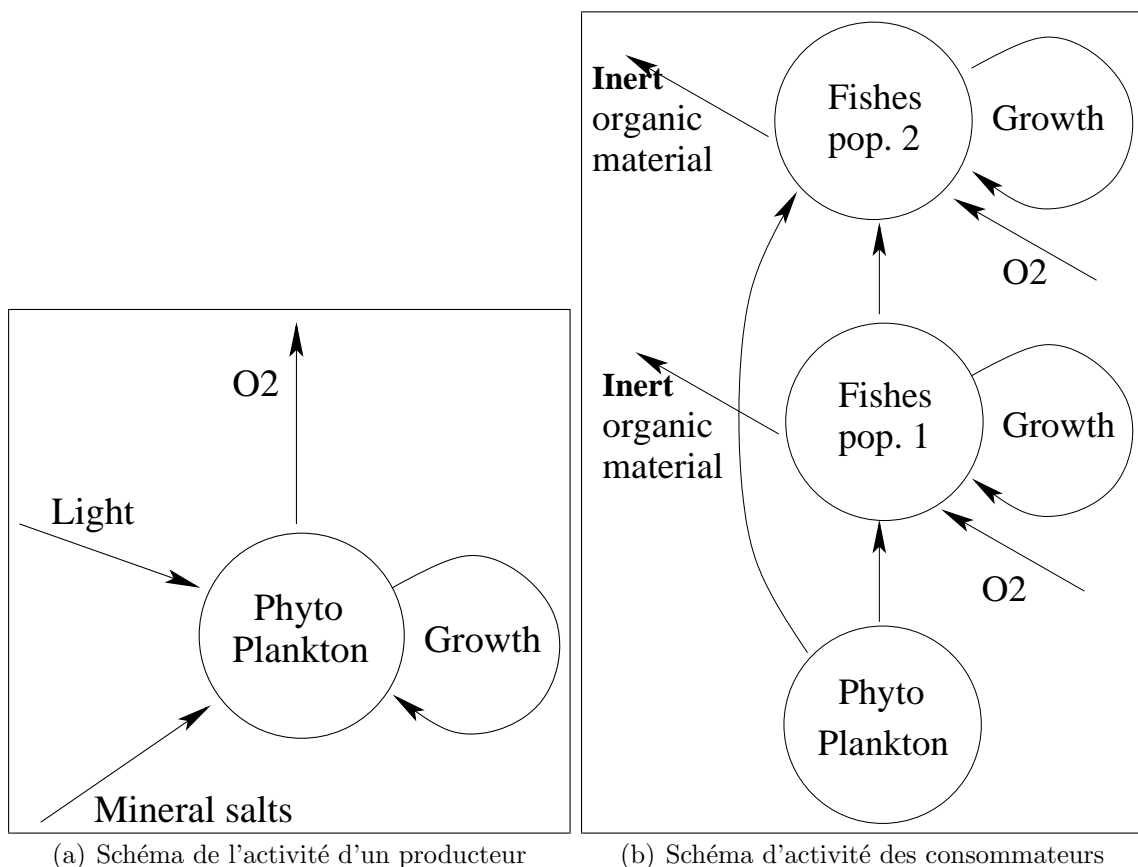


FIG. 3.28 – Producteurs-consommateurs

Nous modélisons :

- Le phytoplancton en tant que super-individu. Il a un unique **i-state** qui représente un niveau d'énergie. Sa production d'oxygène dépendra de la luminosité et des sels minéraux avec une relation affine (approximation possible tant que l'on ne dépasse pas le taux de luminosité optimal de production de O_2 par la photosynthèse [Pavé, 1994]). Elle est incorporée à un comportement de production effectué à chaque pas de temps. Le phytoplancton n'a pas de déplacement. Cette production augmente le niveau d'énergie. Un comportement de reproduction implique la genèse de nouveaux planctons si un certain niveau d'énergie est atteint (cette reproduction implique une baisse du niveau d'énergie). Ils sont situés via un système de coordonnées à deux dimensions.
- Les poissons en tant qu'individus. Ils consomment leurs proies respectives et assimilent une quantité de biomasse dépendant du nombre d'individus et de l'espèce des proies qu'ils ont ingérées lors de leur comportement de prédation. Ils se déplacent de manière aléatoire. Après une certaine période de temps et s'ils ont assimilé assez de biomasse, les poissons se reproduisent. A chaque pas de temps, ils ont une probabilité de mort et doivent respirer. S'ils n'y parviennent pas, leur probabilité de mort est augmentée. S'ils ne parviennent plus à respirer ou à se nourrir durant une période assez longue, ils migrent de compartiment (suivant les rapports entre compartiments). Ils sont situés via un système de coordonnées à deux dimensions.
- les compartiments ont pour **e-state** l'oxygène, la luminosité (critère d'homogénéité) et les sels minéraux. Ils échangent de l'oxygène tous les dix pas de temps en fonction du pourcentage de contact entre eux, ceci est retranscrit via un comportement. Le taux de sels minéraux évolue suivant une loi discrète. Leur espace est un espace continu à deux dimensions.
- l'écosystème présente un espace discret représentant un réseau qui décrit les liens entre les compartiments avec leur surface de contact.

De nombreuses simulations avec des conditions de placement initiales des individus, de rapport entre les compartiments et de luminosité des compartiments aléatoires ont été réalisées permettant de dégager diverses évolutions caractéristiques possibles de chacun des compartiments :

- Stabilité des compartiments : dans ce cas-ci, le compartiment présente une certaine stabilité dans les effectifs des trois populations. Une baisse de la population de phytoplancton entraîne dans ce genre de compartiment le report de la prédation des poissons de la population 2 sur ceux de la population 1. De même une migration d'une partie des deux populations vers d'autres compartiments s'opère si l'oxygène vient à trop manquer. Cela permet alors à la population de plancton de se redévelopper, ce qui implique consécutivement l'augmentation des effectifs des deux populations de poissons à nouveau. Ce cas se rencontre lorsque la luminosité est forte permettant un développement rapide du plancton. Il a aussi été observé lorsque les apports en O_2 des autres compartiments étaient importants.
- Quasi disparition de la population de plancton : ce cas s'opère lors de luminosité forte et d'apport extérieur en O_2 suffisamment fort pour annuler la rétroaction {consommation de O_2 par les poissons, production de O_2 par le plancton}. Il reste parfois des amas de planctons isolés des prédateurs dans l'espace. La population de poissons 2 survit alors tant que la population de poissons 1 n'a pas disparu. Au final,

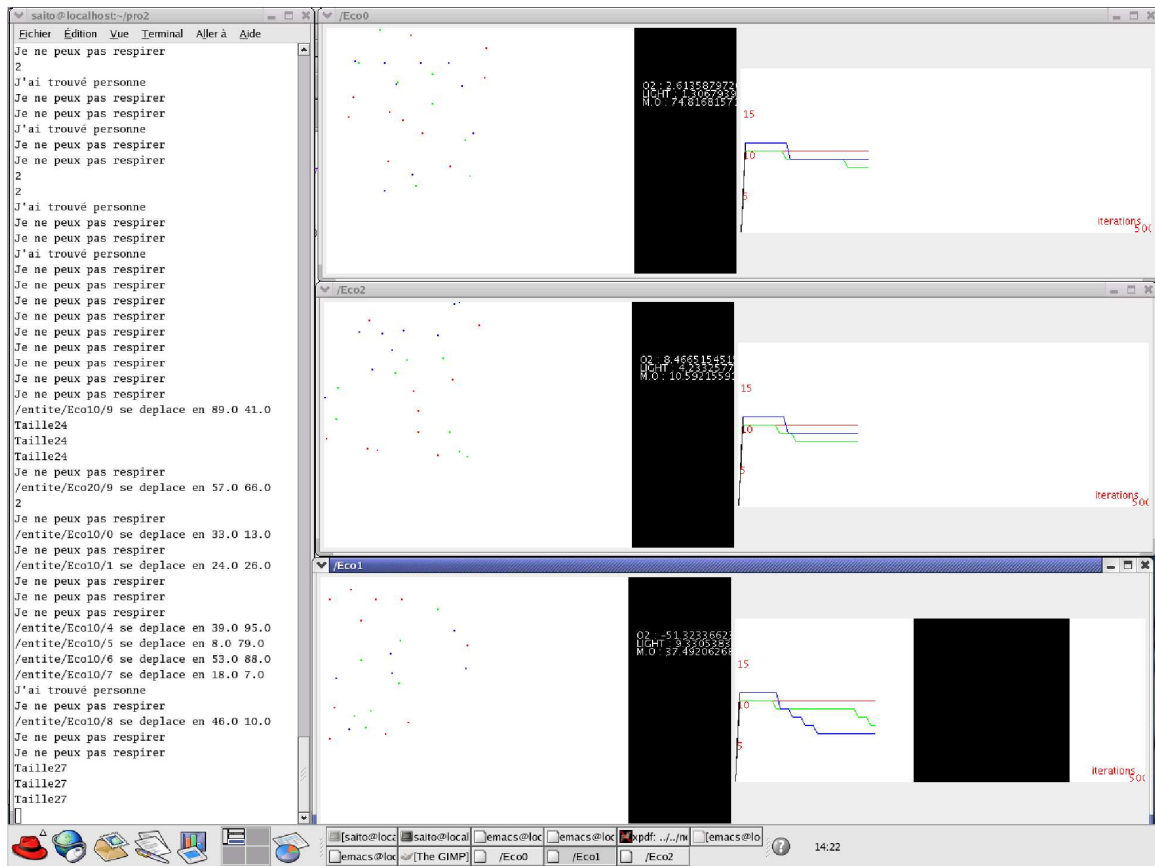


FIG. 3.29 – Les trois compartiments et leur évolution

- le compartiment voit sa population le quitter pour migrer vers des compartiments contenant des proies. Ceci peut aboutir aux deux cas qui vont être décrits ensuite.
- Compartiment mort : plus aucune espèce.
 - Écosystème renaissant : une souche de plancton isolée a survécu. Elle se développe alors plus ou moins vite en fonction de la luminosité. Ce compartiment fournira alors ses voisins grandement en oxygène, dans l'attente d'un repeuplement par des poissons voisins.

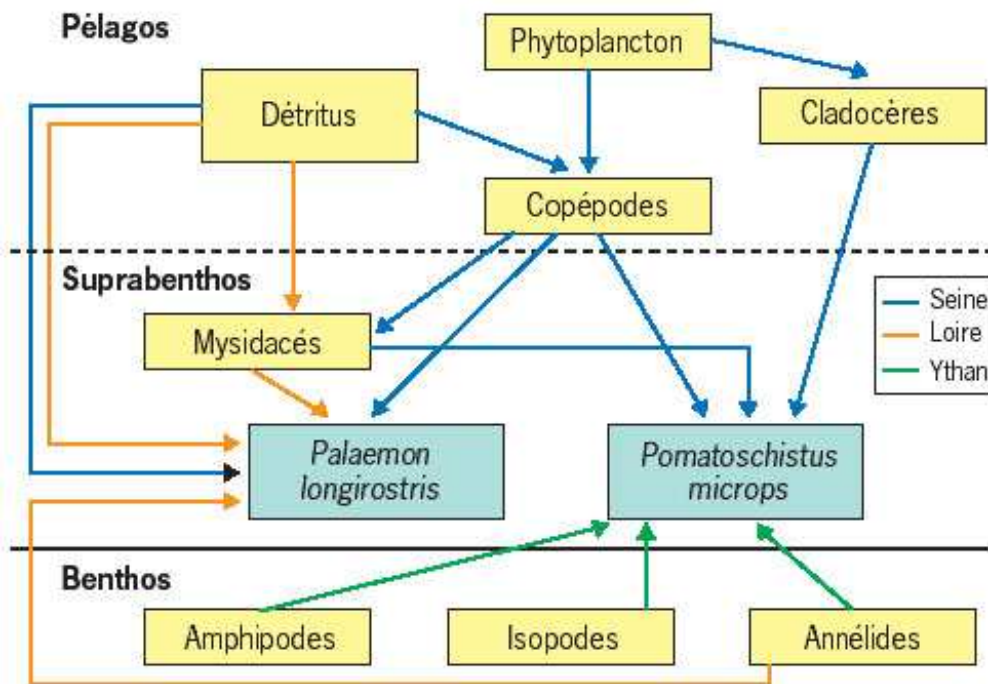
3.4.4 Détection et gestion des organisations

Nous disposons donc d'un modèle pour étudier le réel et d'un outil pour le simuler. Les écosystèmes sont des systèmes complexes dans lequel on voit apparaître des phénomènes émergents et des organisations. Nous allons nous attacher à les détecter et les réifier éventuellement, dans une démarche soit d'acquisition de connaissances et/ou de réduction de complexité calculatoire. La première consiste donc à détecter des réseaux d'interactions (par exemple des chaînes trophiques particulières) et la seconde à effectuer du changement d'échelle en fonction de l'évolution des éléments de la simulation. Dans les deux cas c'est le réseau d'interactions qui est analysé.

Détection des réseaux trophiques

Un des problèmes critique en écologie est la compréhension des divers réseaux d'interactions entre espèces d'un même écosystème. Un des réseaux les plus souvent étudié est la chaîne trophique qui répond à la question : «qui mange qui?». L'étude de la complexité structurelle d'un écosystème passe par l'analyse de la structure du réseau trophique. D'autre part il y a autant de réseaux trophiques que d'écosystèmes puisqu'ils sont influencés par l'environnement global. Diverses conditions de salinité, températures ou autres ainsi que des barrières physiques peuvent en effet empêcher deux espèces d'être en rapport. Donc, la connaissance de la chaîne trophique d'une espèce dans un écosystème ne nous permet pas de connaître celle qu'elle aurait dans un autre écosystème. Au mieux, on ne peut qu'émettre des suppositions quant à la place qu'elle pourrait occuper d'autant qu'elle sera aussi soumise à des interactions avec d'autres espèces ne se trouvant peut-être pas dans son écosystème d'origine. Ainsi, il est impossible de prévoir quelle sera réellement la place dans le réseau trophique d'une espèce dans un écosystème comme le montre une étude comparative réalisée sur le régime alimentaire du gobie tacheté dans l'estuaire de la Seine et celui de l'Ythan en Écosse [Dauvin, 1999]. Celle-ci montre que dans le premier cas, cette espèce se nourrit sur le compartiment planctonique de la Seine et dans l'autre sur les compartiments benthiques ou supra-benthiques (c'est-à-dire sur un niveau trophique plus élevé). L'anthropisation de l'estuaire de la Seine en est la cause, en effet elle a réduit les contacts entre le gobie tacheté et ses proies préférentielles (benthos et supra-benthos) dont il se nourrit généralement (voir figure 3.30).

Une interaction entre deux holons est la résultante d'un comportement qui s'est exécuté avec succès entre une entité source du comportement et une entité cible qui se trouve dans son entourage. La prédation n'est rien d'autre qu'un comportement de recherche de proie, absorption de la proie qui se déroule avec succès décrit sous forme de loi ou sous



D'après [Dauvin, 1999].

FIG. 3.30 – Régime alimentaire du gobie tacheté *Pomatoschistus microps* dans l'estuaire de la Seine et de l'Ythan ainsi que de celui du bouquetin *palaemon longirostris* dans l'estuaire de la Seine et de la Loire

forme de règle. A chaque comportement de ce type, l'entité responsable du comportement envoie un message à un objet spécial de la simulation qui enregistre alors l'interaction correspondante. Le message contient à la fois l'identité de la source et de la cible de l'interaction, leur espèce et une valeur représentant l'influence qu'a eue cette interaction sur la source. Dans le cas très particulier de la prédation, cette influence est égale à la biomasse absorbée par la source.

Un graphe valué est alors constitué, il contient un ensemble de noeuds N (les espèces de la simulation) et un ensemble d'arcs valués A (les relations de prédation entre elles avec pour valeur le total de la biomasse de proies absorbées de la manière suivante :

- Si l'espèce de la source (respectivement de la cible) n'est pas présente dans l'ensemble N , on l'ajoute.
- Si un arc incident à l'espèce de la cible de l'interaction et ayant pour destinataire l'espèce de la source de l'interaction existe dans A , on y ajoute la biomasse absorbée par la source.
- S'il n'existe pas dans A d'arc incident à l'espèce de la cible et ayant pour destinataire l'espèce de la source de l'interaction, on en crée un avec pour valeur la biomasse absorbée par la source et on l'insère dans A .

Le graphe $\{N, A\}$ évolue en fonction du temps et permet de comparer à la fois la représentation dans l'espace de nos éléments et l'évolution des **e-state** de l'environnement. Ce mécanisme fonctionne aussi bien quelle que soit la nature du holon (c.a.d des individus, des super-individus ou des populations) et de ses comportements. Ce mécanisme a été testé plusieurs fois sur la simulation du deuxième exemple décrite précédemment en 3.4.3 donnant ainsi l'évolution de chaîne trophique décrite dans la figure 3.31 qui nous montre plus particulièrement une évolution de la chaîne trophique résultant d'une raréfaction des individus de *Poisson2* et de plancton dans le voisinage de ceux de *Poisson1*.

Cette méthode est applicable à d'autres problèmes, comme les chaînes de contamination par exemple. En effet, considérons un problème spatialisé de contamination. On dispose d'un écosystème dans lequel on trouve des points sources de contamination. La contamination se répand par exemple suivant un modèle de diffusion. Les espèces traversant les zones contaminées absorbent une certaine quantité de contaminant dépendant de leur physiologie, c'est la bioconcentration. Elles transmettent cette contamination à leurs descendants. De même, les espèces absorbent par prédation des espèces pouvant être contaminées. Elles assimilent alors une partie de la contamination de leur proie en fonction, une fois de plus, de leur physiologie, c'est la bioamplification. Le graphe contiendra les espèces et le contaminant.

3.4.5 Changement d'échelle

Ce que nous avons présenté correspond à un modèle mixte capable à la fois de mettre en jeu des populations représentées sous forme individu-centrée (au sens large) et populationnelle. Nous allons utiliser cette mixité en cours de simulation, lorsque cela est possible, en repérant les holons dont la description est devenue inappropriée du fait de l'évolution en changeant cette description. Il faut donc être capable de détecter ce fait et de changer de niveau de description, on retrouve donc la thématique déjà développée dans 3.3.3. Cela revient à détecter des organisations et pour cela on va construire le graphe (valué) des

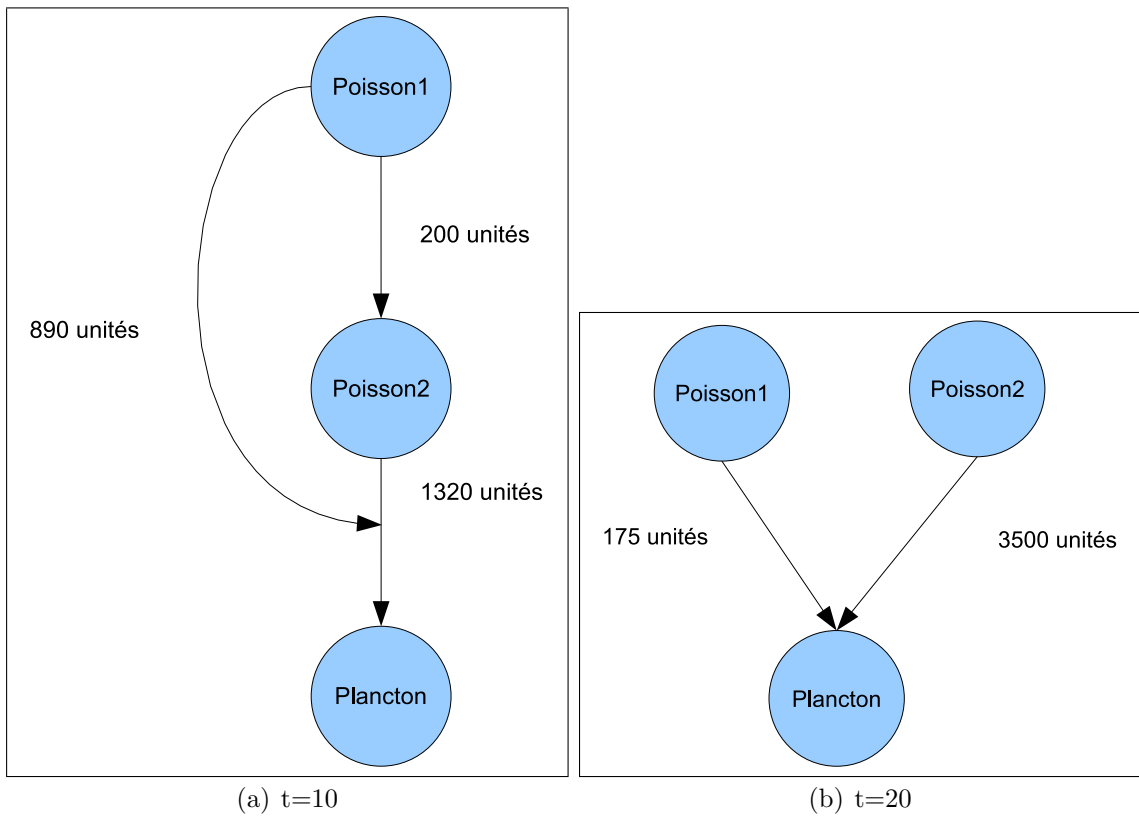


FIG. 3.31 – Évolution de la chaîne trophique d’une simulation impliquant trois populations pour un compartiment donné

interactions (pour plus de détails, on pourra se référer à [77]) entre les holons et à partir de celui-ci détecter les situations suivantes :

1. Plusieurs individus d'une même espèce se retrouvent «piégés» à un endroit de l'espace où ils n'interagissent plus qu'avec des super-individus de manière similaire. Ils développent alors un comportement équivalent tout en restant dans un même voisinage (celui des super-individus avec lesquels ils interagissent) et ne diffèrent que par la valeur de certains de leur *i-state*. L'ensemble des calculs locaux des comportements des individus sont ré-effectués autant de fois qu'on a d'individus dans cette situation alors qu'ils présentent un comportement local similaire (interactions équivalentes avec les mêmes holons).

Ils seront alors regroupés en un super-individu.

2. Des groupes de super-individus interagissent constamment les uns avec les autres en constituant un système disjoint du reste du système. Le système est ouvert il ne reçoit d'énergie que de son environnement (voire ponctuellement de son entourage local). L'intérêt de modéliser chaque partie de ce système est moindre puisque le réseau d'interactions de ce système est invariant. Les comportements se répètent et ont pour acteurs les mêmes holons.

Ils seront agrégés en une entité système les décrivant au niveau populationnel, gérée par une loi de type Lotka-Volterra.

3. Un individu (ou super-individu ou groupe d'individus) n'interagit plus qu'avec les données de son environnement et ne présente donc plus d'interactions locales avec d'autres éléments ou entités de notre système. La projection du holon dans l'espace est alors inutile.

Il sera géré au niveau populationnel avec l'ensemble des autres individus présentant une caractéristique analogue.

Si l'on considère le premier cas cité, on cherche donc à regrouper des individus (ou super-individus) en un même super-individu unique. Dans ce cas, deux changements de représentation ont été mis en place. Soit on regroupe uniquement les individus (ou super-individus) aux états quasi-similaires et on constitue les états du super-individu à partir de la somme (pondérée ou non) des états des individus. Soit on constitue des super-individus dont certains états sont similaires et d'autres différents et séparés. Dans ce dernier cas, leur traitement est individualisé.

Ce type de méthode a été testée par exemple avec deux populations, la première constituant les proies et la seconde les prédateurs. Les résultats (cf. figure 3.32) nous montrent une accélération conséquente sans conséquence réelle sur la trajectoire de la simulation si l'on considère la biomasse présente dans le compartiment considéré.

Dans le deuxième cas, on regroupe des super-individus (qui sont de nature ou espèces différentes) dans un système géré par des lois d'évolution. Dans notre exemple, nous essayons de rassembler proies et prédateurs dans un système géré par des lois de type Lotka-Volterra dont les paramètres sont évalués en cours de simulation (durant la période précédant le changement d'échelle) ou en fonction des comportements même des super-individus.

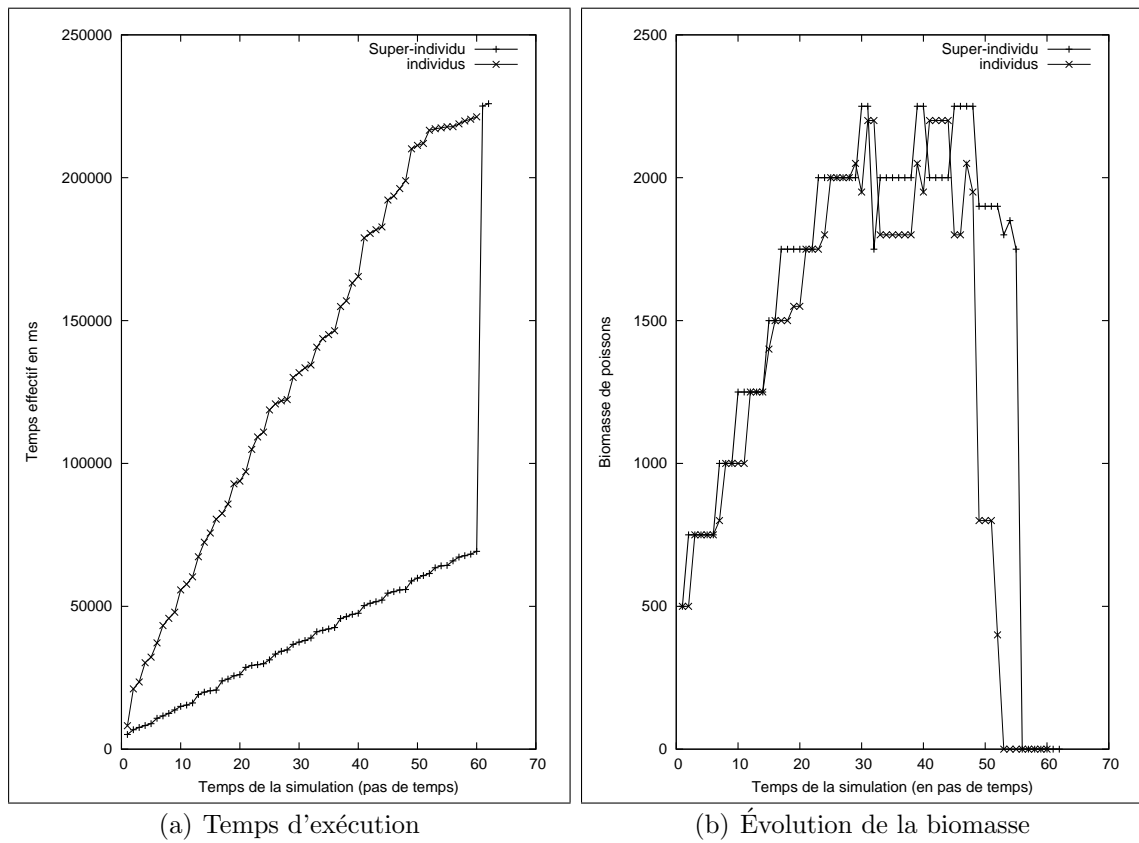


FIG. 3.32 – Simulation avec deux espèces avec (courbe Super-Individu) et sans (courbe Individu) changement de représentation

Ainsi si l'on considère un exemple où chaque comportement implique une rétroaction sur la biomasse des super-individus on peut reproduire la dynamique des populations du système via un système Lotka-Volterra dont les paramètres sont fixés dynamiquement.

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = aX - bXY \\ \frac{dY}{dt} = -cY + dXY \end{cases} \quad (3.11)$$

On détermine alors a , b , c et d en fonction des variations de la biomasse tirées du graphe d'interactions (déterminées à partir de la valeur des arcs) et des données du modèle :

- On établit la variation de biomasse ΔB_X de la population X durant δt en en sommant la valeur des arcs incidents aux nœuds correspondant aux super-individus constituant cette population. Soit f_i la variation de biomasse nécessaire à la production de k_i individus par un individu de la population i . On a :

$$a = \frac{k_X \Delta B_X}{f_X \delta t} \quad (3.12)$$

- On connaît la biomasse de X qui a été prélevée par Y . On peut donc en déduire b en fonction du nombre moyen d'individus de Y et de X sur la période δt et de l'assimilation de la biomasse des individus de X par Y . Grossièrement,

$$b = \frac{\Delta B_X}{E_{X,Y} X_m Y_m \delta t} \quad (3.13)$$

où X_m et Y_m sont la population moyenne de X et Y sur la période δt et $E_{X,Y}$ l'efficacité d'assimilation de la biomasse des individus de X par ceux de Y .

- On détermine de même c et d en fonction respectivement des pertes de biomasse dues aux relations avec le holon représentant l'oxygène et le gain total de biomasse dû aux relations avec les super-individus qui vont constituer X .

Il est évident que ce n'est qu'un exemple et que les situations peuvent s'avérer beaucoup plus complexes et que d'autres part de nombreuses questions se posent quant à la validité des équations obtenues. Nous avons considéré que la croissance des espèces prédatrices était limitée par la densité de leurs proies, ce qui correspond à la réponse numérique du prédateur à la densité [Holling, 1959]. Mais les prédateurs peuvent changer leur comportement en fonction des densités des diverses proies c'est-à-dire capturer les proies les plus abondantes : cela correspond à la réponse fonctionnelle du prédateur. Ainsi différentes réponses fonctionnelles ont été proposées, certaines dépendant uniquement de la densité des proies, et elles présentent alors les caractéristiques de modèles où les abondances sont contrôlées «de haut en bas», d'autres dépendant du ratio entre densité de proies et densité de prédateurs, elles incluent donc une régulation des abondances «de bas en haut».

Dans le dernier cas, les entités n'ont plus d'interaction avec des entités spatialisées, elles sont gérées via des lois populationnelles (loi logistique, exponentielle...) tout en gardant

une trace physique de ces holons afin de pouvoir repérer s'ils développent dans le futur des interactions avec des holons apparus dans leur voisinage. On représente uniquement leur déplacement au sein de l'espace et on gère leur évolution équationnelle simultanément à celle des autres holons de la même espèce ces derniers étant représentés de la même façon au niveau populationnel.

Nous avons donc décliné des règles permettant de rassembler des holons lorsque cela était pertinent. Si nous savons rassembler, il faut aussi être capable de diviser lorsque les hypothèses de rassemblement deviennent critiquables. C'est notamment le cas lorsque :

1. Un super-individu issu d'un rassemblement développe des liens prédominants dans la dynamique de sa biomasse avec des individus. A partir de ce moment là, une redivision en entités décrites suivant leur représentation d'origine est à faire. Dans notre cas, nous avons opté pour un remplacement aléatoire, dans le rayon d'action de ce dernier, des individus ou super-individus constituant notre super-individu issu d'un précédent rassemblement ;
2. Le système isolé constitué développe des interactions avec de nouvelles entités. Dans ce cas, trois choix s'offrent à nous :
 - Soit on développe une méthode permettant aux systèmes d'interagir avec d'autres holons de manière ponctuelle et jouant sur leurs états respectifs et l'on casse le système s'il développe trop d'interactions locales,
 - soit on casse le système dès qu'il est soumis à une interaction locale,
 - soit on lui permet d'assimiler ces nouveaux éléments.
3. Un élément arrive dans le voisinage d'un élément que l'on a intégré au niveau populationnel et dont on a gardé une trace dans l'espace de la simulation. A ce moment-là, on réintègre ce dernier à l'espace de la simulation en le supprimant du niveau populationnel.

3.5 Conclusion

On a décrit différentes méthodes dans ce chapitre pour le passage d'un niveau élémentaire de description à un niveau organisationnel détecté ou émergent. Le cadre du travail qui s'applique soit aux écoulements fluides soit à la composante biologique est tout à fait généralisable et utilisable dans un autre contexte. On y retrouve de mon point de vue plusieurs points importants.

Le premier est la détection des organisations à l'aide d'un graphe d'interactions. Ce graphe évolue dans le temps, il est le « langage » de l'application, détecter les organisations consiste alors à effectuer une « analyse syntaxique ».

Le second consiste à donner du sens aux organisations, ce qui nous permet de faire opérer aux simulations des changements de modèles dans le milieu même qu'elles gèrent. Ainsi, par exemple de manière dynamique, ces simulations sont à même de modifier un modèle particulière en un modèle organisationnel ou encore un modèle individu centré en un modèle proie-prédateur Lotka-Volterra. Rappelons que ces mêmes simulations ne sont, par nature, que le déroulement temporel (la trajectoire) du ou des modèles qui la

constituent. L'approche de résolution multi-échelles engendre ainsi une rétro-action de la simulation sur ses modèles constitutifs et s'inscrit dans le paradigme du complexe. Le dernier point est la gestion des structures elles-mêmes, pour lesquelles on définit un comportement sous forme de lois ou de règles, une frontière qu'elle entretient et sa stabilité.

Terminons sur un regret ou plutôt des perspectives à long terme, le comportement de nos organisations est dans les faits prédéfinis mais que faire d'une organisation présentant un comportement non répertorié ? La voie de la programmation génétique en mémorisant des organisations et leurs trajectoires durant de nombreuses simulations est-elle une piste ?