

ÉPREUVE COMMUNE DE TIPE - Partie D

La modélisation informatique d'écosystèmes

Temps de préparation :2 h 15 minutes

Temps de présentation devant le jury :10 minutes

Entretien avec le jury :10 minutes

GUIDE POUR LE CANDIDAT :

Le dossier ci-joint comporte au total : 12 pages

Il comporte un document principal (pages 1 à 8), un document annexe (pages 9 à 11) et un glossaire (page 12).

Les termes définis en italiques sont définis dans le glossaire.

Travail suggéré :

Donner les propriétés duales des modèles.

Indiquer quelles sont les éventuelles corrélations entre celles-ci.

Illustrer ces propriétés avec l'exemple du modèle PARIS présenté dans le document annexe.

CONSEILS GENERAUX POUR LA PREPARATION DE L'EPREUVE :

* Lisez le dossier en entier dans un temps raisonnable.

* Réservez du temps pour préparer l'exposé devant le jury.

- Vous pouvez écrire sur le présent dossier, le surligner, le découper ... mais tout sera à remettre au jury en fin d'oral.
- En fin de préparation, rassemblez et ordonnez soigneusement TOUS les documents (transparents, *etc.*) dont vous comptez vous servir pendant l'oral, ainsi que le dossier, les transparents et les brouillons utilisés pendant la préparation. En entrant dans la salle d'oral, vous devez être prêts à débiter votre exposé.
- A la fin de l'oral, vous devez remettre au jury le présent dossier, les transparents et les brouillons utilisés pour cette partie de l'oral, ainsi que TOUS les transparents et autres documents présentés pendant votre prestation.

LA MODELISATION INFORMATIQUE D'ECOSYSTEMES

1. SYSTEMES ET ECOSYSTEMES

Un système peut être défini comme un ensemble d'entités ayant des relations entre elles et qui constitue une unité cohérente. Ces relations peuvent être, par exemple, biochimiques, biologiques, sociales, etc. et le système défini par ce type de relations pourrait être respectivement une cellule, un organe d'un être vivant (ou un être vivant), un groupe d'individus (ou une société). Le terme particulier d'écosystème est utilisé dans le cas où l'unité ainsi définie est une unité *écologique* formée par un *biotope* et par les organismes végétaux et animaux qui y vivent.

1.1 L'interaction avec l'environnement

Un système dont les éléments n'ont de relations qu'entre eux, à l'exclusion de toutes autres entités extérieures au système est dit fermé. En réalité, il est difficile de trouver des systèmes totalement fermés, et plus ou moins tous les systèmes que l'on est amené à observer et étudier dans la nature ou dans la société sont des systèmes ouverts, c'est-à-dire en relation avec leur *environnement*. La définition d'un système ouvert nécessite alors de faire la distinction entre les relations liant les entités du système à l'intérieur de celui-ci et les relations éventuelles que peuvent lier ses entités avec l'environnement. La cohérence du système sera d'autant plus claire que cette distinction sera bien faite et que les relations à l'intérieur du système seront caractéristiques de celui-ci. C'est un des points les plus délicats dans la modélisation des écosystèmes car ceux-ci sont des systèmes ouverts.

1.2 Structure hiérarchique des systèmes

L'environnement d'un système peut être constitué de systèmes de même nature. Ces systèmes peuvent interagir entre eux, et constituer les entités d'une structure cohérente d'ordre supérieur, dont ils constituent alors des sous-systèmes. Par exemples : un agrégat de cellules ayant la même morphologie et les mêmes fonctions constituent un tissu cellulaire; l'ensemble de ses *organes* constitue un *organisme* animal ou végétal ; un groupe d'herbivores domestiques constitue un troupeau. Cette notion de sous-systèmes permet d'analyser un système suivant une approche hiérarchique descendante : un troupeau est composé d'animaux qui, analysés en tant qu'organismes biologiques peuvent être eux-mêmes décomposés en divers organes; ces organes comportent différents tissus, chacun constitué d'un type donné de cellules.

La notion de complexité est associée au niveau d'enchevêtrement des interactions possibles, qui sont : les interactions entre les entités d'un même niveau hiérarchique ; les interactions entre les niveaux hiérarchiques ; les interactions avec l'environnement. Lorsque le niveau d'enchevêtrement des interactions est élevé le système est dit complexe. La différence entre complexité et complication est liée au niveau de décomposabilité du système : une agrégation de sous-systèmes simples et faiblement interdépendants peut être un système compliqué s'il y a beaucoup de sous-systèmes, mais n'est pas complexe car il est décomposable. Il est usuel d'affirmer qu'un système complexe ne se réduit pas à la somme de ses parties.

1.3 Systèmes continus et systèmes discrets

Etant un système ouvert, un écosystème est soumis à des conditions (conventionnellement) extérieures que l'on peut désigner par le terme de conditions environnementales (qui peuvent être le pH d'un sol, la température ou l'humidité de l'air, la pression atmosphérique, etc.). Par ailleurs, un écosystème est caractérisé (et potentiellement décrit) par un ensemble de valeurs, appelées attributs. Enfin, un écosystème (ainsi éventuellement que ses conditions environnementales) évolue dans le temps.

Dans le cas où un attribut est numérique et où il est susceptible d'évoluer en fonction de paramètres – qui peuvent être le temps, ou certaines conditions environnementales, ou encore d'autres attributs – celui-ci

est dit continu si d'une part les paramètres en fonction desquels il varie peuvent être assimilés à des variables réelles et si d'autre part l'attribut est assimilable à une fonction continue de ces variables réelles. Comme on le voit, cette définition est associée au concept purement mathématique de continuité d'une fonction. Il est clair que dans bien des cas on assimile à des variables réelles des grandeurs qui, à l'échelle microscopique, sont quantifiées. Certes, cette vision macroscopique du système rentre déjà dans la démarche de modélisation, mais on ne la considérera ici que comme une approximation acceptable à l'échelle des écosystèmes.

On peut donc par exemple considérer, à cette échelle, un certain nombre de processus temporels comme continus : un mouvement; la croissance d'une plante; voire, les évolutions d'une très grande population.

Toutefois l'évolution d'un attribut peut présenter des discontinuités, appelées événements discrets. Pour des processus temporels par exemple, il s'agit d'événements dont l'occurrence a lieu à un instant précis : l'arrêt ou le démarrage du mouvement, un changement "instantané" de vitesse ou de direction suite à un choc; la naissance ou la mort d'un individu dans une petite population. Lorsque l'attribut n'évolue que consécutivement à des événements discrets, il peut être qualifié de discret.

1.4 Systèmes déterministes et systèmes stochastiques

Un système est dit déterministe s'il se comporte toujours exactement de la même manière lorsqu'il est placé dans des conditions identiques. Par opposition, on qualifierait de système indéterministe (ou encore aléatoire, ou stochastique) un système qui se comporterait de façons différentes sans cause apparente, et cette absence de cause apparente est appelée le hasard. La formalisation mathématique de tels systèmes est fournie par la théorie des probabilités.

Dans la mesure où le concept de hasard contredit le principe philosophique de causalité selon lequel tout phénomène a une cause, et où ce principe, du moins à l'échelle macroscopique, n'est pas contredit par les lois de la physique, on peut se demander s'il existe réellement des systèmes indéterministes. Si l'on se place à une échelle macroscopique on peut accepter la réponse donnée par le mathématicien Emile Borel (à qui l'on doit la définition rigoureuse de la notion de probabilité) : "la caractéristique des phénomènes que nous appelons fortuits ou dus au hasard, c'est de dépendre de causes trop complexes pour que nous puissions les connaître toutes et les étudier". Nous concluons donc que si, à l'échelle macroscopique, il n'existe certes pas de hasard, ce concept, et surtout sa formalisation mathématique donnée par la théorie des probabilités, sont fort utiles pour modéliser les incertitudes que l'on a sur la connaissance d'un système.

2. LES MODELES ET LA MODELISATION INFORMATIQUE

2.1 Principes généraux

L'objectif de la modélisation, dans son sens le plus général, est la connaissance du monde réel. Les sciences dites dures (physique, chimie, biologie, ...) ou les sciences humaines (économie, sociologie, psychologie, ...) proposent des modèles. Ces modèles sont d'abord validés par la confrontation de leurs résultats avec ceux d'expériences réalisables. Une fois validés, ceux-ci ont une valeur prédictive et suggèrent d'autres expériences non réalisées jusqu'à maintenant. Si ces nouvelles expériences corroborent les prédictions du modèle, alors la validation de celui-ci est confirmée, et la connaissance du domaine modélisé est réellement augmentée.

De manière plus restrictive, la modélisation informatique utilise l'ordinateur comme un laboratoire d'expériences virtuelles : un modèle (appelé le modèle conceptuel) est traduit sous forme d'un programme informatique (appelé le modèle d'action) ; ce modèle d'action peut être testé dans divers environnements

virtuels représentant autant d'expériences virtuelles. Le couple modèle conceptuel – modèle d'action est désigné de manière générique par le terme de modèle informatique.

90 Suivant le principe général de la modélisation, le modèle conceptuel a un aspect hypothétique : il n'est pas qu'une formalisation qui récapitulerait des connaissances établies, mais il propose une description nouvelle du système étudié. On retrouve alors l'intérêt des aspects reproductifs et prédictifs de tout modèle : dans une première phase, dite de calage, le modèle informatique doit donner des résultats conformes à ceux qui sont déjà connus ; dans une seconde phase, le modèle validé a une valeur prédictive, et si ses prédictions s'avèrent exactes, ceci confirme la pertinence des hypothèses de son modèle conceptuel.

95 Après l'analyse du système à modéliser, effectuée en fonction des objectifs de la modélisation (les propriétés ou les entités du système étant analysées avec le plus de détail étant celles qui sont supposées être les plus influentes sur les objectifs recherchés), la construction du modèle informatique comporte naturellement deux phases :

- la construction du modèle conceptuel : l'analyse du système à modéliser est retranscrite dans un formalisme choisi de manière préalable en fonction de la nature et de la complexité de celui-ci ;
- 00 - la construction du modèle d'action : même s'il s'agit de la traduction du modèle conceptuel en un programme informatique, cette phase nécessite des choix, dits de conception, qui peuvent être très importants pour le futur modèle.

2.2 Les objectifs de la modélisation

05 Réaliser un modèle conceptuel d'un système nécessite de concevoir une abstraction de celui-ci. Le système abstrait obtenu doit satisfaire deux conditions :

- il doit avoir un caractère de ressemblance avec le système réel ;
- il doit aider à la compréhension du système réel.

10 La première condition est associée à l'approche phénoménologique de la modélisation selon laquelle les attributs d'un système peuvent être modélisés par des fonctions qui décrivent bien les observations effectuées sur ceux-ci. Les variables de ces fonctions ne sont pas forcément des conditions environnementales ou des attributs du système, mais peuvent être des variables qui synthétisent des propriétés globales du système. Dans le cadre d'une telle approche, le système est d'abord modélisé à un niveau global. Puis le processus de modélisation descend les niveaux hiérarchiques pour définir les variables globales utilisées à l'étape précédente. Un exemple d'une telle modélisation est donné en annexe
15 avec le sous-modèle végétal (cf. A1) et le sous-module "métabolisme" du sous-modèle animal (cf. A2) du modèle PARIS.

20 La seconde condition est associée à l'approche constructiviste selon laquelle la compréhension d'un système s'établit en le reconstruisant sur un support alternatif (en l'occurrence, un ordinateur, dans le cas de la modélisation informatique). Dans le cadre d'une telle approche, la construction d'un modèle débute par celle de ses composants élémentaires. Puis la modélisation du niveau hiérarchique supérieur est effectuée en décrivant les interactions entre composants élémentaires. En itérant cette opération, le processus de modélisation remonte les niveaux hiérarchiques.

25 L'approche phénoménologique, légitime dans le cas des systèmes compliqués, est considérée comme mutilante dans le cas de systèmes complexes : elle ne rend pas compte de l'émergence au niveau global de phénomènes dont la genèse est liée à la complexité des interactions au niveau local. Par exemple, l'architecture globale d'une fourmilière est le résultat d'une somme d'actions individuelles qui ne sont pas coordonnées par une fourmi "architecte", mais par l'ensemble des communications interindividuelles.

2.3 La formalisation de l'évolution temporelle du système

30 Il a déjà été mentionné que les attributs qui caractérisent un système évoluent en fonction du temps, des conditions environnementales et éventuellement d'autres attributs. C'est la connaissance de l'évolution dans le temps du système (et donc de tous ses attributs) qui est le résultat que doit fournir le modèle. L'évolution d'un attribut peut, selon l'approche de modélisation choisie (phénoménologique ou constructiviste), selon la connaissance plus ou moins précise que l'on en a, et également selon la nature même de celle-ci, être exprimée suivant deux formalismes.

35 Le formalisme algorithmique décrit l'enchaînement des opérations algorithmiques élémentaires (les quatre opérations, les fonctions mathématiques de base, et les instructions conditionnelles) permettant de calculer l'évolution des valeurs d'un attribut en fonction du temps et des éventuels autres paramètres. Le modèle d'action associé au modèle conceptuel d'un système dont l'évolution temporelle est formalisé de manière algorithmique est naturellement le programme informatique qui est la traduction directe, dans un langage de programmation donné, de cet algorithme. Ce formalisme étant par nature discret, il est clair que 40 la variable temps doit être discrétisée suivant une convention propre au modèle conceptuel (cf. 2.6) : on parle alors de modèle à événements discrets.

Le formalisme fonctionnel décrit la valeur de l'attribut comme une fonction. L'évolution temporelle de cet attribut est donc donnée par les variations de cette fonction. Ces variations peuvent être données de 45 manière explicite pour des incréments temporels fixés conventionnellement par le modèle conceptuel (cf. A1) ou bien de manière implicite par des équations différentielles (cf. A2). Dans le premier cas, le modèle d'action associé est un programme qui applique directement aux valeurs des attributs les variations imposées de manière explicite. Dans le second cas le modèle d'action associé doit utiliser des méthodes d'intégration numérique. Cependant, il est rare que le modèle d'action se réduise à la résolution numérique 50 d'un système d'équations différentielles: des événements discrets (par exemple des effets de seuil) peuvent modifier (de façon "instantanée") les équations différentielles.

2.4 Le formalisme du modèle conceptuel

La formalisation de l'évolution temporelle des attributs est primordiale car elle détermine la nature du modèle d'action associé au modèle conceptuel. Cependant, elle ne traduit pas la relation entre la structure 55 du système et celle de son modèle conceptuel.

2.4.1 Le formalisme objet

Dans le cas d'une approche constructiviste, la structure du modèle conceptuel doit se calquer sur celle du système : chaque entité du modèle conceptuel doit correspondre à une entité du système. On utilise alors, pour formaliser le modèle conceptuel, un formalisme dans lequel le terme général d'objet désigne les 60 entités du modèle, et on parle dans ce cas de modélisation orientée objet et de modèle objet. Ces objets sont décrits et caractérisés par un ensemble de valeurs quantitatives ou qualitatives, appelées attributs (la confusion avec ce même terme utilisé également pour désigner des valeurs caractéristiques du système est délibérée), et par un ensemble d'actions qui peuvent être exécutées par ceux-ci, appelées méthodes. Seules les méthodes d'un objet peuvent modifier ses attributs. Les objets communiquent entre eux par envoi de 65 messages. La communication entre objets correspond à la notion de service. L'envoi d'un message d'un objet vers un autre va déclencher chez l'objet sollicité l'exécution d'une méthode qui rendra le service demandé.

La structure hiérarchique commune au modèle et au système modélisé est exprimée par la classification hiérarchique des objets : tous les objets d'une même nature sont regroupés dans une classe. Par exemple, 70 tous les herbivores domestiques peuvent être regroupés dans une classe nommée `C_herbivore`. Les

objets de cette classe ont des attributs qui sont des valeurs qui permettent de caractériser chaque animal, par exemple un numéro d'identité, le sexe, l'âge, le poids, etc., mais aussi sa localisation sur le terrain, l'activité en cours, etc.. Ils ont aussi des méthodes qui permettent de décrire leur physiologie (avoir faim, avoir soif, avoir sommeil, etc.), leur comportement (manger, boire, dormir, etc.), etc.. Le genre biologique (bovin, ovin, caprin, équin ...) ne figure pas parmi les attributs. Ce n'est pas un oubli, car dans le cas contraire tous les individus (ou objets) d'un même genre aurait la même valeur pour cet attribut. Outre que cette redondance représenterait une perte d'espace mémoire pour le modèle d'action, elle révélerait surtout une erreur de conception. Il est en effet plus cohérent d'introduire des classes dérivées de la classe de base `C_herbivore` regroupant tous les individus d'un même genre. Les classes dérivées sont des spécialisations de la classe de base (réciproquement la classe de base est une généralisation des classes dérivées). La répétition de ce processus permet de définir une hiérarchie de classes. Les objets d'une classe dérivée héritent naturellement des attributs et des méthodes des classes dont elles dérivent (quel que soit son genre, un animal mange, boit, dort). Par contre certains attributs ou certaines méthodes peuvent être spécifiques à une classe spécialisée (par exemple seuls certains herbivores ruminent). Cette relation de spécialisation/généralisation permet de décrire une *taxinomie* des objets du modèle. Il faut noter que les objets du modèle appartiennent aux seules classes "terminales" de cette hiérarchie. Les autres classes qui servent à définir la taxinomie (et qui n'ont donc pas d'objets) sont des classes dites abstraites.

Les relations de spécialisation/généralisation ne sont pas suffisante pour décrire tous les aspects structurels communs au modèle conceptuel et au système modélisé. On définit également, entre les classes des relations de composition et d'agrégation. Par exemple, un organisme est composé d'organes et un tissu cellulaire est un agrégat de cellules. La différence entre composition et agrégation est clairement illustrée par l'exemple précédent : chaque élément d'une composition est nécessaire à l'intégrité du composé tandis que lorsque l'on ôte des éléments à un agrégat, on obtient toujours un agrégat, qui est simplement plus petit.

Les concepts exposés ci-dessus sont exactement ceux qu'implémentent les langages informatiques dits orientés objet, comme C++, Java, etc.. Il est donc naturel que le modèle d'action associé à un modèle conceptuel orienté objet soit développé en utilisant un langage orienté objet : le modèle d'action est une traduction, dans ce langage informatique, du modèle conceptuel.

2.4.2 Les modèles à événements discrets

Dans le cas où les objets de base du modèle conceptuel correspondent aux organismes vivants, animaux ou végétaux, du système modélisé, c'est-à-dire à des individualités biologiques à part entière, le modèle est dit individu-centré. Par exemple : dans un modèle de reproduction végétale chaque brin d'herbe peut être un objet individuel caractérisé par un attribut qui représente son code génétique; de même, dans un modèle de pâturage, chaque herbivore est un individu.

Si, dans un modèle individu-centré, il n'existe aucune instance décisionnelle autre que les individus eux-mêmes, c'est-à-dire, plus précisément, si le comportement de chaque individu n'est déterminé que par lui-même et par ses interactions avec les autres individus et avec l'environnement, ces individus sont alors nommés des agents, et le modèle est appelé improprement un système multi-agent. Dans un tel modèle, les agents peuvent donc communiquer entre eux (par échange de messages par exemple), et ne connaissent de leur environnement que ce qu'ils en perçoivent et ce qu'ils en ont mémorisés (ce qui suppose bien sûr dans ce cas de modéliser la mémoire animale : apprentissage, mémorisation, oubli, etc.).

Commençons par donner un contre-exemple : un modèle de gestion de troupeau en *élevage intensif* peut être un modèle individu-centré, dans la mesure où chaque animal correspond à un objet du modèle et où il est caractérisé par des données individuelles ; par contre il ne s'agit pas d'un système multi-agent dans la

15 mesure où l'évolution du système est déterminée par l'éleveur qui est l'acteur unique qui centralise toute l'information et effectue toutes les décisions sur l'évolution de son troupeau.

Il est d'usage de distinguer deux catégories de systèmes multi-agents : les systèmes d'agents réactifs et les systèmes d'agents cognitifs. Les systèmes d'agents réactifs comportent un grand nombre d'agents très simples, sans mémoire et avec une vision locale de leur environnement. Ils sont par exemple bien adaptés à la modélisation des sociétés d'insectes. Les systèmes d'agents cognitifs comportent un petit nombre d'agents complexes, qui mémorisent (avec des oublis) leur passé ainsi que leur environnement, et enfin (et surtout) qui communiquent entre eux au moyen de messages destinés à un individu unique ou à un groupe d'individus. Ces modèles permettent de prendre en compte des données *éthologiques* chez les animaux dits "supérieurs", et en particulier de modéliser les interactions sociales, par exemple au sein d'un troupeau d'herbivores en *élevage extensif*.

25 **2.4.3 Les modèles à compartiments**

Dans le cadre d'une approche phénoménologique la structure du modèle conceptuel est libre par rapport à celle du système modélisé. Les entités du modèle ne correspondent donc pas forcément toutes à celles du système. Les premières peuvent faire référence à des aspects globaux du système qui soient "transverses" par rapport aux secondes : par exemple, pour un modèle qui n'est pas individu-centré, la densité de *biomasse* qui est présente dans les épis d'une graminée est une variable globale très importante, mais ne correspond, en fait, à aucune réalité directement tangible dans le système car elle a plutôt une valeur statistique.

On appelle compartiments des entités représentées par un ensemble de variables quantitatives qui déterminent de manière globale l'évolution du système. Ces compartiments correspondent à des divisions théoriques et implicites du système, mais permettent d'exprimer explicitement les flux (de matière, d'énergie, ...) qui existent entre eux et qui régissent l'évolution du système. Ces flux peuvent être exprimés au moyen d'équations différentielles (cf **A2**), ou bien en calculant explicitement les variations (pour des incréments de temps donné) en fonction de l'état du système (cf **A1**). Il est intéressant de remarquer que dans l'approche constructiviste, le modèle présente des divisions explicites du système, mais que par contre les flux globaux n'apparaissent pas de manière explicite (ils ne peuvent être connus que par sommation des flux entre entités individuelles).

40 **2.5 Modèles stochastiques et modèles déterministes**

Etant donnée une entité quelconque d'un système réel à modéliser, sa prise en compte dans un modèle n'est pas binaire. Certes, elle peut être prise en compte de manière explicite dans le modèle, ou bien purement ignorée, mais il existe une troisième alternative, qui délimite une frontière "floue" entre le connu et l'inconnu. Cette troisième alternative est la prise en compte de cette entité de manière statistique.

Il est fréquent que la modélisation d'un système complexe nécessite de prendre en compte des événements discrets fortuits (la mortalité des individus par exemple) ou également des phénomènes trop complexes pour être explicités dans le modèle (choix alimentaire immédiat d'un herbivore, météorologie à l'échelle de la journée, mouvement d'une graine emportée par le vent, etc.). Le modèle conceptuel requiert alors l'utilisation de lois de probabilité et est qualifié de stochastique.

La stochasticité d'un modèle n'est pas systématiquement liée à la complexité du système modélisé : si celui-ci est fermé, il peut être d'une grande complexité, mais être suffisamment bien connu pour que tous ses aspects soient pris en compte de manière explicite (par exemple sous forme d'un système d'équations différentielles non linéaires dont la solution peut avoir un comportement *chaotique*) ; a contrario, celui-ci

peut être relativement simple, mais en interaction avec d'autres systèmes trop complexes pour être pris en compte de manière explicite dans le modèle.

2.6 Gestion du temps

60 En fonction du formalisme qui est adopté pour décrire son évolution temporelle, le modèle conceptuel utilise une variable temps, appelée temps de simulation, considérée soit comme une variable continue, *i.e.* qui peut prendre toute valeur réelle, soit comme une variable discrète, *i.e.* qui peut prendre un nombre fini ou dénombrable de valeurs (éventuellement réelles).

65 Le temps de simulation est considéré comme une variable continue essentiellement dans le cas des modèles à compartiments pour lesquels les flux sont exprimés au moyen d'équations différentielles. Si aucun événement discret ne vient modifier les expressions de ces équations, le modèle d'action se réduit à la résolution numérique d'un système d'équations différentielles.

70 Dans tous les autres cas, le temps de simulation est considéré comme une variable discrète. Cependant, la gestion de ce temps par le modèle d'action n'est pas simple : les occurrences des événements discrets sont le fait des entités actives du modèle qui, à des dates données, exécutent des activités qui vont faire évoluer celui-ci; ces entités actives représentent donc une multitude de processus qui sont interdépendants et qui peuvent chacune exécuter leurs activités suivant des échelles de temps très différentes.

On distingue deux mécanismes de gestion du temps de simulation :

75 - dans le cas d'une simulation dirigée par horloge, la durée de la simulation est divisée en un certain nombre d'intervalles de temps de durée identique, appelée pas de temps. Chaque entité active dispose d'un attribut permettant de savoir si elle a une activité à exécuter. A chaque "top d'horloge", le gestionnaire de temps interroge toutes les entités actives et détermine ainsi toutes celles qui ont une activité à exécuter. Le problème inhérent à cette méthode est le choix d'un pas de temps pertinent, qui est délicat : s'il est trop petit, beaucoup de temps est perdu à interroger inutilement les entités actives, s'il est trop grand, on perd en précision, et on multiplie les difficultés liées aux exécutions "simultanées". Par exemple si à la date t une plante P_1 doit compter son nombre de voisines pour calculer l'ombrage qu'elles lui font et si à cette même date t une plante P_2 , qui figure parmi les voisines de P_1 , meurt, le traitement séquentiel des deux événements ne donne pas le même résultat en fonction de l'ordre de traitement. Cela n'a pas grande importance si ces exécutions "simultanées" sont rares, mais cela peut ne pas être le cas, du fait d'une gestion du temps dirigée par horloge.

85 - dans le cas d'une simulation dirigée par événements, le gestionnaire de temps dispose d'un échancier, qui est une structure de donnée qui contient les dates futures de tous les événements potentiels, rangées par ordre croissant, ainsi que toutes les informations nécessaires pour exécuter cet événement (entité active et activité concernées...). Ainsi le temps de simulation ne progresse-t-il plus par incréments égaux, mais "saute" d'une date à une autre. Lorsqu'une entité active exécute une activité elle agit également sur l'échancier : elle peut y insérer de nouveaux événements, en supprimer d'autres (par exemple l'activité "manger" supprime les activités "ruminer", cf. **A2**), etc.. Cette méthode n'est pas adaptée aux activités régulières qui pourraient être exécutées à pas de temps régulier et qui surchargent inutilement l'échancier.

90 Un compromis entre ces deux méthodes est l'approche dite en trois phases qui fait une distinction entre activités conditionnelles et inconditionnelles :

- 95
- première phase : gestion du temps (suivant une approche par horloge ou par événement) ;
 - deuxième phase : exécution de toutes les activités inconditionnelles ;
 - troisième phase : interrogation des entités actives concernées par les activités conditionnelles (et exécution de ces activités) ;

2.7 Gestion de l'espace

00 Si la position spatiale des entités d'un modèle est prise en compte par celui-ci, il est dit spatialisé.

Si un modèle n'est pas spatialisé, cela peut avoir deux significations :

- l'espace n'est pas un paramètre du modèle : il n'y a donc pas de variabilité spatiale des résultats ;

05 - il existe une variabilité spatiale des résultats, mais le modèle ne s'y intéresse pas (parce qu'elle est faible, ou jugée sans signification) ; les résultats sont donc intégrés de manière statistique sous la forme d'une moyenne (c'est souvent le cas pour les modèles à compartiments).

Si le modèle est spatialisé, cela signifie qu'il y a une modélisation de l'espace, implicite ou explicite.

10 Cette modélisation est implicite, par exemple, dans le cas de la spatialisation d'un modèle à compartiment : considérons un modèle comportant n compartiments C_1, \dots, C_n ; s'il est non spatialisé, chaque compartiment contient les valeurs moyennes de variables d'état sur tout l'espace; pour le spatialiser, l'espace peut être partitionné en m parties P_1, \dots, P_m ; le modèle spatialisé comportera alors $n \times m$ compartiments C_{ij} , $1 \leq i \leq n$, $1 \leq j \leq m$, C_{kl} contenant la valeur moyenne de C_k sur la partie de l'espace P_l ; les équations régissant l'évolution temporelle de ces compartiments doivent être modifiées en conséquence.

15 Dans le cas des modèles réalisés suivant une approche constructiviste, comme les modèles individu-centrés par exemple, la modélisation de l'espace peut également être implicite si celle-ci ne se traduit que par le fait que les entités du modèle ont des attributs permettant de connaître leur position spatiale.

20 Cependant, elle est le plus souvent explicite, l'espace (par exemple la parcelle sur laquelle pâturent des herbivores, le bassin dans lequel vivent des poissons, etc.) étant bien, à proprement parler, une entité du système modélisé. Cet espace physique, qui est tridimensionnel, peut être modélisé par un espace bidimensionnel quand la troisième dimension (la hauteur) n'est pas déterminante (celle-ci pouvant malgré tout être éventuellement prise en compte par certains attributs des entités) : cela peut être le cas pour la parcelle de pâturage, mais certainement pas pour le bassin. Dans tous les cas, cette modélisation revient à discrétiser l'espace en le partitionnant en cellules : dans le cas bidimensionnel ces cellules sont le plus souvent des carrés ou des hexagones. L'avantage d'une telle modélisation explicite est qu'elle se traduit

25 dans le modèle d'action par une structure de donnée permettant un accès rapide et facile aux entités voisines d'une entité donnée via des attributs donnant l'indice de la cellule à laquelle appartient l'entité (ce qui n'empêche pas, en surplus, d'avoir des attributs donnant des coordonnées réelles et permettant de gérer des calculs de distance, des déplacements suivant des axes de direction quelconque, etc.).

30 ANNEXE : Exemple du modèle PARIS (PAsture Ruminants Interactions Simulator)

PARIS modélise les interactions dynamiques au sein d'une parcelle pâturée par des ruminants (vaches ou brebis). PARIS est un modèle stochastique à événements discrets, dirigé par événements suivant une approche en trois phases. PARIS est de plus un multi-modèle, dans la mesure où il se décompose en deux sous-modèles :

- 35 - le sous-modèle végétal modélise la croissance végétale, soumise à la *défoliation* par les animaux ;
- le sous modèle animal qui modélise le métabolisme et le comportement individuel et social des animaux ;

La parcelle est modélisée par un plan partitionné en cellules hexagonales. Chaque cellule est une station alimentaire (surface sur laquelle l'animal peut brouter sans bouger les pattes, soit par exemple 0,1 m₂ pour une brebis).

40 A1. Le sous-modèle végétal

Chaque cellule appartient à un faciès défini par des proportions données de différentes espèces végétales. La croissance végétale étant un processus temporel continu le sous modèle végétal est un modèle à compartiment. Les variations des compartiments sont décrites explicitement (et non avec des équations différentielles). Les défoliations par les animaux étant des événements discrets, lorsqu'elles ont lieu, les variations sont calculées de façon instantanée. Par ailleurs, les processus physiologiques des végétaux étant très lents (par rapport à ceux des animaux), les variations dues à ceux-ci ne sont calculées qu'une fois par jour, en fin de journée (en temps de simulation).

Chaque cellule comporte six compartiments :

- 50 - quatre compartiments représentent respectivement les feuilles vertes (*FV*), les feuilles *sénescentes* (*FS*), les épis verts (*EV*), les épis *sénescents* (*ES*) ;
- un compartiment de réserve, représentent la matière organique en *réserve*, *R*, inaccessible à la défoliation, dans lequel les *assimilats* sont stockés lorsque la quantité produite par *photosynthèse* excède la demande ;
- 55 - un compartiment *litière* qui modélise l'interface entre le couvert végétal et le sol.

Les compartiments *FV*, *FS*, *EV* et *ES* sont caractérisés par trois attributs structuraux et par des attributs qualitatifs destinés à être communiqués au sous-module "métabolisme" du sous-modèle animal (cf. **A2**). Les attributs structuraux sont (pour $C = FV, FS, EV$ ou ES) : la *biomasse*, M_C ; la distribution verticale de cette biomasse, H_C ; la surface de feuilles intervenant dans la photosynthèse, S_C .

60 Voici, par exemple, comment varie la biomasse des feuilles vertes, M_{FV} :

- à chaque défoliation M_{FV} est diminué de $\Delta M_{def_{FV}}$, calculée par le sous-modèle animal en fonction de la distribution verticale de la biomasse dans le compartiment *FV* de cette cellule;
- en fin de journée M_{FV} est augmentée de $\Delta M_{croissance_{FV}}$ et diminué de $\Delta M_{senescence_{FV}}$.

Par exemple : $\Delta M_{croissance_{FV}} = \alpha_{FV} \times \Delta M$ où α_{FV} est la proportion d'*assimilats* allouée aux feuilles (fonction des conditions environnementales hydriques, de la nutrition azotée de la plante et de la biomasse dans le compartiment de réserve *R*) et où ΔM est l'incrément de biomasse total donné par

$$\Delta M = \text{Min} (\Delta M_{potentiel}, \Delta M_{photosynthèse} + \Delta M_{réserve})$$

$\Delta M_{potentiel}$ étant lui-même calculé en fonction du nombre d'axes (*i.e.* de "tiges") par mètre carré, de la largeur moyenne des nouvelles feuilles, de l'élongation potentielle journalière des nouvelles feuilles (elle même fonction du nombre de feuilles en croissance par axe, de la longueur des feuilles matures, de la température moyenne de l'air), et $\Delta M_{photosynthèse}$ étant calculé en fonction du rayonnement

photosynthétiquement actif incident intercepté par le couvert et de l'efficacité d'utilisation de cette lumière, (elle même fonction de l'intensité de cette lumière, de la température, de l'humidité), etc., etc. !!

A2. Le sous-modèle animal

75 Ce sous-modèle se divise en deux modules :

- le module "individuel" modélise :

. l'ingestion et la digestion des aliments (sous-module "métabolisme") ;

. le choix d'une activité individuelle, en fonction de l'état physiologique et de la qualité de la végétation dans le champ de vision de l'animal (sous-module "décision") ;

80 . dans le cas où l'activité choisie est de manger sur place, le choix de la cellule à défolier (sous-module "choix") ;

- le module "social" modélise :

. les interactions spatiales entre les animaux ;

. le choix d'entraîner tout le troupeau dans un déplacement long ;

85 . la mémoire.

Le sous-modèle animal est composite : c'est un modèle discret qui intègre un modèle continu à compartiment, déterministe, le sous-module "métabolisme".

Le sous-module "métabolisme" modélise :

- l'ingestion qui, par mastication, transforme les fibres végétales en particules de tailles variables ;

90 - la *ruminantion*, qui transforme les grandes particules en petites particules et permet la formation d'*acides gras volatils* (AGV) par fermentation microbienne ;

- la digestion qui, par assimilation des AGV, fournit de l'énergie.

Ce sous-modèle comporte trois compartiments représentant respectivement la masse (dans le *rumen*) de grandes particules (*GP*), de petites particules (*PP*), d'AGV (*AGV*). Les équations différentielles modélisant les variations de ces compartiments sont les suivantes :

95 - $\frac{dGP}{dt} = FGPI - FGPR - FGPT - FGPM$, où *FGPI* est le flux d'ingestion de grandes particules,

FGPR le flux de transformation en petites particules par le processus de ruminantion, *FGPT* le flux de transit hors du rumen (vers l'estomac et l'intestin) et *FGPM* le flux de dégradation microbienne ;

- $\frac{dPP}{dt} = FPPI + FPPR - FPPT - FPPM$, avec des notations analogues pour les petites particules ;

00 - $\frac{dAGV}{dt} = FAGVM + FAGVA - FAGVT$, où *FAGVM* est la production d'AGV par fermentation

microbienne, *FAGVA* l'absorption d'AGV par les parois du rumen et *FAGVT* le flux de transit hors du rumen.

Par exemple : $FAGVA = K \times AGV \times \left(1 + \frac{CMM}{CAGVR} \right)^{-1}$, où $K = 0.02 \text{ min}^{-1}$ est le taux maximal

05 d'absorption, $CMM = 100 \text{ mmol.l}^{-1}$, la constante de Michaelis-Menten, et *CAGVR* la concentration en AGV dans le rumen.

Le pas de temps d'intégration est de une minute. Les flux d'ingestion sont donnés par d'autres équations qui utilisent elles-mêmes des données fournies par le modèle végétal.

Le sous-module "métabolisme" fournit au sous-module "décision" une fonction de satiété *FSAT* donnée en fonction du chargement du rumen *CR* et du bilan énergétique *BE* par

10
$$FSAT = CR \times e^{0.1 \frac{BE}{BEI}}, \text{ avec } BE = 0.432 \times FAGVA - BEI,$$

où *BEI* représente le besoin énergétique instantané.

Le sous-module “décision” est activé toutes les 20 minutes. La décision de manger est prioritaire sur les autres. Elle est prise tant que la fonction de satiété reste inférieure à une fonction de motivation à ingérer (elle même fonction des apports énergétiques des dernières 24 heures), de la *palatabilité* du fourrage et du fait que ce soit le jour ou la nuit. Dans le cas où la décision de manger n'est pas prise, la décision de boire peut être prise par comparaison de la quantité de matière sèche ingérée depuis la dernière buvée avec un seuil dépendant de la température. Sinon, la décision d'aller dormir (repos long) peut être prise si la fonction de motivation à ingérer est décroissante et inférieure à un seuil. Sinon l'animal effectue un repos court, jusqu'à prise d'une nouvelle décision. Par ailleurs, une variabilité stochastique peut être introduite dans ces choix d'activité. L'activité de rumination n'est pas gérée par le sous-module “décision” car elle peut être menée durant les périodes de repos ou de déplacement.

20 Dans le cas où la décision de manger est prise, le sous-module “choix” choisit, parmi les 15 cellules placées devant la tête de l'animal, celle qui optimise une fonction de trois critères :

- 25 - la valeur nutritive donnée statistiquement en fonction des proportions des quatre compartiments de la cellule, *FV*, *FS*, *EV*, *ES* (l'animal préfère le vert au sec, et les feuilles aux épis) ;
- la distance (l'animal préfère la minimiser) ;
- la direction (l'animal préfère aller tout droit).

30 Dans le cas où l'animal décide de manger mais qu'aucune cellule devant lui ne lui convient, ou bien décide d'aller boire mais qu'il n'est pas près du point d'eau ou bien décide d'aller dormir mais qu'il n'est pas près du lieu de repos, celui-ci peut éventuellement effectuer un déplacement long.

Le déplacement long est géré par le module “social” parce que, comme il concerne tout le troupeau (les vaches ou les brebis étant des animaux grégaires), seuls les animaux qui ont une position sociale dominante peuvent en prendre l'initiative. Ce module “social” est un système d'agents cognitifs : le comportement de chaque animal n'est déterminé que par lui même en fonction de son état interne et de ses interactions sociales avec les autres animaux et avec l'environnement. La modélisation des comportements sociaux intègre :

- 35 - le comportement grégaire : des tests d'éloignement par rapport aux autres animaux sont effectués à intervalles réguliers ;
- le leadership : chaque animal peut prendre à un moment donné l'initiative d'un déplacement long avec une probabilité qui lui est propre;

40 L'interaction avec l'environnement est modélisée en utilisant non pas les données de l'environnement du modèle lui même, mais la perception et la mémorisation de ces données par l'animal. Chaque animal possède donc dans sa mémoire spatiale une “carte” de la parcelle, qui est une version grossière, incomplète et déformée par l'oubli, de la représentation de la parcelle dans le modèle : initialement vierge, cette carte s'enrichit progressivement de sites mémoriels ; lorsque l'animal pâture sur un site, une fonction de perception de la qualité nutritive des cellules défoliées lui permet de mémoriser une qualité moyenne pour ce site (qui n'est pas la qualité moyenne des cellules du site, mais plutôt la qualité moyenne des meilleures cellules du site, puisque c'est celles-ci que l'animal choisit !) ; cette mémoire spatiale est utilisée lors des déplacements longs ; enfin l'oubli, qui affecte préférentiellement les sites ayant les moins bonnes qualités nutritives ou qui sont le moins souvent fréquentés, supprime des sites ou fusionne des sites voisins.

GLOSSAIRE

Acides gras volatils : Les molécules des acides gras sont formées par une chaîne carbonée de type général $\text{CH}_3 - (\text{CH}_2)_p - [\text{CH} = \text{CH}] - (\text{CH}_2)_q - \dots$ et se terminent par un groupe carboxylique $-\text{COOH}$. Un acide gras est dit volatil lorsque la chaîne carbonée n'a pas plus de 6 atomes de carbone.

Assimilats : Matières organiques fournies par le processus de *photosynthèse* ou puisée dans des organes de *réserve*.

Biomasse : matière organique, mesurée en grammes de matière sèche (gMS).

Biotope : Milieu biologique déterminé offrant à une population animale et végétale donnée des conditions d'habitat relativement stable.

Chargement : Nombre d'animaux mis en pâture par unité de surface.

Chaos, chaotique : Un système chaotique présente une "hypersensibilité" aux conditions initiales; Ceci signifie que deux systèmes identiques présentant une très petite différence dans leur conditions initiales vont avoir, au bout d'un certain délai, des évolutions totalement différentes et indépendantes.

Défoliation (terme utilisé ici dans un sens restrictif) : Prélèvement des feuilles d'une plante par un herbivore.

Ecologie : Etude des milieux où vivent et se reproduisent les êtres vivants, ainsi que des rapports de ces êtres avec leur milieu.

Elevage extensif : Mode d'élevage avec un *chargement* faible, donc dans des conditions de grande autonomie, proches de ce que seraient leurs conditions de vie naturelles.

Elevage intensif : Mode d'élevage avec un *chargement* fort, donc avec la nécessité de rajouter beaucoup d'intrants (engrais, azote) au niveau du sol, ainsi que des compléments alimentaires.

Ethologie : Science des comportements des espèces animales dans leur milieu naturel.

Environnement : Conditions extérieures susceptibles d'agir sur le fonctionnement d'un système. En particulier, ensemble des conditions naturelles (physiques, chimiques, biologiques) et culturelles (sociologiques) susceptible d'agir sur les organismes vivants et les activités humaines.

Litière : couche supérieure organique du sol constituée des débris végétaux en décomposition.

Organe : Partie d'un être vivant (organisme) remplissant une fonction particulière.

Organisme (au sens biologique du terme) : Etre vivant, animal ou végétal, ayant une individualité propre.

Palatabilité : mesure expérimentale, pour un fourrage donné, de l'appétit de l'animal pour celui-ci.

Photosynthèse (ou *assimilation* chlorophyllienne) : Phénomène physiologique par lequel les plantes vertes fabriquent, à partir d'éléments minéraux, des substances organiques, en utilisant l'énergie lumineuse.

Réserves : Organes végétaux le plus souvent souterrains (racines, rhizomes, tubercules, bulbes, ...) dont les cellules ont une grande capacité d'accumulation.

Rumination, rumen : fonction physiologique des ruminants (comme les bovidés : bovins, ovins, caprins) qui consiste à faire revenir les aliments du rumen (qui est un pré-estomac) pour les mâcher, jusqu'à ce qu'ils soient réduits en petites particules (diamètre inférieur à 1 mm chez la brebis) et transitent vers l'estomac.

Sénescence : Vieillesse naturelle des tissus d'un organisme. Les feuilles ou les épis sénescents sont secs et constituent un fourrage assimilable à du foin.

Taxinomie : 1°) Science des lois de la classification des formes vivantes, et par extension science des lois de la classification. 2°) Une classification d'éléments.

DOCUMENT POUR LES EXAMINATEURS

Travail demandé :

Donner les propriétés duales des modèles.

Indiquer quelles sont les éventuelles corrélations entre celles-ci.

Illustrer ces propriétés avec l'exemple du modèle PARIS présenté dans le document annexe.

Une présentation possible :

1°) Dans ses fondements (cf. 2.2), la modélisation présente des propriétés duales :

- dans l'approche de modélisation : **phénoménologique / constructiviste** ;
- dans les objectifs de modélisation : **prévoir / comprendre**.

Ces deux propriétés fondamentales sont corrélées (mais ne sont pas synonymes), ainsi que celles qui vont en découler.

Pour exprimer la corrélation de toutes les autres propriétés duales avec cette propriété fondamentale qu'est l'approche de modélisation, elles seront qualifiées par des doublons notés P_1/P_2 , P_1 étant plus ou moins corrélée à l'approche phénoménologique et P_2 à l'approche constructiviste.

Remarque : L'approche de modélisation n'est pas indépendante d'une propriété duale des systèmes qui est la complication / complexité, mais on sort ici des propriétés des modèles.

2°) Comme conséquences directes (cf. 2.2) de ces deux propriétés fondamentales on peut donner deux autres propriétés duales (très corrélées entre elles) :

- la vision initiale du modèle : **globale / locale** ;
- la progression de la modélisation dans la structure hiérarchique des systèmes : **descendante / montante** ;

3°) Concernant le formalisme choisi pour l'évolution temporelle (cf. 2.3) :

- formalisme **fonctionnel / algorithmique** ;
- formalisme **implicite / explicite**.

Remarque : La seconde propriété n'est pas corrélée à l'approche, mais est une simple différence technique : effectivement le formalisme des équations différentielles est propre aux modèles à compartiments, modèle archétypique de l'approche phénoménologique (cf. point suivant), mais *in fine*, le résultat dans le modèle d'action peut être le même si la méthode d'intégration numérique est d'ordre 1.

4°) Chaque approche a son modèle archétypique :

modèle à compartiments / modèle de simulation à événements discrets;

Remarque :

Ces deux types de modèles ne sont pas exclusifs (cf. le modèle PARIS qui est composite), et il existe d'autres types de modèles, par exemple les automates cellulaires (pour les modèles de propagation spatiale), ou encore des types de modèles utilisés pour la modélisation d'autres types de systèmes que les écosystèmes (chaînes de Markov, réseaux de files d'attente, réseaux de Petri, etc.).

La propriété duale caractérisant la différence entre ces deux types de modèles est la correspondance entre les entités du modèle et celles du système (cf. 2.4.2 et 2.4.3) : correspondance "**transverse**" / **biunivoque**.

Remarque : Attention! Le formalisme objet est indépendant de toutes ces propriétés duales. On peut quand même remarquer qu'il est parfaitement adapté à l'approche constructiviste, et il lui est d'ailleurs historiquement lié : le premier langage orienté objet mis au point à la fin des années soixante (Simula) était destiné à la simulation à événements discrets.

5°) Cette dualité dans les archétypes de modèles induit d'autres propriétés duales (cf. 2.4.3) :

- la plus caractéristique : **modèle continu / modèle discret** ;
- **structure implicite / structure explicite** ;
- **flux explicites / flux implicites** ;

6°) On peut encore citer (cf. 2.5, 2.7) :

- **modèles déterministes / modèles stochastiques** ;
- **modèles non spatialisés / spatialisés** ;

Remarque : la dernière propriété peut sembler un peu forcée : on pourrait dans ce cas, pour toute propriété P énoncer des propriétés duales P / non P !! Elle est en fait justifiée parce que la plupart du temps, les modèles à compartiments ne sont pas spatialisés (ce qui n'est d'ailleurs pas le cas des modèles à compartiments inclus dans PARIS), et les modèles à événements discrets, qui sont souvent individus-centrés sont très souvent, dans ce cas, spatialisés.

Des questions testant la compréhension directe du document :

Question : Comment l'environnement d'un système ouvert est-il finalement modélisé dans le modèle d'action ?

Réponse : C'est l'ensemble des paramètres d'entrée du programme de simulation.

Question : La hiérarchie d'un système peut-elle être modélisée ?

Réponse : Oui, c'est tout l'intérêt de la relation de spécialisation / généralisation entre les classes d'un modèle objet.

Question : Pourquoi dit-on qu'un système complexe ne se réduit pas à la somme de ses composants ?

Réponse : Parce que ce sont les interactions entre composants, entre groupes de composants, entre niveaux hiérarchiques, qui sont déterminantes.

Question : PARIS relève-t-il d'une approche phénoménologique ou d'une approche constructiviste ?

Réponse : Les deux : les modèles à compartiments (sous-modèle végétal et sous-module "métabolisme" du sous-modèle animal) décrivent de manière fonctionnelle et globale les phénomènes observés. Ils relèvent d'une approche phénoménologique, et leur but est plutôt de reproduire fidèlement les phénomènes pour fournir une infrastructure réaliste aux modèles de comportements animal. Le module "social" du sous-modèle animal relève d'une approche constructiviste : il cherche à expliquer comment se comporte un troupeau, non pas en l'observant et en reproduisant son comportement avec des fonctions, mais en cherchant à reconstruire le comportement collectif à partir des interactions des comportements individuels.

Question : Donner un exemple d'approche descendante dans PARIS.

Réponse : La modélisation, dans le sous-modèle végétal, de la variation de biomasse des feuilles vertes à la fin de la section **A1** : M_{FV} dépend entre autres de $\Delta M_{croissance_{FV}}$, qui dépend entre autres de ΔM , qui dépend entre autres de $\Delta M_{potentiel}$, qui dépend entre autres de l'élongation potentielle journalière des nouvelles feuilles, qui dépend entre autres de la longueur des feuilles matures ...

Question : Donner un exemple d'approche montante dans PARIS.

Réponse : le module "social" du sous-modèle animal : le comportement du troupeau est déterminé par celui des individus.

Question : Donner les caractéristiques essentielles du modèle PARIS. Est-il vraiment un modèle à événements discrets ?

Réponse : Les caractéristiques sont données au début du document annexe : "PARIS est un modèle stochastique, à événements discrets, dirigé par événements suivant une approche en trois phases". Ce n'est pas, au sens strict un modèle à événements discrets parce qu'il inclut des modules qui sont des modèles à compartiments. Mais au niveau global (interaction du troupeau avec l'environnement), le temps est géré comme dans un modèle à événements discrets.

Question : Quelle est la différence entre composition et agrégation ?

Réponse : cf. avant dernier paragraphe du **2.4.1**.

Question : Comment gérer le temps si le modèle comporte des processus agissant à des échelles de temps très différentes ?

Réponse : Avec une approche en trois phases.

Question : PARIS est-il un modèle spatialisé ? Si oui, sa modélisation de l'espace est-elle implicite ou explicite ?

Réponse : Oui, PARIS est un modèle spatialisé. Sa modélisation de l'espace est explicite pour deux dimensions, et implicite pour la troisième (modélisation de la distribution en hauteur de la biomasse dans le sous-modèle végétal).

Question : pourquoi le flux $FGPR$ est-il affecté d'un signe négatif dans l'équation différentielle donnant les variations de GP et d'un signe positif dans celle donnant les variations de PP ?

Réponse : Parce que il représente le flux allant du compartiment GP vers le compartiment PP .

Des questions plus difficiles nécessitant des déductions et un bon recul par rapport au document :

Question : Les modèles à compartiment sont-ils incompatibles avec le formalisme objet ?

Réponse : Pas du tout : rien n'empêche de représenter un compartiment avec un objet; ses attributs sont les différentes variables quantitatives qui interviennent dans les flux;

Question : Pourquoi parle-t-on d'exécutions "simultanées" en mettant le mot "simultanées" entre guillemets ?

Réponse : La simultanéité n'est que par rapport au temps de simulation. L'ordinateur (sauf dans le cas rarissime d'une simulation parallèle sur une architecture multiprocesseur) ne peut gérer chaque processus que séquentiellement.

Question : Quel est l'intérêt d'utiliser des cellules de forme hexagonales par rapport à des cellules carrées ?

Réponse : Les distances entre les centres des cellules voisines sont égales quelle que soit la direction.

Questions de culture scientifique (difficiles) :

Question : Connaissez vous des méthodes d'intégration numérique. Si oui qu'appelle-t-on l'ordre de la méthode ?

Réponse (à compléter) : méthode d'Euler d'ordre 1, d'ordre 2, méthode de Runge-Kutta d'ordre 4.

Question : Qu'appelle-t-on une grandeur quantifiée ? Donner des exemples de grandeurs physiques qui sont quantifiées à l'échelle microscopique.

Question : Existe-t-il des systèmes stochastiques ?

Réponse (à compléter) : Einstein a dit que "Dieu ne joue pas aux dés", mais tout le monde n'est pas d'accord ...

Question : Qu'entend-on par "phénomène émergent" ? Donner un exemple bien connu (dont l'analyse prête à controverses outre Atlantique).

Réponse (incomplète) : voir le dernier paragraphe du **2.2**. La fourmi "architecte" est une allusion au Grand Architecte et aux débats sur l'évolution qui, selon la théorie Darwinienne, est un phénomène émergent.