

Représentation informatique d'un ensemble d'objets spatiaux structuré et déformable (à partir d'un exemple de structures microscopiques de sols gonflants)

E. PERRIER¹, J.P. TREUIL¹, C. CAMBIER², M. RIEU³

¹ Laboratoire d'Informatique Appliquée, Orstom, 32, av. H. Varagnat, 93143 Bondy Cedex, France

² Laboratoire d'Informatique du Littoral, Université du Littoral, BP717, 62218 Calais Cedex, France

³ Département Eaux Continentales, Orstom, 213 rue Lafayette, 75480 Paris Cedex 10, France

RESUME

Des structures microscopiques de sol sont représentées comme un ensemble de particules élémentaires, souvent regroupées en agrégats, et dont l'assemblage est déformable (il varie avec la teneur en eau dans les sols gonflants). En première partie, nous présentons des déformations de structure effectuées suivant des contraintes géométriques s'appliquant globalement à l'échelle d'un échantillon et de ses différents niveaux d'organisation. Nous montrons ensuite comment la gestion d'un spectre étendu de déformations possibles conduit à une programmation plus locale des déplacements de particules. Il est alors possible d'envisager la prise en compte des processus physiques identifiés à l'échelle des objets individualisés de la structure, et, dans une deuxième partie, nous exposons de façon formelle comment nous abordons la question sous un double aspect géométrique et mécanique. En troisième partie, nous présentons les principes généraux d'une recherche en cours, dans laquelle nous construisons un simulateur "multi-agents" pour modéliser les processus de déformation d'un milieu spatialisé comme résultant des comportements locaux d'un ensemble d'objets autonomes et en interaction.

INTRODUCTION

Notre réflexion s'appuie sur une étude spécifique de modélisation des propriétés hydriques du sol en fonction de son organisation structurale, tenant compte des variations de cette organisation en fonction de la teneur en eau (Perrier, 1994; Perrier *et al.*, 1995). La

création de structures virtuelles sur ordinateur visait à recréer des types d'organisations naturelles, puis à simuler leur comportement hydrique global à partir de lois physiques de fonctionnement données à l'échelle des pores. Nous nous référons aux publications citées en ce qui concerne les résultats de cette étude; notons seulement ici que si le comportement hydrique du sol est intimement lié à la distribution des pores dans lesquels l'eau circule, la distribution des pores se déduit elle-même de la répartition spatiale des éléments solides. Dans les sols déformables, il est donc nécessaire de pouvoir tenir compte des variations de l'assemblage des solides en fonction de la teneur en eau du sol. Dans cette communication, c'est essentiellement la méthode de construction de milieux spatialisés suivant une approche de "naturaliste" et la méthode de gestion des déformations que nous désirons présenter et discuter, dans une perspective de généralisation.

UNE REALISATION "ORIENTEE-OBJET": DEFORMATION GEOMETRIQUE DE LA STRUCTURE DES SOLS

Création de structures poreuses

Fragmentation hiérarchisée de l'espace, relations spatiales locales

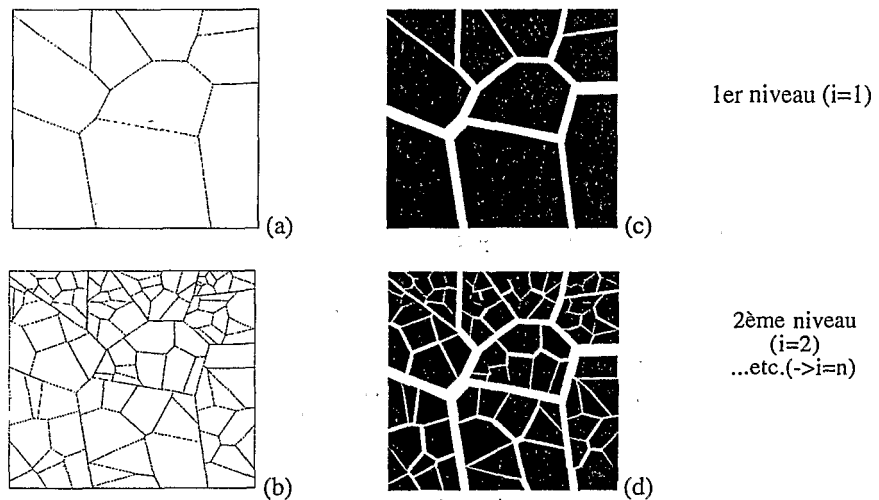


Figure 1. (a) (b) Partition de l'espace sur plusieurs niveaux emboîtés
(c)(d) Définition d'entités individualisées: ici des particules solides ou des agrégats de particules dans un échantillon virtuel de sol bi-dimensionnel modélisant l'assemblage de volumes.

Dans cette application, des structures de sol sont générées en 2-dimensions. Elles sont basées sur une fragmentation de l'espace à partir d'un jeu quelconque de germes initiaux (tessellation de Voronoï), fragmentation réitérée sur plusieurs niveaux d'emboîtement successifs pour représenter plusieurs niveaux d'organisation structurale. On obtient ainsi un squelette de structure (Fig.1a,b). Puis on associe à chaque zone de fragmentation, un élément solide représentant un agrégat de particules ou une particule élémentaire suivant l'échelle

d'observation (Fig.1c,d). On utilise pour cela des transformations géométriques simples, généralement des homothéties contractant les zones initiales dans des rapports variables, introduisant des espaces vides et identifiant les objets à manipuler.

Chaque élément individualisé de la structure poreuse est représenté par un objet informatique dans lequel toute information relative à la localisation de cet objet et à son fonctionnement est enregistrée. C'est ainsi que les relations de voisinage et de hiérarchie sont des attributs locaux de chaque objet. Les caractéristiques des transformations géométriques associées à une zone de fragmentation sont aussi enregistrées au sein de chaque objet (par exemple le point utilisé comme centre d'homothétie ainsi que le nombre réel définissant le rapport d'homothétie utilisé pour une zone donnée d'un niveau donné).

Déformation de structures Topologie constante, et géométrie variable.

Dans l'exemple ci-dessous les mêmes particules élémentaires, regroupées dans les mêmes agrégats plus ou moins visibles, et conservant les mêmes relations de voisinage, sont présentées dans plusieurs assemblages géométriques dont les propriétés fonctionnelles vont bien sûr différer.

Les transformations géométriques du milieu sont effectuées par rapport à une structure topologique constante, et permettent de gérer des évolutions réversibles. Plusieurs types de transformations géométriques définies sur un même "squelette" de référence (Fig.2a) permettent de définir de multiples états structuraux (Fig.2b,c,d,e,f).

Par exemple, dans le cas de transformations homothétiques effectuées à chaque niveau de fragmentation i , réduisant chaque zone à partir de son centre de gravité dans un rapport k_i constant, la forme d'une particule solide de dernier niveau n est entièrement décrite par la zone du squelette correspondante et sa taille par le produit des rapports d'homothéties successifs. Il s'ensuit que plusieurs jeux de rapports d'homothéties différents mais de produit identique permettent de définir autant d'états structuraux possibles d'une même structure déformable (Fig.2b,c,d).

Un état structural est dit géométriquement acceptable s'il respecte la cohérence de la partition de l'espace en éléments toujours disjoints. Dans le cas particulier des transformations homothétiques principalement utilisées, définies à partir du centre de gravité ou d'un point quelconque situé à l'intérieur de chaque zone polygonale convexe, et suivant des rapports contractants ($0 < k_i < 1$), il se trouve que la cohérence de la partition est toujours respectée, et il est donc possible d'envisager une infinité d'états structuraux géométriquement possibles de ce type pour une même variation globale de volume observé. Rentre dans ce cadre le cas où les centres et les rapports d'homothétie sont choisis aléatoirement (resp. à l'intérieur de chaque

zone et entre 0 et 1), ce qui permet de générer des structures désordonnées (Fig.2e) dans lesquelles les distributions de taille des éléments solides et vides sont conservées globalement, mais dont la connectivité du réseau poral ouvert à l'écoulement des fluides est profondément modifiée.

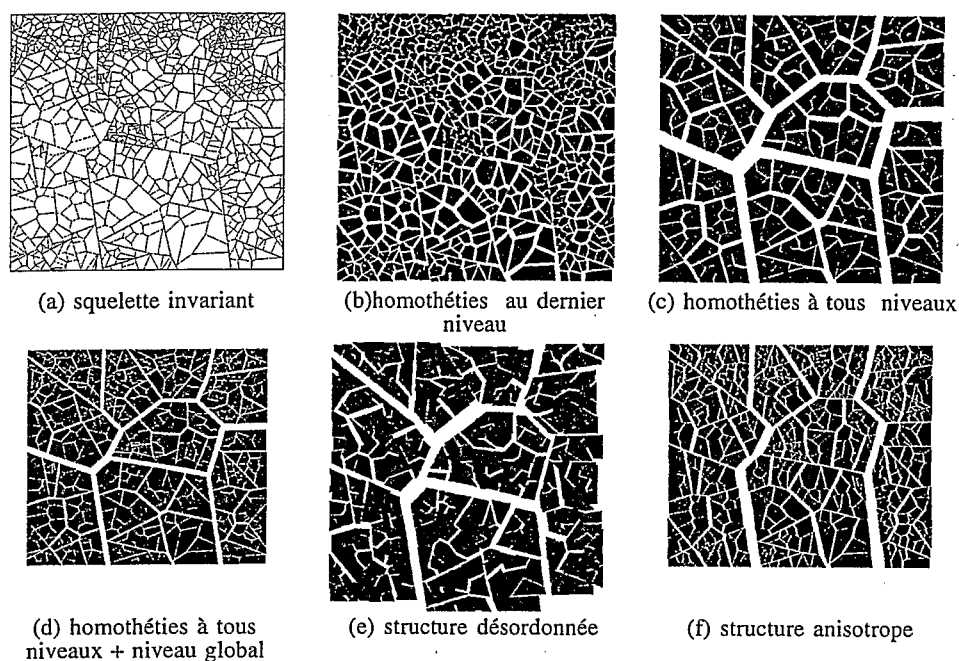


Figure 2. Déformation d'un ensemble d'objets élémentaires invariants. Plusieurs états structuraux possibles (b,c,d,e,f) pour une structure topologique constante (a)

Mais la cohérence géométrique de la structure s'avère plus difficile à respecter lorsque des transformations plus complexes sont envisagées et représentées sous la forme de translations, rotations, ou affinités. C'est le cas par exemple lorsque l'on considère des transformations anisotropes où les variations des rapports d'homothéties s'effectuent différemment suivant les différentes directions de l'espace (Fig.2f). On utilise alors des composées d'affinités orthogonales dans chacune des directions (qui se réduisent à une homothétie lorsque leurs rapports sont identiques). Mais suivant les configurations du squelette, des chevauchements de particules apparaissent çà et là, d'autant plus souvent et d'autant plus fortement que le coefficient d'anisotropie est élevé (Fig.3). Dans un premier temps, nous nous sommes contentés d'éliminer les déformations qui conduiraient à de tels recouvrements, sur un critère global de surface totale occupée (en sommant les aires des solides élémentaires et de l'espace poral et en comparant avec l'aire totale).

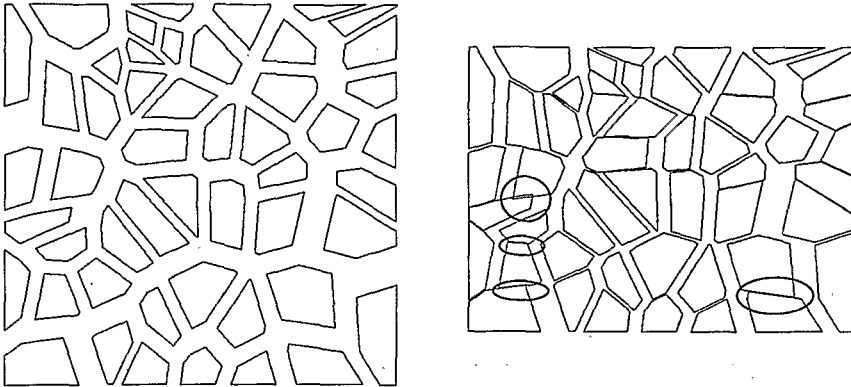


Figure 3. Recouvrements de particules (zones entourées par des ellipses) lors de transformations fortement anisotropes définies globalement

Programmation globale, programmation locale.

Jusqu'ici, les paramètres de la déformation sont calculés globalement:

- en fonction de deux contraintes géométriques: la première est une modification imposée du volume total de l'échantillon virtuel (analogue à celle observée sur un échantillon réel, et représentée en 2D par une modification de surface); la deuxième est l'invariance de forme et de volume de chaque particule élémentaire identifiée au dernier niveau de fragmentation.
- en fonction de différentes hypothèses émises sur la nature des réarrangements internes: les agrégats d'un niveau d'organisation donné varient plus ou moins en forme, volume, et localisation.

A partir d'un état structural au temps t , la procédure "espace.déforme (contraintes, hypothèses)" calcule les paramètres des transformations géométriques définissant l'état structural au temps $t+1$, et transmet ces paramètres à l'ensemble des objets concernés. Chaque particule, par exemple, calcule alors localement sa nouvelle position suivant la nature et les paramètres des transformations qui ont été attribuées soit à elle-même, soit à ses agrégats parents dans la hiérarchie de fragmentation. Lorsque l'ensemble des particules et agrégats ont calculé leur nouvelle position, le contrôle de non-recouvrement est alors effectué (si des transformations autres que de simples homothéties ont été utilisées). Un seul recouvrement de particules (visible ou non sur l'écran, mais toujours calculable), entraîne alors le rejet des hypothèses émises par la procédure "espace.déforme ()".

Il est cependant aisé d'imaginer qu'un recouvrement local aurait pu être évité par une simple petite translation par exemple (cf. Fig.3), tout en respectant les contraintes ou hypothèses affectant les différents niveaux d'organisation. Pour éviter un recouvrement, il peut suffire de modifier la position d'une seule particule de l'assemblage, il peut aussi falloir modifier localement tout un ensemble de particules: la particule a priori recouverte se translate si

l'espace vide l'entourant le permet sinon, elle peut "demander à ses voisines" au sein d'un même agrégat de se translater un peu au préalable. Il s'agit ainsi de conférer à chaque particule une certaine "autonomie" tout en respectant des consignes qui lui sont transmises par une procédure de déformation globale. C'est ce que nous avons réalisé en introduisant une gestion locale des conditions de non-recouvrement, et des modifications a posteriori de la position de certaines zones, limitées pour l'instant aux zones concernées par les recouvrements et à leurs voisines immédiates. En effet la transmission systématique des déplacements de particules en particules pose des problèmes de programmation spécifiques, et ceci nous a amené à généraliser nos principes de programmation comme il sera exposé plus loin.

Une programmation plus locale peut donc permettre d'étendre le champ des déformations possibles au delà des cas simples associés à un type particulier de structures géométriques.

Dynamique de la déformation

Différentes hypothèses ou scénarios sur le type de réarrangement des particules sous une contrainte hydrique donnée ont été testés en fonction des implications qui s'ensuivent sur les caractéristiques hydrodynamiques. Le modèle fonctionne en dynamique, si l'on considère une succession d'états structuraux possibles en fonction de l'évolution de la teneur en eau au cours de différentes expériences de drainage ou d'imbibition. La dynamique proprement dite des processus physiques de déformation n'est pas abordée.

Il est clair que l'éventail des états structuraux possibles d'un point vue purement géométrique est très large, et que nous n'en avons testé qu'un sous-ensemble restreint. Une façon réaliste de limiter le champ des investigations possibles consiste à simuler une déformation pas seulement comme un changement d'état géométrique compatible avec des observations globales incomplètes et des hypothèses sur les réorganisations internes possibles, mais comme l'effet de la modification des forces hydriques ou mécaniques mises en jeu.

PRISE EN COMPTE SIMULTANEE DE FORCES ET DE CONTRAINTES GEOMETRIQUES LOCALES

Dans le type de modèle abordé ici, deux questions distinctes doivent être examinées :

- quelle est la nature et comment agissent les forces à l'origine des déformations?
- quelles contraintes géométriques s'imposent par ailleurs aux états possibles du système?

Les forces à l'origine des déformations sont, dans le contexte présenté dans la première partie, liées aux pressions et tensions superficielles entre l'air, l'eau et les solides. Sans entrer dans la physique du problème (voir par exemple Synder, 1990), nous supposons que dans une configuration d'éléments telle que celle de la figure 4, ces forces s'appliquent perpendiculairement aux interfaces de chaque élément, et qu'elles sont calculables localement

par une formule du type $F(d,p)$ où d est la distance entre les deux interfaces en vis à vis et p un vecteur de paramètres (dans notre cas par exemple, p comprendra la quantité et la pression locale de l'eau présente entre les deux interfaces). D'autres forces (par exemple gravitaires) pourraient de la même façon être introduites au niveau de chaque entité.

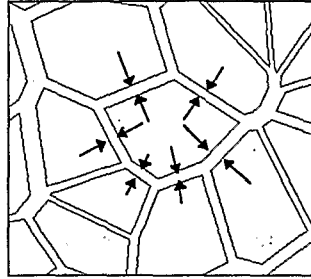


Figure 4. Forces (hydriques) locales agissant sur un élément solide donné

Une fois identifiées les forces actives ou du moins la part de ces forces que l'on souhaite modéliser, il est nécessaire de déterminer la façon dont elles peuvent travailler. Cela se fait en spécifiant les contraintes géométriques qui délimitent l'ensemble des transformations possibles du système. Nous avons évoqué précédemment les méthodes qui permettront, en exprimant ces contraintes au niveau local, d'élargir précisément l'ensemble des transformations envisageables dans les simulations. La prise en compte explicite de forces oblige toutefois à une certaine prudence, car il faut pouvoir être à même de calculer la résultante de ces forces, et la façon dont elles évoluent au fur et à mesure des transformations. Notre choix a été déterminé non pas pour son réalisme ou son absolue exactitude mécanique, mais par la capacité qu'il nous donne d'exprimer simplement une action des forces de liaisons aux interfaces. Cette conception conserve les structures obtenues par tessellation de Voronoï, et considère que les forces s'appliquant aux interfaces convergent vers le centre de gravité de chaque élément. Il n'y a pas de mouvements de rotation, les seuls mouvements autorisés sont des translations dans une direction quelconque de l'espace (ce modèle serait géométriquement et mécaniquement exact si les éléments étaient sphériques).

Pour des raisons de simplicité, nous ne considérons pour le moment qu'un seul niveau de décomposition : la prise en compte de variations données du volume des éléments peut d'ailleurs être une façon d'intégrer de façon exogène les transformations des niveaux inférieurs.

UN SIMULATEUR MULTI-AGENTS POUR L'ETUDE DE DEFORMATIONS SPECIFIEES GEOMETRIQUEMENT ET MECANIQUEMENT

Systèmes Multi-agents

La simulation de processus comportant des entités mobiles et/ou déformables sous l'influence de forces et de contraintes spatiales a été abordée par diverses approches. Dans notre contexte d'application notons le travail de Skjeltorp et Meakin (1988), étudiant, dans un réseau régulier de sphères se contractant, la formation de fissures sous l'effet des forces mécaniques reliant les sphères entre elles. Différents modèles conceptuels peuvent aider à la simulation informatique de tels processus : parmi eux les réseaux d'automates et les systèmes multi-agents. Dans cette dernière voie, qui présente par rapport à la première l'avantage de ne pas supposer à priori de connexions fixes entre les entités (Ferrand *et al.*, 1994), et qui permet de prendre en compte des interactions de nature variée entre ces entités, citons les contextes applicatifs de la robotique mobile (Hassoun *et al.*, 1992), et d'une façon plus abstraite la vision par ordinateur (Demazeau, 1991) ou les problèmes de généralisation cartographique.

L'informatique s'est très tôt conformée à notre tendance à découper le monde à notre échelle en objets, classés en catégories, dotés de propriétés, et entretenant entre eux divers types d'interactions. A travers les systèmes multi-agents, elle nous induit de plus à considérer les objets comme des agents s'échangeant des messages, s'animant et réagissant de façon autonome. Les systèmes multi-agents "réactifs" mettent en oeuvre des agents simples dont les actions sont directement liées, de façon réflexe, à leur perception (Ferber, 1995). C'est le formalisme et le vocabulaire des systèmes multi-agents réactifs de Ferrand *et al.* (1994) qui sont essentiellement repris ici.

Principes du simulateur

En s'inspirant de ces concepts pour construire, autour des problèmes évoqués dans les deux premières parties, notre propre simulateur, nous caractérisons des systèmes déformables par les propriétés suivantes:

- ils sont formés d'unités spatialement réparties sur un environnement.
- ces unités ont une certaine extension spatiale.
- ces unités peuvent se déplacer et sont éventuellement elles-mêmes déformables.
- ces unités s'influencent mutuellement par des liaisons. Chaque liaison détermine à chaque instant les forces qui agissent sur les unités qu'elle relie.

Dans de tels systèmes, chaque unité a ainsi un double champ de relations : un champ géométrique, constitué des unités les plus proches, et un champ mécanique, constitué des

liaisons qui agissent sur elle; ces deux champs sont à priori variables dans le temps. Toutefois, dans les déformations considérées ici, champ géométrique et champ mécanique se confondent, et de plus, leur topologie reste constante: chaque unité reste au contact - et sous l'influence - des mêmes autres unités au cours du temps.

Le premier principe du simulateur est la programmation locale. Diverses considérations (portant sur l'énergie potentielle, comme dans les méthodes de recuit simulé) montrent qu'il est possible d'obtenir des états d'équilibre d'un système soumis à des contraintes données, en parcourant à partir d'un état initial quelconque une succession d'états ne se distinguant chacun de celui qui précède que par des différences spatialement limitées et calculables localement. Ce principe général de localité s'applique également pour approximer par une séquence discrète d'états les dynamiques réelles de déformation (continues) d'un tel système.

Le second principe, "naturaliste", vise à ajuster au plus près les entités informatiques du simulateur à la façon dont nous voyons le monde physique. Il conduit à séparer nettement les connaissances géométriques des connaissances mécaniques, en les "encapsulant" (attributs et procédures internes, éventuellement inaccessibles de l'extérieur) dans des "agents" différents. Aux agents représentant informatiquement les unités du système et son environnement sont réservées les informations et procédures contrôlant sa géométrie, à ceux représentant les liaisons les informations et procédures concernant le calcul des forces.

De façon plus précise, le simulateur comporte les classes d'agents suivantes :

les unités : chaque unité a un état constitué de sa position dans l'environnement, d'une extension spatiale, d'un mouvement ; elle identifie son champ de relations géométrique (unités proches) et son champ de relations mécanique (liaisons actives) en les actualisant s'il y a lieu par des requêtes à l'environnement. A partir de cette information et de filtres de perception, elle maintient une représentation des contraintes géométriques et des forces mécaniques auxquelles elle est soumise. Elle en déduit l'état dans lequel elle devrait se trouver mécaniquement au pas de temps suivant et vérifie si cet état est géométriquement possible. Elle adresse éventuellement des requêtes aux unités de son champ géométrique pour leur demander de changer d'état.

les liaisons : chaque liaison a un état constitué d'un ensemble de paramètres. Elle identifie les unités qu'elle relie ; à partir de cette information et de filtres de perception, elle maintient une représentation de la disposition de ces unités, et en déduit les forces auxquelles elle les soumet.

l'environnement : l'environnement constitue en tant qu'agent autonome l'espace même sur lequel sont placées les unités: il est donc considéré comme un objet. Il possède un état représentant les propriétés de cet espace en chaque point. Il identifie l'ensemble des unités et des liaisons et dispose éventuellement de procédures lui permettant d'actualiser ces ensembles. En dehors de ce rôle de détenteur indirect de l'ensemble des informations caractérisant le

système à chaque instant, il peut également jouer un rôle actif par l'intermédiaire de liaisons mécaniques le liant à chaque unité.

La réalisation d'un prototype a d'ores et déjà permis d'expérimenter sur ces principes de programmation et devrait permettre d'avancer à terme dans notre compréhension des mécanismes de déformation des sols.

III.3 Pourquoi parler d'agents et non d'objets?

Les termes employés plus haut pour décrire le comportements des unités, des liaisons et de l'environnement sont volontairement anthropomorphes ; ils prêtent à ces entités des capacités (connaître, savoir, interroger, adresser, etc.) attribuées aux êtres humains, ce qui peut surprendre lorsqu'il s'agit d'entités physiques. Cette attitude anthropomorphique éclaire déjà la programmation objet. Il faut pouvoir considérer les objets " comme de petits êtres ... si caractéristiques des contes et des dessins animés, qui s'animent et réagissent de façon autonomes " (Ferber, 1990). Dans une conception générale où "il s'agit de demander aux objets d'accomplir eux même leurs actions" (Ferber, 1990), la distinction entre objet et agent n'est pas immédiate ; les deux notions apparaissent plutôt comme deux zones d'un continuum, et il est nécessaire de descendre à un niveau plus technique pour en caractériser les multiples dimensions (Boulanger et al., 1994).

Une première dimension est celle des modalités de *contrôle* qui règlent l'ordonnement des mises en activité et en veille des différentes entités informatiques du système.

Sur l'un des pôles de cette dimension, on trouve les mécanismes de gestion des messages où l'émission entraîne la mise en attente de l'émetteur et l'activation immédiate du récepteur, et où les messages et activités s'enchaînent les uns aux autres de façon séquentielle (Labidi et Lejouad, 1993). A l'autre pôle, on trouve des systèmes d'agents placés sur des machines différentes, travaillant en parallèle, recevant, traitant et émettant leur message selon une temporalité qui leur est propre.

Les simulations mises en oeuvre n'expriment pas toutes les mêmes besoins et ne se situent pas donc à la même place dans cette dimension : par exemple des procédures de type "recuit simulé" qui se concentrent sur la recherche d'états d'équilibre sans se préoccuper des dynamiques donnent séquentiellement la main, au hasard, à une succession d'unités, et ne requièrent nullement le parallélisme. A l'inverse, la représentation au plus près d'un processus réel de déformations se propageant de proche en proche appelle intrinsèquement ce parallélisme.

Une autre dimension régit l'axe "réactif/cognitif", c'est à dire la complexité du lien entre le message reçu et la réponse fournie. Chez un agent réactif, la réception d'un message entraîne toujours l'activation de la même méthode. Chez un agent cognitif, le message sera d'abord filtré par un "interpréteur" (Mariouchi et al., 1990), partie constitutive de l'agent, qui, en fonction de

l'état du moment, évaluera l'opportunité d'une action et choisira parmi une palette d'actions possibles après "délibération" (Ferber, 1995), l'action qui devra être réellement effectuée. Dans cette seconde dimension, l'enchaînement physique des modifications des liaisons et des déplacements d'unités sans extension spatiale, donc en l'absence de contraintes géométriques, est un mécanisme très réactif, dans lequel la modification d'une liaison entraîne de façon automatique la mise en oeuvre d'un déplacement. A l'inverse, la recherche de configurations satisfaisant des contraintes géométriques données requiert chez les unités une représentation de l'espace dans lequel elles peuvent se mouvoir, celle d'un but à atteindre (donné par les liaisons), et la capacité d'effectuer des "requêtes" à ses voisins avant toute action effective.

Une troisième dimension considère les capacités d'apprentissage des agents : capacité de construire dynamiquement leurs représentations, leur buts, leurs méthodes d'évaluation et d'action. Cette dimension elle même pourrait être mobilisée ici en dotant par exemple les unités d'un mécanisme leur permettant d'apprendre à calculer leur changement d'état à partir de données fournies par les liaisons, de manière à maximiser la perte de potentiel.

Ces quelques considérations montrent que penser en terme d'agents plus ou moins autonomes, plus ou moins complexes, plus ou moins figés, ouvre un grand champ de possibilités. L'approche multi-agents n'est pas indispensable pour programmer telle ou telle simulation particulière. Elle fournit par contre un cadre efficace pour penser et programmer la variété des mécanismes utiles à l'ensemble des simulations à effectuer dans un contexte donné.

CONCLUSION

Trois idées clés permettent de donner de notre travail de modélisation une description intrinsèque dégagée de son contexte d'origine, dans le but de le rendre plus général et de pouvoir alors appliquer les représentations informatiques qui lui sont liées à d'autres contextes et d'autres échelles :

- une vision géométrique et naturaliste d'un milieu spatialisé: l'espace se structure en objets spatiaux individualisés, et dont l'identité se maintient à travers les déformations affectant leur position, leur contour, et leurs attributs non spatiaux ;
- la représentation de multiples échelles d'observation sous forme de hiérarchie emboîtée : chaque objet individualisé à une certaine échelle est un agrégat d'objets plus élémentaires (cet aspect n'a été pris en compte que dans la première partie traitant de déformations purement géométriques).
- la modélisation de l'espace comme un réseau de relations géométriques et fonctionnelles entre composants élémentaires. Ce réseau peut évoluer dynamiquement, mais nous avons retenu dans notre application l'idée d'invariance topologique : chaque objet possède à l'échelle où il est défini, un ensemble de voisins qui reste le même au cours du temps.

En ce qui concerne le fonctionnement du système - il s'agit ici du processus de déformation - , son implémentation informatique repose sur le principe de localité, plaçant les règles de contrôle dans chaque objet. Ce principe a permis de représenter un milieu géométriquement complexe, ainsi que différents états de ce milieu, mais ne semble pas suffisant pour résoudre efficacement tous les problèmes posés par une modélisation plus physique et dynamique des processus mis en jeu. Des solutions sont recherchées dans le principe d'autonomie. Ce principe, issu des "systèmes multi-agents" (Ferber, 1995), pose les objets comme des individus ayant une certaine perception de leur environnement local et des forces auxquels ils sont soumis, ajustant leur rapports spatiaux mutuels en s'échangeant des messages.

De façon générale, ne voyant l'espace ni comme le substrat d'un problème de physique pure sans géométrie, ni comme une simple représentation géométrique statique, la gageure est de faire cohabiter des informations géométriques et fonctionnelles, ce qui s'accompagne nécessairement de schématisations à chacun de ces niveaux d'informations.

REFERENCES

- BOULANGER D. , COLLOC J., DUBOIS G., WINTERGERST C., 1994. *Objets - agents: continuum ou différences*, P.R.C.-G.D.R. Intelligence artificielle, Journées Systèmes Multi-agents, Paris, 12p.
- DEMAZEAU Y. , 1991. *Coordination patterns in multi-agent worlds. Application to computer vision and robotics*, In: Colloquium on intelligent agents IEEE, Savoy place, Paris, 9p.
- FERBER J., 1990. *Conception et programmation par objets*. Ed. Hermès, Paris, p.36-39.
- FERBER, J., 1995. *Les Systèmes Multi-agents. Vers une intelligence collective*. Ed. Interéditions, Paris, p.20-25 et p.205-206.
- FERRAND N., LABBI A., GIACOMETTI A., AMI B., DEMAZEAU Y., 1994. *Entre systèmes multi-agents réactifs et réseaux d'automates: pour une communauté de recherche*, P.R.C.-G.D.R. Intelligence artificielle, Journées Systèmes Multi-agents, Paris, 13p.
- HASSOUN, M., DEMAZEAU Y., LAUGIER C., 1992. *Motion control for a car-like robot : potential field and multi-agent approaches*, 3rd IEEE international conference on intelligent robots and systems, Raleigh, 1-7.
- LABIDI S., LEJOUAD. W., 1993. *De l'intelligence artificielle distribuée aux systèmes multi-agents*. INRIA Sophia Antipolis, Rapport de recherches no 2004, 5-10.
- MARIOUCHI T, ICHIKAWA M., TOKORO M., 1990. *Modelling autonomous agents and their groups*, in Decentralized A.I From the Proceedings of the 1st European Workshop on Modelling Autonomous Agents in a Multi-Agent World, North-Holland, Elsevier, Amsterdam, 215-233.
- FERRIER E., 1994. *Structure géométrique et fonctionnement hydrique des sols. Simulations exploratoires*. Thèse Univ. Paris VI. Hydrologie, Sciences de la terre, 253p.
- FERRIER E., MULLON C., RIEU M., DE MARSILY G., 1995. A Computer Construction of Fractal Soil Structures. Simulation of their Hydraulic and Shrinkage Properties. *Water Resources Research*, 31(12), 2927-2943.
- SKJELTORP A.T., MEAKIN P., 1988. Fracture in microlayers studied by experiment and computer simulation. *Nature* Vol 335, 424-426.
- SNYDER A.V. , 1990. Scaling of mechanical forces and stresses in unsaturated granular soils, in *Scaling in soil physics: principles and applications*. SSSA Special Publication no.25, 73-108.

Etude des phénomènes spatiaux en agriculture

Colloque organisé par le groupe
«Etude des phénomènes spatiaux»
(INRA-EPS)
avec la Direction de l'Informatique de l'INRA
La Rochelle (France), 6-8 décembre 1995

Prêt prolongé
M. Simonneaux

O.R.S.T.O.M.	
Dpt : MAA	UR : 4 8A
Cds DOC n° de 1996	

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
147, rue de l'Université - 75338 Paris Cedex 07

Cg
INR

- 6 MARS 1997

0 100 01786

Ce colloque a été édité avec la participation financière :

- du Département de Biométrie et Intelligence artificielle (INRA-BIA)
- du Département Systèmes agraires et Développement (INRA-SAD)
- de la Direction Scientifique Environnement physique et Agronomie (INRA-EPA)
- de la Direction Scientifique Sciences économiques et sociales pour l'Agriculture et l'Agro-alimentaire et Méthodes d'Etudes des Systèmes (INRA-SESAMES)

Editeurs / Editors

C. CHRISTOPHE
INRA, Direction de l'Informatique
Unité de Science du Sol
11, rue Jean Nicot
75007 Paris, France

S. LARDON
INRA - SAD
2 place Viala
34060 Montpellier Cedex, France

P. MONESTIEZ
INRA, Biométrie
Site Agroparc
84914 Avignon Cedex 9, France

En vente / For sale

INRA Editions
Route de St Cyr, 78026 Versailles Cedex, France

© INRA, Paris, 1996
ISBN : 2-7380-0699-X

© Le code de la propriété intellectuelle du 1er juillet 1992 interdit la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Le non respect de cette disposition met en danger l'édition, notamment scientifique. Toute reproduction, partielle ou totale, du présent ouvrage est interdite sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC), 3, rue Hautefeuille, Paris 6ème.