

SUR LA MODÉLISATION DE SYSTÈMES COMPLEXES À DIFFÉRENTES ÉCHELLES D'ESPACE ET DE TEMPS

Christian MULLON*

INTRODUCTION

Il y a de la démesure, si ce n'est du sacrilège, à envisager de modéliser la forêt, objet chargé de significations, symbolisant l'inconnu, l'obscurité, l'effroi, la terreur irraisonnée, mais aussi la plénitude, la sagesse, la puissance ou la majesté. C'est également un vieux rêve. Le Programme Environnement du CNRS fait certainement preuve d'audace en nous proposant de le concrétiser.

On peut aujourd'hui envisager la modélisation d'un arbre (croissance), d'un écosystème forestier de quelques hectares (dynamique des populations, compétition, coopération) et même d'une forêt de quelques dizaines de kilomètres carrés (bilans énergétiques, sensibilité climatique). Les travaux d'Oldeman sur la forêt guyanaise ont un niveau de formalisation qui se prête naturellement à la modélisation (Oldeman, 1974). Toute la difficulté, dans le projet qu'il nous est demandé de concevoir, réside, à mon avis, dans la nécessaire articulation entre différents niveaux de modélisation.

Avec le développement des capacités informatiques et autour du nouveau paradigme que constituent les théories de la complexité, du chaos, la pratique de la modélisation connaît actuellement une transformation rapide, tourmentée. Je voudrais ici, de façon certainement abrupte, préciser comment, à mon avis, se pose aujourd'hui, dans ce cadre changeant, le problème de la prise en compte de la multiplicité des échelles lors de la modélisation d'un système complexe (Allen & Starr, 1982 ; Mullon, 1991 ; Baudry, Auger & Fournier, 1993).

TRANSFERT D'ÉCHELLE

De nombreux programmes de recherche multidisciplinaires sont articulés en une phase d'études préliminaires, chacune à son échelle propre (par exemple, en hydrologie, études de bassin versant, études de parcelles, études de colonnes de sol) et une phase de synthèse, de transfert d'échelle. À l'expérience il s'avère que, si les protocoles sont bien établis pour la première phase et des résultats obtenus, il n'en est, la plupart du temps, pas de même pour la seconde très souvent laissée

*Laboratoire d'Informatique Appliquée, ORSTOM - 93143 Bondy Cedex.

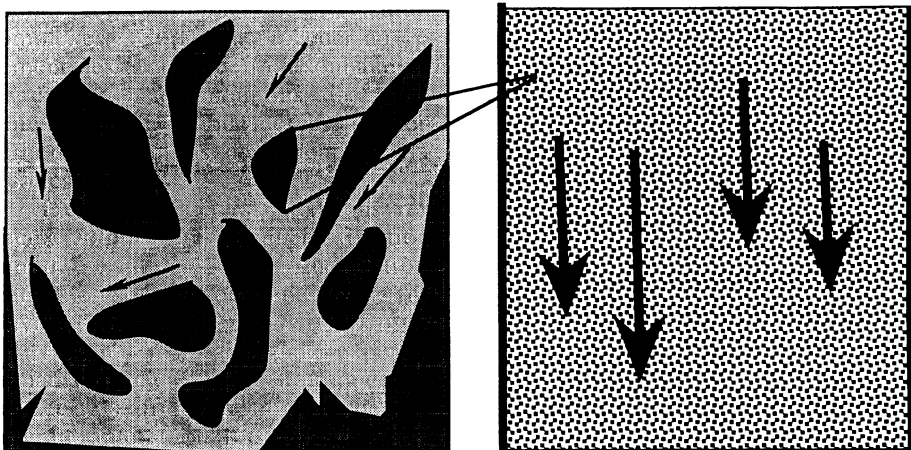


Figure 1. — Ecoulement de l'eau dans le sol aux échelles microscopique et macroscopique

en plan. Ceci n'est pas sans doute pas fortuit. La difficulté d'effectuer une synthèse entre modèles à différentes échelles est souvent sous-estimée. Prenons le risque de le dire crûment : sauf exceptions, l'articulation de modèles à diverses échelles, le transfert d'échelle « ne marche pas bien », du moins dans le domaine de la recherche appliquée. On doit tenir compte des bilans négatifs établis en la matière au sein de disciplines aussi diverses que l'hydrologie (Lebel, 1991) ou l'économie politique (Couty, 1991). Le « No Bridge » est la règle dans la plupart des disciplines. Il serait illusoire de croire qu'il en sera différent en écologie, où pourtant se pose si naturellement la question de la multiplicité des échelles (Baudry, Auger & Fournier, 1992).

HÉTÉROGÉNÉITÉ

L'examen d'un des rares cas de transfert d'échelle réussi, celui de la modélisation de l'écoulement de l'eau dans le sol (Perrier, 1991) permet d'appréhender la difficulté. Au niveau microscopique (micron), le phénomène est régi par les équations de Navier-Stokes, équations de base de l'hydrodynamique ; leurs conditions aux limites imposent de prendre en compte la structure fine du sol, la géométrie de l'ensemble complexe constitué des pores et des agrégats ; on conçoit la difficulté (pratique et théorique) de formaliser et de résoudre de tels systèmes. Darcy a montré que l'on pouvait de façon très satisfaisante représenter ce système au niveau macroscopique (mm) par une équation beaucoup plus simple et facile à intégrer.

L'équation de Darcy, vérifiée empiriquement, mais non justifiée théoriquement, a longtemps été une énigme. Dans les années 1980, de façon indépendante, Matheron (1979) et Withaker (1986) ont montré comment l'équation de Darcy découlait des équations de Navier-Stokes. Leur argumentation est intéressante :

ils examinent les conditions qui permettent de calculer des « moyennes » des fluctuations microscopiques ; c'est seulement parce qu'ils disposent d'une mesure de l'hétérogénéité du milieu qu'ils peuvent démontrer que les fluctuations microscopiques, aléatoires, se propagent de façon ordonnée au niveau macroscopique.

Là réside la principale difficulté du transfert d'échelle entre modèles écologiques : on ne dispose pas, aujourd'hui, en écologie, en dépit d'efforts constants en matière de modélisation statistique et mathématique (Pielou, 1977, Pascal, 1994), de système de mesure de l'hétérogénéité qui permette effectivement d'envisager d'articuler des modèles à différentes échelles. Ce manque apparaît constituer une des questions-clés de l'écologie d'aujourd'hui (May & Southwood, 1990).

VIE ARTIFICIELLE

La Vie Artificielle (Mayer *et al.*, 1990 ; Ferber, 1989 ; Langton *et al.*, 1989, Varela & Bourgine, 1991) est un domaine de recherche récent dans lequel on construit des versions artificielles des systèmes vivants, essayant de synthétiser à cette occasion des points de vue très divers sur la complexité : informatique, cognitiviste, psychologique, biologique, écologique, philosophique. L'objectif est de formaliser des questions de biologie théorique : « understanding life by attempting to abstract the fundamental dynamical principles underlying biological phenomena » (Langton *et al.*, 1989). Inversement, pour construire des systèmes artificiels, il y a beaucoup à apprendre des systèmes naturels, et il existe des applications de la Vie Artificielle en informatique théorique dans des domaines aussi divers que la résolution de problèmes (Ferber, 1989), l'intelligence artificielle distribuée (Ferber, 1989), la robotique (Husbands *et al.*, 1993).

Les recherches en Vie Artificielle se focalisent autour de plusieurs types de modèles et présentent des niveaux d'abstraction variés.

* *modèles abstraits* comme les algorithmes génétiques, représentation d'une évolution de type Darwinien, processus d'adaptation et apprentissage (Holland, 1975), les réseaux neuronaux, représentation du fonctionnement neuronal, processus cognitifs (Lippman, 1987), mais aussi les automates cellulaires, représentation d'interactions spatialisées, de processus de diffusion (Wolfram, 1987), ou les machines de Boltzman (représentation du désordre (Aarst & Korst, 1992).

* *modèles réalistes* comme les systèmes multi-agents (Drogoul *et al.*, 1991) qui mettent en jeu des individus disposant de capacité de réaction (réflexes), de perception (environnement) et de cognition (apprentissage, mémorisation) et qui s'appliquent en éthologie ou en sociologie.

Les modèles de la Vie Artificielle permettent de représenter et de faire jouer des notions comme celles d'organisation, adaptation, apprentissage, hystérésis. Le concept le plus important est celui d'émergence : comment une propriété globale du système émerge-t-elle à partir des comportements de ses composants individuels ? Un résultat spectaculaire des recherches en Vie Artificielle réside dans l'explicitation du mécanisme de vie au bord du chaos, moyen par lequel un système acquiert des propriétés propres au vivant en se maintenant dans des conditions voisines d'un brusque changement d'état.

La Vie Artificielle peut être considérée comme une théorie qui traite du transfert d'échelle entre local et global en privilégiant une approche ascendante (Bottom-Up, des individus au système) alors que l'on peut considérer que la théorie « systémique », issue de la cybernétique, formalisée par exemple autour de la notion de boucle de rétro-action, distinguant flux de matières et flux d'information (Forrester, 1984) suit une approche descendante (Top-Down, du tout aux parties).

La Vie artificielle est, peut-être, une voie pour aborder le transfert d'échelle. Aujourd'hui, l'emploi de ses outils (simulations informatiques) et de ses principes (approche ascendante) se généralise en biologie, notamment en éthologie et en génétique ; de nombreux travaux de recherche se constituent associant informaticiens et biologistes (Mayer *et al.*, 1990) ; notons qu'à l'occasion de ces travaux, les chercheurs abordent le problème de la mesure de l'hétérogénéité dans les systèmes (Langton *et al.* ; 1992).

Un certain nombre de problèmes typiques apparaissent à l'occasion de la construction de simulations de systèmes vivants. Ainsi le dilemme entre abstraction et réalisme : grâce à leur puissance, les outils actuels de simulation permettent d'envisager de construire des systèmes aussi complexes que l'on veut ; d'un autre côté, les modèles génériques abstraits comme les automates cellulaires posent des problèmes théoriques propres ; dans un cas, le simulateur se transforme en réalisateur de films, dans l'autre en mathématicien. Ce dilemme entre abstraction et réalisme est en fait, pourvu qu'on le pose clairement, plutôt fécond dans les programmes multidisciplinaires ; il est représentatif de la relation entre les modélisateurs qui recherchent des règles générales et les naturalistes qui ont un penchant pour le particulier.

PHYSIQUE STATISTIQUE

En physique statistique (Chandler, 1987), les propriétés macroscopiques d'un système à l'équilibre (par exemple, la pression) peuvent se calculer :

- en considérant toutes les configurations de ce système (ensemble d'atomes dotés de caractéristiques élémentaires : position, vitesse, magnétisation, etc...) qui sont possibles dans des conditions données ;
- en calculant directement pour chacune la quantité en question (la pression) ;
- en affectant à chacune une probabilité, fonction de l'énergie et de la température ; cette étape, dite d'évaluation de la fonction de partition, est la plus difficile à mettre en œuvre et nécessite une méthodologie d'utilisation du hasard, de « randomisation » (méthodes de Monte-Carlo) ;
- en calculant la moyenne de la distribution ainsi constituée, on retrouve par ce procédé les relations thermodynamiques usuelles entre volume, pression, température, énergie et on dispose d'une définition précise de l'entropie (Ellis, 1985), concept nécessaire pour mesurer le changement qualitatif qui se produit lors du passage à la limite thermodynamique, c'est-à-dire lorsque l'on fait tendre l'effectif de chaque combinaison vers l'infini, et que l'on s'éloigne ainsi des systèmes dynamiques finis, réversibles.

Il y a eu de nombreuses tentatives d'application des principes de la thermodynamique à la biologie et à l'écologie (Tonnelat, 1978), et, en particulier,

d'une façon astucieuse, de ceux de la physique statistique à la modélisation de la dynamique des populations (Kerner, 1957). Aujourd'hui, l'intérêt des biologistes pour la physique statistique a évolué. On considère de plus en plus la physique statistique comme l'archétype des approches ascendantes et on cherche à intégrer les simulations de la Vie Artificielle dans le cadre qu'elle définit (Langton *et al.*, 1992) ; ceci permet, en particulier, une nouvelle réflexion sur les pratiques de « randomisation » systématique.

En physique statistique, on obtient des résultats rigoureux parce qu'on ne se contente pas de la mise en évidence d'un phénomène émergent en créant et en observant un monde artificiel, mais parce qu'on envisage tous les mondes artificiels possibles. La physique statistique est ainsi une arithmétique des degrés de liberté et on imagine comment les principes qu'elle propose peuvent être une voie pour résoudre le dilemme présenté plus haut entre réalisme et abstraction.

Indiquons ce qui constitue, à notre avis, une différence essentielle entre les modèles de physique statistique et les univers construits en Vie Artificielle : les premiers de l'ordre de 10^{23} atomes ne sont pas du même ordre de grandeur que les seconds où on observe des propriétés émergentes avec 100 à 1 000 agents. Que signifie cette différence ? N'y a-t-il pas dans les ordres de grandeurs des classes d'universalité caractéristiques de la forme des processus émergents ?

RENORMALISATION

Depuis quelques années, se sont développées, en physique statistique, autour de la théorie du groupe de renormalisation, des idées qui sont étroitement liées aux problèmes de multiplicité d'échelles et qui en définissent une approche systématique et rigoureuse (Wilson, 1989 ; Creswick, Farach & Pool, 1992) ; ces idées sont les suivantes :

- pour la plupart des phénomènes physiques, une échelle de mesure s'impose ; lorsque ce n'est pas le cas, on est souvent en présence d'un phénomène de changement de phase, de transition brusque d'un état du système dans un autre ;

- ce qui caractérise un changement de phase, c'est la coexistence de deux ou plusieurs échelles de mesure ; par extension, au moment du changement de phase, il y a autosimilarité de la dynamique du système ; les interactions entre groupes d'individus (atomes) sont similaires aux interactions entre individus.

- On construit une fonction dite de renormalisation entre les paramètres de la dynamique du système qui indique comment, à l'occasion d'un changement d'échelle où l'on constitue des groupes d'individus, il faut recalculer les interactions entre groupes de façon à restituer la même dynamique globale.

- On itère le procédé, construisant alors des groupes de groupes, etc...

- Puisqu'il y a autosimilarité à ce moment, le changement de phase est défini comme étant un point fixe de cette fonction ; le comportement qualitatif du système au moment du changement de phase est conséquence de la forme de cette fonction en ce point.

- La méthode du groupe de renormalisation fournit alors une théorie générale des changements de phase ; elle permet d'associer le comportement qualitatif des systèmes au moment du changement de phase à un petit nombre de classes d'universalité et de montrer que celles-ci ne dépendent en fait que de la dimension de l'espace ambiant (2 ou 3 pour les systèmes physiques) et de la dimension du paramètre d'ordre (1, 2 ou 3 pour les systèmes physiques).

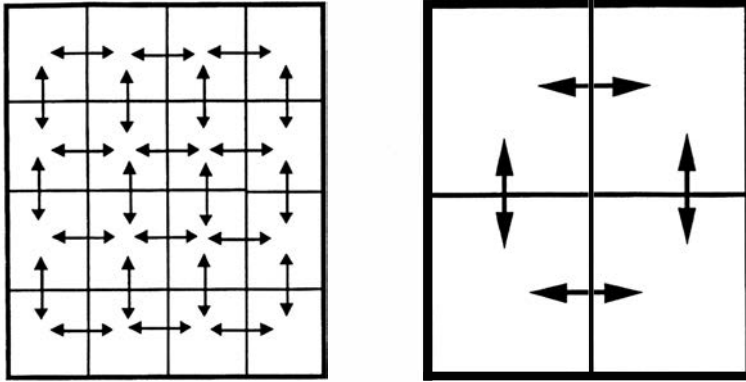


Figure 2. — Transformation de renormalisation : des interactions entre individus vers les interactions entre groupes de quatre individus.

La théorie du groupe de renormalisation explicite ainsi un lien étroit entre multiplicité d'échelles et changement de phase, entre comportement qualitatif au moment du changement de phase et classe d'universalité ; elle en montre la dépendance vis-à-vis de la structure topologique sous-jacent : dimension et connectivité.

CONCLUSION

Il peut être intéressant, à l'occasion du développement d'un programme de modélisation de la forêt tropicale à plusieurs échelles d'espace et de temps, de tenir compte des remarques précédentes, c'est-à-dire,

- de la difficulté du transfert d'échelle en écologie, et de la nécessité d'un système de mesure de l'hétérogénéité, préalable nécessaire au transfert d'échelle,
- de l'intérêt des outils de la vie artificielle pour aborder le transfert d'échelle,
- de la nécessité de se reposer sur les principes de la physique statistique considérée comme archétype des approches ascendantes, notamment sur ceux mis en œuvre dans la théorie de la renormalisation qui présente une approche rigoureuse des échelles.

Cela revient à recommander une attention soutenue dès la définition du protocole de recherche

- aux notions de changement de phase et de comportement qualitatif, à la topologie et la connectivité de l'espace sous-jacent ; on notera que les concepts introduits par Oldeman dans ses essais de modélisation de la forêt tropicale — compétition entre ensembles du passé, du présent et de l'avenir, surfaces d'inversion — rentrent assez naturellement dans ce cadre (Oldeman, 1974) ; de la même façon, on notera que les processus de dissémination des graines par les

animaux identifiés en tant que facteur déterminant (Charles-Dominique, 1993) définissent en fait une « topologie » sous-jacente de la dynamique de la forêt, particulièrement complexe et originale.

- aux problèmes de dépendance d'échelle, avec l'ambition d'aboutir à un système de mesure de l'hétérogénéité dans les écosystèmes complexes ; il s'agit ici de constituer des protocoles de recherche où l'on joue systématiquement sur les échelles plutôt que d'envisager plusieurs échelles initiales à concilier ultérieurement.

De façon plus générale, on peut considérer que la notion d'échelle doit devenir un élément de référence dans les discussions entre scientifiques et aménageurs. Elle doit apparaître explicitement de façon à ce que les partenaires des scientifiques prennent conscience qu'en matière de modélisation d'un phénomène complexe, le résultat d'une recherche réside souvent dans la détermination de l'échelle adéquate de perception, d'analyse et d'action. Quelle est l'échelle de temps (géologique, historique ou contemporaine) pertinente pour le diagnostic sur l'évolution de la forêt tropicale ? Quelle est l'échelle d'espace (écosystème ou ensemble de la forêt Amazonienne) à laquelle il faut prendre les décisions d'aménagement ? Voilà les questions réellement posées aux scientifiques ; la prise de décision et son exécution reviennent aux aménageurs.

REMERCIEMENTS

L'auteur remercie B. Riéra, P. Auger et J.P. Treuil de leur lecture critique, de leurs remarques et suggestions constructives.

RÉSUMÉ

Modéliser la forêt tropicale implique d'intégrer plusieurs échelles d'appréhension (de l'arbre à la forêt en passant par l'écosystème). Cela implique d'articuler des modèles à différents niveaux. Nous essayons de dégager les enseignements que l'on peut tirer des principes et des méthodes qui sont mis en œuvre en physique statistique pour aborder ce délicat problème du transfert d'échelle. Il nous apparaît que l'on doit insister sur :

- la nécessité d'une caractérisation préalable de l'hétérogénéité des systèmes dynamiques
- le changement de paradigme qu'implique en modélisation une approche « bottom-up » (de l'élément au système)
- la phénoménologie des transitions de phase
- le lien entre la caractérisation qualitative de la dynamique et la connectivité sous-jacente.

Nous proposons ensuite quelques éléments pour dégager la signification de ces idées dans le contexte écologique de la dynamique forestière.

SUMMARY

Modelling dynamics of tropical forests presupposes integration of several perception scales (from the tree to the whole forest passing through forest

ecosystem). It presupposes the articulation of models at different levels of analysis. We try in this paper to bring out some lessons from principles and methods of physics, especially statistical physics, for solving the delicate question of scale transfer. Then, it appears important to focus upon :

- the need for a preliminary characterization of heterogeneity in dynamic systems,
- the change of paradigm that is due to a « bottom-up » approach in scientific modelization,
- the phenomenology of phase transitions,
- the link between a qualitative characterization of dynamics and connectivity of underlying space.

Finally, we try to expound the meaning of these ideas in the connect of the modelling of forest dynamics.

RÉFÉRENCES

- ALLEN, T. F. H. & STARR, T. B. (1982). — *Hierarchy : Perspectives for Ecological Diversity*. Chicago U.P.
- AARTS, E. & KORST, J. (1992). — *Simulated annealing and Boltzmann machines*. J. Wiley, New York.
- AUGER, P. (1989). — *Dynamics and Thermodynamics in Hierarchical Organized Systems*. Pergamon.
- BAUDRY, J., AUGER, P. & FOURNIER, F. (eds) (1992). — *Hierarchie et échelles en écologie*. Naturalia publications.
- CHARLES-DOMINIQUE, P. (1995). — Interactions plantes-animaux frugivores, conséquences sur la dissémination des graines et la régénération forestière. *Rev. Ecol. (Terre Vie)*, 50 :
- CHANDLER, C. (1987). — *Introduction to Modern Statistical Physics*. Oxford U.P.
- COUTY, P. (1991). — Changement d'échelle et économicité ou l'enroulement des choses. In : Mullon, C. (ed) *Seminfor 4, Le transfert d'échelle*. Orstom, Paris.
- CRESWICK, R. J., FARACH, H. A. & POOL, C. P. (1992). — *Introduction to renormalisation group methods in Physics*. Wiley.
- DROGOUL, A., FERBER, J. & CAMBIER, C. (1992). — Multigent Simulation as a Tool for Analysing Emergent Processes in Societies. In : Gilbert, N. (ed) *Simulating Societies*. University of Surrey.
- ELLIS, S. (1985). — *Entropy, Large Deviations and Statistical Mechanics*. Springer Verlay.
- FERBER, J. (1989). — Eco-Problem Solving : how to solve a problem by interactions. *Proceeding of the 9th Workshop on Distributed Artificial Intelligence*, 113-128.
- FORRESTER, W. (1984). — *Principe des systèmes*. Presses Universitaires de Lyon.
- HOLLAND, J. H. (1975). — *Adaptation in natural and artificial ecosystems*. University of Michigan Press.
- HUSBANDS, P., HARVEY, I. & CLIFF, D.T. (1993). — *Analysing Recurrent Dynamical Networks Evolved for Robot Control*. Cognitive Science Research Paper, University of Sussex, School of Cognitive and Computing Science.
- KERNER, E. H. (1957). — A statistical mechanics of interacting biological species. *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 19, 121-146.
- LANGTON, C., TAYLOR, C., FRAMER, J. D & RASMUSSEN, S. (eds) (1992). — *Artificial Life II*. Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity, Proc. vol 10, Addison Wesley.
- LEBEL, L. (1991). — Le transfert d'échelle en hydrologie : concept ou confusion. In : Mullon, C. (ed) *Seminfor 4, Le transfert d'échelle*, Orstom, Paris.
- LIPPMAN, R. P. (1987). — An Introduction to Computing with Neural Nets. *IEEE ASSP Magazine*, April 1987, 4-22.
- MATHERON, G. (1979). — *L'émergence de la loi de Darcy*. Publication interne, Ecole des mines de Fontainebleau.
- MAY, R. M. & SOUTHWOOD, T. R. E. (1990). — Introduction, In : Shorrocks, B. & Swingland, I. R., (eds) *Living in a Patchy Environment*. Oxford Science Publications.
- MAYER, J. A., WILSON, S. W. & HUSBANDS, P. (eds) (1990). — *From animals to animats*. International Symposium on the simulation of adaptative Behaviour, M. I. T. Press.

- MULLON, C., (ed) (1991). — *Seminfor 4 : Le transfert d'échelle*. Orstom Paris.
- OLDEMAN, R. (1974). — *La structure de la forêt Guyanaise*. Orstom, Paris.
- PASCAL, J.-P. (1995). — Quelques exemples de problèmes posés à l'analyste et au modélisateur par la complexité de la forêt tropicale humide. *Rev. Ecol. (Terre et Vie)*, 50 :
- PERRIER, E. (1991). — Modélisation du fonctionnement hydrique des sols : Passage de l'échelle microscopique à l'échelle macroscopique. In : Mullon, C. (ed) *Seminfor 4, Le transfert d'échelle*. Orstom, Paris.
- PIELOU, E. C. (1977). — *Mathematical Ecology*. Wiley, New York.
- STEIN, L. (ed) (1991). — *Lectures in the Sciences of Complexity 2, Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity*. Lectures, vol 1, Addison Wesley.
- TONNELAT, J. (1978). — *Thermodynamique et Biologie*. Maloine.
- VARELA, F. & BOURGINE, P. (eds) (1991). — ECAL91 : Towards a practice for autonomous systems. *Proceeding of the first European Conference on Artificial Life*. MIT Press, Bradford Books.
- WILSON, K. (1989). — Les phénomènes physiques et les échelles de longueur, In : P. G. de Gennes (ed) *L'ordre du chaos*. Bibliothèque Pour la Science.
- WITHAKER (1986). — Flow in porous media, a theoretical derivation of Darcy's law. *Transport in porous media*, 3-25.
- WOLFRAMM, S. (ed) (1987). — *Theory and Application of cellular automata*. World Scientific.