

Apport des simulations à l'étude des morphogenèses naturelles, sociales et artificielles

Un parcours de recherche

Franck Varenne

Université de Rouen & ERIAC (EA 4705)

Plan de l'exposé

- Origine personnelle de la problématique de recherche (1993-1999)
- Le cas des plantes : du modèle à la simulation (2000-2010)
- Idée centrale : le passage à la simulation permet la conquête de l'espace
- Tests de cette idée hors de la biologie (2010-...)

ORIGINE DE LA PROBLÉMATIQUE DE RECHERCHE (1993-1999)

Origine personnelle de cette réflexion (1)

Activité d'ingénieur de recherche au Laboratoire de l'Horloge Atomique (CNRS) entre 1993 et 1996 :

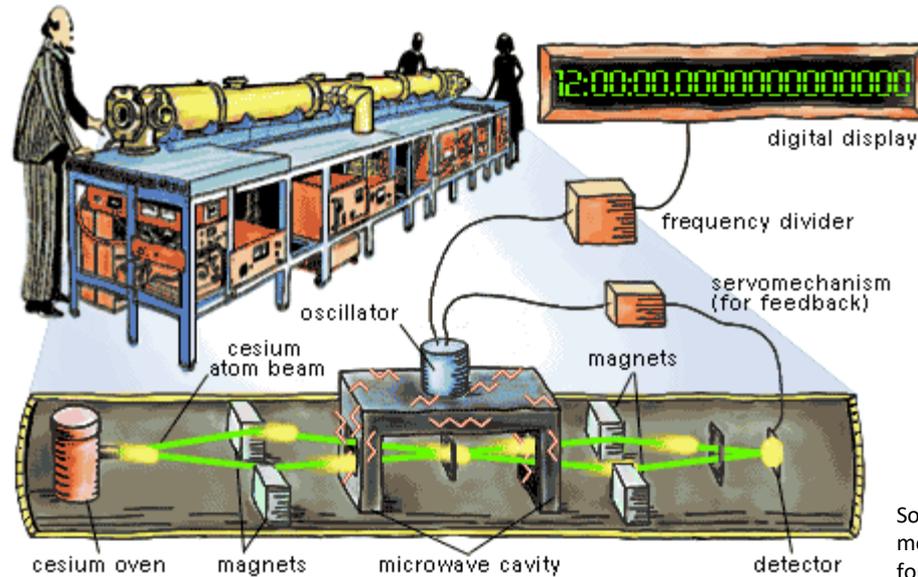
1993 et 1996 : Stagiaire (3 mois) puis Scientifique du Contingent (12 mois), en physique atomique et métrologie au Laboratoire de l'Horloge Atomique du CNRS (Orsay), depuis intégré au SYRTE UMR 8630 : <http://syрте.obspm.fr/>

Nature de mes recherches à l'époque :

1- Instrumentation d'une expérience de refroidissement d'atomes de césium par piège magnéto-optique. Gestion de l'informatique temps-réel du banc d'expérimentation.

2- Expérimentation sur cavité micro-onde d'une horloge atomique miniature. **Modélisation mathématique et simulation numérique** du comportement de cette cavité (sous la direction de Pierre Cérez, Noël Dimarcq et Bertrand Bousset).

Origine personnelle de cette réflexion (2)



Source : <http://horlogeatomiquesjp.e-monsite.com/pages/plan-du-tpe/principe-de-fonctionnement.html>

Principe d'une horloge à jet de Césium :

- *La cavité micro-ondes prépare les atomes de Césium en les installant dans un état d'interrogation*
- *La fréquence de l'émetteur micro-onde est asservie de sorte que sa fréquence finisse par être égale à la fréquence de transition ultrafine de l'atome de Césium*

Origine personnelle de cette réflexion (3)

1996 : Thèse de Bertrand Boussert : Horloge miniature, horloge embarquée (militaire)

- **Géométrie « exotique » de la cavité micro-onde**
- **D'où : Géométrie du rayonnement électromagnétique (hyperfréquences) dans les guides d'ondes difficiles à calculer**
- **Modélisation mathématique et simulation numérique du comportement électromagnétique de cette cavité (sous la direction de Pierre Céréz, Noël Dimarcq et Bertrand Boussert)**

Origine personnelle de cette réflexion (4)

1996 : Thèse de Bertrand Boussert (Supélec, PhD 1996) : Horloge miniature, horloge embarquée (militaire)

- **1. Mesures du profil d'onde sur la paillasse avec antenne de détection mobile** (F. Varenne)
- **2. Modélisation mathématique théorique et calcul exact** du comportement électromagnétique de cette cavité (B. Boussert)
- **3. Simulation numérique avec approximations** (B. Boussert, F. Varenne)
- **Résultats surprenants** : la simulation donne des résultats constamment plus proches des mesures de terrain que les calculs par le modèle théorique
- **Interprétation** : la modélisation mathématique reflète une idéalisation de la forme. Or la forme de la cavité a ses imperfections. La simulation, ajoute du bruit. Ce qui dégrade le signal et rend au final le résultat plus « réaliste ».
- **Pas publié** : car aucun contrôle sur la nature, l'origine exacte (discrétisation, troncature ?) et l'ampleur de l'ajout de bruit par l'approche numérique. Le plus grand « réalisme » de la simulation numérique est donc peut-être accidentel c'est-à-dire dû à d'autres imperfections (qui sont alors des imperfections « idéales ») que celles qui sont effectivement propres à la cavité réelle

Choix de problématique de recherche : le « destin » des formalismes avant et après les tournants computationnels

- **Objection** : la science, la physique a toujours modélisé (Blay)
- **Réponses** : 1) il y a eu le tournant formel des modèles, 2) des types nouveaux sont apparus, dont la simulation sur computer
- **Projet de recherche** : étude de la diversité et de l'évolution des types de modèles formels avant et après le computer
- **Etat des lieux en 2000** : à faire en dehors de la physique car Galison et quelques autres (Humphreys) ont dit l'essentiel de ce qu'il y avait à dire sur la simulation numérique en physique entre 1989 et 1997. Humphreys (2004) : simulation = modèle à gabarit computationnel et plus sélectifs et plus fins encore que les modèles traditionnels, mais dans la continuité. Galison : pluralisme des simulations, pluralisme à base linguistique et sociologique.
- **Donc** : choix pour les modèles et simulations de la croissance des plantes (agronomie, biologie du développement) : Du modèle à la simulation informatique, Vrïn, 2007 ; Formaliser le vivant : lois, théories, modèles ?, Hermann, 2010.

LE CAS DES PLANTES : DU MODÈLE À LA SIMULATION (2000-2010)



© BIONATICS 2007 - All rights reserved

Aulne - Source : Bionatics (<http://www.bionatics.com>)

Rapidly growing tree mature at about 60 years with long trunk and narrow crown. Distinctive outline in winter. Height 20m or more.

© Franck Varenne - Université de Rouen

Simulation informatique de l'architecture en agronomie

L'arbre comme population de bourgeons

Trois événements possibles pour un bourgeon (**probabilités**):

- 1) La croissance
- 2) La pause
- 3) La ramification

Événements aléatoires à paramètres variables suivant la localisation dans l'arbre (chaînes de Markov)

⇒ **Approche reconstructrice pas à pas** = d'où **SIMULATION** (De Reffye - 1979)



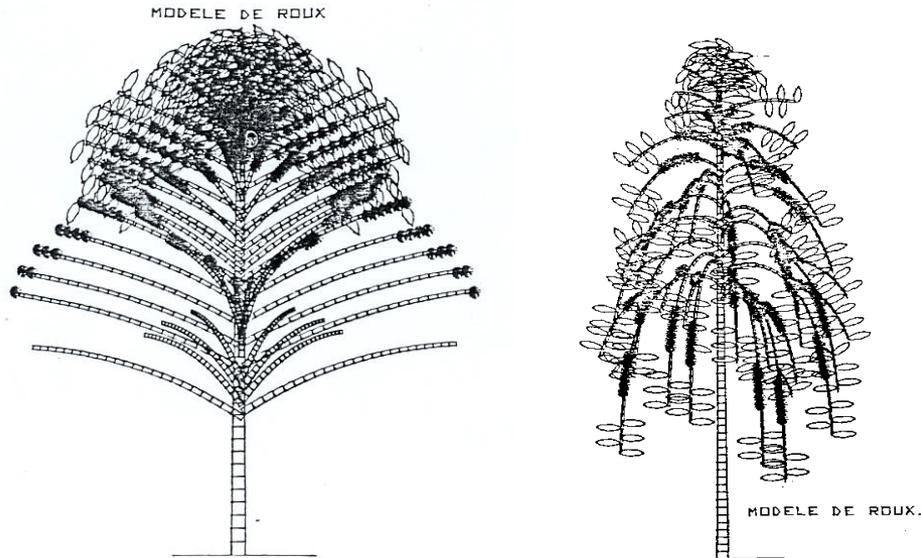
Modélisation fragmentée ET simulation informatique

- 1) Test de fructification : **topologie**
- 2) Ensoleillement : **géométrie**
- 3) Verse, casse : **mécanique**

Réplication de la morphogenèse de l'arbre dans le détail, pas à pas, de manière réaliste

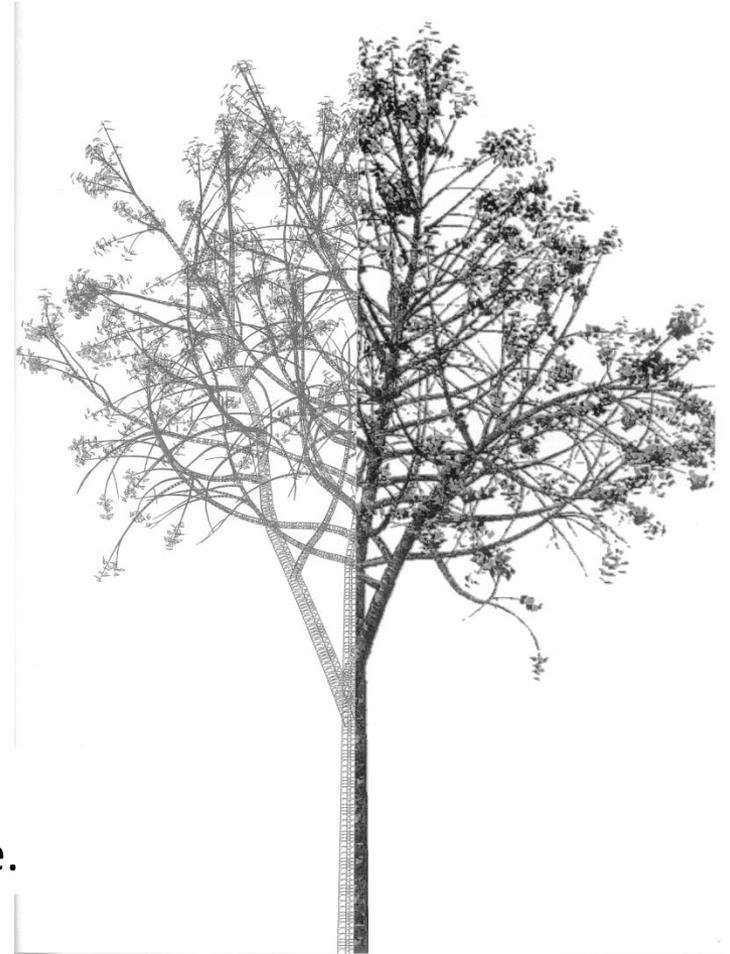
Source : *Du modèle à la simulation informatique*, chapitre 5.

Simulations et dessins des modèles architecturaux



Caféiers sur table traçante. On y distingue nœuds feuillés et nœuds fructifères. (Thèse de de Reffye, 1979)

Arbre simulé sur écran bitmap et partiellement recouvert d'une texture. Brochure AMAP - 1996.

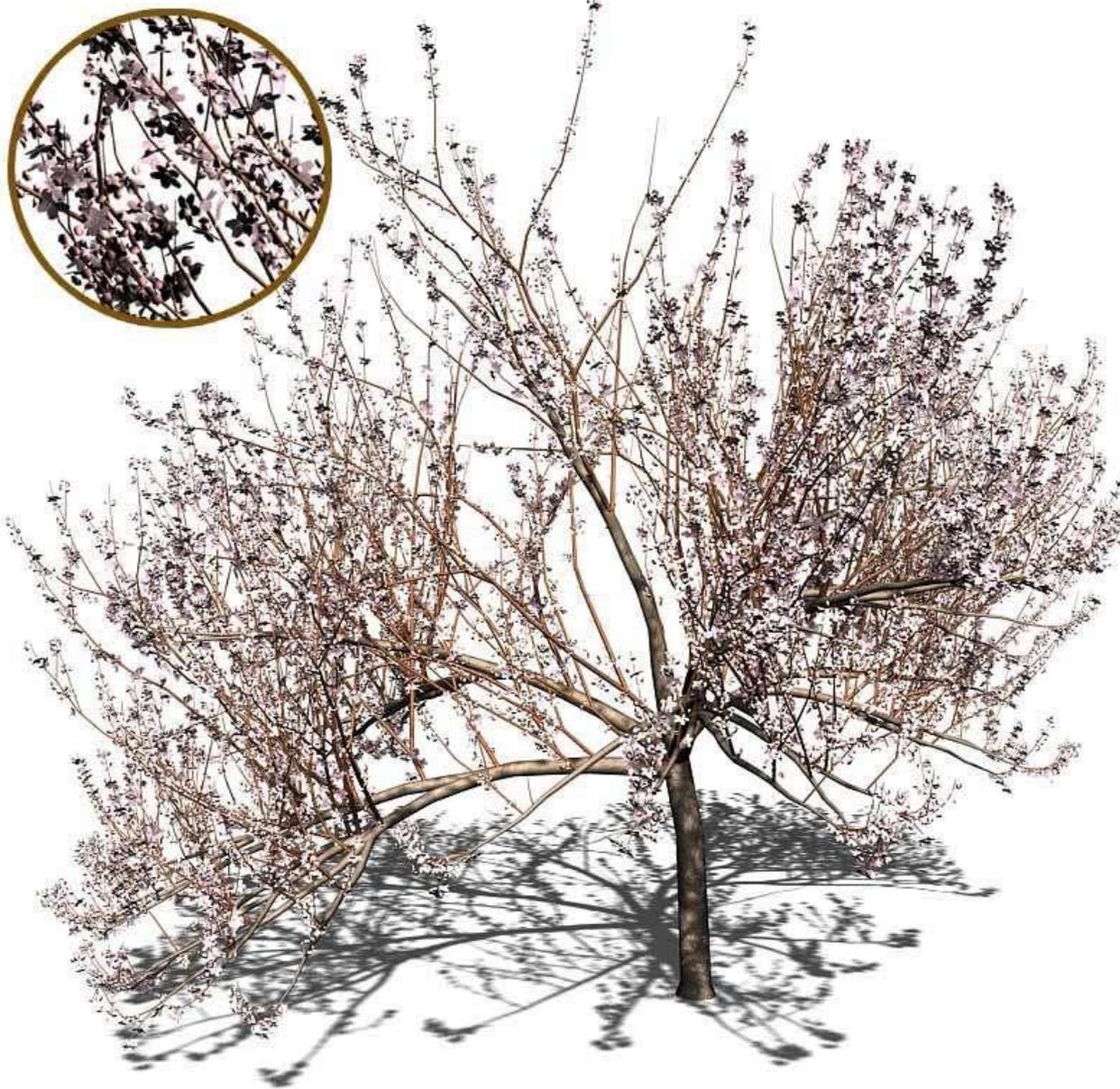




© BIONATICS 2007 - All rights reserved

Accacia Lahia - Source : Bionatics (<http://www.bionatics.com>)
A perennial flat-topped species of tree found in Africa.

© Franck Varenne - Université de Rouen



© BIONATICS 2007 - All rights reserved

Abricotier japonais - Source : Bionatics (<http://www.bionatics.com>)
Low spreading tree with pink flowers in spring.

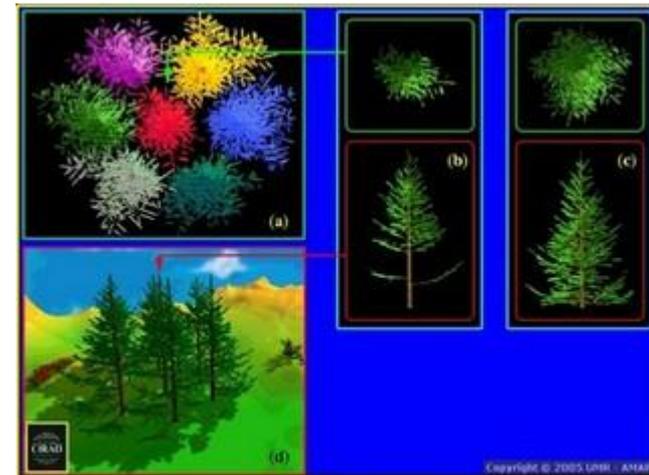
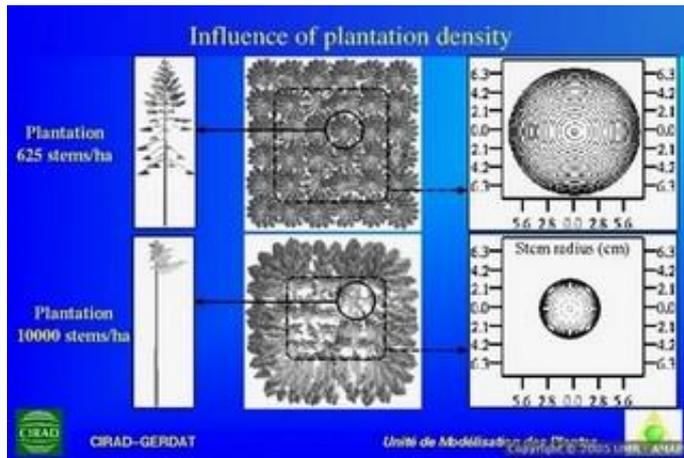
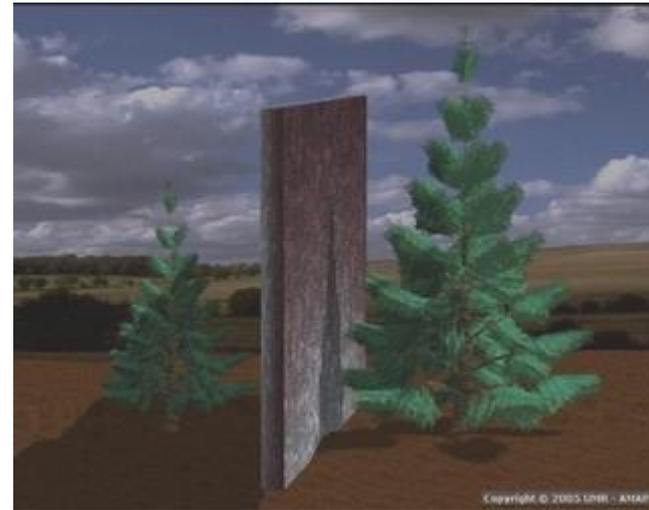
© Franck Varenne - Université de Rouen

A quoi cela sert-il ?



En architecture - Bionatics : <http://www.bionatics.com>

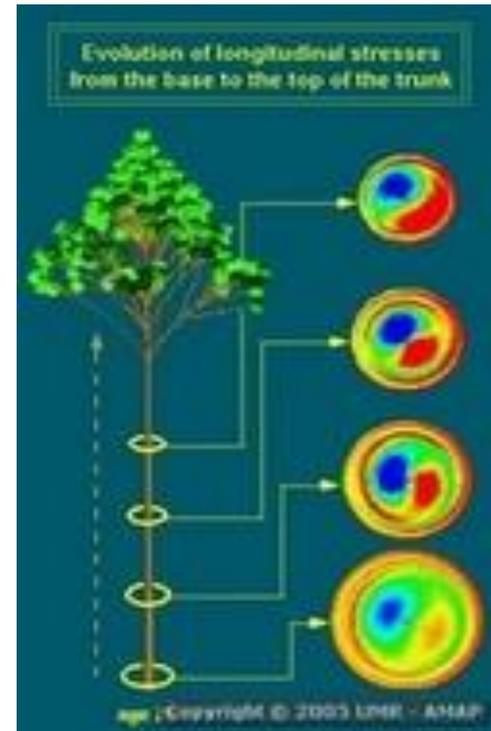
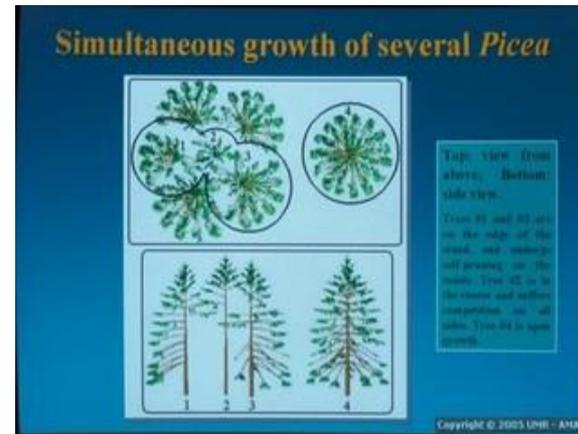
Interactions internes et externes : simulations structurelles / fonctionnelles



Source: AMAP (CIRAD, INRIA, INRA, IRD, CNRS, Montpellier)

© Franck Varenne - Université de Rouen

Interactions, flexions, contraintes mécaniques → prediction de la qualité du bois



Sources :

- Site : AMAP (CIRAD, INRIA, INRA, IRD, CNRS, Montpellier)
- F. Varenne : *Du modèle à la simulation informatique*, Vrin, 2007.

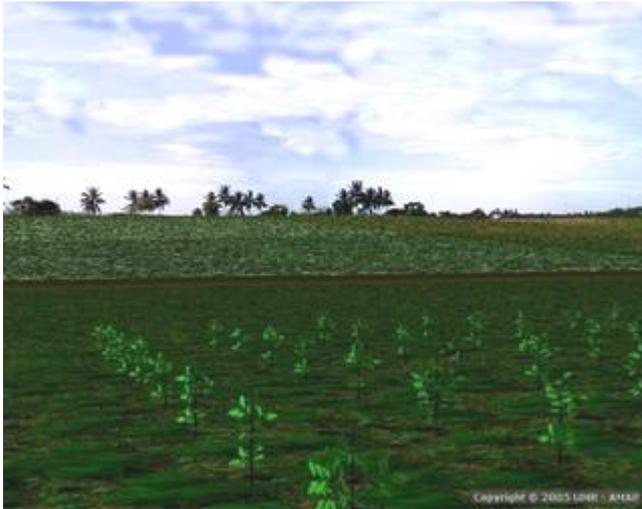
Applications en agronomie prédictive : café, betterave, blé...



Source : Philippe de Reffye (Digiplante-Inria-ECP-INRA, Amap Cirad)

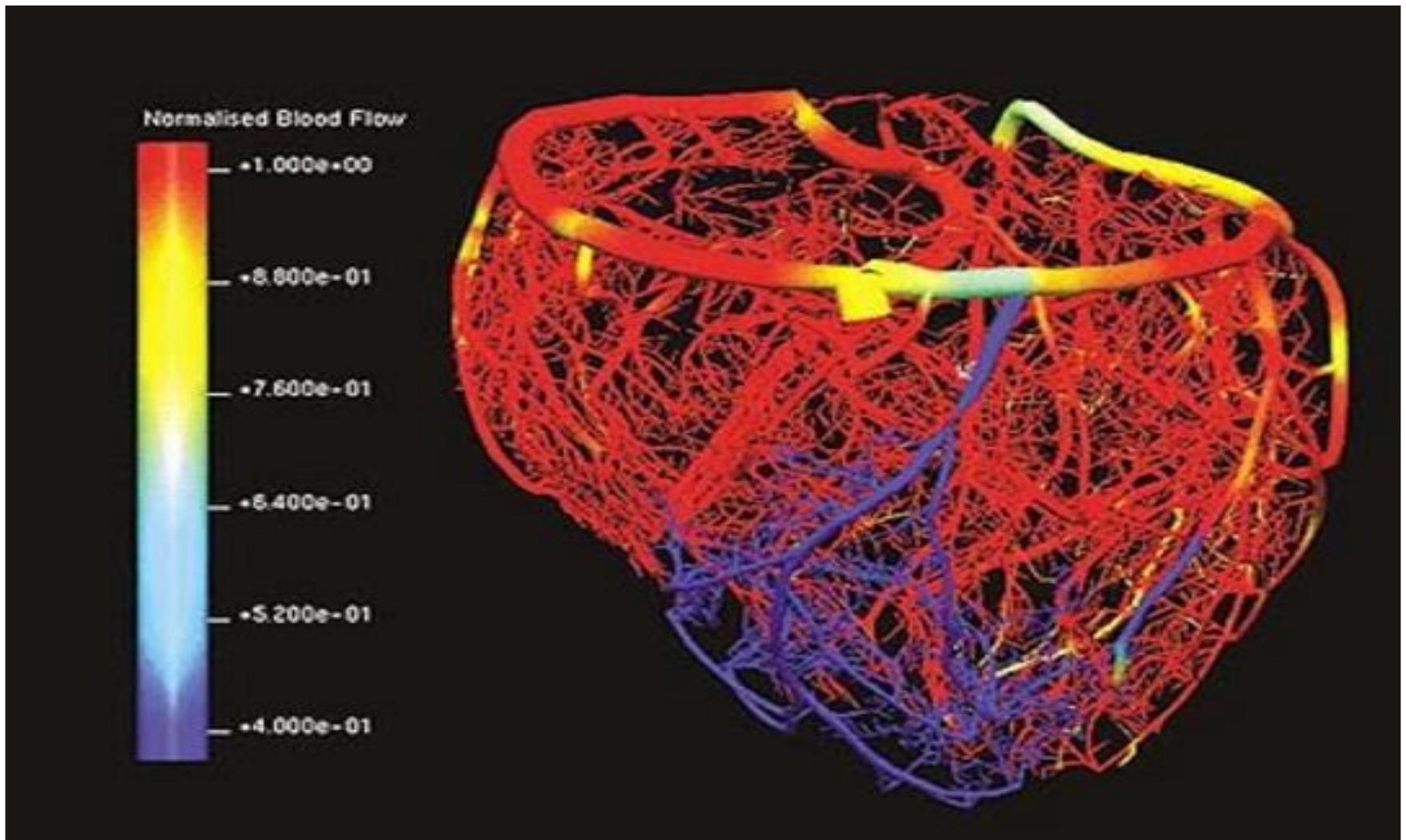
© Franck Varenne - Université de Rouen

Applications en agronomie prédictive



Source: AMAP (CIRAD, INRIA, INRA, IRD, CNRS, Montpellier)

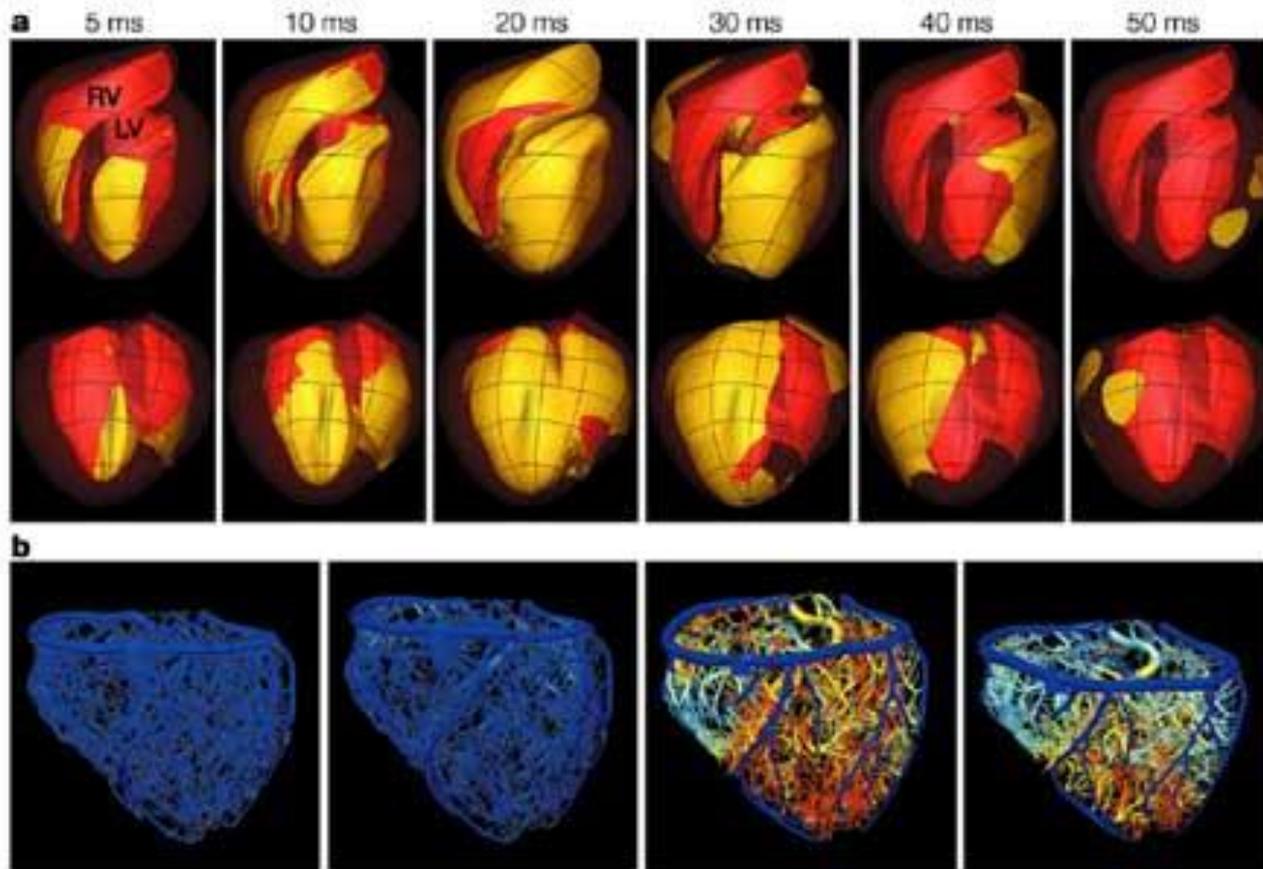
© Franck Varenne - Université de Rouen



Virtual heart - Denis Noble *et al.* (Oxford – Physiome Project)

“The ‘Oxford Cardiac Electrophysiology Group’ led by Professor Denis Noble is an example for having developed a virtual model of the human heart, which *integrates* the kinetic characteristics of the *molecular* and *cellular* mechanisms of heart activity into *detailed anatomical* heart models and *allows forecasts* to be made on the *physiology and pathophysiology* of the heart”, Dr. Roland Eils (German Cancer Research).

Source : <http://bio-pro.de/magazin/thema/00173/index.html?lang=en&artikelid=/artikel/03079/index.html>



Nature Reviews | Molecular Cell Biology

Physiome Project : Auckland, Oxford, San Diego

Source : http://www.nature.com/nrm/journal/v4/n3/box/nrm1054_BX2.html

Bilan sur ces simulations

- **Multi-aspects** : géométrie, topologie (ordre de filiations des bourgeons), résistance mécanique, hydraulique, indice de réflectance des feuilles, ombrage...
- **Multi-échelles** (mais pas nécessairement : ex. : à base de composants pour les premières simulations de plantes : bourgeon, axes, feuilles étaient hétérogènes mais subsistant à une même échelle)
- **Multi-physiques** : phénomènes électriques, mécaniques, chimiques...
- **Multidisciplinaires** : physique, biologie...
- **Couplage des sous-modèles hétérogènes** : pas à pas et par passages de valeurs; importance de la programmation

Idée centrale : la conquête de l'espace

- Rôle fondamental de l'apport de Stanislaw Ulam à la différence de celui – plus marginal – de Turing dans les passages du modèle mathématique à la simulation : **Formaliser le vivant** (2010), chap. 12 : « La simulation comme computation spatialisée »
- Galison (1996-1997) avait dit : Ulam = « stochasticisme » : granularisme + hasard (Monte Carlo)
- Mais plus que la simulation du hasard (hasard - même simulé - pas nécessaire pour faire du Monte Carlo)...

.... La spatialisation du formalisme permet la formalisation des phénomènes intrinsèquement spatiaux...

- Car elle permet la prise en compte de relations :
 1. multilatérales (d'un à plusieurs ou de plusieurs à un ; recherché depuis longtemps en biologie théorique),
 2. simultanées
 3. multitypes et pour cela pluriformalisées (2002 : « Bachelard avec la simulation informatique »)

Ces relations sont mises en oeuvre dans des **systèmes de symboles** opérant parfois en deçà de langages bien définis , d'où ma critique des linguisticismes contemporains ou de la simulation comme « nouvelle écriture »: Dagognet, Quéau...) : « Chains of Reference in Computer Simulations »

Idée centrale : la conquête de l'espace

Attention :

- Pas une métaphysique spatialiste, pas remise à l'honneur d'une hypothétique « question de l'Espace » comme certains parlent d'une « question de l'Être ». Comme épistémologue, je n'ai pas à me muer en « berger de l'Espace ». Ce serait proche des réflexions d'Augustin Berque sur l'écoumène
- Pas non plus une nouvelle « Nouvelle Alliance » (Prigogine, Stengers, 1979), car ils se fondent sur une assimilation assumée de l'ontologique au méthodologique
- Pas une « métaphysique des sciences » (nouveau nom pour « philosophie de la nature »), mais une **épistémologie des méthodes avec des conséquences d'abord méthodologiques**
- ***Philosopher pour la science, non philosopher (au sujet) des sciences ni même dans la science*** : hypothèse = ce sont les méthodes nouvelles qui imposent l'inédit et le renouvellement de nos conceptions, à leur corps défendant

Idée centrale : la conquête de l'espace

- Certes : critique de la spatialisation/homogénéisation : Bergson (EDIC, 1889) : possible à l'époque de par une conception restrictivement temporaliste (avec relation d'ordre, asymétrique, axiale, unilatérale) de la supposée spatialisation du temps ; imposée elle-même par l'approche par les équations différentielles alors seules disponibles. La philosophie comme rationalisation d'une technique scientifique.
- L'approche cellulariste (AC), multi-agents, individus-centrée dans un espace est une **approche à fonction avant tout méthodologique de méta-formalisation** qui permet l'intrication de différents comportements et de différentes relations simultanés.
- Un véritable **individualisme méthodologique** est possible et même peut-être nécessaire (pour l'heure) dans la modélisation des systèmes complexes.

TESTS DE CETTE IDÉE HORS DE LA BIOLOGIE (2010-...) : SCIENCES SOCIALES, SCIENCES ET TECHNIQUES DE LA CONCEPTION

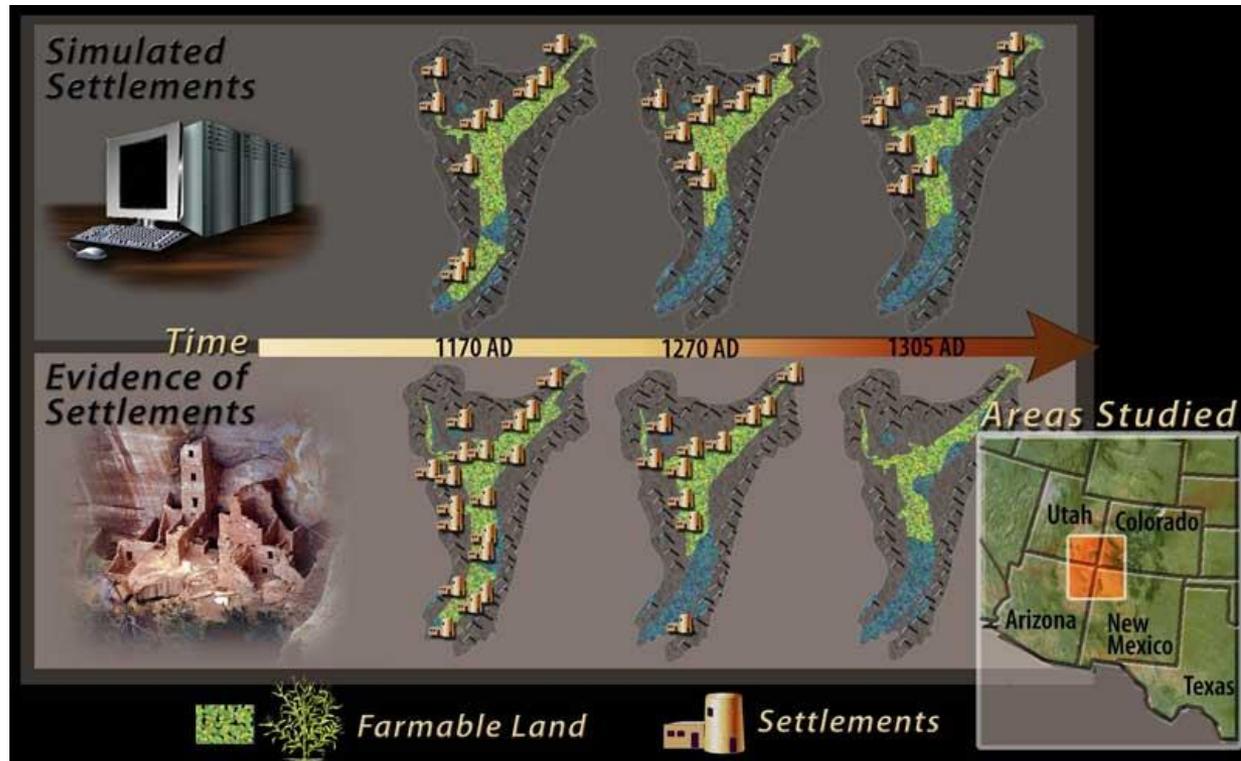
Modélisation et simulation en géographie

« On peut donc certes s'attendre à des parentés de questionnement. Dans les deux cas, en effet, on modélise des phénomènes hétérogènes, spatialisés et où les interactions individuelles ont un poids fort. Ainsi, le cas des modèles de géographie pourra servir effectivement à tester plus largement notre interprétation de l'un des apports décisifs de la simulation sur computer : la prise en compte renouvelée et plus efficace de l'espace et des phénomènes spatialisés par les formalismes. Mais on ne doit jamais oublier que l'analogie n'a pas valeur de preuve en elle-même car elle ne fournit aucunement ni systématiquement les schémas causaux plausibles : une ville ne possède pas quelque chose comme un déterminisme génétique strict qui puisse être comparé à ceux des plantes. À ce titre, même si elle prend elle aussi la forme d'un phénomène spatial aux causalités multiples, hétérogènes et déclenchés diversement au cours de son histoire individuelle, une plante constitue un système spatial complexe probablement plus simple, parce que plus invariablement contraint, qu'une ville. Et, *a posteriori*, on peut même le dire : c'est essentiellement pour cette raison toute pragmatique du point de vue de l'instrumentation et de la détermination stabilisée des modèles de données qu'il a été historiquement plus facile de calibrer un modèle de simulation pluriformalisé de croissance de plantes que ce n'est le cas encore aujourd'hui pour un modèle de croissance de villes. D'où l'avance relative des modèles de simulation de plantes. »

Varenne, *Théories et modèles en sciences humaines*, Paris, Matériologiques, 2017, introduction.

Simuler les sociétés anciennes

Les recherches en archéologie de Tim Kohler (Washington State University)
& George Gumerman (School of American Research - Santa Fe)



Le peuple « Pueblo » ou Anasazi a vécu des siècles dans une région du Sud-ouest des EU, y a prospéré et l'a brusquement abandonné au 14^{ème} siècle.

Comment expliquer cette évolution ?

Source : NSF - http://www.nsf.gov/news/news_summ.jsp?cntn_id=104261

Idées de base

- **Approches par des individus interagissants et évolutifs (les foyers)**
- **Ils évoluent 1) selon des règles de comportement et 2) selon leur environnement (d'où : *Système Multi-Agents*).**
- **On a des données environnementales permanentes**
- **On part d'une répartition initiale au hasard des foyers**
- **On regarde si on peut rétrodire la répartition réelle des foyers**

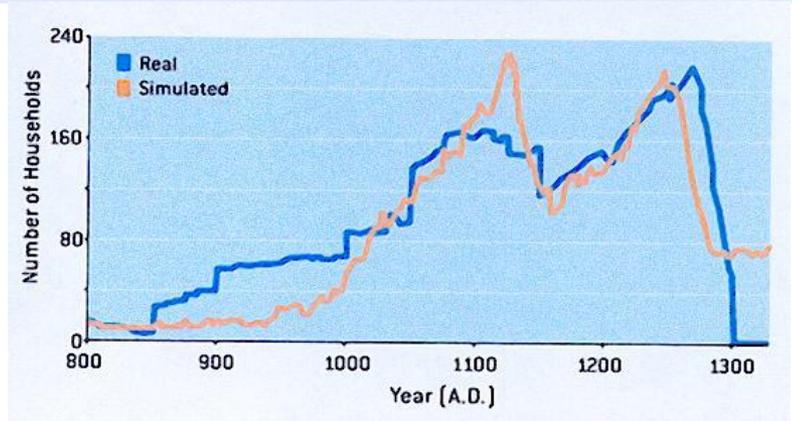
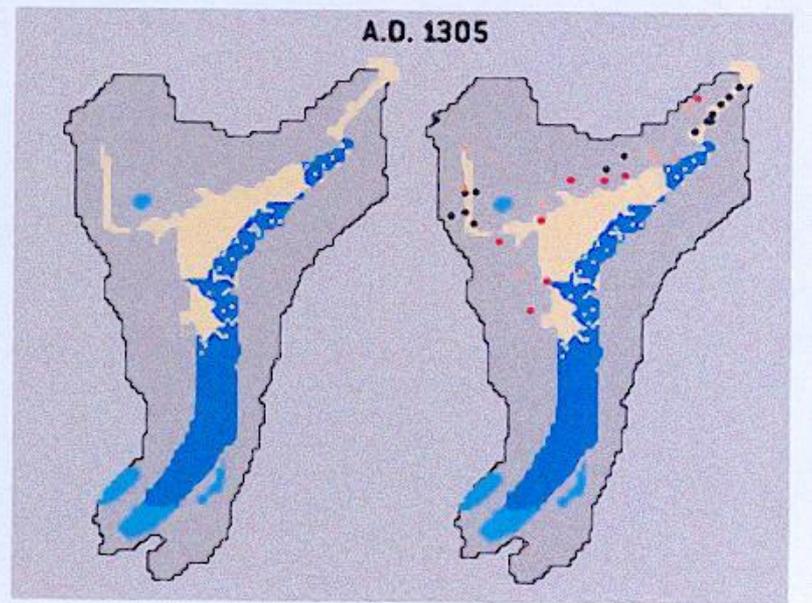
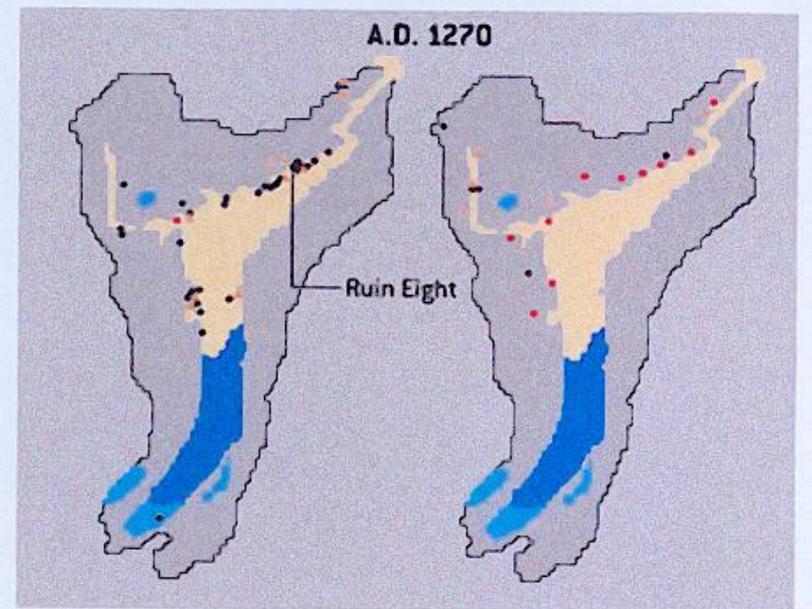
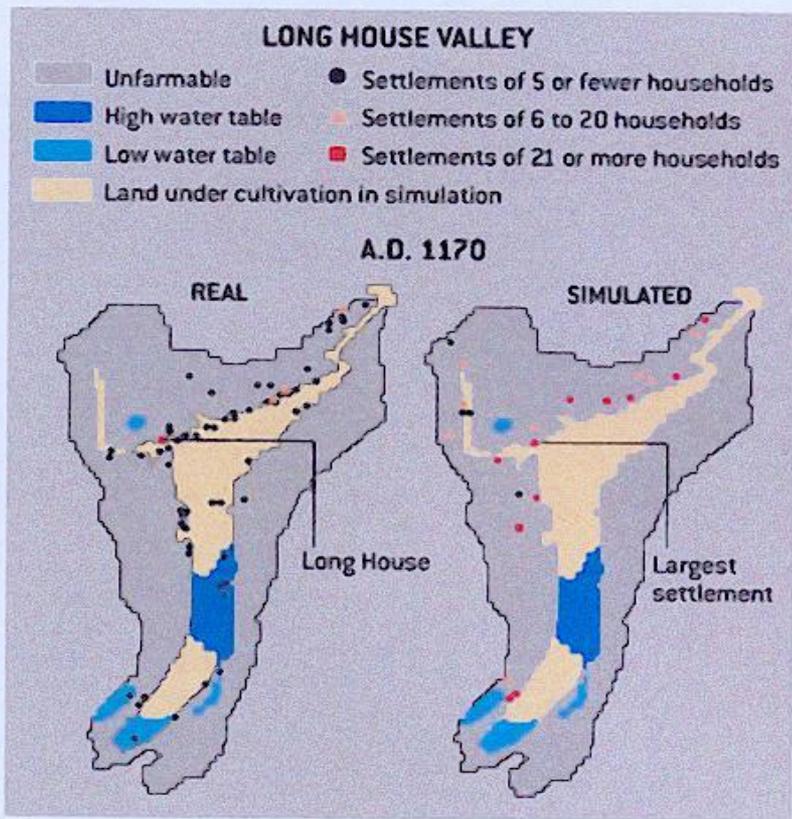
Le modèle de simulation

L'environnement :

- Information sur les capacités de production en maïs des zones simulées entre 400 et 1305 ApJC.
- Conditions topographiques et environnementales : montagnes, vallées, données hydrographiques, SIG, données paléoclimatiques....
- Accessibilité variable des sources d'eau sur cette période (données paléo-hydrographiques).

Les agents :

- Foyers avec chacun des caractéristiques définies : capacité de production, besoins en nourriture, fertilité, longévité, chacun distribué au départ de manière aléatoire sur la carte
- Possibilité de déplacement de ces foyers en fonction de la zone la plus favorable pour eux
- Si la capacité de production en maïs de la zone baisse, le foyer se déplace vers une zone voisine plus favorable



Source : « Simulating Ancient Societies », *Scientific American*, 2005, Timothy A. Kohler, George J. Gumerman and Robert G. Reynolds

Résultats

- Jusqu'en 1300, on a des **résultats très proches** des enregistrements archéologiques, y compris dans la réaction des Pueblos à un épisode connu de sécheresse
- Mais il ne **prédit pas la disparition brusque** de ces implantations autour de 1300
- Les archéologues en concluent qu'il a dû se produire quelque chose qui n'était pas de l'ordre d'une modification **environnementale** (sécheresse, changement climatique ou appauvrissement due à une pression de production) mais un **événement d'ordre politique ou social**

Bilan pour le social

- La simulation permet une **intégration espace / temps inédite** ;
(géographie / histoire)
- Mais plus difficile de coller à la **complexité du social qu'à celle du vivant**
 - Pas de réelle reconstruction phénoménologique
 - Car :
 - interactions entre agents plus fortes encore
 - changement techniques, politiques, religieux...
- On a vu : **rérodition possible**, mais partielle
- Quant à la **prédiction** et au contrôle ...
 - Or : enjeu important pour le développement durable et les problématiques d'adaptation au changement climatique
- La simulation a en fait un **rôle plus théorique** de test d'hypothèses (**test de comptabilité mutuelle entre données de natures diverses et hypothèses**), de test de mécanisme, de test de scénario...

Rencontres en architecture : P.M. Morel

- 2005-2006 : connaissance commune : l'épistémologue Anne-Françoise Schmid ; interactions et réflexions sur les langages dans les modèles des sciences de la vie et des sciences de la conception
- 2011 : Colloque « Computational Politics And Architecture » novembre 2011, ENSAPM : « An extensionalist epistemology of integrative simulation and its perspective on education » (cf. « Chains of Reference in Computer Simulations » en ligne).
- 2012 (février) : UCL – Bartlett : Séminaire et conférence invités par Alisa Andrasek : **“Computational design and architecture: a new materiality through integration and circumspection”**
- 2013 : Archilab Orléans / Chambord : article (« Le parti-pris des choses computationnelles » : matérialité et épaisseur) + conférence en ligne sur Vimeo (« La circonspection des choses computationnelles »)

Une matérialité par circonspection

- Caractère concret de la simulation (de *con-cresco* : croître ensemble)
- Entrelacs : ciment (agrégat assembleur d'autres matériaux, C. Girard)
- Historicité : résultat d'un processus dépendant du chemin, qu'on ne peut dissoudre aisément
- Aristote :
 - La matière existe surtout en puissance
 - Tandis que les êtres qui ont une âme (végétative, appétitive, intellectuelle) existent davantage ou plus parfaitement car ils existent en acte
 - // SMA réactifs, purposefull (porteurs de buts) et cognitifs
- Leibniz : être vraiment, c'est agir, et agir c'est représenter
- Le tournant computationnel nous aurait permis de capter et restituer ce qui fait la matière du monde
- Aux époques aristotéliennes (comme la nôtre), la nature demande à être parfaite, parachevée ou parachevante, donc remise en acte.
- L'art/l'artefact vient au secours de la nature en la remettant en action et en la prolongeant (pour nous, c'est aussi parce qu'elle est dominée, en danger)



A. Andrasek : AgentWare Research / 2009

Source : <http://www.biothing.org/>

“Agents are programmed bottom-up through simple interactions of alignment, cohesion and separation and variable values of their spring connections such as mass, dampening and stiffness. Self-organizing populations of agents are interlaced through different hierarchies and their interactions are run through variable durations parametrizing rhythmic interactions within the system [...] Even though the agents share their DNA, different events can trigger different genes and enable change of states and as a result performing differently”. <http://www.biothing.org/>

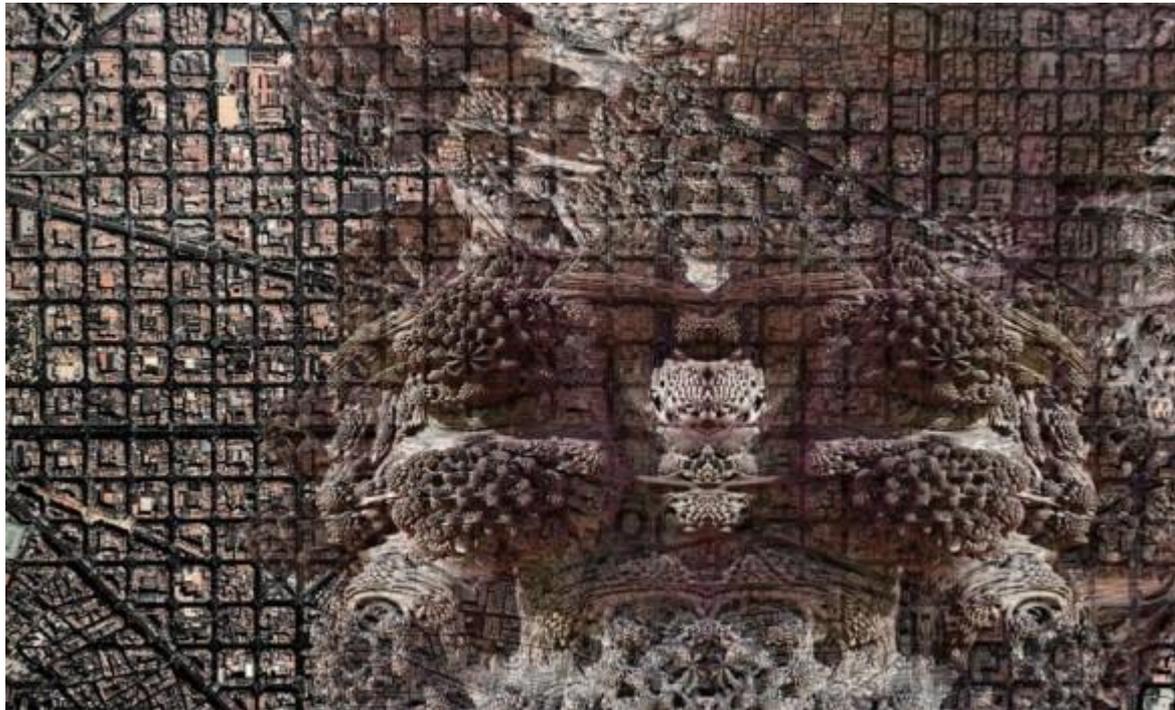
Légèreté et concrétude par la circonspection : une illustration

Plurisensibilité, interactivité et modélisation participative



Andrasek : Bloom - 2012

Matérialité par bourgeonnement



Matias del Campo and Sandra Manninger
(plan de ville avec géométrie récursive)

La forme ne s'impose pas à la matière,
elle est



Matsys, (Andrew Kudless)

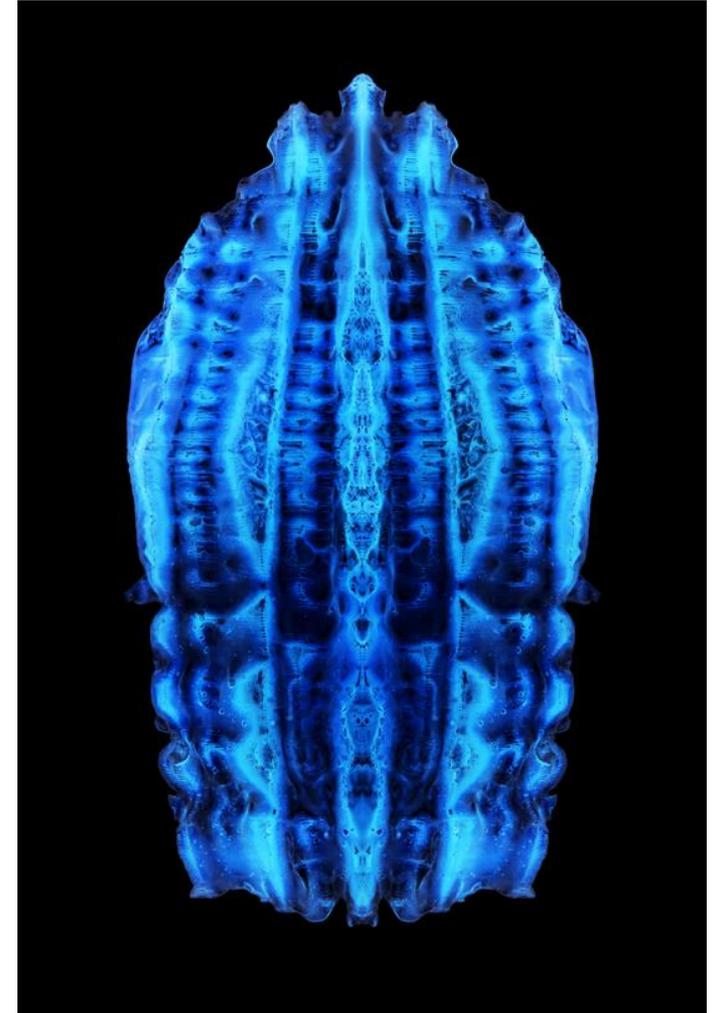
Chrysalis, algorithme de Voronoï

© Franck Varenne - Université de Rouen

Corporification par métamorphoses successives : Jorge Ayala



Ayala : post-digital curiosities



L'ingénierie morphogénétique

collaboration avec René Doursat (CNRS - ISC-PIF)

Source : "Programming the Emergence in Morphogenetically Architected Complex Systems",
Acta Biotheoretica, 2015.

- Motivation personnelle : travailler sur l'émergence du point de vue de l'épistémologie appliquée.
- Avec une question de recherche propre : cf. Varenne, « Models and simulations in the historical emergence of the science of complexity », 2009, p. 19 : « Is the emergence in a complex computer simulation an adequate model of a real emergence in the target system? » Voir aussi la fin de l'article "La reconstruction phénoménologique par simulation : vers une épaisseur du *simulat*", in D. Parrochia & V. Tirloni, *Formes, systèmes et milieux techniques après Simondon*, Lyon, Jacques André Editeur, 2012, pp. 107-123.
- Et une demande de René (que je connais depuis 2009 : RNSC) : à la suite du travail de master de Pierre Chaigneau, co-dirigé par Jean Petitot, l'aider à consolider philosophiquement et conceptuellement son engagement en faveur du « Morphogenetic Engineering »
- Moyen proposé : publier dans une revue de philosophie et de biologie théorique

Programming the Emergence in Morphogenetically Architected Complex Systems

Franck Varenne^{1,2} · Pierre Chaigneau³ ·
Jean Petitot⁴ · René Doursat^{5,6}

Received: 22 February 2015 / Accepted: 25 May 2015 / Published online: 30 May 2015
© Springer Science+Business Media Dordrecht 2015

Abstract Large sets of elements interacting locally and producing specific architectures reliably form a category that transcends the usual dividing line between biological and engineered systems. We propose to call them *morphogenetically architected complex systems* (MACS). While taking the *emergence* of properties seriously, the notion of MACS enables at the same time the *design* (or “meta-design”) of operational means that allow controlling and even, paradoxically, programming this emergence. To demonstrate our claim, we first show that among all the self-organized systems studied in the field of Artificial Life, the specificity of MACS essentially lies in the close relation between their emergent properties and *functional* properties. Second, we argue that to be a MACS a system does not need

✉ René Doursat
rene.doursat@iscpif.fr

Franck Varenne
franck.varenne@univ-rouen.fr

Pierre Chaigneau
pichaigneau@laposte.net

Jean Petitot
jean.petitot@ehess.fr

¹ Sorbonne Research Group in Sociological Analysis Methods (GEMASS), CNRS (UMR8598), Paris-Sorbonne University, Paris, France

² Department of Philosophy, University of Rouen, Rouen, France

³ “Science, Philosophy, History” (SPHERE) Laboratory, CNRS (UMR7219), Paris-Diderot University, Paris, France

⁴ Center for Social Analysis and Mathematics (CAMS), CNRS (UMR8557), School of Advanced Studies in Social Sciences (EHESS), Paris, France

⁵ Complex Systems Institute Paris Ile-de-France (ISC-PIF), CNRS (UPS3611), Paris, France

⁶ BioEmergences Laboratory, CNRS (USR3695), Gif-sur-Yvette, France

Source : Varenne, F.,
Chaigneau, P., Petitot, J. &
Doursat, R. (2015)
“Programming the
emergence in
morphogenetically
architected complex
systems”, *Acta Biotheoretica*
63(3): 295-308.

[http://doursat.free.fr/docs/Varenne et al 2015 macs ActaBio.pdf](http://doursat.free.fr/docs/Varenne%20et%20al%202015%20macs%20ActaBio.pdf)

Le contexte de la recherche de

René Doursat <http://doursat.free.fr/>

- Alife (Sante Fe)
- BioEmergences (CNRS)
- Son idée force dans *Morphegenetic Engineering*: instiller plus d'auto-organisation dans les artefacts (robotique en essaim) et symétriquement instiller plus de technologie de l'information dans des objets naturels s'auto-organisant (biologie synthétique) (« PE in MACS », p. 296)
- **Enjeu** : établir un pont d'ingénierie de nature en même temps conceptuelle (sans que cela soit de la ALife théorique) et tirer les bénéfices de l'auto-organisation dans le design d'artefacts
- **Question centrale**: comment penser un type de design (concevoir un meta-design) permettant une auto-organisation contrôlée ? Contradiction irréductible ou pas ?

Vers la notion centrale d'architecture

(« PE in MACS », p. 296)

- Choix: l'auto-organisation est mesurée en termes d'émergence faible
- René a montré qu'il y a des propriétés émergentes sans intérêt (patterns) et d'autres intéressantes parce que fonctionnelles (assurant une fonction)
- En travaillant avec lui, je me suis aperçu que c'était la notion d'**architecture** qui pouvait jouer un rôle clé parce que médiateur entre la notion d'émergence et celle de fonction (qu'on espère pouvoir contrôler)

Là où morphogenèse et architecture se rejoignent

- Mon idée : on devrait essayer de préciser comment exactement le concept d'architecture (par différence avec les concepts voisins de symétrie, d'harmonie, d'organisation, d'ordre) peut aider :
 - 1) à reconnaître le caractère fonctionnelle d'une propriété émergente d'un système complexe (l'architecture comme critère qualitatif)
 - 2) à quantifier son niveau fonctionnel (l'architecture comme étalon de mesure)

Plan de l'article

- 1. Introduction
- 2. Définition de MACS
- 3. L'émergence dans les MACS
- 4. Le contrôle et la programmation de l'émergence faible dans les MACS
- 5. Conclusion

Définitions de MACS

- P. 297: Les systèmes morphogénétiques naturels ou artificiels ont une morphologie qui les dote d'une forme géométriquement mesurable ou caractérisable.
- P. 297 : “An architected system is not any structured system [structure : the arrangement of its elements]. Its architecture is not only an orderly arrangement of the elements of the systems (an ordered structure) but, more precisely, an orderly arrangement of its parts [having spatial locations most of the times]. This order relation specific to architecture comes from hierarchical relationships between parts and subparts, via groups and subgroups. »
- P. 297 : “An organized system is a system whose structure suggests symmetry, equilibrium, harmony, coherence, meaning, or function. It is one that seems to be organized to some end, first and foremost its own morphogenesis and self-maintenance, namely through self-organization. A self-organized system increases its statistical complexity while at the same time giving birth to emergence that makes its complexity drop relative to a new level of perception (Shalizi 2006). For us, MACS are those self-organized systems whose emerging properties are appealing mainly in the sense that the new perception level that they trigger often reveals the types of function that the system can have ».

Comment mesurer la « fonction d'une structure » ?

- Nous généralisons la notion de « fonction d'une structure » aux systèmes artefactuels :
- P. 297 : “Godfrey-Smith (2004, p 286) proposes that for a living system, ‘the function of a structure is the effect it has that has been responsible for its being selected for’ (our emphasis). Accordingly, and more broadly, we propose to define a function of the structure of any system (living or not, natural or not) as any effect it has that has been responsible for its being selected, modified or designed”
- Dès lors, un problème considérable apparaît : comment mesurer, quantifier la « fonction d'une structure » d'un système en vue de son contrôle, de son optimisation et de sa programmation ?
- Idée médiatrice : si on suppose que la « fonction de structure » du système d'intérêt est souvent prioritairement corrélée à l'architecture de ce système, alors il “suffira” de pouvoir mesurer son degré d'architecturalité (si on peut montrer qu'il est lui-même mesurable) pour contrôler la fonctionnalité du système sans y empêcher pour autant l'auto-organisation

Affinement de la définition de MACS

- C'est finalement pour cette dernière raison, fondamentale, que les MACS sont des SC médiateurs (bio / info / robotique) très particuliers et féconds : faisant toute leur place à la fois à l'espace (donc à la matérialité possible comme aussi à la mesurabilité indirecte) et à l'hétérogénéité interne du système, ils sont tels que l'ingénierie morphogénétique a tout intérêt à les avoir prioritairement en ligne de mire
- P. 299: *"In sum, a MACS is a complex system (1) that has a form; (2) whose form possesses not only patterns but an architecture caused by its morphogenetic processes; (3) whose complexity at least partly resides in this architectural form, i.e. makes it difficult to predict from the sole properties of the elements"*

L'émergence faible (Bedau, 1997, 2002)

- P. 300 : Emergence nominale : “emergent phenomena are simultaneously (1) dependent on underlying processes and (2) autonomous from them” (Bedau,
- P. 300 : “A nominally emergent macro property P of S “is weakly emergent iff P is derivable from all of S’s micro facts [dynamics, states, locations] but only by simulation” (p 15).
- P. 300 : “This is an objectivist definition of emergence to the extent that it is based at least on computational incompressibility”

Attention sur la portée exacte du propos

- P. 301 : « Our assertion is not that all emergent properties of all MACS are or can be seen as the result of a weak emergent process. What we want to show is that many emergent properties of many MACS, whether natural, artificial or hybrid, can be captured, understood, simulated, replicated, and possibly enhanced or even redesigned, from the sole perspective of weak emergence with appropriate artificial computational devices.”
- P. 301: “Functional forms are most striking in the bodies of biological organisms, but not unique to them. They can also be artificial or produced by living agents from inert materials. »

Exemples d'émergence faible dans les MACS naturels

déjà simulables de manière
computationnelle par des MACS artefactuels (pp. 301-303)

- Repliement des protéines
- Embryon réel et embryon digital conçu par « reconstruction phénoménologique » à BioEmergences
- Les constructions des insectes sociaux (ou méta-organismes, Turner) : architecture non planifiée

Programmer une émergence ?

- P. 303 : “But how can a functional form be both wanted and emergent? How can we build an emergent architecture? We now address the question of (re)taking control of MACS, i.e. guiding or programming them toward specific and beneficial outcomes”
 - C’est le cœur de la pratique de l’ « ingénierie morphogénétique » (instiller...) :
- p. 303: “this can be achieved in two ways: 1. by instilling more self-organization into those artefacts that compute via an architecture and, conversely, 2. by instilling more information technology into self-architected natural objects. The first approach is illustrated below by morphogenetic collective robotics; the second by morphogenetic synthetic biology ».

Morphogenetic swarm robotics and synthetic biology

- P. 304: « A system like Swarmorph (O’Grady et al. 2009) provides a good template to explore such self-assembly capabilities. Given distributed and situated agents, the main challenge is to cross an arena littered with obstacles that cannot be overcome by a single agent but only by adequate group formations and morphologies. Experiments were conducted in simulation and actual conditions on the Swarmbot or (s-bot) robotic platform. By attaching to each other, s-bots are able to cross a trench in single file, or pass over a bridge in pairs using lateral connections. » (instillation n°1)
- Soft-to-wet approach: SybnBioTIC (Pascalie et al) : (instillation n°2)
P. 304 : « SynBioTIC proposes to design and develop formalisms and computer tools to translate the desired overall behavior of a population of cells into processes local to each cell. It relies on the specification of a global spatial behavior and its description across a “tower of languages”. Each language at a given level addresses distinct features. Its set of instructions can be literally “compiled” into the lower level, and ultimately down to the bioware into a cellular regulation network (gene regulatory network, signaling and metabolic pathways). »

Conclusion sur l'article

- Plus étude admirative de la morphogénèse pour elle-même
- L'approche par la morphogénèse permet un lieu de rencontre et l'établissement d'une continuité entre explication et design des systèmes complexes
- La notion d'architecture est la notion pivot

Conclusions générales

- Les simulations computationnelles et la formalisation de la morphogénèse restent en première ligne dans tous ces travaux
- Preuve d'un changement de paradigme: on peut attaquer les questions de morphogénèse (après le séquençage, avec la postgénomique, ...).
- Pas de fascination philosophique pour la morphogénèse comme telle (Goethe, Cassirer, Heidegger, Thom, Boutot, etc.).
- Les computers et les tournants computationnels ouvrent en cela concrètement plusieurs voies et font tomber quelques barrières :
 - La pluriformalisation: l'intrication concrète des formalismes, la fin de l'iconoclasme épistémologique, la fin du minimalisme de principe pour les modèles
 - La prise en compte généreuse des processus spatio-temporels (historicité et spatialité intriquées et s'inter-déterminant) sans plaquage prématuré sur la notion mathématique généralisatrice de systèmes dynamiques (limite du mathématisme)
 - La simulation des processus distribués, des processus de ramification, des processus de diffusion adaptatifs, des processus de fonctionnalisation de système (fonctionnalisation par genèse d'architecture)
 - La simulation des processus distribués de coopération: la robotique morphogénétique en essaim montre que l'émergence de la coopération (Axelrod) nécessite sans doute le plus souvent de l'espace (oubli de l'espace en SHS)
 - Epistémologie appliquée : le retour à un usage concret de la notion d'émergence, aider à la conception de l'adaptabilité et de la contrôlabilité des systèmes complexes de demain

MERCI DE VOTRE ATTENTION !

Sources, articles, conférences :

https://www.researchgate.net/profile/Franck_Varenne