

## SIMULER UNE “ARTIFICIAL SOCIETY”: ORGANISATION SOCIALE, GOUVERNANCE ET ATTITUDES SOCIETALES

### 1. INTRODUCTION

La reconstitution des sociétés du passé par l'approche archéologique est un domaine d'application de l'étude des systèmes complexes. L'expression “système complexe”, telle qu'elle apparaît dans les instances de la recherche internationale actuelle, renouvelle ou réactive des concepts anciens, développés sinon nés dans l'après deuxième guerre mondiale: la théorie des jeux (VON NEUMANN 1928; MORGENSTERN 1944) et la dynamique des systèmes dans les années 1960 (J.W. Forrester), mais en y incorporant les résultats de recherches plus récentes: systèmes non linéaires, théorie du chaos, fractales, systèmes d'apprentissage (réseaux de neurones), systèmes multi-agents, etc.

Un système complexe est, par définition, un système composé d'un grand nombre d'entités en interaction locale et simultanée, qui présente la plupart des comportements suivants:

- L'auto-organisation et l'émergence de structures cohérentes;
- La robustesse locale et la contrôlabilité à moyenne échelle du système;
- La connaissance d'une partie du système ne permet pas d'affirmer que le reste du système est en moyenne dans le même état (brisure de symétrie);
- Plusieurs comportements possibles sont en compétition, certains sont simples, d'autres chaotiques;
- Plusieurs échelles temporelles et spatiales apparaissent (système fractal).

Depuis les années 1970, plusieurs de ces techniques de modélisations ont été appliquées en archéologie, de façon expérimentale, et avec des succès variés (DORAN 1990; DJINDJIAN 2011, §IV.2)

L'étude de la dynamique des systèmes (linéaires) possédant des interactions complexes et des rétroactions de leurs principales composantes est du domaine de la théorie des systèmes (FORRESTER 1968; *Urban Dynamics* 1969; *World Dynamics* 1970, au M.I.T.). Dans cette approche, le modèle s'attache à étudier les interactions entre les principales composantes du système étudié, à partir d'un ensemble d'équations linéaires et d'équations différentielles, qui conduisent à définir une matrice d'interaction dont les propriétés permettent la mise en évidence de solutions d'équilibre, indépendantes du temps. La donnée de l'état initial du système est indispensable pour démarrer la simulation. Cette technique a été utilisée pour l'élaboration de nombreux modèles de peuplement (THOMAS 1972; ZUBROW 1975; O'SHEA 1978; BLACK 1978; AMMERMAN, CAVALLI-SFORZA 1984; REYNOLDS 1986) et de population

(MARTIN 1972; WARD *et al.* 1973; WOBST 1974; MACARTHUR *et al.* 1976). LOWE (1985) l'utilise pour étudier l'effondrement maya.

La théorie des jeux, qui met en jeu un modèle dans lequel plusieurs groupes (et non plus un seul) concourent à atteindre des objectifs différents, par la voie du conflit ou de la collaboration n'a pas été appliquée en archéologie.

Parallèlement, la théorie des fractales de B. MANDELBROT (1983) qui possède des rapports étroits avec la théorie du chaos, a d'intéressantes applications en archéologie (BROWN *et al.* 2005), notamment dans le domaine de la tracéologie (caractérisation mathématiques des polis), de la fragmentation (débitage lithique, cassure des céramiques), de l'analyse spatiale de la distribution des sites (loi de Zipf-Mandelbrot) et des systèmes dynamiques non linéaires notamment pour l'étude des transitions dans le monde vivant (NOTTALE *et al.* 2000). De même, la théorie des catastrophes du français THOM (1972) propose une modélisation applicable quand des forces se modifiant graduellement produisent des effets soudains, appelés catastrophes, du fait de leur nature discontinue, non seulement dans le temps, mais aussi dans les formes, c'est la morphogenèse. RENFREW (1978), RENFREW et COOKE (1979) ont introduit l'utilisation de cette modélisation en archéologie.

L'hypothèse linéaire sous-jacente à la dynamique des systèmes de J.W. Forrester en limitait considérablement les applications dans les Sciences Humaines et Sociales. Les travaux d'I. PRIGOGINE (1968) sur les systèmes non linéaires et de T-Y. LI et J.A. YORKE en 1975 sur la théorie du chaos (systèmes dynamiques sensibles aux conditions initiales), allaient relancer les travaux de modélisation en archéologie à la fin des années 1990 (VAN DER LEEUW, MC GLADE 1997; BEEKMANN, BADEN 2005). MCGLADE et ALLEN (1986) étudient le système d'horticulture Huron au moyen d'équations différentielles non linéaires avec des variables stochastiques. Ils soulignent l'équilibre instable du système et le stress permanent des populations, qu'une approche fonctionnelle n'aurait pu déceler. Néanmoins, ces applications sont restées très limitées, même si la nature de la non linéarité des processus socioculturels étaient admise par tous.

C'est alors que les travaux précurseurs de Doran (cf. *infra*), sur les systèmes multi-agents, allaient commencer à se développer en archéologie à partir de la toute fin des années 1990.

## 2. QUELQUES APPLICATIONS DE SYSTÈMES MULTI-AGENTS EN ARCHÉOLOGIE

Un système multi-agent (SMA) est un système composé d'un ensemble d'agents, situés dans un certain environnement et interagissant selon certaines relations (FERBER 1995). Un agent est une entité caractérisée par le fait qu'elle est, au moins partiellement, autonome. Des applications existent en physique des particules (agent = particule élémentaire), en chimie (agent = molécule), en biologie cellulaire (agent = cellule), en éthologie (agent = animal), en sociologie,

en ethnologie (agent = être humain). L'autonomie permet ici de simuler le comportement exact d'une entité. En archéologie, l'agent peut être un individu, un groupe humain, un habitat, un village, une ville, un territoire, un état, etc.

Les agents doivent être dotés:

- de systèmes de décisions et de planification à plusieurs;
- d'un modèle cognitif;
- d'un système de communication.

L'implémentation effective du système multi-agents s'effectue en utilisant une plate-forme de développement dont il existe aujourd'hui de nombreux modèles (Jade, Omas, Spade, Cormas, Netlogo, Turtlekit, Repast, Swarm, etc.).

Précurseur, J. DORAN (1982) a appliqué la modélisation par les systèmes multi agents à plusieurs problématiques archéologiques comme l'organisation sociale des chasseurs-cueilleurs d'Aquitaine au Paléolithique supérieur (EOS project), la modélisation des systèmes de production et de commerce, des systèmes socioculturels et le changement culturel comme l'effondrement de la civilisation maya (NIGEL, DORAN 1994).

Le projet EOS (DORAN *et al.* 1994) cherche à mettre en évidence un processus de hiérarchisation des groupes de chasseurs cueilleurs dans le Magdalénien du Périgord, sur la base d'un modèle de hiérarchisation proposé par Mellars. Dans cette simulation, les agents sont supposés capables de prise de décision rationnelle individuelle, de planification et de coopération dans le cadre de la collecte de ressources. Ils communiquent entre eux; leur planification est rudimentaire; les agents peuvent soit acquérir les ressources eux-mêmes soit élaborer des plans intégrant d'autres agents pour les acquérir collectivement. Les plans mis en œuvre sélectionnent les ressources à acquérir, choisissent les agents pour ce travail, estiment les résultats espérés et les planifient, négocient le plan avec les autres agents et sélectionnent le plan qui a la meilleure efficacité. Les résultats de la simulation sont les suivants: certains agents adoptent de façon répétitive les plans proposés par d'autres agents et sont amenés à se comporter comme des suiveurs. Dans le cas de ressources alimentaires très distribuées, travailler seul est plus efficace; dans le cas de concentrations de ressources, l'action groupée et organisée est plus efficace; quand les concentrations d'agents font face à des ressources insuffisantes, elles se défont. Si elles persistent, les chances de survie sont plus faibles que si elles se sont défaites.

Cette simulation multi-agents n'aboutit pas à démontrer une quelconque hiérarchie dans les groupes. Elle retrouve la capacité intragroupe et intergroupe à collaborer pour des tâches de chasses collectives saisonnières aux troupeaux de bison et de renne puis à se séparer. La hiérarchie dans les groupes de chasseurs cueilleurs n'apparaît que dans des cas très rares et sédentaires (KELLY 2007, chapitre 8) à l'Holocène chez les populations de chasseurs-pêcheurs-cueilleurs du Nord de la côte Ouest du continent américain.

Le lecteur trouvera dans KOHLER et GUMERMAN 2000 et dans KOHLER et VAN DER LEEW 2007 plusieurs exemples d'application de la modélisation des systèmes multi-agents en archéologie.

La simulation multi-agents du peuplement Anasazi dans la Long House Valley en Arizona entre 800 and 1350 AD (DEAN *et al.* 2000; AXTELL *et al.* 2002; JANSSEN 2009) est devenu un grand classique de référence, même exploité par DIAMOND (2006).

Dans la dernière publication qui a vérifié les résultats des travaux précédents (JANSSEN 2009), les agents sont les habitations, où sont supposés vivre 5 individus. Le territoire est structuré en 80×120 champs de taille 100×100 m<sup>2</sup>, qui se différencient par des indices de qualité du sol et de sécheresse. La séquence suivante de calculs est effectuée pour chaque année:

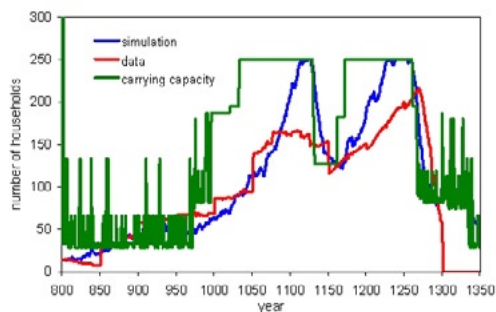
- 1) Calculer la récolte de chaque habitation (minimum 800 kg/an);
- 2) Si un agent ne produit pas suffisamment de nourriture à partir de la récolte et du stockage ou si l'âge est au-delà de l'âge maximum du ménage (30 ans) alors l'agent est retiré du système;
- 3) Calculer la récolte estimée pour l'année suivante à partir du maïs en stock et de la récolte réelle de l'année en cours;
- 4) Les agents qui pensent ne pas produire la quantité nécessaire de nourriture pour l'année suivante seront déplacés vers un nouvel emplacement cultivable et un endroit pour s'établir à proximité (maximum 1600 m);
- 5) Si un ménage est plus vieux que l'âge minimum de fertilité (16-30 ans), un nouveau ménage est généré, qui recevra en dotation une fraction du stock de maïs (0.33 kg);
- 6) Mettre à jour les sources d'eau à partir des données d'entrée;
- 7) L'âge de chaque agent ou ménage est incrémenté d'un an.

L'application travaille essentiellement sur une simulation des processus liés à la *carrying capacity*, et ne prend en compte aucun processus social (entraide, parenté, etc.).

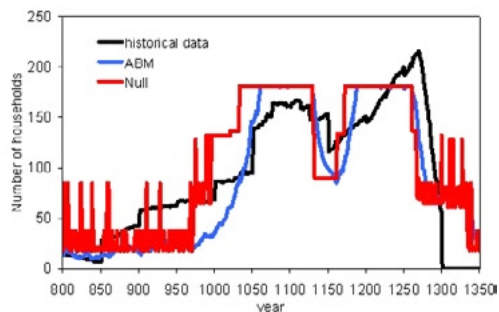
Les différents auteurs concluent que l'environnement ne peut pas expliquer à lui seul l'abandon soudain du peuplement de la vallée à partir de 1300 AD (Figs. 1-2).

T. Kohler (KOHLER *et al.* 2007) a appliqué la modélisation multi-agents à l'étude “éco-dynamique” des peuplements pueblos de la région centrale de Mesa Verde (Village Ecodynamics Project) entre 600 et 1300 apr. J.-C.

Le projet VEP 1 (2002-2008) a concerné 3176 sites pueblos datés par dendrochronologie dont 2220 à unique habitation, 850 entre 2 et 8 habitations, et 106 entre 9 et 134 habitations (villages) et sur une zone de 1827 km<sup>2</sup>, avec 45400 parcelles de 4 ha. Le peuplement pueblo est caractérisé par deux cycles, le premier de 600 à 900 marqué par une activité basée sur la chasse au cerf et au dindon, suivi d'une crise, puis un second cycle jusqu'à 1200 marqué



1



2

Figs. 1-2 – 1. Evolution du peuplement Anasazi (AXTELL *et al.* 2002); 2. Evolution du peuplement Anasazi (JANSSEN 2009).

par la culture du maïs et la domestication du dindon. Les raisons de l'abandon vers 1200 n'est pas expliquée et plusieurs hypothèses ont été évoquées: baisse de productivité agricole lié à un changement climatique, attraction pour une meilleure région ou conflit. Les processus modélisés par la simulation multi-agents concernent les changements climatiques, l'économie de production (chasse, culture du maïs, domestication), la *carrying capacity*, la croissance démographique et du nombre d'habitats et l'évolution de la végétation. Ce sont des processus économiques et environnementaux.

Le projet VEP2 (2009-2013) met en jeu de nouveaux processus intégrant cette fois des processus SHS: les mécanismes d'échanges entre agents (échange réciproque de nourriture), la domestication du dindon, la spécialisation des tâches en relation avec le troc, et la hiérarchisation de la société implémentant un modèle à 11 agents (HOOPER *et al.* 2010). Les résultats du projet VEP2 ne sont encore connus que partiellement (KÖHLER *et al.* sous presse) mais il est possible de considérer que les premiers processus sont plus des processus économiques (lissage des surplus et réciprocité; domestication du dindon grâce à la surproduction de maïs; spécialisation des tâches entre agents – ou répartition des tâches au sein de l'agent? – et troc). Le processus de hiérarchisation est en fait un processus de gouvernance, dont le développement est lié à la création de villages.

Tony Wilkinson (Université de Chicago) a développé le projet Enkimdu du nom de l'ancien Dieu sumérien de l'agriculture et l'irrigation pour modéliser les processus naturels (météo, croissance des cultures, hydrologie, évolution des sols, la dynamique des populations, etc.) et les processus économiques et sociétaux (pratiques de l'agriculture et de l'élevage, comportements axés sur la parenté, commerce, etc.) interagissant quotidiennement à travers des séries décennales sur plusieurs générations. Les agents sont des individus et des habitations, des champs cultivés ou mis en jachère et des troupeaux. La

modélisation permet de simuler la tendance démographique du système agropastoral (WILKINSON *et al.* 2007).

### 3. LES PROCESSUS D'ADAPTATION À L'ENVIRONNEMENT

Dans la modélisation des systèmes multi-agents, le paradigme écologiste et malthusien, largement diffusé dans le grand public par Jared DIAMOND (2006) met en œuvre prioritairement et parfois essentiellement des mécanismes d'adaptation à l'environnement, qu'ils soient indépendants de l'activité humaine comme:

- Changements de température;
- Changements de pluviosité;
- Catastrophes naturelles;

ou le résultat d'une activité humaine mal contrôlée et parfois irréversible entraînant le changement du paysage et des biocénoses:

- Changements de rendement agricole;
- Développement de la domestication animale et éradication des animaux sauvages;
- Epuisement des sols;
- Erosion des sols;
- Réduction de la végétation;
- Modification de l'écosystème;
- Epidémies humaines, animales et végétales;
- Etc.

Ces approches ont largement utilisé l'abondance des données d'activités alimentaires (archéozoologie, archéobotanique) et de reconstitution de l'environnement (dendrologie, palynologie, malacologie, etc.) que fournit l'archéologie.

Dans ce contexte, deux attitudes sont possibles:

- Les sociétés humaines doivent s'adapter à un environnement qu'elles peuvent dégrader, et en corollaire, seules celles qui ont pu s'adapter ont survécu;
- Les sociétés humaines, malgré un environnement défavorable, ont réussi à trouver en eux-mêmes les forces intérieures et les solutions nécessaires pour survivre, par différents moyens comme la modification de leurs organisations sociales, l'adoption d'innovations techniques ou le changement de leur système de croyances.

Plus généralement, c'est l'ensemble des deux approches qu'il faudra considérer dans une modélisation par les systèmes multi-agents. L'analyse critique des applications actuelles révèle que la première approche est favorisée soit pour des raisons paradigmatiques (lié à l'Ecologie politique et au développe-

ment durable), soit pour des raisons pratiques, les processus d'adaptation à l'environnement étant plus facilement mesurables et formalisables dans une modélisation par les systèmes multi-agents.

Dans les exemples cités précédemment, les projets sur les peuplements Anasazi du Colorado et Pueblo d'Arizona appartiennent à cette catégorie. Néanmoins, le projet VEP2 introduit significativement des processus de gouvernance et de règles sociales inter-habitations. Les deux projets échouent cependant à trouver l'explication de l'effondrement de ces deux peuplements.

#### 4. PROCESSUS D'ACTIVITÉS ASSOCIÉS À DES SYSTÈMES ARCHÉOLOGIQUES

La modélisation systémique d'une société est une formalisation difficile, car elle doit prendre en compte des sous-systèmes et des processus qui à la fois jouent un rôle essentiel dans le fonctionnement d'une société et qui sont mesurables dans le sens des informations qui sont enregistrées ou enregistrables par l'approche archéologique et épigraphique (DJINDJIAN 2011, §4.3). Certains de ces processus sont de mieux en mieux connus tandis que d'autres ne sont qu'esquissés. Certains ne sont connus que par des textes ou des inscriptions, et ont pu faire l'objet d'une réécriture du passé que nous enregistrons comme une vérité historique. D'autres ne nous sont suggérés que par le comparatisme ethnographique et l'anthropologie culturelle et nous en séparent le plus souvent par des milliers d'années et de kilomètres de distance.

Les processus de fabrication ou systèmes techniques, qui concernent aussi bien les ustensiles, les outils, les armes, les bijoux, les machines, les bâtis, les infrastructures (irrigation, transport, aménagement du paysage, urbanisation, etc.) nous sont accessibles à partir des vestiges de la culture matérielle quand ceux-ci sont conservés.

La mise en contexte socio-économique de ces objets permet de reconstituer les processus économiques (production et commerce) dans leur organisation sociale (production familiale, artisanat, production industrielle), spatiale (diffusion des matériaux et objets manufacturés) et commerciale (troc, commerce).

L'alimentation des sociétés humaines et de leurs animaux domestiques est le domaine d'étude des processus de gestion des ressources alimentaires, reconstituant les systèmes de chasseurs-cueilleurs-pêcheurs comme les systèmes agro-pastoraux et leurs nombreuses révolutions techniques.

La relation de la société avec son espace de vie conduit à l'étude des processus d'occupation du territoire, de l'implantation des sites d'habitat, de leur distribution spatiale, de leur spécialisation fonctionnelle, de leurs interrelations, de leur hiérarchisation entraînant l'urbanisation du territoire puis son étatisation. Ces études mettent en évidence la dimension fractale de l'organisation spatiale de l'activité humaine et l'importance des mécanismes d'auto-organisation.

La méthode archéologique sait prendre en compte ces processus car il est possible de reconstituer les activités à partir des artefacts fossilisés et de mettre en relation les activités entre elles, permettant de reconstituer des sous-systèmes. Les agents sont alors soit des artefacts (habitations, parcelles cultivées, etc.) soit des acteurs (individus, groupes humains, maisonnées, etc.) liés à ces activités.

## 5. PROCESSUS SHS EN ARCHÉOLOGIE

Il n'en est pas de même pour les processus des Sciences Humaines et Sociales (SHS) que la méthode archéologique peine encore aujourd'hui à reconstituer à partir des données qu'elle enregistre et des processus qu'elle étudie.

### 5.1 *Processus d'organisation sociale*

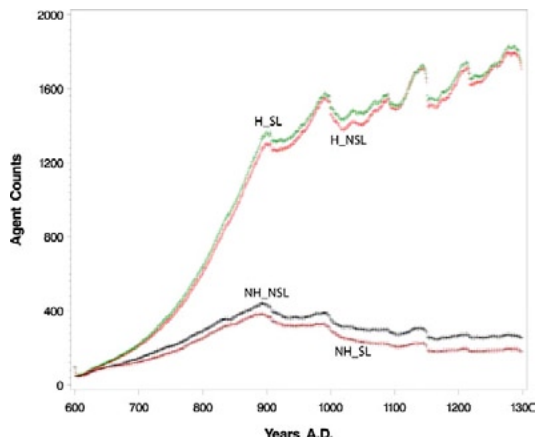
Sous l'influence de l'anthropologie sociale et culturelle, certains processus ont été modélisés par des systèmes multi-agents comme :

- Les systèmes de parenté (READ 1998);
- Les échanges réciproques (KOHLENER *et al.* sous presse);
- La “hiérarchisation” de la société (DORAN *et al.* 1994; KOHLER *et al.* 2012b);
- La spécialisation des tâches.

Les systèmes multi-agents permettent d'organiser les agents suivant les grandes catégories d'organisation sociale connues, comme par exemple :

- Parenté;
- Hiérarchies;
- Holarchies (hiérarchies sans relation d'autorité) comme des structures spatiales (habitations, villages, parcelles cultivées, territoires, etc.);
- Coalitions (regroupements opportunistes ponctuels de groupes de chasseurs-cueilleurs);
- Coopérations (travaux communs: infrastructure agricole, irrigation, défense de l'habitat, etc.);
- Congrégations (groupes);
- Sociétés (ensemble d'agents possédant des règles communes);
- Fédérations (ensemble des sociétés avec un représentant);
- Marchés (relation offre/demande avec ou sans moyens de paiement);
- Echanges (échanges réciproques à différents niveaux: intra-habitation, interhabitation, intra-famille élargie, intra-groupe, intergroupe, etc.);
- Matrices (organisation matricielle);
- Compositions (mélanges des organisations précédentes).





3

Systèmes environnementaux		Systèmes de production systèmes agro-alimentaires systèmes d'artisanat systèmes énergétiques	
Organisation spatiale		systèmes commerciaux systèmes de distribution systèmes de transport systèmes financiers	
Administration Défense Police Diplomatie	Gouvernance	Tribus Butins Esclaves	
	Organisation sociale	Taxation	
Savoirs Savoir-faire	Croyances Religions	Règles sociales	Attitudes sociétales

4

Figs. 3-4 – 3. Simulation du nombre moyen d’habitations avec un modèle hiérarchique (H) et non-hiérarchique avec apprentissage social (SL) ou sans (NSL) (KOHLER *et al.* 2012b); 4. Processus concernés par la simulation globale d’une “artificial society”.

### 5.2 Processus de gouvernance

Les simulations multi-objets ont traités jusqu’à présent des modèles de chasseurs-cueilleurs et des modèles agro-pastoraux du Néolithique et de l’âge du Bronze, en y incluant des processus de hiérarchisation et de leadership. La question des semi-états et des états n’a pas encore été abordée.

### 5.3 Processus d’attitudes sociétales

Les simulations multi-objets n’ont pas traité l’introduction de processus d’attitudes sociétales, sauf la notion d’apprentissage social (KOHLER *et al.* 2012b) (Fig. 3) ou d’émulation inter-individus (REYNOLDS *et al.* 2001).

### 5.4 Processus de sacralisation de la société (religion, croyances populaires)

Les simulations multi-objets n’ont pas traité l’introduction de processus de sacralisation de la société.

## 6. PROCESSUS D’ORGANISATION SOCIALE: VERS UN MODÈLE SYSTÉMIQUE

Les organisations sociales des sociétés que les archéologues étudient sont toujours basées sur des modèles anthropologiques paradigmatiques proposés par les évolutionnistes du XIX<sup>e</sup> siècle (Moran, Spencer, Engels), les fonctionnalistes du XX<sup>e</sup> siècle (Malinowski, Evans-Pritchard, Fortes), les processualistes (Gluckman, Leach, Balandier, Bastide), les néo-évolutionnis-

tes (Steward, White, Fried, Service, Sahlins, Southall) ou les néo-marxistes (Meillassoux, Godelier). Ils semblent néanmoins tous se reconnaître dans la distinction minimale Bande/Tribu/Chefferie/Etat même si elle ne représente qu’une “forme” sociale et non un stade d’évolution sociale.

Dans l’approche systémique de la modélisation multi-agents, les modèles anthropologie classique montrent cependant leurs limites:

- Organisation familiale: nucléaire, élargie, punaluana, etc.;
- Systèmes de lignages: parenté, clan, lignées;
- Organisation corporatiste: commerce, classes, castes;
- Organisation territoriale: bande, tribu, chefferie, micro-état.

Ces limites bloquent le développement de simulation multi-agents intégrant des processus d’organisation sociale.

L’approche de TESTART (2005), bien qu’elle soit encore embryonnaire, marque une rupture par rapport aux modèles précédents, par sa structure systémique:

- Sociétés sans stockage:
  - Service pour la fiancée (Inuit);
  - Echange de sœurs;
  - Obligations viagères (aborigènes australiens);
- Sociétés ploutocratiques à ostentation (avec stockage):
  - Echanges ou paiements (avec ou sans esclavage);
  - Dons et contre-dons;
- Semi-états:
  - Lignagère (liens familiaux);
  - Villageoise (proximité de lieu de vie);
  - Classes d’âge (âge et expérience);
  - Démocratie primitive;
- Etats:
  - Royautés;
  - Sociétés de classes:
    - Propriété de la terre;
    - Propriété de capitaux;
    - Propriété de réseaux commerciaux.

C’est dans ce contexte systémique et lui seul que plusieurs processus liés à des règles sociales pourraient prendre leur sens: systèmes de parentés (Lévi-Strauss, Radcliffe-Brown, Morgan, etc.), pratiques du don et du contre-don (Boas, Malinowski, Mauss, Testart), dot et prix de la fiancée, tabous, interdits alimentaires, rites de purification, règles de compensation, éducation, fêtes (les Travaux et les Jours), distribution des tâches (genre), etc.

## 7. PROCESSUS D'ORGANISATION SPATIALE

L'organisation spatiale d'un peuplement dans son territoire possède naturellement plusieurs types de structures:

- Des structures de localisation des habitats, des zones de ressources alimentaires (sites de chasse, zones de cueillette, parcelles cultivées, aires de broutage) et des sites de ressources de matière première, d'eau et d'énergie;
- Des structures d'influence réciproque des sites (comme par exemple celles mises en œuvre par des modèles de gravité au sens large) ou de non-influence (phénomènes de frontières);
- Des structures fractales liées au développement à plusieurs niveaux d'échelle (loi de Zipf-Mandelbrot et dérivées);
- Des structures liées à l'urbanisation incluant la spécialisation partielle ou totale des fonctions des sites urbains: administrative, commerciale (bourg, foire, comptoir), industrielle et transport, depuis la théorie de la place centrale jusqu'à plus récemment le projet ISCOM (LANE *et al.* 2009);
- Des structures en réseau liées des fonctions commerciales, défensives et de communications caractérisées par des nœuds (étapes, forts sémaphores), des flux (objets, forces, informations) et des voies fluviales, maritimes, terrestres et aériennes: *social network analysis*, centralité d'interposition et autres techniques de centralité (WASSERMAN, FAUST 1994; WHITE, SPUFFORD 2005);
- Des structures de résiliences, liées à la perduration et à la réutilisation dans le territoire d'anciens sites et paysages (analyse de la résilience – HOLLING 1978 – chrono-chorématique urbaine).

De nombreux processus possèdent cette composante spatiale: gestion du territoire des groupes de chasseurs-cueilleurs, construction du paysage agro-pastoral, industrialisation, urbanisation, étatisation, qui évoluent dans le temps en passant par des phases de création, développement, stagnation, récession, adaptation.

L'intérêt d'intégrer les structures spatiales précédentes dans une simulation multi-agents est évident et les premières applications en archéologie verront probablement le jour dans les toutes prochaines années.

## 8. PROCESSUS D'ATTITUDES SOCIÉTALES (EXEMPLES)

Les attitudes sociétales d'un individu, d'un groupe comme d'une communauté jouent un rôle essentiel dans la capacité de modifier les organisations et les règles sociales pour faire face à la nécessité d'une adaptation, de la réaction à un danger ou d'un changement critique. Dans les sociétés du passé, ces attitudes sont inévitablement liées aux croyances et aux religions, et font partie de l'éducation transmise aux enfants.

Il n'est pas possible de faire une liste exhaustive de ces attitudes et nous nous limiterons ici à illustrer par quelques exemples des attitudes opposées:

Confiance dans le futur	Investissement/thésaurisation
Innovation/progrès	confiance/crainte
Savoirs/connaissances	soif/refus
Solidarité	entraide/égoïsme
Respect des règles	soumission/transgression
Relation avec l'autre (dans le groupe)	empathie/repli sur soi
Relation avec l'autre (hors du groupe)	exclusion/indifférence/cohabitation
Réaction aux difficultés	pragmatisme/idéalisme
Réaction aux responsabilités collectives	engagement/évitement
Genre	égalité/hierarchie, partage/séparation tâches
Réaction aux “informations”	émotivité/passivité
Religion	exotérisme/ésotérisme
Tradition	respect/adaptation

Ainsi des attitudes concernant la famille, le travail, la santé, le temps, la mort vont avoir au niveau de la communauté une influence considérable dans le succès ou l'échec d'un changement que le contexte extérieur ou l'évolution intérieure rend obligatoire.

## 9. TOCQUEVILLE ET LA RÉVOLUTION FRANÇAISE DE 1789

L'analyse d'Alexis de Tocqueville (TOCQUEVILLE 2004) sur les causes de la révolution française, illustre bien les propos précédents. Bien que les hypothèses suivantes puissent être caricaturales dans leur résumé, elles mettent en évidence la pluralité des processus en jeu:

1. L'explosion du volcan Laki en Islande (1783-85) à l'origine d'un climat pourri, de mauvaises récoltes, d'une spéculation sur la farine de blé, d'une disette à l'origine d'émeutes populaires;
2. Une gouvernance faible (Louis XVI);
3. Une société bloquée sans courage de réformes (Turgot);
4. Une banqueroute suite à l'accumulation des dettes (Necker) entraînant la convocation des Etats Généraux en janvier 1789;
5. Les attitudes du peuple français (souci d'égalité pour les uns, refus d'abandonner des privilèges pour d'autres, envie d'être rentier pour les possédants, etc.).

## 10. CONCLUSIONS

Il est aisé de constater dans l'exemple sur les causes de la révolution française de 1789, l'influence de plusieurs processus: économique, environ-

nemental, organisationnelle, gouvernance et sociétal, qui vont intervenir conjointement pour déclencher la révolution. Il en est probablement de même pour toutes les applications de ce qui est désigné par les mots à la mode aujourd'hui: *archaeology of socationatural systems* qui a remplacé l'*archaeology of sociocultural systems* des années 1970-80 ou même encore plus globalement la formule marketing *artificial societies*, qui résonne si bien avec la *virtual archaeology*.

Le tableau de la Fig. 4 illustre l'importance du nombre de processus induits par la simulation globale d'une société, et les progrès restant à accomplir pour la modéliser. Le projet est-il utopique? Les systèmes multi-agents sont-ils les systèmes experts (GARDIN 1987) des années 2000/2010? Faut-il les restreindre à l'étude des changements culturels où connaissant A (société avant le changement) et B (société après le changement), les processus et les données responsables d'une transition réussie peuvent être plus facilement mis en évidence? Et est-on sûr qu'en simulant un modèle de A, la méthode possède la potentialité de nous donner toutes les changements de A y compris son éventuel effondrement? Pour répondre à la question, le plus simple moyen est que les archéologues s'y mettent!

FRANÇOIS DJINDJIAN  
Université de Paris 1 Panthéon-Sorbonne  
CNRS UMR 7041 ArScAn, Nanterre

## BIBLIOGRAPHIE

- ALTAWEEL M. 2006, *Addressing the Structures and Dynamics of Modeled Human Ecologies*, in J. CLARK, J. HAGEMASTER (eds.), *Digital Discovery: Exploring New Frontiers in Human Heritage [CAA 2006. Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology]*, Budapest, Archaeolingua, 30-41.
- AMMERMANN A.J., CAVALLI-SFORZA L.L. 1984, *The Neolithic Transition and the Genetics of Populations in Europe*, Princeton, Princeton University Press.
- AXTELL R.L., EPSTEIN J.M., DEAN J.S., GUMERMAN G.J., SWEDLUND A.C., HARBURGER J., CHAKRAVARTY S., HAMMOND R., PARKER J., PARKER M. 2002, *Population Growth and Collapse in a Multi-Agent Model of the Kayenta Anasazi in Long House Valley*, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(3), 7275-7279.
- BEEKMAN C.S., BADEN W.W. (eds.) 2005, *Nonlinear Models for Archaeology and Anthropology, Continuing the Revolution*, Hampshire-Burlington, Ashgate.
- BENTLEY R., MASCHNER A., HERBERT D.G. 2003, *Complex Systems and Archaeology, Empirical and Theoretical Applications*, Foundations of Archaeological Inquiry, Salt Lake City, University of Utah Press.
- BLACK S. 1978, *Polynesian outliers: a study in the survival of small populations*, in I. HODDER (ed.), *Simulation Studies in Archaeology*, Cambridge, Cambridge University Press, 63-76.
- BRANTINGHAM J. 2003, *A Neutral Model of Stone Raw Material Procurement*, «American Antiquity», 68(3), 487-509.
- BROWN C.T., WITSCHY W.R.J., LIEBOVITCH L.S. 2005, *The broken past: Fractals in Archaeology*, «Journal of Archaeological Methods and Theory», 12(1), 37-78.
- COSTOPOULOS A., LAKE M. 2010, *Simulating Change, Archaeology into the Twenty-First Century*, Foundations of Archaeological Inquiry, Salt Lake City, The University of Utah Press.

- DEAN J.S., GUMMERMAN G.J., EPSTEIN J.M., AXTELL R.L., SWEDLUND A.C., PARKER M.T., MCCARROLL S. 2000, *Understanding Anasazi Culture Change Through Agent-Based Modeling*, in A. TIMOTHY KOHLER, G.J. GUMMERMAN (eds.), *Dynamics in Human and Primate Societies, Agent-Based Modeling of Social and Spatial Processes*, New York-Oxford, Oxford University Press, 179-207.
- DIAMOND J. 2006, *Effondrement*, Paris, Gallimard.
- DJINDJIAN F. 2011, *Manuel d'Archéologie*, Paris, Armand Colin.
- DORAN J. 1982, *A Computational model of sociocultural systems and their dynamics*, in C. RENFREW, M.J. ROWLANDS, B. ABBOTT SEGRAVES (eds.), *Theory and Explanation in Archaeology*, New York, Academic Press, 375-388.
- DORAN J.E. 1990, *Computer-based simulation and formal modeling in Archaeology: a review*, in A. VOORRIPS (ed.), *Mathematics and Information Science in Archaeology: A Flexible Framework*, Studies in Modern Archaeology, 3, Bonn, Holos, 93-114.
- DORAN J., PALMER M., GILBERT N., MELLARS P. 1994, *The EOS Project: Modeling Upper Palaeolithic Social Change*, in N. GILBERT, J. DORAN (eds.), *Artificial Societies*, London, UCL Press, 195-221.
- EPSTEIN J.M., AXTELL R. 1996, *Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom-up*, Washington DC-Cambridge, The Brookings Institution Press and MIT Press.
- FERBER J. 1995, *Les Systèmes multi-agents: vers une intelligence collective*, InterEditions.
- FORRESTER J.W. 1968, *Principles of Systems*, Cambridge, Wright Allen Press.
- FORRESTER J.W. 1969, *Urban Dynamics*, Cambridge, MIT Press.
- FORRESTER J.W. 1970, *World Dynamics*, Cambridge, Wright Allen Press.
- GARDIN J.-Cl. (ed.) 1987, *Systèmes experts et Sciences humaines: le cas de l'archéologie*, Paris, Eyrolles.
- GILBERT N. 2008, *Agent-Based Models, Quantitative Applications in the Social Sciences*, 153, Sage Publications, Thousand Oaks, CA.
- GILBERT N., DORAN J. 1994, *Artificial Societies: The Computer Simulation of Social Phenomena*, London, UCL Press.
- GILBERT N., TROITZSCH K.G. 2009, *Simulation for the Social Scientist*, Berkshire, Open University Press.
- GRAHAM S. 2009, *Behavior Space: Simulating Roman Social Life and Civil Violence*, «Digital Studies/Le champ numérique», 1, n. 2 ([http://www.digitalstudies.org/ojs/index.php/digital\\_studies/article/view/172/214](http://www.digitalstudies.org/ojs/index.php/digital_studies/article/view/172/214)).
- GRIFFIN A.F., STANISH C. 2007, *An Agent-based Model of Prehistoric Settlement Patterns and Political Consolidation in the Lake Titicaca, Basin of Peru and Bolivia, Structure and Dynamics*, «Journal of Anthropological and Related Sciences», 2(2) (<http://www.escholarship.org/uc/item/2zd1t887>).
- HOLLING C.S. (ed.) 1978, *Adaptive Environmental Assessment and Management*, London, John Wiley & Sons.
- HOOPER P.L., KAPLAN H.S., BOONE J.L. 2010, *A theory of leadership in human cooperative groups*, «Journal of Theoretical Biology», 265, 633-646.
- JANSSEN M.A. 2009, *Understanding Artificial Anasazi*, «Journal of Artificial Societies and Social Simulation», 12(4)13 (<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/12/4/13.html>).
- KELLY R.L. (2007), *The Foraging Spectrum. Diversity in Hunter-Gatherer lifeways*, New-York, Percheron Press.
- KOHLER T.A., GUMMERMAN G.J. 2000, *Dynamics in Human and Primate Societies, Agent-Based Modeling of Social and Spatial Processes*, New York-Oxford, Oxford University Press.
- KOHLER T.A., BOCINSKY R.K., COCKBURN D., CRABTREE S.A., VARIEN M.V., KOLM K.E., SMITH S.C., ORTMAN S.G., KOBTI Z. (sous presse), *Modelling prehispanic pueblo societies in their ecosystems*, «Ecological Modelling», 2012, doi:10.1016/j.ecolmodel.2012.01.002.
- KOHLER T.A., COCKBURN D., HOOPER P.L., BOCINSKY R.K., KOBTI, Z. 2012b, *The coevolution of group size and leadership: an agent-based public goods model for prehispanic pueblo societies*, «Advances in Complex Systems», 15, Nos. 1&2, doi: 10.1142/S0219525911003256
- KOHLER T.A., VAN DER LEEUW S.E. 2007, *The Model-Based Archaeology of Socio-natural Systems*, Santa Fe, School for Advance Research Press.
- KOHLER T.A., VARIEN M.D. (eds.) 2012a, *Emergence and Collapse of Early Villages: Models of Central Mesa Verde Archaeology*, University of California Press, Berkeley.
- KOWARIK K., RESCHREITER H., WÜRZER G. 2010, *Modeling a mine, Agent based Modeling, System dynamics and Experimental Archaeology applied to the Bronze Age Salt mines of Hallstatt*, in *Mining in European History and its Impact on Environment and Human Societies, Proceedings of the*

- 1<sup>st</sup> Mining in European History-Conference of the SFB-HIMAT (Innsbruck 2009), University Press, 199-208.
- LAKE M.W. 2000, *MAGICAL Computer Simulation of Mesolithic Foraging*, in T.A. KOHLER, G.J. GUMMERMAN (eds.), *Dynamics in Human and Primate Societies: Agent-Based Modelling of Social and Spatial Processes*, Oxford, Oxford University Press, 107-143.
- LANE D., PUMAIN D., VAN DER LEEUW S.E., WEST G. (eds.) 2009, *Complexity Perspectives in Innovation and Social Change (Methods Series)*, Berlin, Springer-Verlag.
- LI T.Y., YORKE J.A. 1975, *Period three implies chaos*, «American Mathematical Monthly», 82, 985-992.
- LIAO T.F. 2008, *Series Editors, Introduction*, in N. GILBERT, *Agent-Based Models, Quantitative Applications in the Social Sciences*, 153, IX-X.
- LOWE J.W.G. 1985, *The Dynamics of Apocalypse: A System Simulation of the Classic Maya Collapse*, Albuquerque, The University of New Mexico Press.
- MACARTHUR N., SAUNDERS I.W., TWEEDIE R.L. 1976, *Small population isolates: a micro-simulation study*, «Journal of the Polynesian Society», 85, 307-326.
- MCGLADE J., ALLEN P.M. 1986, *Fluctuation, instability and stress: understanding the evolution of a Swidden horticultural system*, «Science and archaeology», 28, 44-50.
- MITHEN S.J., REED M. 2002, *Stepping Out: A Computer Simulation of Hominid Dispersal from Africa*, «Journal of Human Evolution», 43, 433-462.
- MANDELBROT B.B. 1983, *The Fractal Geometry of Nature*, New York, Freeman and Co.
- MARTIN J.F. 1972, *On the estimation of the sizes of local groups in a hunting-gathering environment*, «American anthropologist», 75, 1448-1468.
- NIGEL G., DORAN J., (eds.) 1994, *Simulating Societies: The Computer Simulation of Social Phenomena*, London, UCL Press.
- NOTTALE L., CHALINE J., GROU P. 2000, *Les arbres de l'évolution*, Paris, Hachette.
- O'SHEA J.M. 1978, *A Simulation of Pawnee site development*, in I. HODDER (ed.), *Simulation Studies in Archaeology*, Cambridge, Cambridge University Press, 39-40.
- PREMO L.S. 2005, *Patchiness and Prosociality: An Agent-based Model of Plio/Pleistocene Hominid Food Sharing*, in P. DAVIDSSON, K. TAKADAMA, B. LOGAN, *Multi-Agent and Multi-Agent-Based Simulation, Lecture Notes in Artificial Intelligence*, 3415, Berlin, Springer, 210-224.
- PREMO L.S. 2008, *Exploring behavioral terra incognita with archaeological agent-based models*, in B. FRISCHER, A. DAKOURI-HILD (eds.), *Beyond Illustration: 2D and 3D Technologies as Tools of Discovery in Archaeology*, BAR International Series 1805, Oxford, ArchaeoPress, 46-56.
- PRIGOGINE I. 1968, *Introduction à la thermodynamique des processus irréversibles*, Paris, Dunod.
- READ D.W. 1998, *Kinship based demographic simulation of societal processes*, «Journal of Artificial Societies and Social Simulation», 1 (<http://jass.soc.surrey.ac.uk/1/1/1.html>).
- RENFREW C. 1978, *Trajectory discontinuity and morphogenesis: the implication of catastrophe theory for archaeology*, «American Antiquity», 43, 203-222.
- RENFREW C., COOKE K.L. (ed.) 1979, *Transformations: Mathematical Approaches to Culture Change*, New York, Academic Press.
- REYNOLDS R.G. 1986, *An adaptative computer model for the evolution of plant collecting and early agriculture in the eastern valley of Oaxaca*, in K.V. FLANNERY (ed.), *Guila Naquitz: Archaic Foraging and Early Agriculture in Oaxaca, Mexico*, Orlando, Academic Press, 439-500.
- REYNOLDS R., WHALLON R., GOODHALL S. 2001, *Transmission of Cultural Traits by Emulation: An Agent-Based Model of Group Foraging Behavior*, «Journal of Memetics - Evolutionary Models of Information Transmission», 4 ([http://jomemit.cfpm.org/2001/vol4/reynolds\\_r&al.html](http://jomemit.cfpm.org/2001/vol4/reynolds_r&al.html)).
- TAINTER J.A. 1988, *Collapse of Complex Societies*, Cambridge, Cambridge University Press.
- TESTART A. 2005, *Éléments de classification des sociétés*, Paris, Errance.
- THOM R. 1972, *Modèles mathématiques de la morphogénèse*, Paris, Bourgeois.
- THOMAS D.H. 1972, *A Computer simulation model of Great Basin Shoshonean subsistence and settlement patterns*, in D.L. CLARKE (ed.), *Models in Archaeology*, London, Methuen, 671-704.
- TOCQUEVILLE A. (de) 2004, *État social et politique de la France avant et depuis 1789*, dans *Œuvres*, t. III, Paris, Gallimard.
- VAN DER LEEUW S., MCGLADE J. (eds.) 1997, *Archaeology: Time, Process and Structural Transformations*, London, Routledge.

- WARD R.H., WEISS' K.M. 1976, *The Demographic Evolution of Human Populations*, London, Academic Press.
- WASSERMAN S., FAUST K. 1994, *Social Network Analysis: Methods and Applications*, New York, Cambridge University Press.
- WHITE D.R., SPUFFORD P. 2005, *Medieval to Modern: Civilizations as Dynamic Networks*, Cambridge, Cambridge University Press.
- WILKINSON T.J., CHRISTIANSEN J.H., UR J., WIDELL M., ALTAWHEEL M. 2007, *Modeling Settlement Systems in a Dynamic Environment, Case Studies from Mesopotamia*, in T. A. KOHLER, E.S. VAN DER LEEUW (eds.), *The Model-Based Archaeology of Socio-natural Systems*, Santa Fe, School for Advance Research Press, 175-208.
- WOBST H.M. 1974, *Boundary conditions for Palaeolithic social systems: a simulation approach*, «American Antiquity», 39, 2, 147-170.
- WOOLRIDGE M., JENNINGS N. 1995, *Intelligent Agents: Theory and Practice*, «The Knowledge Engineering Review», 10(2), 115-152.
- ZUBROW E.B.W. 1975, *Prehistoric Carrying Capacity: A Model*, Menlo Park, California, Cummings.

## ABSTRACT

The attempts to model past societies by the latest techniques, such as multi-agent systems, are limited by the difficulties in modeling the processes of Human and Social Sciences: social organization, social rules, management, societal attitudes. While addressing this problem, the archaeologist is often led to select the climatic change and the economic processes, which are easier to quantify and model and therefore to find only “eco-systemic” explanations for changes in societies. We are here trying to initiate work on the modeling of such processes, the foundations of which are found in the work of earlier authors (history, anthropology, sociology).