

6^{ème} congrès Européen de Science des Systèmes Paris
19-22 septembre 2005

Utilisation de la systémique et des algorithmes génétiques pour une prospective technologique dans le domaine du bâtiment

Dr R.Cantin, Dr HDR P.Michel

Chercheurs

Laboratoire des Sciences de l'Habitat, DGCB - URA CNRS 1652 - ENTPE
Rue Maurice Audin
69518 Vault en Velin Cedex - France
Tel. 04 72 04 70 31
richard.cantin@entpe.fr pierre.michel@entpe.fr

Résumé : Le bâtiment présente de fortes interactions avec ses environnements naturel, économique, social, énergétique, financier, urbain, etc. Or, l'essor des technologies de l'information et de la communication, et leur diffusion, transforment les bâtiments et les modes de vie des occupants: multiplication des interfaces et des artefacts de communication, développement des réseaux et des systèmes de gestion, etc.

Ces changements et les mutations technologiques, sources d'incertitudes et d'interrogations quant à l'avenir, rendent la réflexion prospective nécessaire pour qui veut anticiper les évolutions possibles du bâtiment, les maîtriser et en tirer parti.

Les différentes approches prospectives actuelles montrent des difficultés à identifier explicitement les évolutions technologiques possibles dans un environnement complexe, pluridisciplinaire et changeant, comme le domaine du bâtiment. Elles n'intègrent pas les mécanismes complexes des évolutions et des ruptures technologiques.

Pour y remédier, nous proposons l'approche systémique, complétant l'approche analytique classique, pour modéliser les équipements comme des individus soumis à des contraintes de leur environnement extérieur. Puis, nous faisons appel aux algorithmes génétiques pour représenter les évolutions technologiques possibles de ces individus.

Une application à une étude prospective des systèmes de Gestion Technique du Bâtiment illustre cette démarche, montrant la complémentarité de la systémique et des algorithmes génétiques pour représenter les trajectoires possibles des systèmes technologiques, subissant des transformations diverses telles que les reproductions, les croisements ou les mutations.

Abstract : *Use of systemic and genetic algorithms for a technology future approach in the building sector*

Building sector presents strong interactions with its natural, economic, social, energy, financial, or urban environments. However, the rise of communication and information technologies, and their diffusion, change buildings and ways of life of people: multiplication of interfaces and communication artefacts, development of networks and management systems, etc.

These technological changes, sources of uncertainties and interrogations about the future, make the foresighting approach necessary for which wants to anticipate the possible evolutions of buildings, to control them and benefit from it.

The various current prospective approaches show difficulties for explicitly identifying the possible technological developments in a complex, multi-field and changing, environment, like the building trade. They do not integrate complex mechanisms of evolutions and the technological breaks.

We propose the systemic approach, supplementing the traditional analytical approach, to model a building product like a individual subjected to constraints of their external environment. Then, we call upon the genetic algorithms to represent the possible technological developments of these individuals.

An application with a future approach of Building Management Systems illustrates this step, showing the complementary of systemic and genetic algorithms to represent the possible trajectories of systems, undergoing various transformations such as reproductions, crossings or mutations.

1. Introduction

Le bâtiment présente de fortes interactions avec ses environnements naturel, économique, social, énergétique, financier, urbain, etc. Or, l'essor des technologies de l'information et de la communication, et leur diffusion, transforment les bâtiments et les modes de vie des occupants: multiplication des interfaces et des artefacts de communication, développement des réseaux et des systèmes de gestion technique des bâtiments (GTB), etc.

La demande en prospective technologique s'est accentuée avec l'incertitude grandissante générée par de nombreuses mutations technologiques dues à cet essor rapide des technologies de l'information et de la communication. Etre en mesure d'anticiper ces évolutions des produits répond en effet à des intérêts économiques et stratégiques fondamentaux.

Or les méthodes actuelles dites prospectives présentent une faiblesse méthodologique liée à la difficulté de proposer une représentation des mécanismes complexes de l'évolution technologique.

Cependant, en considérant les produits comme des individus évoluant dans un environnement compétitif et complexe identifié notamment par le marché, il apparaît qu'une approche systémique combinée avec une approche évolutionniste permet d'enrichir la prospective technologique actuelle.

Cette perception de l'évolution technologique conduit à mettre en oeuvre une approche originale pour modéliser les transformations des produits.

Dans une première partie, une lecture systémique fournit une description des systèmes de GTB. Ensuite, une approche évolutionniste montre comment l'évolution des systèmes peut être représentée par les algorithmes génétiques. Enfin, une application à une étude prospective des systèmes de GTB montre comment les algorithmes génétiques constituent un langage original consonnant avec la systémique.

2. Approche systémique des systèmes de GTB

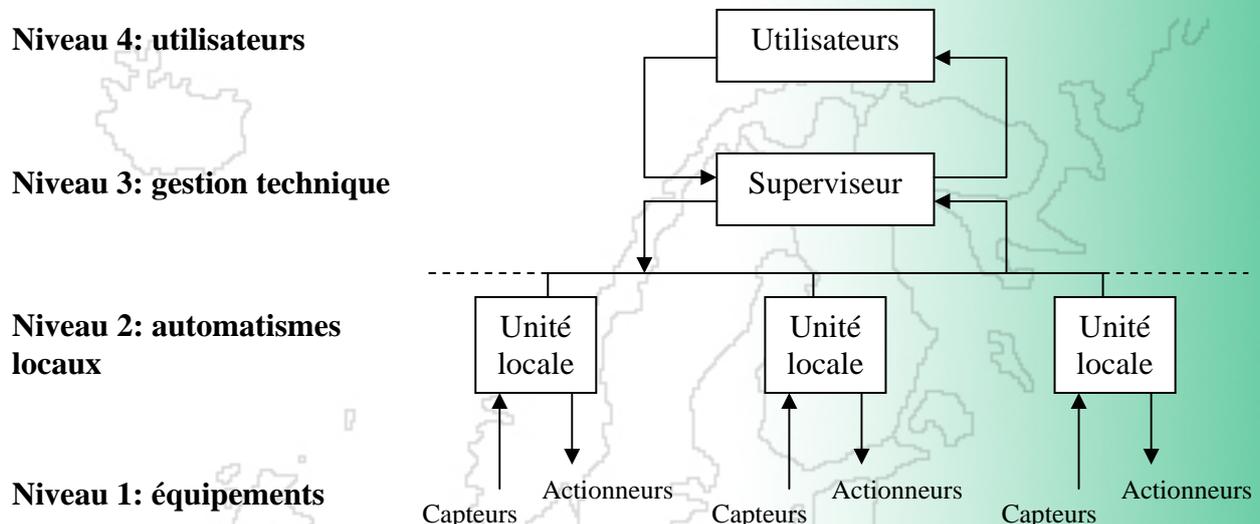
La Gestion Technique des Bâtiments est définie ainsi: "Ensemble de services assurés dans les bâtiments par des systèmes réalisant plusieurs fonctions, pouvant être connectés entre eux et à des réseaux internes ou externes de communication. Les fonctions réalisées concourent principalement à assurer le confort et la sécurité des usages ainsi que les conditions de fonctionnement optimal des appareils ou processus dans les bâtiments, et à assurer la maîtrise des frais de fonctionnement. Ces fonctions consistent à détecter, contrôler, réguler, programmer, analyser et agir pour assurer la sûreté de fonctionnement des équipements techniques, la sécurité et le confort d'usage des bâtiments." [Cyssau]

Aujourd'hui, outre les fonctions spécifiques à la gestion des équipements, d'autres fonctions permettent de gérer les flux de personnes (contrôle d'accès, gestion du temps, gestion des parkings, etc.).

Les systèmes de GTB côtoient d'autres systèmes communicants: la téléphonie, la bureautique et l'informatique, la vidéo, etc. Les bâtiments équipés de tels systèmes de communication et de contrôle sont parfois qualifiés de bâtiments intelligents. Avec l'essor des NTIC, de nouvelles formes d'intégration de services dans les bâtiments sont apparues, désignées par l'immatique, l'urbatique, la domotique, etc.

L'architecture d'un système de GTB peut être décomposée en 4 niveaux. Le niveau "équipements" est le niveau constitué par les capteurs (entrées du système) et les actionneurs (sorties du système) destinés à agir. Le niveau "automatismes locaux" regroupe les stations locales qui assurent les fonctions de contrôle des équipements, la sauvegarde et l'acquisition des paramètres nécessaires à la gestion du bâtiment. Le niveau "gestion technique ou

supervision" centralise les informations en provenance des unités locales qui permettront d'effectuer un bilan du bâtiment. Enfin, les utilisateurs pilotent le système. Un système de GTB est donc caractérisé par la qualité de chaque composant des différents niveaux mais également par les interrelations existantes entre eux. Cette décomposition en 4 niveaux structurels permet de distinguer les différentes fonctions des systèmes de GTB.



Quatre niveaux structurels d'un système de GTB

Les durées de vie (Source ADDI, 1999) des différents composants d'un système de GTB témoignent des rythmes d'évolution des architectures des systèmes: logiciels (1,5 an), micro-ordinateurs (3 ans), serveurs (8 ans), systèmes de communication (5 à 10 ans), systèmes de câblage (8 à 10 ans), équipements techniques (20 à 30 ans), bâtiment (plus de 50 ans). Par ailleurs, s'ajoute la diversité des disciplines et des métiers concernés par la mise en oeuvre et l'entretien des systèmes: industries électriques, électroniques et de communication, sécurité, gestion, énergie, télécommunications, chauffage, climatisation, ventilation, etc. Ainsi, les systèmes de GTB forment des systèmes complexes qui, équipant les bâtiments de moyens de communication et de contrôle, sont soumis à de nombreux facteurs d'évolution. L'approche systémique permet la construction d'un référentiel commun pour ces systèmes complexes.

3. Approche évolutionniste avec les algorithmes génétiques

Les notions d'individus et d'espèces pour qualifier des produits, et des systèmes technologiques comme les systèmes de GTB, résultent d'une représentation par les métaphores biologiques [Cantin]. En effet, en proposant, pour l'étude prospective, une approche évolutionniste, nous utilisons, par analogie avec les théories de l'évolution biologique, des concepts destinés en principe à expliquer l'évolution des espèces [Monod]. Cette approche ne s'arrête pas à une simple transposition, mais s'emploie fondamentalement, tout en gardant le contenu des théories évolutionnistes comme point de repère épistémologique, à mettre en évidence des mécanismes propres à l'innovation [Sebbar]. Ainsi, il peut être question d'une dynamique technologique des produits orientée par des forces. De même, les notions de hasard et de nécessité peuvent retrouver leur conciliation dans la notion d'un déterminisme partiel de l'innovation.

Par ailleurs, l'évolution technologique d'un produit (ou d'un système de GTB) peut être perçue comme le résultat de processus complexes d'innovation qui rend l'approche analytique et déterministe inadaptée à son étude. Le changement technologique, qui peut être considéré comme une réponse aux besoins des utilisateurs, a lieu à l'intérieur de tendances induites par le marché, en rapport avec un milieu ou un environnement socio-économique [Sebbar]. Mais, une particularité de l'innovation vient du fait qu'à la fois les frontières du marché et celles de la technologie changent continuellement. Ces changements créent une succession kaléidoscopique de nouvelles possibilités et combinaisons.

Cette perception de l'évolution de produits conduit à poursuivre la métaphore évolutionniste jusqu'aux mécanismes d'évolution.

L'utilisation de cette métaphore biologique offre une nouvelle perception de l'évolution technologique. Ainsi, nous nous intéressons aux algorithmes génétiques, non pas pour réaliser une optimisation, mais pour représenter des mécanismes d'évolution.

Nous considérons les évolutions technologiques, de façon analogique, comme pouvant être représentées par les principaux opérateurs de l'évolution naturelle que sont la reproduction, le croisement et la mutation. Ainsi, dans une étude de prospective technologique, un produit peut être considéré comme un individu soumis aux lois de l'évolution. Il évolue comme un système changeant dans un environnement changeant qui est le marché. Il peut se reproduire et se multiplier. Il peut échanger ou croiser un ou plusieurs éléments avec d'autres produits plus ou moins performants. Il peut enfin muter en acquérant des caractéristiques nouvelles inexistantes au sein de son espèce ou de la population (la gamme de produits) à laquelle il appartient.

Ces types d'évolution permettent de faire apparaître de nouveaux individus ou produits technologiques identiques ou différents. Des générations nouvelles de produits peuvent ainsi apparaître.

L'approche par des métaphores est souvent utilisée en prévision et en prospective [Bonnaure], mais elle est employée lorsqu'il s'agit d'exposer des phénomènes complexes difficiles à expliquer. La métaphore est alors un procédé de langage qui consiste "en un transfert de sens par substitution analogique". Cette approche dévoile cependant une faiblesse scientifique de cette forme de discours figuré où l'idée évoquée est présentée sous une formulation détournée pour donner au discours un plus grand pouvoir suggestif [Bonnaure]. Cependant, l'approche évolutionniste, faisant appel directement aux lois de l'évolution, permet, par analogie avec le monde vivant, d'explorer et de représenter les processus de l'évolution technologique.

4. Représentation de l'évolution technologique

Pour représenter les mécanismes d'évolution, nous utilisons les quatre étapes fondamentales qui interviennent dans le fonctionnement d'un algorithme génétique [Goldberg]. Tout d'abord, une population initiale, c'est-à-dire l'ensemble des individus retenus pour l'étude prospective, est constituée. Chaque produit (ou système) est évalué par l'intermédiaire d'une fonction de performance traduisant la qualité de la dite solution pour le problème traité. Une étape de reproduction conduit ensuite à la création d'une nouvelle génération d'individus (la nouvelle population) sur la base de la population précédente. Cette phase de reproduction ou d'évolution fait intervenir trois mécanismes principaux:

- la sélection: un algorithme permet de sélectionner dans la génération précédente un nombre limité d'individus, au regard de la fonction de performance;
- le croisement: les éléments sélectionnés sont accouplés et donnent naissance à de nouveaux éléments (progéniture) dont les caractéristiques proviennent de l'un ou de l'autre des parents. ce mécanisme, couplé à celui de sélection des meilleurs individus de la génération précédente,

permet de conserver les caractéristiques des meilleurs éléments et d'éliminer les caractéristiques les moins appropriées au problème posé;

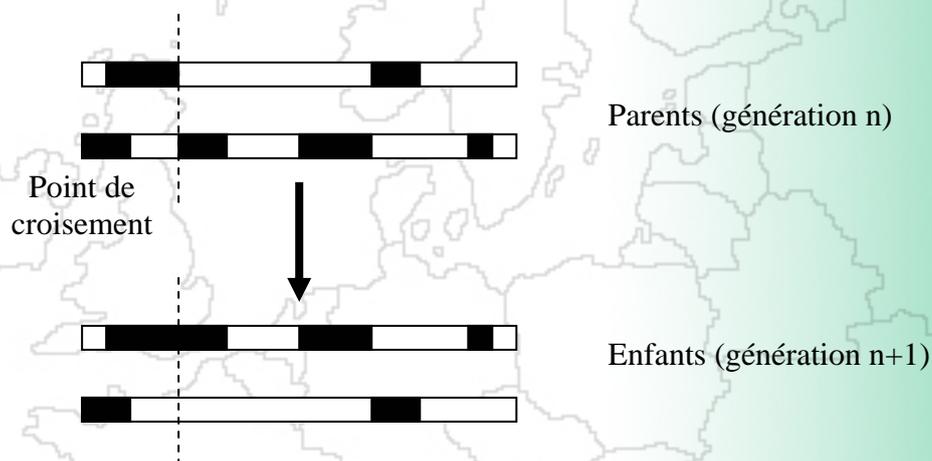
- la mutation: elle modifie les caractéristiques de l'une et ou de l'autre des progénitures pour y introduire une nouvelle caractéristique dont ne disposait aucun des parents.

Différentes opérations mathématiques sont nécessaires pour cette approche évolutionniste:

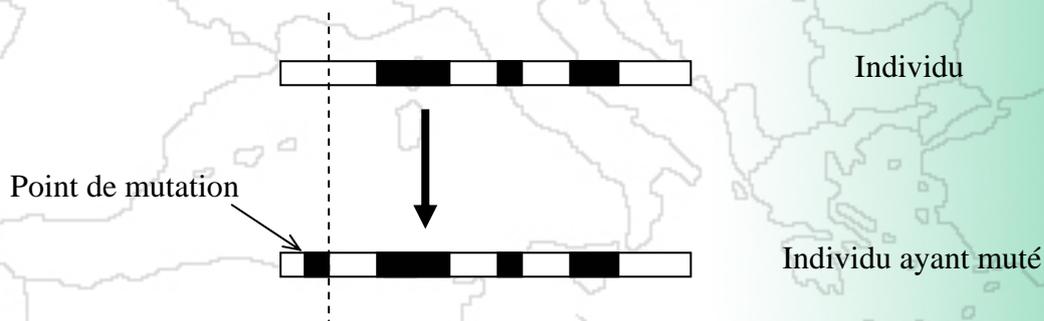
- le codage: les différents individus d'une population doivent représenter un système potentiel. Le codage consiste donc à représenter l'information sous forme d'une chaîne de caractères numériques binaires (un chromosome). Cette chaîne est elle-même découpée en sous-éléments correspondant chacun à une information (les gènes). Enfin, un gène est constitué d'allèles (les composants élémentaires non divisibles du chromosome). Si les allèles sont le plus souvent des variables binaires, ils peuvent aussi prendre des valeurs numériques différentes.

- la sélection: la performance de chaque système étant connue, une sélection basée sur leur valeur est opérée. Plusieurs techniques ont été développées, la plus connue étant la technique de la roulette [Goldberg].

- le croisement et la mutation sont représentés par les figures ci-dessous.



Mécanismes du croisement en un point



Mécanismes de mutation

Nous disposons ainsi d'un ensemble d'opérateurs qui nous permettent de décrire des mécanismes d'évolution. La connaissance du patrimoine génétique d'un système fournit une partie des éléments pour la compréhension des évolutions possibles.

5. Application à une étude prospective des systèmes de GTB

L'identification des systèmes de GTB comme des individus est liée à l'objectif d'une étude prospective. Le choix des systèmes s'appuie sur la nécessité de disposer de données suffisantes pour caractériser les individus et les coder.

Un système de GTB peut être décrit selon le modèle canonique du système général [Le Moigne] et par les outils de la systémique avec une lecture structurelle et fonctionnelle. Des échanges de flux d'énergie, d'information et de matière sont identifiables entre les composants et les différents niveaux structurels. Par l'approche systémique, les individus sont représentés par une structure, un fonctionnement, des finalités et un environnement.

Une contrainte apparaît lorsqu'il s'agit de définir une grille de codage (ou référentiel) pour les individus. En effet, cette grille (ou schéma de modélisation) doit permettre de proposer des critères de codage pour traduire nos connaissances des individus. Le codage de ces informations doit pouvoir être traité par les fonctions de performance. Cette codification est indispensable à la représentation des connaissances mais entraîne une perte partielle des informations recueillies. Les étapes du codage ne définissent pas une relation isomorphique entre l'individu à représenter et sa représentation.

Une grille de décodage est utilisée pour la lecture de l'information codée afin d'identifier les individus. Au cours de l'évolution, il convient de s'assurer de l'invariance de ces grilles. En utilisant l'approche systémique pour modéliser un système de GTB, une grille est construite.

Finalités d'un système de GTB	Réduction des coûts de gestion du bâtiment Amélioration du confort	
Environnement	Secteur d'utilisation: résidentiel, tertiaire, collectif, etc.	
Aspects fonctionnels	Flux	Voix, données, images, énergie, etc.
	Centres de décision	Utilisateurs, ordinateur, unités locales
	Boucles de rétroaction	Echanges d'informations local/central, etc.
	Délais	Rapidité de réaction du système de GTB,...
Aspects structurels	Frontière	Limite englobant le système
	Éléments	Capteurs, actionneurs, unités, ...
	Réseaux de transport	architecture, supports, techniques de communication,...
	Réservoirs	Mémoires, stockages,...

Grille de lecture des individus

Cette représentation permet de modéliser un système de GTB selon une grille invariante dans le temps. Ainsi, la comparaison d'un système existant dans le passé et d'un système présent est possible avec cette grille. Il est évident que si les indicateurs du passé ont eux-même évolué, il devient difficile de comparer les transformations intrinsèques d'un système, car nous risquons de mesurer des transformations du système, enchevêtrées aux transformations des indicateurs, des échelles de représentation et des grilles d'évaluation. Il est plus difficile de comparer un système S1 évalué avec l'indicateur I1 au temps t1, avec le système S2 évalué avec l'indicateur I2 au temps t2. Le référentiel doit pouvoir être conservé sauf si nous pouvons déterminer les liens entre des référentiels différents.

Pour le codage, nous avons choisi des valeurs entières variant sur un intervalle borné. Ces valeurs sont exploitables par les fonctions de performance. La longueur du chromosome est fixée bien qu'il puisse être conçue pour varier dans le temps. Nous considérons donc que toutes les informations pour cette étude peuvent être portées par les chromosomes initialement définis. Les critères de codage sont considérés être indépendants du temps (sur la période

d'étude) car toute évolution irréversible de ces critères rendrait difficile et incertaine toute comparaison entre le passé et le futur des individus.

Pour comparer les individus, l'information codée doit pouvoir être utilisée par les fonctions de performance. Pour cette raison, les définitions du codage et des fonctions de performance ne sont pas indépendantes.

Les espèces forment des populations d'individus. Un codage de l'espèce ou de la population complète celui des individus et permet d'évaluer les évolutions des espèces. Les propriétés des groupes d'individu, étant parfois différentes des propriétés des individus pris séparément (propriétés émergentes), il convient de pouvoir codifier ces informations.

Le codage des informations est effectué à l'aide d'échelles graduées, les critères de codage constituant la grille de représentation des caractéristiques du système.

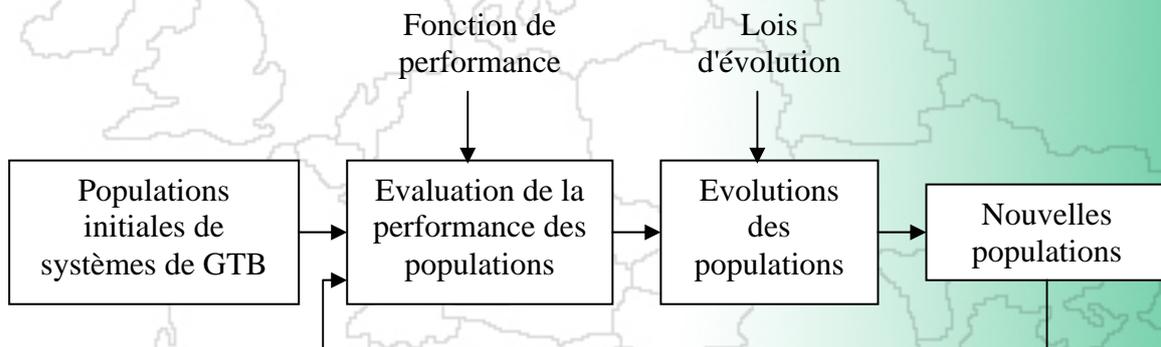
La construction de la fonction de performance et le choix des pondérations relèvent d'une problématique multicritère d'aide à la décision. La fonction de performance FP s'écrit alors:

$$FP = \sum p_i C_i (x_i)$$

avec $i \in ([0,5])^n$, n critères, x_i la valeur du gène i

et p_i le poids du critère C_i

Après une lecture systémique des systèmes de GTB, les algorithmes génétiques fournissent un langage original pour élaborer un modèle dynamique suivant les caractéristiques structurelles suivantes.

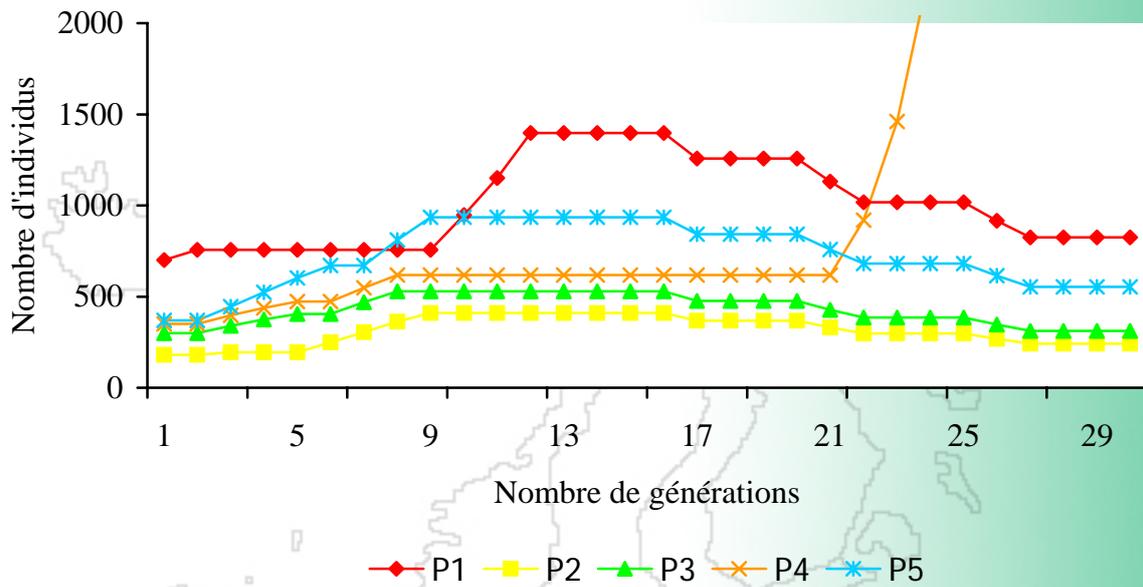


Caractéristiques structurelles du modèle dynamique

Un outil de simulation est développé avec le logiciel MATLAB pour effectuer l'étude prospective des systèmes de GTB. La simulation est discrète et s'appuie sur un pas de temps correspondant à un bouclage de l'information c'est-à-dire à l'apparition d'une nouvelle génération.

Par exemple, cinq populations initiales (correspondant à 5 gammes de systèmes de GTB) sont définies (P1, P2, P3, P4, P5). Chaque individu de chaque population est codé sur la base du référentiel systémique. Chaque individu est ensuite évalué par la fonction de performance. Chaque individu évoluera selon sa performance par reproduction, croisement ou mutation.

La figure suivante illustre un exemple de résultats obtenus. Il s'agit de l'évolution du nombre d'individus des 5 populations de systèmes de GTB en fonction du nombre de générations. Ainsi, la population P1 compte 1500 individus à la génération 15 alors que la population P3 compte 500 individus. Les trajectoires de chaque population dépendent des caractéristiques et des performances des individus, de l'évolution de leurs gènes, mais également de l'évolution et de la performance des autres populations présentes.



Evolution de 5 populations de systèmes de GTB

A partir de cette modélisation associant la systémique et les algorithmes génétiques, plusieurs études de sensibilité et de validation doivent être poursuivies. En effet, il est nécessaire de procéder à l'étude de l'influence du référentiel systémique et des codages génétiques sur les résultats obtenus. De même, les impacts de la fonction de performance et des lois d'évolution (probabilités de croisement ou de mutation) doivent être analysés. Des travaux sont en cours afin de développer cette méthodologie prospective basée sur la complémentarité de la systémique et des algorithmes génétiques.

6. Conclusion

Cette utilisation de la systémique et des algorithmes génétiques, pour l'étude prospective des systèmes de Gestion Technique du Bâtiment, montre une démarche originale pour représenter l'évolution des systèmes. La prospective technologique reste une démarche difficile à mettre en oeuvre compte tenu de la complexité des mécanismes dynamiques de l'évolution technologique. Cependant, l'usage des algorithmes génétiques permet une approche évolutionniste des transformations de systèmes. Au-delà des contraintes d'une telle approche, liée aux limites de l'analogie, les lois d'évolution fournissent une représentation originale des trajectoires des systèmes. L'évolution technologique n'est pas l'évolution biologique, mais l'analogie biologique nous apporte une perception nouvelle des problèmes de prospective technologique.

Cependant, plusieurs difficultés demeurent. En effet, la représentation des systèmes, par la systémique et le codage génétique, reste une étape délicate où la représentation de l'information influence la perception du système et donc la perception de ses évolutions possibles. L'étape d'évaluation d'un système doit aussi tenir compte des difficultés d'une évaluation quantitative et qualitative des performances. Nous y retrouvons également ces problèmes liés à ce type de démarche dans l'étape mettant en oeuvre les lois d'évolution. Celles-ci font appel à de nombreux paramètres dynamiques difficiles à identifier et à

préciser avec certitude: stratégies de sélection, nombre de reproduction, probabilités de croisement et de mutation, etc.

Par compte, en complément de la systémique et de la dynamique des systèmes, l'usage des algorithmes génétiques permet la construction de modèles, traduisibles en langage informatique, et donc permet de mettre en oeuvre des procédures de validation de modèles dynamiques..

Ainsi, les algorithmes génétiques, permettant une modélisation des mécanismes d'évolution et la représentation de trajectoires, offrent un langage original et de nouvelles voies en matière de développement méthodologique dans le domaine de la prospective technologique. En ce sens, ils complètent l'approche systémique.

7. Références bibliographiques

- BERTALANFFY Ludwig von. (1973). *Théorie générale des systèmes*. Bordas.
- BONNAURE, P. De l'usage des métaphores en prospective. *Futuribles*, vol 9, n°212, pp 59-74, 1996.
- CANTIN, R. et MICHEL, P. Towards a new technology future approach. *Futures*, 35, pp 189-201, 2003.
- CYSSAU R. (1990). *Manuel de la régulation et de la gestion de l'énergie*. PYC Edition. Paris
- DELATTRE, P. Analogie et connaissance scientifique. *Encyclopaedia Universalis*. Paris : Encyclopaedia Universalis, pp 261-263, 1990.
- DONNADIEU Gérard & KARSKY Michel. (2002). *La systémique, penser et agir dans la complexité*. 269 p. Editions LIAISONS. Rueil-Malmaison.
- DURAND Daniel. (1979). *La systémique*. PUF.
- GOLDBERG, D.E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. USA : Addison – Wesley, 1989.
- LE GALOU F. & BOUCHON-MEUNIER B. (1992). *Systémique, théorie et applications*. Lavoisier.
- LE MOIGNE Jean-Louis. (1984). *La théorie du système général*. PUF. Paris
- LE MOIGNE Jean-Louis. (1990). *La modélisation des systèmes complexes*. Dunod. Paris
- MICHALIEWICZ, Z. *Genetic Algorithms+Data Structures = Evolution programs*. Berlin : Springer, 1996.
- MONOD, J. *Le hasard et la nécessité*. Paris : Seuil, 1970.
- ROSNAY Joël de. (1975). *Le microscope - Vers une vision globale*. Le Seuil. Paris
- SEBBAR, S. Eléments conceptuels pour l'explication de l'évolution technologique des produits. *Technologies de l'Information et Société*. vol 7, n°4, pp. 385-407, 1995.