

Enseignement de la dynamique des systèmes complexes dans une Grande Ecole d'ingénieurs Démarche pédagogique et résultats obtenus

Hakim REMITA

Professeur Agrégé de mécanique
Enseignant ECP
remita@lgi.ecp.fr

Stéphane COPIN

Docteur en gestion
Chef de projet risques opérationnels à la CaixaBank
steph.copin@free.fr

Abstract : The purpose of this article is to describe how System Dynamics (SD) is taught at Ecole Centrale Paris (ECP), a French Engineering School. After a brief presentation of ECP, we explain how SD is related to the pedagogical objectives of the engineering education program. Then, we present the educational method we use in teaching our students quantitative and qualitative tools to analyse problems with a systemic approach. In the course we try to develop four complementary concepts : **feedback loops, delays, non-linearity and the evolution of the structure itself**. We use feedback loops to explain that the state of a system depends on the value of its main parameters ; in return these values are influenced by the state of the system. Within one system, each loop works according to its own time pattern, called delay, and these respective delays are key part of the complexity of a system. Non-linearity between parameters has to be pointed out by an expert, who has a deep knowledge of the system. Finally, in risk analysis, we insist on the evolution of the structure of the system itself instead of random changes of its parameters. Our paper ends with the presentation of a model proposed by two of our students: a medieval city besieged by an army. This model gave our students a better understanding of feedback loops and delays.

1- INTRODUCTION

Le présent article porte sur un retour d'expérience pédagogique concernant l'enseignement de la dynamique des systèmes complexes (DSC) dans le cadre de la troisième année de l'option Génie Industriel (GI) à l'Ecole Centrale Paris (ECP). Nous présenterons la démarche pédagogique employée pour former des élèves ingénieurs à des méthodes qualitatives et quantitatives leur permettant d'aborder les problèmes de manière systémique. Le module de dynamique des systèmes complexes a été créé il y a cinq ans à la faveur d'une réorganisation des options de troisième année et d'une remise à plat de leurs contenus. C'est tout naturellement que l'enseignement de la DSC s'est intégré à l'option GI. En effet, celle-ci a pour objectif de former les étudiants à l'analyse, la modélisation, l'évaluation et l'optimisation des processus de conception, de fabrication et de distribution de biens et de services. Dans leur mise en oeuvre, certains de ces processus possèdent des caractéristiques qu'il convient d'aborder de façon systémique.

L'option GI recrute chaque année une cinquantaine d'étudiants et s'organise autour de trois thématiques regroupant chacune six modules de formation de 30 heures chacun:

- Les processus de conception des produits et services
- Les processus logistiques
- Les processus économiques

Le module de DSC fait partie de la thématique « processus de conception des produits et services ». Il est animé par Hakim REMITA, professeur agrégé de mécanique au laboratoire de Génie Industriel de l'ECP, et par Stéphane Copin, docteur en gestion, chef de projet risques opérationnels à la CaixaBank et Cogérant de KBS-Simulation.

2 - PRESENTATION DE L'ECOLE CENTRALE PARIS (ECP)



2.1 Généralités :

Fondée en 1829 dans le but de former des ingénieurs généralistes qui accompagneront les progrès scientifiques et techniques d'alors, l'École Centrale Paris se classe à l'heure actuelle dans le peloton de tête des Grandes Ecoles d'ingénieurs françaises. Elle recrute chaque année 350 élèves ingénieurs à travers un concours que présentent 10 000 étudiants issus des Classes Préparatoires aux Grandes Ecoles d'ingénieurs (CPGE).

De plus, une centaine d'étudiants issus des meilleures universités européennes viennent compléter le recrutement.

Recherchés pour leurs capacités d'abstraction, leur dynamisme et leur adaptabilité, les ingénieurs centraliens travaillent dans tous les secteurs économiques, en général pour de grands groupes internationaux dans lesquels ils occupent différentes fonctions.

2.2 Projet éducatif de l'École:

Le projet éducatif de l'ECP s'appuie sur une pluridisciplinarité intégrée, mariant formation scientifique et technique de base, formation technologique et initiation concrète aux réalités économiques, sociales et humaines de l'entreprise.

Cette pluridisciplinarité est le garant de la modernité du projet : adaptabilité aux mutations, maîtrise de la complexité des organisations, ouverture sur les nouvelles technologies émergentes ou inconnues à ce jour, aptitude à innover.

Réalisé en partenariat étroit avec les entreprises, ce projet s'articule en deux phases:

- Un cycle de 24 mois, soit deux années de Tronc Commun, communes à l'ensemble de la promotion,
- Un cycle de 16 mois appelé 3^e Année comportant une « Option d'Approfondissement » et une « Filière » ouvrant sur un premier « Métier » en alternance avec 7 mois de « Thèse Professionnelle » en entreprise. L'option GI fait partie de ces options d'approfondissement.

2.3 Relations internationales :

L'École Centrale Paris a inscrit l'ouverture sur le monde dans un véritable développement stratégique. Tout Centralien se voit offrir l'opportunité d'obtenir, simultanément avec son diplôme, **un diplôme étranger :**

- Un diplôme d'ingénieur d'une université technique européenne appartenant au réseau T.I.M.E. (Top Industrial Manager for Europe)
- Un diplôme d'ingénieur d'une université technique appartenant à des pays émergents : l'École Centrale Paris met en place un programme de double diplôme calqué sur T.I.M.E. avec les meilleures universités du Brésil, de la République Populaire de Chine et de Singapour.

- Un Master's Degree d'une université américaine, britannique, canadienne ou japonaise appartenant au réseau Centrale Master's Degree.

La complémentarité de deux formations d'excellence, les qualités développées par les élèves dans le cadre de cette expérience interculturelle approfondie conduisent à un nouveau profil d'ingénieur, bien préparé à affronter les défis internationaux proposés par nos sociétés modernes.

Chaque année, plus de 145 Centraliens (près de 36% de la promotion) et étrangers bénéficient de cette double formation.



3 – QUATRE IDEES ESSENTIELLES¹

Le but de l'apprentissage est de proposer aux élèves ingénieurs une démarche qui leur permettra dans leur futur emploi de décisionnaire, de mieux appréhender les évolutions possibles dans le temps d'une structure complexe et d'éviter autant que se peut, celles qui risquent de conduire à une catastrophe (écologique, financière, culturelle...).

1.1 Accepter la notion de rétroaction

La complexité à laquelle nous confrontons les élèves est celle d'une structure qui comprend des boucles de rétroaction. Cette notion est placée au centre de notre apprentissage. Nous pouvons dire après 5 années d'expérience que, malgré la capacité d'abstraction élevée des élèves qui n'ont aucun mal à comprendre les notions de stabilisation et d'amplification des boucles de rétroaction, la plupart ont des difficultés à accepter l'idée qu'elles jouent un rôle prépondérant sur l'évolution structurelle. Ces difficultés sont selon nous en partie liées à une prédominance d'autres démarches enseignées qui propose de prévoir ce qui va se passer à l'aide de projections statistiques basées sur des données réels observées. La DSC, toute entière, elle aussi, tournée vers ce qui risque de se passer, ne place pas les données au cœur de sa problématique. Elle propose des scénarii d'évolutions possibles d'une structure de facture

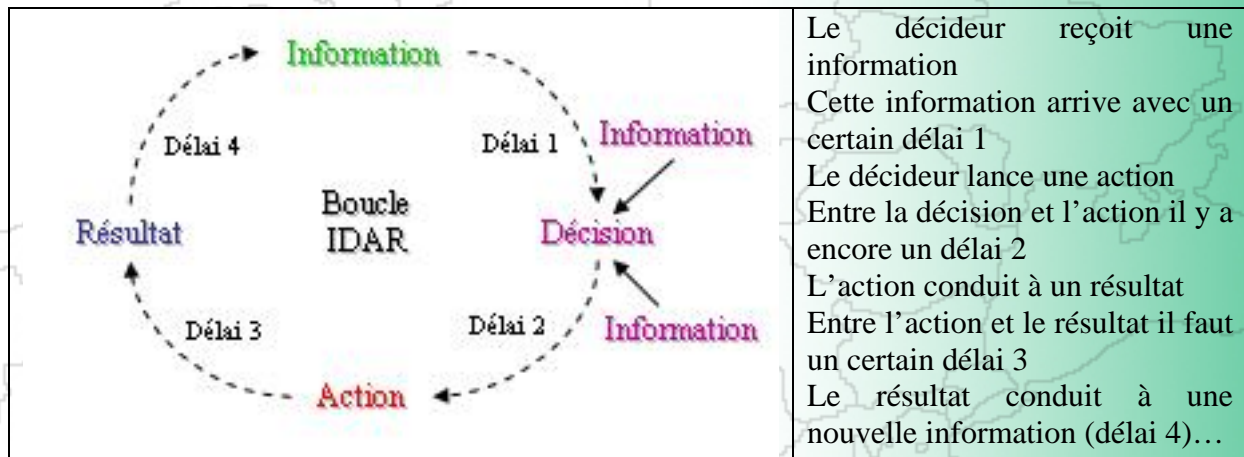
¹ Voir également : KARSKY. M., REMITA. H « Teaching System Dynamics in a French Engineering School ». Congrès de Dynamique des Systèmes. New York. 2003

systémique en fonction de tel ou tel évènement (pollution d'un lac, concurrence, décision politique...), et postule que ces futurs possibles sont intrinsèquement et principalement liés à la notion de rétroaction et à la complexité qu'elle génère, pas à des données statistiques même si le modèle s'en nourrit. Là est la principale valeur ajoutée de notre enseignement : proposer aux élèves ingénieurs, futurs managers, une vision systémique qui permet de comprendre que des forces agissantes modifient l'état du système et qu'en retour ces changements le modifient.



1.2 Tenir compte de la notion de retard

La seconde notion sur laquelle nous insistons est celle du délai. A travers quelques exemples nous expliquons l'importance des effets retard sur le comportement du système dans le temps. Ce n'est pas instantanément qu'une décision aura l'effet recherché. Il existe toujours un délai entre la cause et son effet. Dans l'entreprise industrielle, certains sont assez facilement identifiables et mesurables, d'autres moins, selon la nature de la relation causale : lorsque celle-ci est physique, entre production et stock par exemple, le délai sera assez aisé à mesurer ; dans le cas d'une relation de décision il sera plus difficile de trouver des indicateurs et de faire comprendre leur impact sur un résultat. C'est pourtant souvent ce type de délai qui sera à l'origine de scénarios inattendus, auxquels on n'avait pas pensé sans l'aide de la simulation. Pour illustrer notre propos nous utilisons la boucle IDAR² (Information – Décision – Action – Résultat) schématisée ci-dessous :



Boucle IDAR constitué de multiples boucles semblables interconnectées (toute décision étant prise en général sur la base de plusieurs informations)

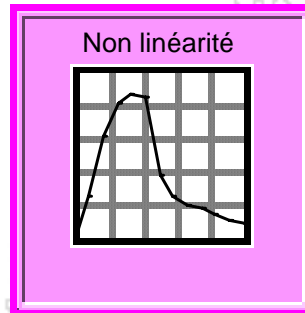
1.3 Prendre en considération l'expérience de l'expert

La troisième notion est celle de la non proportionnalité stricte entre cause et effet : la non linéarité. Même si elle n'est pas uniquement propre à cette notion, c'est dans cette partie que nous avons choisi de rendre saillante la nécessité de sortir d'une prison de données pour aller chercher la parole de l'expert. C'est bien souvent ce dernier qui a une idée, par expérience, de l'allure des courbes de relations et qui mettra à disposition du dynamique des systèmes des informations précieuses. Nous amenons l'élève à comprendre que même si

² DONNADIEU. G., KARSKY. M. « La systémique, penser et agir dans complexité » Editions liaisons. 2002

l'expert se trompe, qu'il ne dispose pas de données, il ne faut pas hésiter à tenir compte de son avis car c'est lui, qui par ses conseils au décideur, va agir sur la réalité future. Toute la puissance de la simulation sera de montrer la valeur dynamique de l'expertise, de révéler d'éventuelles incohérences qui permettront de l'enrichir et sans doute, d'agir avec plus d'efficacité.

Bien souvent, ces courbes sont non linéaires et non monotones et peuvent donc engendrer des comportements très contre intuitifs du modèle en inversant la polarité de boucles de rétroaction. Pour illustrer notre propos, nous simulons un cas de pollution radioactive engendrant une catastrophe différée³. Par ce résultat nous démontrons l'extrême importance de ces courbes d'influence et invitons les élèves à en tenir compte dans leur travail.



1.4 Comprendre l'évolution structurelle

Pour faire vivre ces notions, nous montrons plusieurs résultats d'évolutions catastrophiques d'un système. Il s'agit ici à travers des simulations issues de différents domaines (Environnement, Economie, Anthropologie, Psychologie, Biologie, Gestion, Production,...) de démontrer l'intérêt principal de la démarche : quand l'enjeu est important (coût du projet, risque de pollution de la planète, perte de savoir faire...), utiliser la DSC permet d'anticiper les risques qui peuvent amener la structure à évoluer dans une direction catastrophique ou non souhaitée. Réaliser un tel travail de prospective est une façon de voir les choses à contre courant d'une culture très probabiliste du domaine. Son retour sur investissement est pourtant bien plus important à moyen et long terme puisqu'il aura permis d'éviter la survenance d'un évènement catastrophique grâce à des changements structurels effectués quand il en est encore temps. A notre sens, la vraie valeur ajoutée de la DSC est contenue dans cette seule idée. La comprendre est le principal déclencheur de motivation à son application.

4- DEMARCHE PEDAGOGIQUE

4.1 Déroulement du cours :

Le cours de DSC se déroule suivant 3 phases distinctes :

- Présentation de l'approche dynamique des systèmes (concepts clefs, exemples d'applications).
- Méthodes de modélisation et de simulation (construction d'un diagramme causal, modélisation à l'aide du logiciel Stella®).
- Projet d'application (en binôme): Modélisation et analyse d'un système complexe proposé par les étudiants.

4.2 Enjeux de la formation :

³ KARSKY. M., DORE. J.CH., GUENEAU. P. « De la possibilité d'apparition de catastrophes différées ». Ecodécision. N°6. Montréal. 1992.

L'enjeu majeur de ce module est de former de futurs cadres dirigeants de grands groupes internationaux à l'approche systémique dans la résolution et la compréhension de problèmes complexes. Le développement de la pensée systémique au sein des directions générales permettra de l'étendre au niveau des directions opérationnelles.

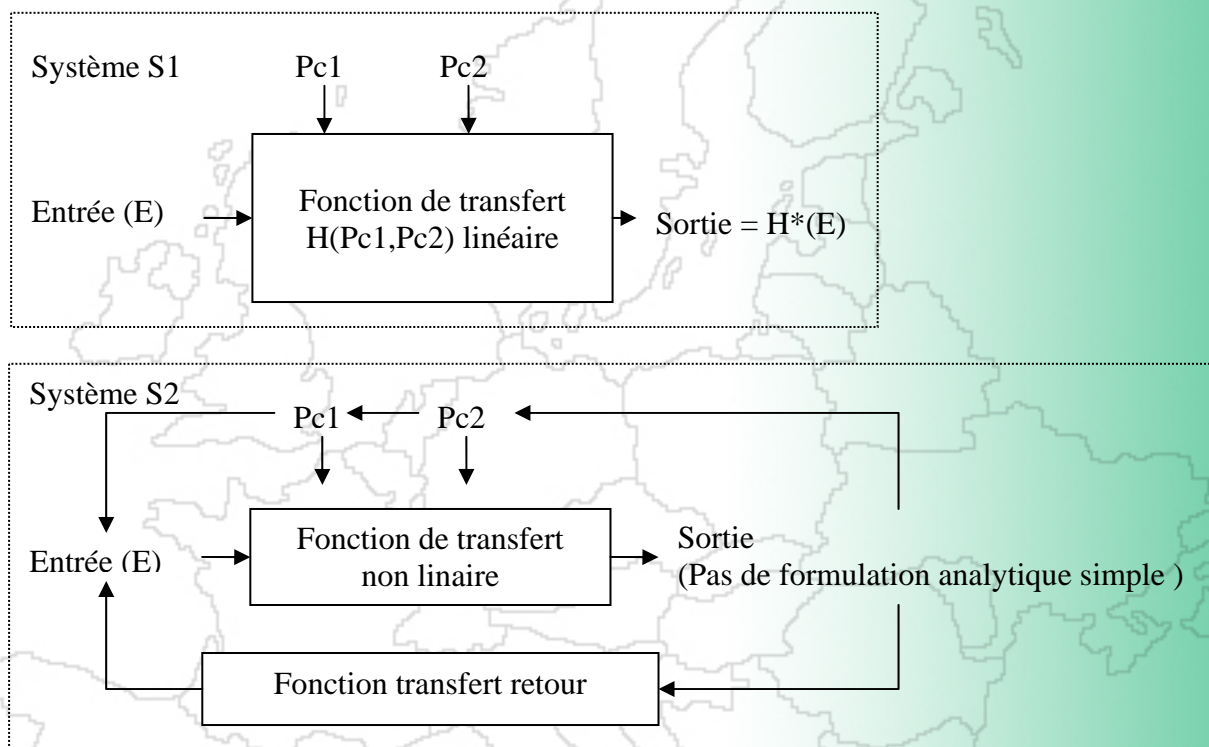
4.3 Objectifs pédagogiques :

Les objectifs pédagogiques du module sont les suivants :

- Savoir modéliser le comportement d'un système complexe (comportant des boucles de rétroaction).
- Savoir simuler et analyser le comportement d'un système à l'aide du logiciel Stella®.

Plus globalement, les étudiants devront être en mesure d'appréhender la complexité d'un système en ayant identifié ses boucles de rétroaction et les liens de causalité non linéaires entre certains de ses paramètres.

Schématiquement l'étudiant devra pouvoir passer de la vision S1 à la vision S2 d'un système :



Avec Pc_i : paramètres de contrôle du système.

4.5 Résultats pédagogiques

Dans la phase de modélisation d'un système complexe, les étudiants mettent en œuvre les connaissances (théoriques et techniques) qu'ils ont acquises au cours des deux phases précédentes. Le fait de demander aux étudiants de proposer eux même le système à modéliser les oblige à mettre en application les notions qu'ils ont acquises sur la définition d'un système complexe.

En règle générale, les systèmes modélisés par les étudiants sont choisis en fonction de :

- leur niveau de connaissance sur les éléments composant le système
- leur attrait pour le domaine auquel appartient le système
- leur goût du défi dans la modélisation d'un système jugé complexe à décrire.

Les systèmes modélisés se classent suivant plusieurs catégories illustrées par les exemples suivants :



4.6 Exemples

Management/Finance

- Management d'un supermarché
- Management d'un stade de football

Modélisation d'entreprises

- Station de ski
- Restaurant
- Usine

Organisation / psychologie

- Management d'une école d'ingénieurs
- Management d'une ville de 15 000 habitants
- Management d'une équipe de rugby

Divers

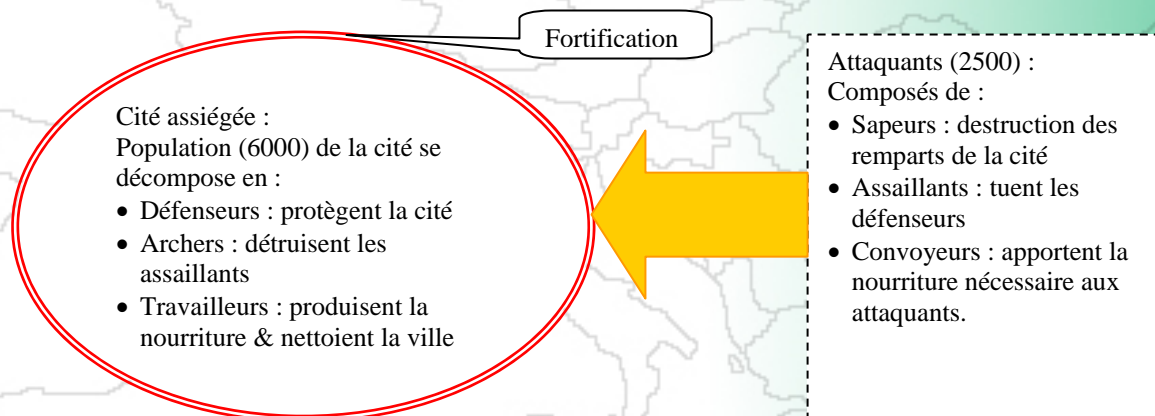
- Evolution de deux fourmilières ennemies évoluant sur un même territoire
- Evolution d'une espèce rare de papillon
- Le bonheur dans le couple
- Modélisation d'une cité médiévale assiégée

5 – UN EXEMPLE DETAILLE

Pour illustrer de manière concrète notre démarche pédagogique, nous avons choisi de vous présenter le modèle proposé par deux élèves ingénieurs, Benjamin Seigneur et Aline Chemineau, intitulé : **Modélisation d'une cité médiévale assiégée**

5.1 Description du modèle :

Le système modélisé peut se schématiser de la manière suivante :



- Conditions de victoire :

1. Les remparts de la cité cèdent : les attaquants gagnent.
2. La population de défenseurs passe sous un seuil critique (4000 :-1/3 de la population initiale) : elle se rend. Les attaquants gagnent.
3. Le siège de la ville coûte la vie à trop d'attaquants (1825 morts : les $\frac{3}{4}$ des attaquants) : le siège est abandonné : les défenseurs gagnent.

- Leviers d'action :

Chez les défenseurs :

- Répartition de la population entre défenseurs, archers et travailleurs

Chez les attaquants :

- Répartition de la population entre assaillants, sapeurs et convoyeurs.

- Enjeux du modèle proposé :

Tester différentes politiques de défense et d'attaque. En effet, si le nombre de travailleurs et de convoyeur est trop réduit, les approvisionnements en nourriture seront insuffisants, ce qui peut entraîner un nombre de morts élevé et à terme une défaite.

- Valeurs initiales du modèle :

Population de défenseurs : 6000 ; population d'attaquants : 2500 ;

Niveau de solidité des remparts : 10 (valeur arbitraire)

La simulation a été effectuée avec le logiciel STELLA[®] sur une période de 60 jours.

5.2 Résultats obtenus après simulation :

Cas 1. Aucune force de défense dans la cité face à des assaillants et des sapeurs.

Cas	Défense		Attaque		Résultat après simulation	
Cas 1	% Archers	0	% Sapeur	5	POP défense	5500
	% Défenseurs	0	% Assaillants	70	NB jours	35
	% Travailleurs	100	% Convoyeurs	25	Remparts	0
	Nourriture initiale (kg)	180000	Nourriture initiale (kg)	35000	Attaquants	2300

Les remparts de la cité cèdent au bout de 35 jours.

Cas 2. La cité oppose des archers et des défenseurs face à des attaquants sans sapeurs.

Cas	Défense		Attaque		Résultat	
Cas 2	% Archers	20	% Sapeur	0	POP def	5800
	% Défenseurs	70	% Assaillants	70	NB jours	11
	% Travailleurs	10	% Convoyeurs	30	Remparts	10
	Nourriture initiale (kg)	180000	Nourriture initiale (kg)	35000	Attaquants	580

Les assaillants sont exterminés, ils lèvent le siège au bout de 11 jours.

Cas 3. Aucune force de défense face à des attaquants qui n'ont que des convoyeurs.

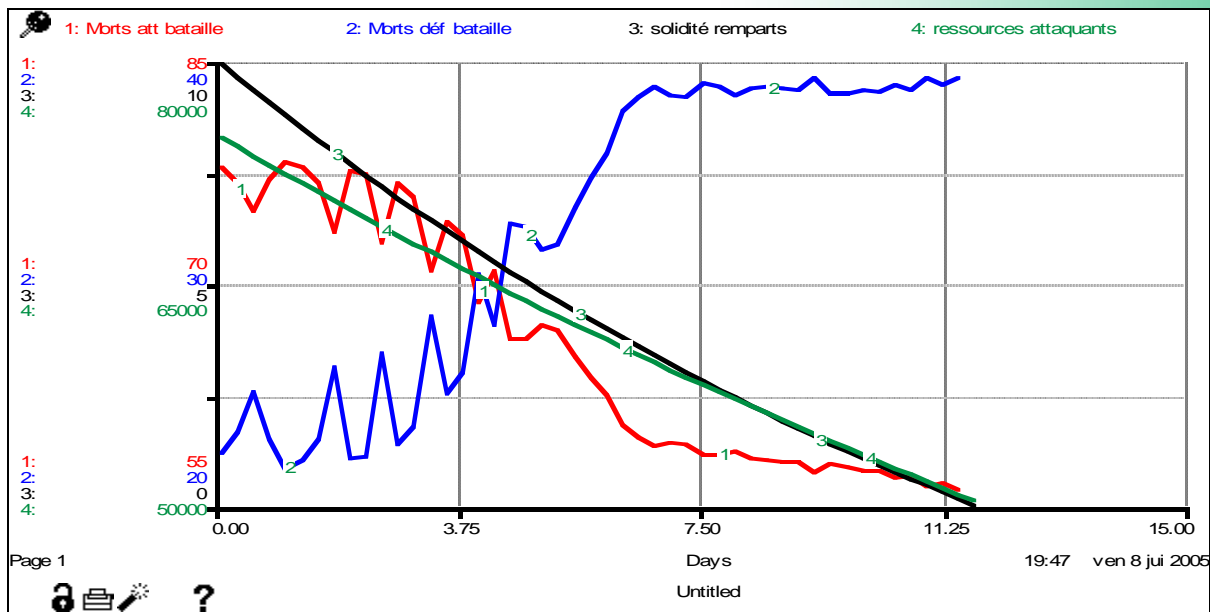
Cas	Défense		Attaque		Résultat	
Cas 3	% Archers	0	% Sapeur	0	POP def	5800
	% Défenseurs	0	% Assaillants	0	NB jours	60
	% Travailleurs	100	% Convoyeurs	100	Remparts	10
	Nourriture initiale (kg)	180000	Nourriture initiale (kg)	35000	Attaquants	2300

Le siège dure plus de 60 jours, aucun des deux camps n'est diminué...les quelques centaines de morts dans les deux camps correspondent à des morts naturelles prévues dans le modèle.

Grâce à la réalisation de ces trois simulations, dont les résultats étaient attendus, les étudiants ont pu vérifier la cohérence de leur modèle.

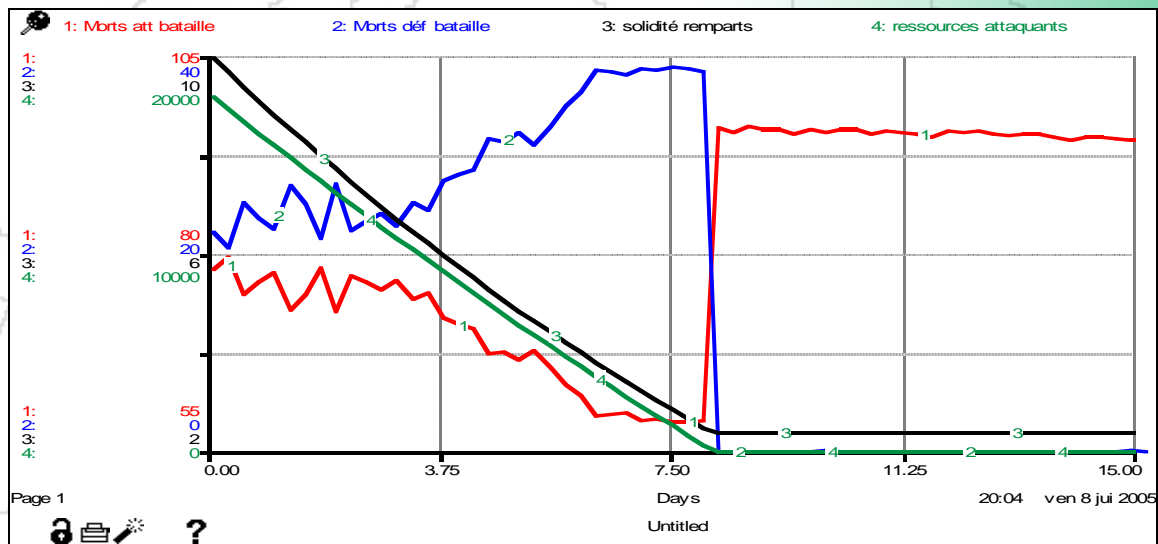
5.3 Autre cas: Problème d'allocation de ressources (attaquants/convoyeurs)

Dans un premier temps, avec un stock initial de ressources élevé, les attaquants gagnent le siège de la ville car la présence en nombre suffisant de sapeurs (15%), parvient à faire céder les remparts de la cité, et ce malgré des forces de défense conséquentes qui leur infligent de lourdes pertes.

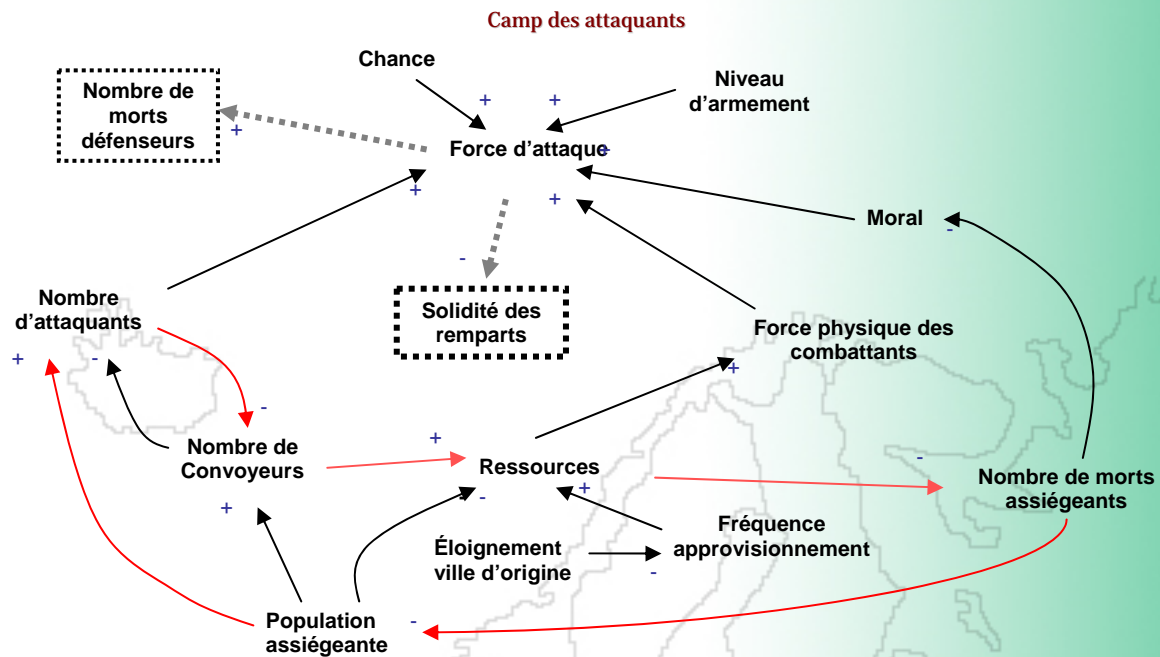


On constate, à partir de 4 jours de combats, que le nombre de morts côté attaquants diminue alors que celui des défenseurs augmente. Les ressources en nourriture des attaquants (en vert sur le graphique), bien qu'en baisse, restent non nulles, ce qui leur permet de mener le combat.

Si dans un second temps, nous limitons le stock initial de nourriture des attaquants, au bout de quelques jours, ce stock n'est plus suffisant pour nourrir les troupes attaquantes, ce qui entraîne un nombre de morts élevé. Les attaquants ont opté pour une proportion importante de sapeurs au détriment des convoyeurs, qui ne peuvent alimenter le stock de nourriture de manière suffisante.



On constate que le stock de ressources des attaquants devient nul au bout de 8 jours, en conséquence la population d'attaquants meurt de faim... elle lève le siège. Ce résultat était prévisible grâce au diagramme causal du modèle qui mettait en évidence des boucles de rétroaction « dangereuses » en rouge sur le diagramme causal.



Les étudiants ont pu mettre en évidence le fait que les ressources de nourriture sont au cœur des boucles de rétroaction du modèle de la cité assiégée. Mal gérées, elles peuvent conduire à la défaite.

6 - CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Proposé dans l'option Génie Industriel depuis 5 années, le module de dynamique des systèmes complexes entre à présent dans sa phase de maturité. Il apparaît comme un complément essentiel aux cours plus analytiques proposés dans le cursus de formation de nos élèves ingénieurs. Pour la majorité d'entre eux, la complexité comportementale d'un système, réside dans les phénomènes aléatoires qui s'y produisent. La DSC, leur montre que cette complexité peut résider dans la structure même du système. D'après les évaluations réalisées en fin de module, les étudiants la plébiscitent en insistant sur la vision systémique nécessaire pour analyser des problématiques industrielles de plus en plus complexes.

Néanmoins, la dynamique des systèmes peine encore à s'imposer pleinement comme faisant partie intégrante des sciences de l'ingénieur, certains étudiants la considèrent trop souvent comme faisant partie des sciences humaines et à ce titre ne lui accordent pas toute la rigueur intellectuelle qu'elle mérite. Cela conduit, au travers de leurs applications, à des systèmes mal définis, mal modélisés où les résultats de la simulation sont mal ou peu analysés. Ceci oblige les enseignants à faire preuve d'une pédagogie originale mais aussi clairement structurée.

Bien établie à l'ECP, l'enseignement de la DSC, se développe depuis quelques années dans les universités françaises, notamment dans le DESS Systèmes d'Information et de Communication (DESS SIC) proposé par l'Université Paris I où plus d'une cinquantaine d'étudiants sont formés chaque année. D'autres établissements se montrent intéressés (ENTPE Lyon,...) par ce type de formation. N'en doutons pas, les évolutions de l'environnement socio-économique mondial pousseront les établissements d'enseignement supérieur à proposer à leurs étudiants des formations leur permettant d'appréhender au mieux les complexités nouvelles qui se présentent. La dynamique des systèmes complexes sera alors bien positionnée.