



SSC TME 1

Systèmes proie-prédateur : modélisation
et co-évolution

6 mars 2006

Par:
ALEXANDRE BARGETON
BENJAMIN DEVÈZE

TABLE DES MATIÈRES

1	Présentation du travail demandé	1
1.1	La question scientifique	1
1.2	Les raisons du choix d'un modèle à base d'agents	2
1.3	Les échelles spatiales et temporelles du modèle	2
1.4	Les objets du modèle et leurs descripteurs	3
1.5	Les mécanismes en oeuvre dans la dynamique du modèle	3
1.6	Les points de vue mésoscopiques et macroscopiques étudiés	4
1.7	L'implémentation informatique du modèle	4
1.8	Le plan d'expérience et les scénarios étudiés	6
1.8.1	Expériences sans utilisation des génotypes	6
1.8.2	Expériences avec utilisation des génotypes et évolution	8
1.9	L'apport du modèle à la question scientifique	14
1.10	Autres modélisations du même phénomène	14
	Bibliographie	14

PRÉSENTATION DU TRAVAIL DEMANDÉ

Sommaire

1.1	La question scientifique	1
1.2	Les raisons du choix d'un modèle à base d'agents	2
1.3	Les échelles spatiales et temporelles du modèle	2
1.4	Les objets du modèle et leurs descripteurs	3
1.5	Les mécanismes en oeuvre dans la dynamique du modèle	3
1.6	Les points de vue mésoscopiques et macroscopiques étudiés	4
1.7	L'implémentation informatique du modèle	4
1.8	Le plan d'expérience et les scénarios étudiés	6
1.8.1	Expériences sans utilisation des génotypes	6
1.8.2	Expériences avec utilisation des génotypes et évolution	8
1.9	L'apport du modèle à la question scientifique	14
1.10	Autres modélisations du même phénomène	14

1.1 La question scientifique

Nous allons présenter ici le contexte général de cette étude, décrire la problématique et présenter les objectifs du modèle et des simulations qu'il convenait d'effectuer. Ceci nous amènera à préciser la question scientifique ainsi que l'objectif de recherche à l'origine de ce travail.

La théorie de l'évolution de Darwin établit que tous les individus d'une population sont différents les uns des autres. Certains d'entre eux sont mieux adaptés à leur environnement que les autres et ont, de ce fait, de meilleures chances de survivre et de se reproduire. Ces caractéristiques avantageuses sont héritées par les générations suivantes et, avec le temps, deviennent dominantes dans la population. L'évolution des espèces résulte de ce processus progressif et continu de sélection naturelle. Pour comprendre ce phénomène naturel dans un contexte de ressources limitées, il convient de prendre en compte de nombreuses interactions qu'elles soient interspécifiques (compétition, prédation, parasitisme, mutualisme, commensualisme) ou intraspécifiques (compétition, mutualisme, altruisme).

L'idée générale de la théorie de l'évolution de Darwin a été reprise dans les algorithmes d'évolution artificielle. Ces méthodes sont confrontées à un certain nombre de difficultés notamment relatives à l'évaluation d'un individu.

Les systèmes écologiques naturels font intervenir plusieurs entités en conflit ou en coopération pour une ressource. Si les algorithmes évolutionnistes classiques exploitent les principes de sélection des individus performants et les mécanismes de mutation et de croisement pour la génération de nouveaux individus, ils ne prennent pas en compte les interactions individuelles des agents soumis à l'évolution. Certaines dynamiques apparemment très importantes apparaissent dans la nature du fait de ces interactions. La première question à se poser est celle de l'influence des interactions directes avec d'autres individus, identiques ou non, dans le cadre d'un écosystème simple soumis à évolution. L'objectif était donc de réaliser une simulation simple d'un système proies/prédateurs afin d'étudier les conditions dans lesquelles peuvent apparaître certaines de ces dynamiques naturelles (cycles, oublis, courses aux armements) et de comprendre l'influence de différents paramètres sur ces dynamiques. Il s'agit à terme de comprendre comment ces dynamiques peuvent apparaître ou non afin de les utiliser à bon escient dans le cadre des algorithmes évolutionnistes. En somme *existe-t-il d'autres dynamiques liées à l'interaction entre les individus qui pourraient améliorer les algorithmes évolutionnistes ?*

1.2 Les raisons du choix d'un modèle à base d'agents

En partant des données biologiques il est possible de faire une modélisation des systèmes proies/prédateurs par le biais d'équations différentielles simples, comme cela fut proposé par Lotka (1925) et Volterra (1926). Ces modèles permettent de rendre compte d'un certain nombre de phénomènes dont notamment : points fixes, extinction après augmentation et cycles.

Toutefois ces modèles mathématiques présentent des limitations comme cela est notamment mis en exergue dans [WR99]. D'une manière générale ces modèles sont impuissants pour rendre compte à la fois des actions au niveau microscopique et macroscopique et se placent au niveau de la population. Avec cette approche, il est difficile de modéliser l'action, de rendre compte du réalisme des paramètres. Il est enfin difficile d'y faire intervenir l'évolution des individus.

Ces constations nous amènent naturellement vers des modèles individu-centré i.e. des modèles à base d'agents. Dans ce cadre, en effet, chaque agent du système est modélisé indépendamment et est doté d'un système de contrôle propre. Le nombre d'individus ainsi que les autres phénomènes de niveau macroscopique sont des processus qui émergent des interactions de niveau microscopique. L'utilisation d'un modèle à base de système multiagent permet notamment de prendre en compte les mécanismes d'évolution. Ces arguments expliquent l'utilisation d'un modèle à base d'agents qui permet de bien aborder la problématique que nous avons posée plus haut.

1.3 Les échelles spatiales et temporelles du modèle

En ce qui concerne l'échelle spatiale, il s'agit d'une arène de taille limitée et fixée contenant un certain nombre d'individus de type proies et un certain nombre d'individus de type prédateurs. Dès lors il est nécessaire de jouer sur la taille des populations initiales pour intervenir sur la densité de population.

Relativement à l'échelle temporelle, il s'agit d'un enchainement de générations de durée variable. En d'autres termes, les populations de proies et de prédateurs évoluent au cours du temps, des individus de chaque espèce étant potentiellement créés et détruits à chaque pas de temps élémentaire, la simulation pouvant éventuellement se prolonger à volonté.

1.4 Les objets du modèle et leurs descripteurs

Les objets du modèle sont les proies (assimilées à des moutons) et les prédateurs (assimilées à des loups).

Descripteurs des proies

Capteurs : vision
 Propriété des effecteurs : vitesse de déplacement, force de défense
 Génotype : chaîne binaire
 Etat : position spatiale, état énergétique

Descripteurs des prédateurs

Capteurs : vision
 Propriétés des effecteurs : vitesse de déplacement, force d'attaque
 Génotype : chaîne binaire
 Etat : position spatiale, état énergétique

Bien que pouvant être assimilée à l'environnement, il nous faut ajouter l'herbe qui interviendra dans de nombreux scénarios. Celle-ci possède un temps de repousse fixé.

1.5 Les mécanismes en oeuvre dans la dynamique du modèle

Les proies et les prédateurs se déplacent dans leur environnement en fonction de leur vitesse. A chaque pas de temps les prédateurs perdent une partie de leur énergie. Ils reprennent de l'énergie en mangeant des proies. Si l'énergie d'un prédateur atteint 0 il meurt.

Lorsque l'herbe est désactivée, les proies ne perdent pas d'énergie, au contraire lorsque l'herbe est activée les proies doivent s'en nourrir pour survivre.

A chaque pas de temps, un individu peut manger, se reproduire, se déplacer.

Les principaux mécanismes intervenant dans la dynamique du modèle sont les suivants :

- *capture de la proie par le prédateur* : lorsqu'un prédateur se trouve sur la même case qu'une proie, l'individu le plus fort l'emporte, si la force de la proie est supérieure à celle du prédateur la proie s'échappe dans le cas contraire la proie meurt et le prédateur remporte une certaine quantité d'énergie.
- *consommation de l'herbe* : lorsque l'herbe est activée, les proies peuvent consommer de l'herbe (si il y'en a là où elles se trouvent) pour reprendre de l'énergie, l'herbe disparaît et repousse ultérieurement.
- *repousse de l'herbe*, lorsque ce paramètre est pris en compte
- *reproduction décentralisée* : deux individus de la même espèce se trouvant au même endroit peuvent se reproduire et engendrer un nouvel individu, cette reproduction fait intervenir les mécanismes de croisement et mutation
- *reproduction centralisée* : on favorise la reproduction des meilleurs individus de chaque espèce (la fitness correspond au temps de survie), peu importe leur position spatiale, cette reproduction fait intervenir les mécanismes de croisement et mutation
- *déplacement des proies* : lorsque dépourvues de vision elles se déplacent aléatoirement, sinon elles cherchent à fuir les prédateurs qui sont dans leur champs de vision

- *déplacement des prédateurs* : lorsque dépourvues de vision ils se déplacent aléatoirement, sinon ils cherchent à rejoindre les proies qui sont dans leur champs de vision

1.6 Les points de vue mésoscopiques et macroscopiques étudiés

Nous étudierons au niveau macroscopique le nombre d'individus de chaque espèce, le nombre de '1' dans les génotypes de chaque espèce ainsi que la variété globale des génomes, tous ces éléments étant la conséquence des interactions individuelles des agents au niveau microscopiques.

1.7 L'implémentation informatique du modèle

Le modèle a été implémenté en Netlogo. La figure 1.1 présente une capture d'écran de l'interface permettant de réaliser toutes les simulations décrites ci-après.

Rappelons que le but de l'implémentation informatique est d'écrire un programme informatique qui prend le modèle conceptuel en entrée et peut l'exécuter dans un environnement de simulation.

Les éléments du modèle décrits précédemment ont donc été implémentés très simplement grâce à Netlogo en exploitant les propriétés des *turtles* et des *patches*. A chaque pas de temps les agents se déplacent, se nourrissent, meurent et se reproduisent comme nous l'avons décrit précédemment. Notons qu'à chaque pas de temps nous faisons d'abord évoluer en parallèle toutes les proies puis tous les prédateurs.

Le déplacement des proies pourvues de vision se fait comme suit. Chaque proie perçoit l'ensemble des prédateurs dans un rayon proportionnel à son champs de vision et se déplace selon le vecteur opposé à la somme des composantes des vecteurs décrits par la position des prédateurs. Les prédateurs se déplacent sur ou le plus près possible des proies qui se trouvent dans leur champs de vision.

Le vainqueur d'un affrontement proie contre prédateur est l'agent qui a la force la plus élevée.

Les primitives de liste permettent très simplement de gérer les génotypes (représentés comme des listes de 1 et de 0) et notamment d'effectuer les croisements et les mutations. La figure 1.2 présente la représentation interne de génotype que nous avons adopté.

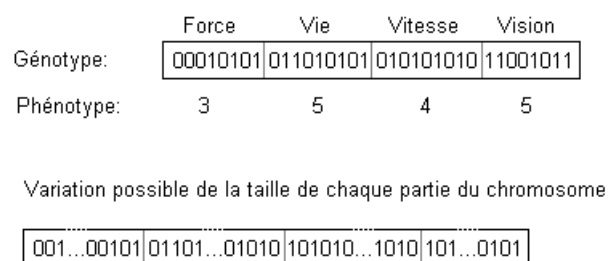


FIG. 1.2: Représentation du génotype

On constate que la valeur pour chaque champs est donnée par le nombre de 1 qui figure dans le champs correspondant. La taille de chaque champs est variable et peut-être différent selon l'espèce. Les croisements se déroulent comme représentés sur la figure 1.3. Les mutations consistent en l'inversion d'un bit aléatoire du génotype. Il est possible

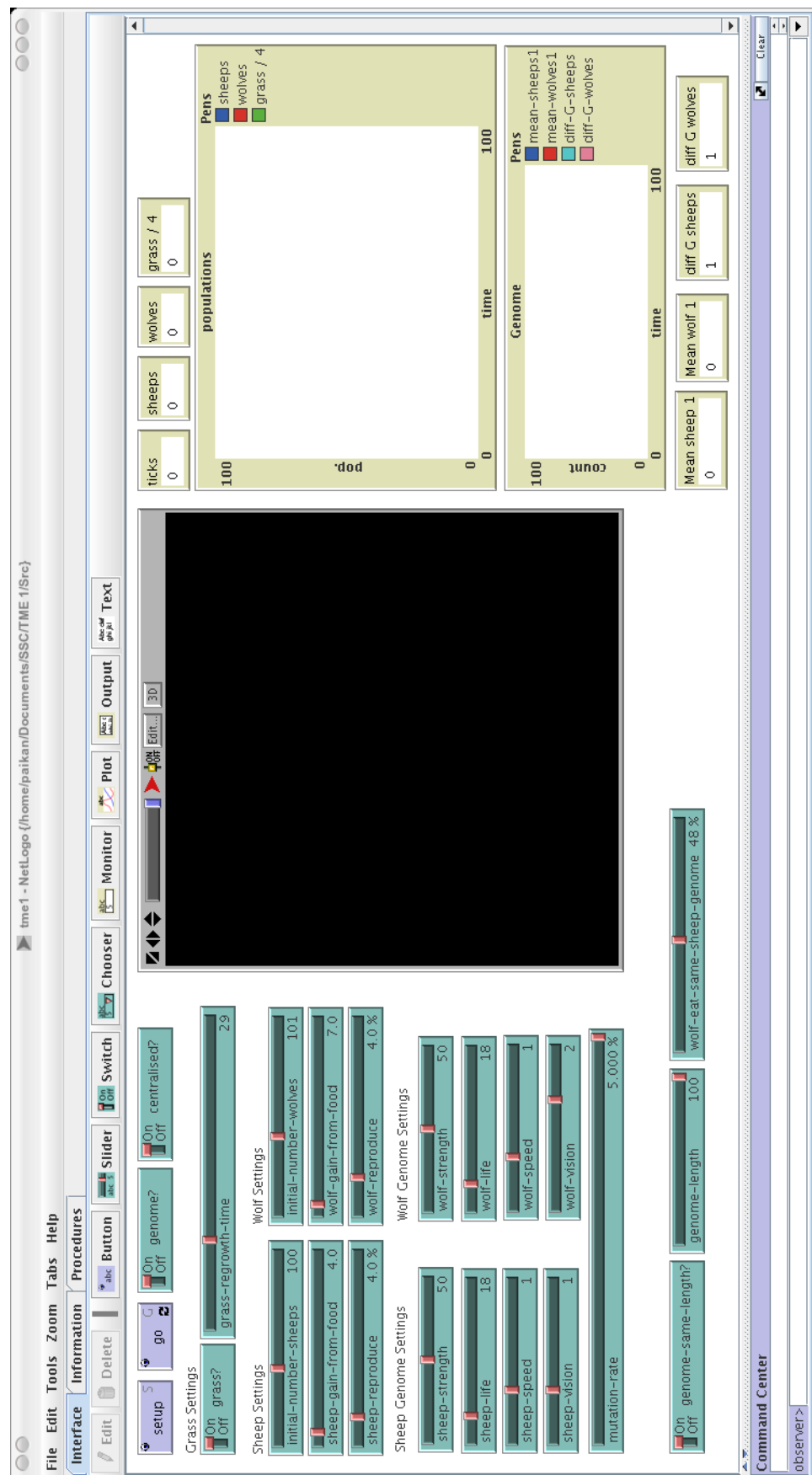


FIG. 1.1: Interface

de lancer la simulation sans tenir compte des génotypes, dans ce cas les valeurs correspondant à la taille de chaque champs du génotype sont assignées directement à tous les individus de l'espèce.

Cross over :

00010101	01	1010101	010101010	11001011
00101010	10	1100110	101010101	00101010
00010101	01	1100110	101010101	00101010

FIG. 1.3: Exemple de croisement de génotypes

Citons brièvement les paramètres principaux sur lesquels nous pouvons jouer dans le cadre de cette implémentation informatique :

- complexité du génotype puisque la taille de chaque champs est variable
- règles d'interaction entre la proie et le prédateur par le biais de la vision notamment
- durée de vie des proies et des prédateurs
- taille initiale des populations
- taux de mutation
- influence de l'herbe que consomme les proies pour survivre
- reproduction centralisée et décentralisée

L'ensemble étant en soi relativement explicite il ne semble pas nécessaire de développer outre mesure.

D'un point de vue vérification interne, il semble que l'implémentation informatique soit exempte de bugs.

1.8 Le plan d'expérience et les scénarios étudiés

Nous relatons ici quelques une des expériences que nous avons menées et qui nous ont semblé pertinentes relativement à la question scientifique posée.

1.8.1 Expériences sans utilisation des génotypes

Les premières expériences que nous avons menées ont consisté à vérifier si notre modèle reproduisait les dynamiques classiques des interactions proies/prédateurs et ce en absence d'utilisation des génotypes.

En absence d'herbe et en prenant des paramètres similaires au modèle proie/prédateur fourni avec Netlogo on obtient des oscillations déphasées entre le nombre de proies et de prédateurs. Deux cas de figure se présentent alors soit la population de proie disparaît et les prédateurs ne pouvant se nourrir meurent (figure 1.4), soit au contraire il arrive un moment où la population de proie devient très faible ce qui entraîne la mort de tous les prédateurs et finalement les proies se reproduisent exponentiellement (figure 1.5). Dans les deux cas l'écosystème est très instable.

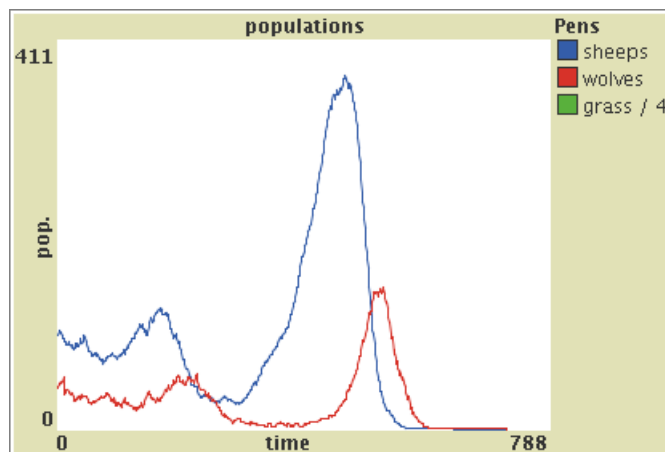


FIG. 1.4: Exemple d'évolution de populations avec extinction des deux espèces

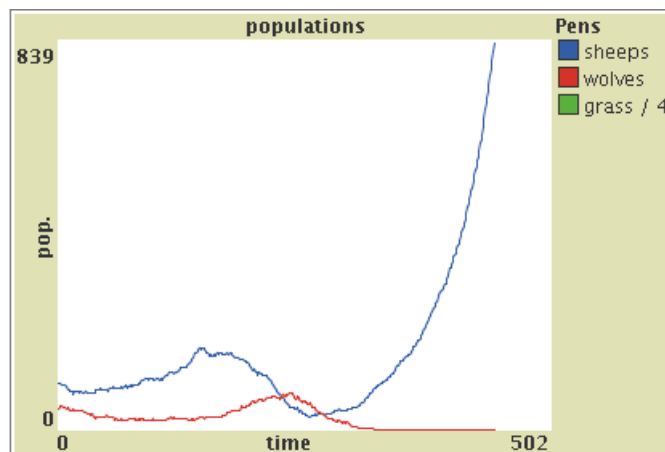


FIG. 1.5: Exemple d'évolution de populations avec prolifération exponentielle des proies suite à l'extinction des prédateurs

Si l'on ajoute à l'expérience précédente de l'herbe qui peut être consommée par les proies et qui repoussent selon un rythme fixé on observe que le système se stabilise et qu'il se forme naturellement un cycle comme en témoigne la figure 1.6. Le système est stable. On constate comme on pouvait s'y attendre que la quantité d'herbe évolue comme l'inverse de la population des proies et que les populations des proies et des prédateurs se régulent par déphasages successifs. Paradoxalement en limitant les ressources de la population de proies, on augmente les chances de survie de l'espèce. Ce phénomène est connu sous le nom de paradoxe de l'enrichissement (Rosenzweig 1971)

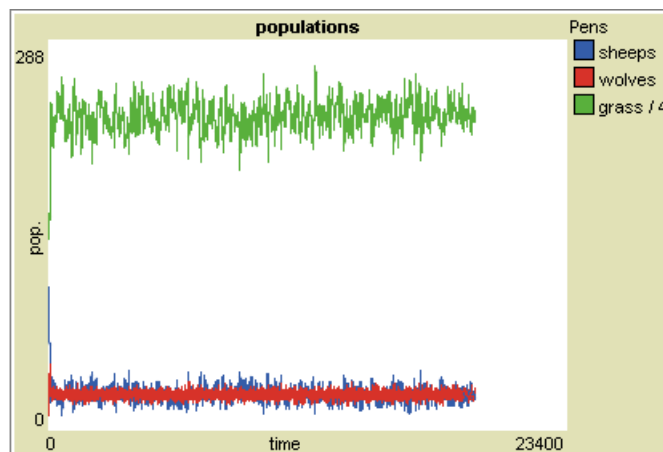


FIG. 1.6: Exemple de cycle avec prise en compte de l'herbe

Nous avons vu succinctement que notre modèle nous permettait de retrouver des dynamiques classiques des écosystèmes naturels, il est dès lors temps d'aborder les expériences qui ont été menées dans le contexte de la co-évolution des espèces.

1.8.2 Expériences avec utilisation des génotypes et évolution

Rappelons que les génotypes des individus encodent la vision, la force, l'espérance de vie initiale et la vitesse. Plus il y a de '1' dans un champs plus l'individu est performant. La première question que l'on peut se poser est la suivante : dans le cadre d'une reproduction décentralisée avec initialisation aléatoire des génotypes allons nous observer en faisant jouer la compétition entre population de proies et population de prédateurs une augmentation du nombre moyen de '1' des génotypes à l'échelle de chaque espèce ?

Comme en témoigne la figure 1.7, cela s'avère être le cas.

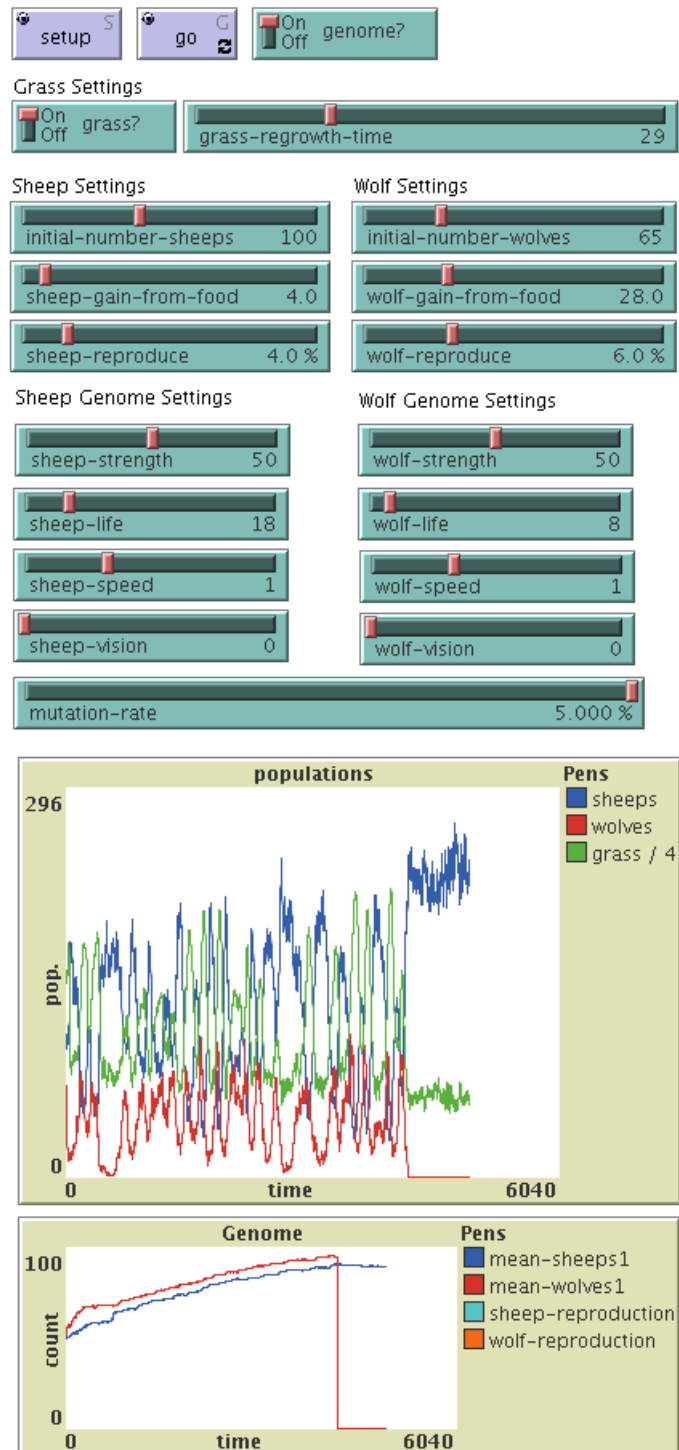


FIG. 1.7: 1ère expérience

Il est intéressant de constater que le nombre moyen de '1' augmente relativement vite et jusqu'à un pourcentage extrêmement élevé. Dans cette expérience, les prédateurs se sont montrés constamment plus performants en terme de génotype que les proies. Cela n'a toutefois pas empêché les prédateurs de disparaître avant les proies. Notons également que dès l'extinction des prédateurs les proies qui n'ont plus à s'adapter aux

performances croissantes des prédateurs n'évoluent plus. Il est également intéressant de constater qu'en début d'expérience les prédateurs étaient nettement plus performant que les proies ce qui a failli conduire à leur extinction prématurée. Du fait de leur performance, ils ont en effet considérablement diminué le nombre de proies ce qui a entraîné une diminution très importante de la population des prédateurs.

On peut se demander si l'on obtient des résultats similaires en utilisant une reproduction centralisée. La figure 1.8 montre que la encore le nombre moyen de '1' augmente relativement vite. Notons que dans cette expérience les courbes de performance des proies et des prédateurs sont très proches et s'entrecroisent, une espèce bat l'autre puis se fait rattraper et dépasser et ainsi de suite. Avec les paramètres utilisés on remarque que le système est assez stable excepté sur la zone centrale où il y a eu une brusque prise de pouvoir des prédateurs sur les proies mais la situation s'est par la suite redressée.

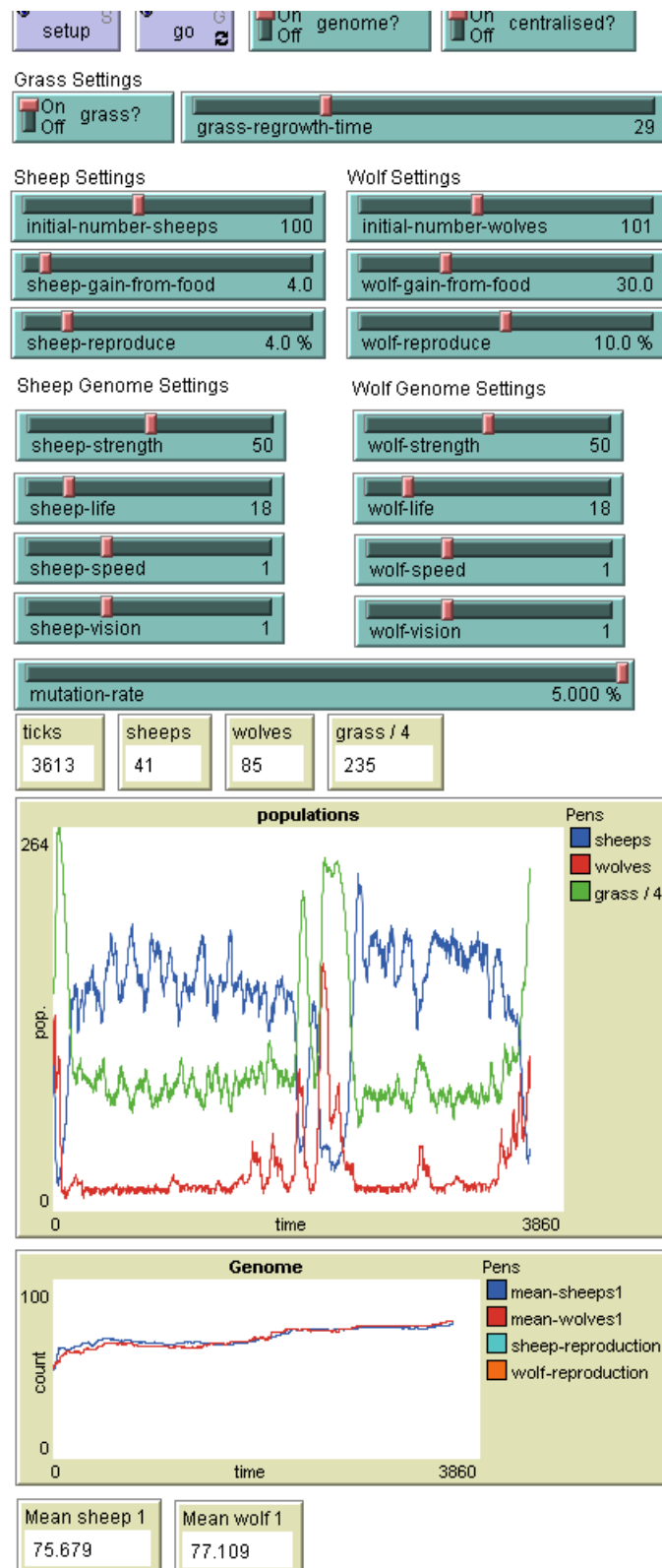


FIG. 1.8: 2ème expérience

Ces deux expériences nous permettent de mettre en évidence le phénomène de course aux armements à laquelle se livre les proies et les prédateurs. Chaque espèce tend à évo-

luer positivement et progresse peu à peu pour survivre afin de s'adapter aux évolutions réciproques de l'espèce antagoniste. Il semble donc relativement simple, quelque soit les paramètres utilisés, de faire apparaître le phénomène de course aux armements.

Dans le cadre de génotype que nous venons de décrire il est clair qu'il existe des individus parfaits (génotype rempli de '1') et que bien que simple à analyser ce contexte ne nous permet pas de faire apparaître certains phénomènes. Dans la nature, en effet, l'évolution se fait par des compromis successifs, il n'existe pas d'individus parfaits mais simplement des individus bien adaptés, à un moment donné, à leur environnement et à leurs éventuels proies ou prédateurs. De ce fait nous avons décidé d'expérimenter le scénario suivant : le génotype est une chaîne binaire de taille variable et un prédateur ne bat une proie que si son génome est semblable à celui de la proie sur un pourcentage donné. Quels sont les résultats obtenus avec cette approche ?

Ils sont présentés à la figure 1.9. Evidemment comme on pouvait s'y attendre le nombre moyen de '1' de chaque espèce reste relativement constant durant la simulation. On remarque que l'on a un système stable. Un nombre de génome différent très faible pour les prédateurs, sur des populations de taille relativement constantes, traduit la sur-adaptation des prédateurs à leurs proies. Dès lors une variété croissante des génomes de nouvelles proies conduisent à une situation de précarité pour les prédateurs qui sont battus et disparaissent. Les nouvelles proies prennent à nouveau le dessus et sont remplacées à leur tour. La connaissance de la première génération de prédateurs a été perdue, nous sommes dans le cas classique du processus d'oubli avec cycle comme en témoigne d'ailleurs les oscillations croisées sur les courbes des génotypes.

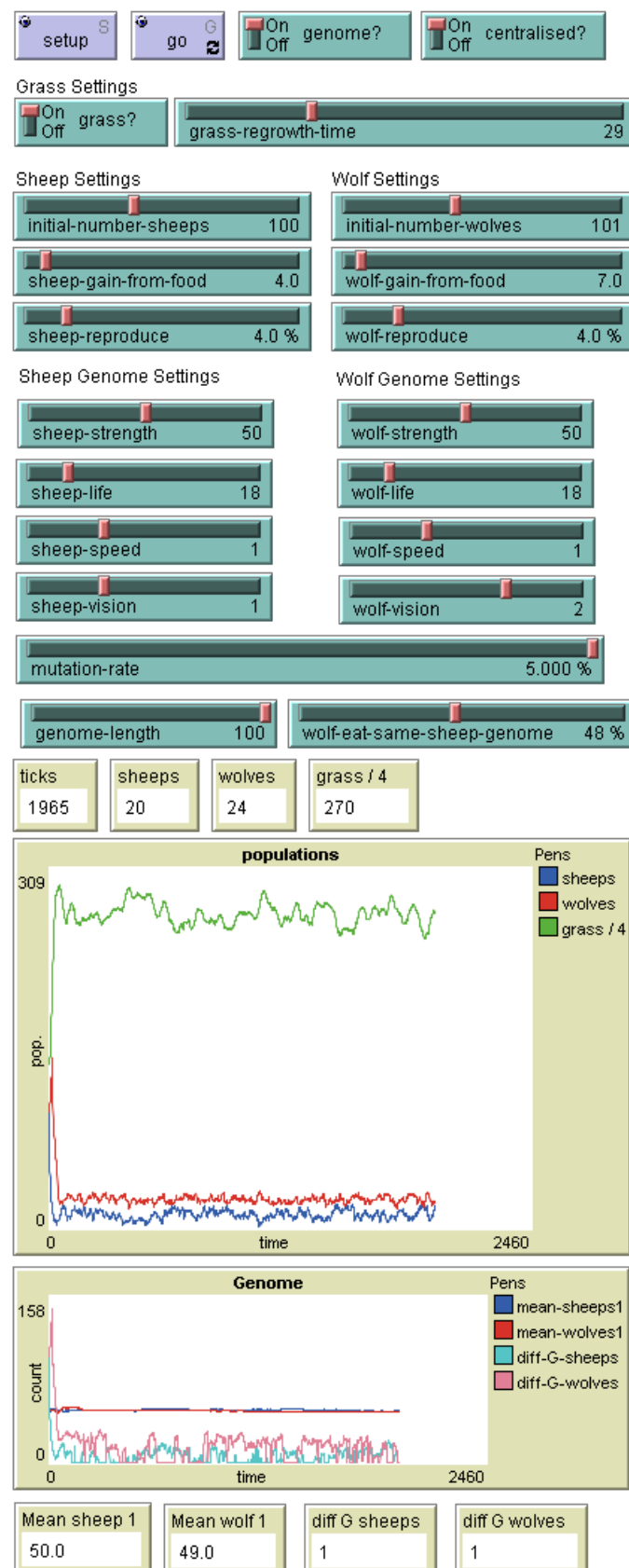


FIG. 1.9: 3ème expérience

1.9 L'apport du modèle à la question scientifique

La modélisation et les simulations effectuées nous ont permis de confirmer nos attentes. Nous sommes parvenus à faire apparaître les dynamiques suivantes : course aux armements, cycles et oublis comme nous nous y attendions en construisant les scénarios décrits dans la question précédente. Le modèle nous a donc permis d'observer l'effet Red Queen, la course aux armements et les processus de cycle et oublis. Il nous permet également de comprendre la pertinence d'une approche multiagent qui nous a permis de faire émerger ces dynamiques alors que d'autres modélisations ne pourraient sans doute pas en rendre compte.

Nous avons pu observer que dans la co-évolution les performances des individus sont évidemment couplées et la réussite d'une espèce signifie l'échec de l'autre. La co-évolution présente un certain nombre d'avantages elle permet notamment la course aux armements, offre une incrémentalité et un système d'évaluation qui s'adapte aux dynamiques environnementales. Cependant dans ce contexte, l'évaluation des individus est difficile, il est difficile de suivre la progression des performances des espèces et il y a des risques de cycles que l'on aimerait pouvoir éviter. La co-évolution reste cependant un mécanisme prometteur pour gagner en flexibilité et il convient d'en exploiter les avantages en limitant ses défauts.

1.10 Autres modélisations du même phénomène

Comme en témoigne les transparents du cours [Don06], d'autres modélisations ont été proposées, nous en dressons ici un très bref récapitulatif.

Nous ne revenons pas sur les modèles équationnels que nous avons évoqués précédemment.

Des expériences similaires consistant à faire évoluer simultanément un prédateur et sa proie ont été menées par Cliff et Miller en 1995 (virtuelle) ainsi que par Nolfi et Floreano en 1999 (sur des robots). Ils sont parvenus à exhiber les dynamiques de cycle, d'oubli et de courses aux armements.

Des expériences récentes (2004) de Buason et al., davantage orienté vers le couplage entre contrôleur, capteurs et effecteurs, ont permis de conclure que la proie tendait vers une vision peu performante et une grande vitesse tandis que le prédateur tendait vers une vision étroite mais de longue portée.

Les expériences de Sims (1994) ont permis d'étudier l'évolution en terme de morphologie par le biais de compétition entre robots et ont permis de dégager des dynamiques similaires à celles précédemment décrites.

Un certain nombre de techniques ont été proposées afin d'améliorer l'évaluation des individus. Citons la méthode du *Hall of fame* (Rosin et Belew 1997) qui consiste à conserver les individus des meilleurs générations précédentes et à évaluer les individus courants face à plusieurs de ces meilleurs individus passés. DeJong en 1994, a proposé une approche inspiré de l'optimisation multi-objectifs exploitant les travaux de Pareto.

Cliff et Miller (1995) ainsi que Stanley et Miikkulainen (2002) ont proposé une méthode pour améliorer le suivi des performances dont nous avons mentionné précédemment qu'il est délicat en pratique.

Enfin Stanley et Miikkulainen, partant du constat que dans la nature la possibilité d'augmenter progressivement la complexité du génome aurait facilité l'évolution, ont proposé de faciliter la co-évolution en lui permettant de générer des réseaux de complexité croissante. La complexification pourrait donc être l'une des sources d'une évolution efficace.

BIBLIOGRAPHIE

- [Don06] Stéphane Doncieux. Modèles proies-prédateurs et co-évolution, 2006.
- [WR99] U. Wilensky and K. Reisman. Connected science : Learning biology through constructing and testing computational theories – an embodied modeling approach. *International Journal of Complex Systems*, pages 1 – 12, 1999.