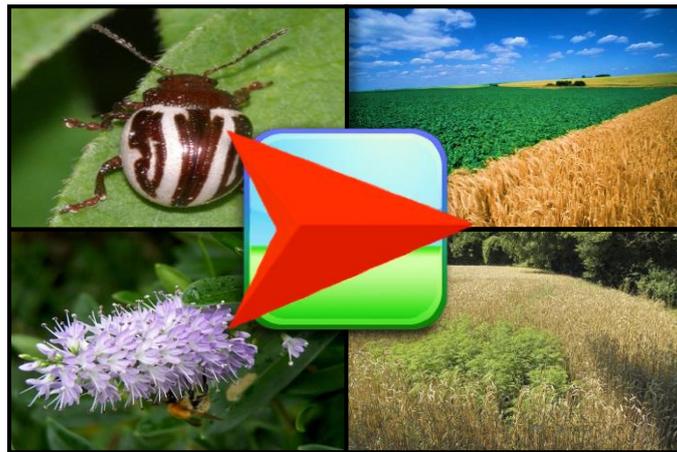


SUJET

ÉTUDE SUR LES ESPECES VEGETALES INVASIVES ET
LUTTES BIOLOGIQUES.

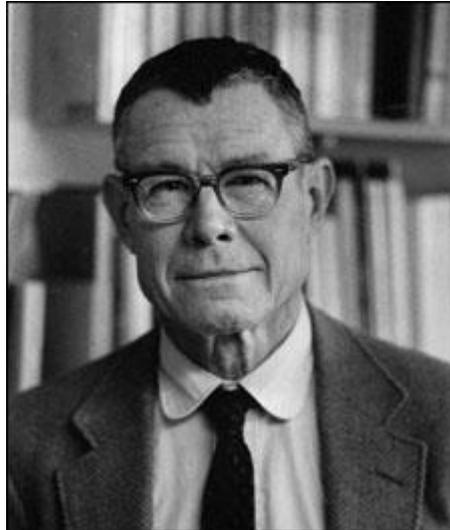
MODELISATION DU PROBLEME BIOLOGIQUE SUR UNE
PARCELLE AGRICOLE AVEC LE LOGICIEL « NETLOGO ».



Le domaine de l'agriculture est fortement surveillé car fragilisé depuis la mondialisation. En effet les transactions inter-continent sont de plus en plus nombreuses et favorisent donc l'expansion d'une plante exotique envahissante au sein d'une parcelle de culture. Une variété envahissante s'introduisant et se développant sur un champ a des conséquences néfastes sur le rendement. Afin de lutter contre ces invasions, et ainsi éviter cette perte d'argent, ou même la modification d'un écosystème, la communauté scientifique travaille sur l'utilisation d'agents biologiques. Généralement, un parasite ravageur est amené à se nourrir des deux variétés de plante mais possède une très forte affinité pour l'espèce invasive. La lutte biologique devient donc la pièce maîtresse du territoire, et en fonction de son taux de reproduction, des possibilités de déplacement et de la quantité de nourriture disponible, on pourra observer plusieurs cas. Afin de visualiser les différents scénarios possibles, de trouver la lutte adaptée à la situation, la modélisation par des outils de bio-informatiques est indispensable. Ce manuscrit traitera donc des différents agents impliqués ainsi que de leurs interactions, et proposera une modélisation via le logiciel « Netlogo ».

Abstract

The area of agriculture is carefully watched because weakened by globalization. Indeed, trades between countries of different continents are increasing; consequently it helps invasive species to take control of fields. An invasive variety being introduced and growing in fields may have harmful consequences for production rates. In order to protect the fields against invasions and to avoid this loss of money or even worse, ecosystem modifications, scientists are working on biological control. Commonly, a harmful parasite uses the two species of plants but has a preference for the invasive variety. Biological control becomes the main agent on fields, depending on its growth rate, its ability to move, and the amount of food supplies we will observe different results. In order to see these cases, the scientific community must use bioinformatics tools. This report will present the involved agents and their interactions, and will propose an establishment of a model with the « Netlogo » software.



Grateful to Thomas Schelling, creator of the first agent-based model.

SOMMAIRE

I- Les espèces invasives.....	1
I.1- Espèce invasive végétale :.....	1
I.2- Voies d'introduction et d'invasion :.....	2
I.3- Impact de l'invasion biologique :.....	2
II- Que faire face à une invasion ?.....	3
II.1- Étude de l'espèce :.....	3
II.2- Evaluation des risques et des impacts d'une invasion :.....	3
II.3- Techniques de gestion :.....	3
III- Invasion par l'Ambroisie.....	4
IV- Modélisation.....	5
IV.1- Introduction :.....	5
IV.2- Explications sur la modélisation réalisée :.....	5
IV.3- Résultats de quelques simulations :.....	8
IV.3.1- Les représentations « témoins » :.....	8
IV.3.2- Les représentations « essais » :.....	9
V- Discussion.....	13
5.1- Conclusions sur la thématique :.....	13
5.2- Améliorations possibles :.....	13
5.3- Conclusions personnelles sur le projet pluridisciplinaire :.....	14
VI- Bibliographie & Webographie.....	15
6.1- Bibliographie :.....	15
6.2- Webographie :.....	15
Annexes.....	17

I- Les espèces invasives

L'Homme a depuis toujours favorisé le déplacement d'espèces au-delà de ce que le naturel le permet. Ayant amélioré ses techniques de transport, le phénomène s'accroît à partir du 16ème siècle (Webber, 1997). D'après Reichard et White ; « **L'essor des colonies européennes de même que le développement des jardins botaniques, de l'horticulture, de l'élevage et de la sylviculture ont également largement contribué à ces mouvements d'espèces** ». L'introduction d'espèces non indigènes dans certains écosystèmes a entraîné la notion d' « espèces invasives ». Ces dernières engendrent un effet néfaste sur l'écosystème. L'augmentation des aires de distribution (favorisé par la mondialisation) ne cesse d'accroître les cas d'invasions. Ce problème est considéré comme « majeur » depuis les années 80 et devient la discipline écologique qui s'est le plus rapidement développée (Pyšek et al. , 2004). D'après la « *Liste rouge* » de l'UICN, les espèces envahissantes sont la deuxième cause d'extinctions d'espèces. On estime qu'elles continuent de menacer 30 % des oiseaux, 15 % des plantes, 11 % des amphibiens et 8 % des mammifères inscrits dans les catégories d'espèces menacées.

Dans ce projet, nous nous focaliserons sur les espèces invasives végétales. Nous étudierons leurs voies d'introduction, leurs mécanismes d'invasions, leur impact sur les écosystèmes concernés. Puis, nous regarderons les solutions pour faire face à ce phénomène, c'est à dire l'étude de l'espèce en question, l'évaluation des risques et des impacts de l'invasion ainsi que les différentes techniques de gestion. Dans une troisième partie, nous étudierons un exemple de l'invasion par *Ambrosia artemisiifolia*. Enfin, dans la dernière partie, nous expliquerons la partie pratique du projet, autrement dit la modélisation à partir d'un environnement de programmation, utilisé pour la simulation de phénomènes collectifs naturels ; « *Netlogo* » dont on se sera servi pour modéliser une invasion et une lutte biologique.

I.1- Espèce invasive végétale :

Une espèce invasive est une espèce exotique envahissante, introduite de façon volontaire ou involontaire, par l'homme et qui menace l'écosystème du territoire qu'elle a envahi. Or une espèce ne peut jamais être invasive en soi, c'est une population d'une espèce, dans un lieu donné et à un moment donné, qui est invasive. Cela dépend donc des interactions entre espèces et l'écosystème d'accueil (Colautti et MacIsaac, 2004).

De ce fait, les plantes endémiques et les espèces exotiques luttent pour les meilleurs emplacements et aires de répartition. Ce sont les variétés exotiques qui l'emportent, le plus souvent en raison de certaines caractéristiques telles que leur capacité de reproduction élevée, leur faculté d'adaptation, leur résistance aux maladies, leur croissance rapide ... Les conséquences de leurs introductions sont multiples : compétition des ressources, transmission de virus ou de parasites, ou autres. Elles sont donc susceptibles d'amener les

espèces indigènes au bord de l'extinction. De plus, certaines d'entre elles sont toxiques pour les animaux et pour l'homme. Or, comme dit précédemment, une espèce n'est pas envahissante partout. Cela dépend des interactions espèce-milieu et de l'écosystème d'accueil. Dans le cas, de variétés qui deviennent invasives, les dégâts liés à leur extension, sont considérés de nos jours, avec la pollution, la dégradation, la fragmentation, la disparition des écosystèmes ainsi que la surexploitation de certaines espèces (chasse, pêche..) comme une des grandes causes de régression de la biodiversité dans le monde.

I.2- Voies d'introduction et d'invasion :

Les voies d'introduction sont différentes d'une espèce à l'autre. Les études nécessitent donc l'analyse des voies d'invasion en milieu terrestre et aquatique pour chaque espèce (exemple : Projet ALARM). Les vecteurs d'introduction d'une espèce sont nombreux. Un vecteur peut être un moyen de transport tel qu'un avion ou un bateau, une activité comme l'agriculture ou encore un produit, par exemple des matériaux de construction. On sait que les activités humaines ont un rôle évident dans ce phénomène à travers le monde. Ces voies d'introduction sont le plus souvent volontaires, comme par exemple l'horticulture et la foresterie mais certaines sont accidentelles comme via la terre, le sable transportés ou encore dans des semences contaminées. Dans le but de constituer des populations stables, et donc des espèces naturalisées et acclimatées qui sont capables de se reproduire, les organismes introduits doivent pour se faire franchir d'importantes barrières biologiques, climatique et physiques.

I.3- Impact de l'invasion biologique :

Les espèces invasives adoptent une stratégie de compétition. Leur croissance et leur multiplication sont généralement rapides. Le mode de dissémination et/ou de régénération peut être très différent d'une espèce à l'autre. On observe dans les premiers temps une phase de latence pendant laquelle la population est restreinte puis elle suit une phase de croissance exponentielle. Ces espèces sont connues en général pour leur capacité à s'adapter rapidement aux variations de l'environnement. L'invasion est d'autre part, favorisée par l'absence de prédateur ou de pathogène spécifique de l'espèce dans leur nouvel habitat. Quoi qu'il en soit, une population invasive, entraîne souvent des conséquences négatives aux niveaux écologiques, économiques et sanitaires sur les écosystèmes, les habitats ou les espèces indigènes. Au niveau économique, du fait des conséquences négatives de leur prolifération ou des coûts pour la maîtrise de leur propagation et la sensibilisation des citoyens, des espèces occasionnent chaque année des coûts économiques importants. On peut citer comme exemple la jacinthe d'eau en Espagne qui engendre des dépenses de 3,4 millions d'euros/an. Au niveau sanitaire, les populations invasives peuvent être porteuses de pathogènes ou parasites non présents dans l'écosystème avant leurs introductions et les espèces autochtones n'y sont pas adaptées. Les espèces introduites peuvent également capter des parasites et pathogènes «indigènes», et que cela favorise leur diffusion.

II- Que faire face à une invasion ?

Une invasion est caractérisée par l'accroissement durable de l'aire de répartition d'un taxon c'est-à-dire d'entités vivantes possédants un caractère commun. Une invasion est soit naturelle soit due à un phénomène anthropique (Williamson, 1960).

II.1- Étude de l'espèce :

La gestion des plantes exotiques envahissantes commence par l'étude de leurs caractéristiques propres, autrement dit de la quantité de semences produites, la capacité d'implantation ou de germination, la vitesse de croissance... Il faut aussi évaluer les caractéristiques du milieu colonisé comme sa sensibilité ou la présence d'espèces menacées et protégées et prendre en compte les usages développés au sein du milieu ainsi que des gestions pratiquées et le but de ces gestions. Il est indispensable d'étudier le risque que pourrait représenter chaque espèce exotique avant leur déplacement afin d'identifier d'éventuels problèmes. Établir des plans d'actions et codes de conduite ainsi qu'effectuer une adaptation de la législation existante et une stratégie de sensibilisation afin de permettre une meilleure compréhension des problèmes liés aux espèces envahissantes, et de faire accepter aux citoyens les mesures prises, comme par exemple les programmes d'éradication.

II.2- Evaluation des risques et des impacts d'une invasion :

Les études portent sur le potentiel de dispersion, la colonisation d'habitats naturels, les impacts écologiques défavorables pour les espèces indigènes (compétition, transmission de maladies, effets sur la génétique comme l'hybridation) ainsi que pour les écosystèmes (effets sur le cycle des nutriments, altérations physiques, effets sur les successions naturelles et sur les réseaux trophiques).

II.3- Techniques de gestion :

Les invasions biologiques ont été scindées en quatre grandes phases, chacune est reliée à des choix de gestion différents (Hulme, 2006). L'introduction est liée à la prévention, l'établissement avec la détection précoce et l'éradication, la propagation corrélée avec le contrôle et le confinement et enfin l'équilibre et les impacts ressentis sont liés à la restauration écologique et l'atténuation des impacts.

Lorsqu'on est face à une invasion biologique, plusieurs luttes sont possibles ; lutte mécanique, chimique, génétique, biologique, ou autres. La particularité de la lutte biologique n'est pas seulement son efficacité, elle est (lorsque correctement appliquée) respectueuse de l'environnement. Il faut préalablement définir l'importance des zones à traiter et les moyens

disponibles. Le milieu naturel a été perturbé par l'invasion, il faut donc aussi établir une stratégie de restauration de l'environnement afin de ne pas l'altérer d'avantage avec la stratégie employé. La lutte biologique consiste à « utiliser » une espèce vivante, généralement, un prédateur naturel, dans le but de réduire l'effectif d'une population exotique envahissante. L'organisme vivant est un « auxiliaire » de l'Homme.

Par exemple, les carabes sont des insectes, prédateurs de limaces, pucerons et autres insectes ravageurs de cultures, utilisés pour cela comme auxiliaires de lutte biologique en milieu agricole. De nombreuses espèces peuvent être « utilisées » en tant qu'arme biologique, celle sélectionnée sera relâchée dans le milieu « contaminé ». Généralement, ce sont les relations antagonistes entre espèces consommatrices (proie-prédateur ou hôte-parasites) qui sont exploitées.

III- Invasion par l'Ambroisie

Diverses plantes de la famille des *Astéracées* sont regroupées dans le genre *Ambrosia*. Parmi elles, l'« Ambroisie à feuilles d'Armoise » (*Ambrosia artemisiifolia*) est la plus connue. Elle est originaire d'Amérique du Nord et a été introduite involontairement dans les zones tempérées de l'Europe et dans d'autres parties du monde. Dans les régions les plus touchées, l'Amérique du Nord et l'Europe, l'ambroisie est responsable d'allergies au pollen. La propagation de cette plante constitue un problème croissant pour la santé humaine.

L'ambroisie a une préférence pour les grands espaces ouverts et ensoleillés, on la retrouve donc souvent dans de grandes cultures. Ainsi, le milieu agricole est le premier touché par son invasion, elle est en effet capable d'engendrer des baisses de rendement allant de 20% à 70% dans les cultures.

Au fil du temps, les agriculteurs ont su trouvé plusieurs solutions efficaces et complémentaires les unes avec les autres afin de lutter contre cette plante (lutte mécanique : arrachage, fauche, ou lutte chimique : herbicides). Cette plante annuelle à floraison estivale produit un grand nombre de semences possédant une forte faculté germinative, elle a donc un important potentiel de propagation. Les graines peuvent être entraînées par l'eau ou être transportées dans la terre présente dans la semelle des chaussures d'agriculteurs, les pneus des camions et tracteurs, ou tous autres engins utilisés pour travailler le sol. Les machines agricole contribuent à l'invasion en favorisant la dissémination lors des récoltes des cultures contenant de l'ambroisie. Un essai de lutte biologique a été tenté en Russie, en Ukraine et en ex-Yougoslavie (1969 à 1990). En effet, plusieurs insectes ont été introduits. L'insecte le plus prometteur (*Zygogramma saturalis*) n'a pas permis de faire régresser le phénomène. Actuellement, il n'existe en Europe aucun moyen de lutte biologique efficace contre l'ambroisie. Ce manque de solution, nous mène à la modélisation de l'introduction d'une espèce capable de limiter ou même d'éradiquer cette plante ou toute autres plantes néfastes au rendement d'un champ agricole.

IV- Modélisation

IV.1- Introduction :

Le procédé de modélisation informatique a pour but de représenter de manière expérimentale *in silico* la complexité de phénomènes du monde réel qui prend de plus en plus d'importance. Modéliser les relations de cause à effet permet de tester des scénarios hypothétiques d'évolution et concrétiser des points de vue provenant d'un panel de disciplines différentes (mathématique, biologique, écologique...). Il s'agit donc ici, de relier la biologie avec d'autres disciplines ou de relier entre eux plusieurs domaines de la biologie (biologie moléculaire et biologie cellulaire) et cela à l'aide de l'outil informatique. L'informatique est donc un outil de médiation, et nous l'espérons, de solutions.

La modélisation informatique que nous avons réalisée via « *Netlogo* 5.1.0 », permet d'étudier le comportement de trois agents sur un territoire agricole. Le logiciel « *Netlogo* » est un langage de programmation appartenant à la grande famille des Logo. Il a été développé par Uri Wilensky et son équipe Modeling de la Northwestern University à Evanston (Etats-Unis). Le modèle représente l'invasion d'un territoire agricole par une plante exotique. Les « *plants* », les « *invasives* », les « *counters* » représentent respectivement, la variété cultivée, la plante invasive, et la lutte biologique. Il a été dans un premier temps difficile de faire un choix entre les patches et les turtles pour représenter les différents agents. Suites à des recherches et du temps de travail sur le logiciel nous avons constaté qu'il été plus judicieux en termes de programmation et d'aspect biologique d'utiliser les turtles. En effet, nous avons préféré séparer le territoire et les agents. Ainsi, les patches représentent le sol et les turtles sont utilisés pour représenter les différentes espèces présentes dans le modèle.

IV.2- Explications sur la modélisation réalisée :

Nous avons dans un premier temps écrit différentes fonctions permettant de générer des agents auxquels sont attribuées une variable d'énergie et une variable d'âge aux « *plants* » (fonction *add-plants*). Une fois les variables attribuées, il a fallu les configurer de sorte qu'elles évoluent au cours du temps, ainsi l'âge augmente, et l'énergie diminue (fonction *life-plants*).

Deuxièmement, après ces différentes étapes, nous nous sommes intéressé au sol, nous avons comme pour les agents, une fonction permettant de le générer (fonction *add-grass*). Cette fonction commence avec l'attribution à la variable « *number-patches-with-grass* » la quantité de patches fertiles. L'utilisateur a la possibilité de changer le pourcentage de la parcelle qui est cultivable (slider *amount-of-grassland*). Initialement, la fonction attribut « *False* » à tous les patches, impliquant une quantité d'énergie et une régénération nulle pour l'ensemble des patches. Mais ensuite, l'ensemble des patches contenus dans « *number-patches-with-grass* », subissent un changement et se voient attribués un « *True* », impliquant une quantité d'énergie et une régénération homogène sur l'ensemble des patches. Ce niveau d'énergie correspond à l'énergie maximale d'un patch divisé par deux. Le

sol se régénère au cours du temps (fonction *grow-grass*). La régénération de l'énergie dans le sol est sous le contrôle du booléen précédent et la variable « *cdown* ». Les différents degrés d'énergie sont illustrés par une échelle de couleur (fonction *color-grass*) allant du clair (faible niveau d'énergie) au marron foncé (forte énergie). Ensuite, nous avons programmé l'utilisation de l'énergie du sol par la plante (fonction *grass-used-by-plants*), la reproduction (fonction *reproduction-breed*), la mort (fonction *death-breed*). La reproduction était une partie qui a nécessité beaucoup de réflexion, nous avons exploré plusieurs voies. Les deux principales étaient, la dissémination de graines autour de la plante et donc la germination de la variété sur le patch vide si elle possède la quantité de graines la plus élevée ou alors c'est l'effectif d'une variété autour du patch vide qui déterminera la nouvelle pousse. Notre choix s'est arrêté sur ce dernier. Premièrement, un chiffre au hasard entre 0 et 1 est implanté dans la variable « *probability-growth* ». Un dénombrement autour du patch vide des différentes variétés de plantes est alors effectué puis divisé par huit autrement dit par le nombre de patches présents autour du patch vide. Le résultat (pourcentage) est introduit dans une variable spécifique à chaque variété (exemple : « *p1* »). Le résultat attribué aux plantes indigènes est le premier à être traité, si le random « *probability-growth* » est inférieur au pourcentage, que l'énergie utilisée par la plante est inférieur à l'énergie du patch et qu'un random 100 est supérieur à 20, une pousse de la variété des indigènes prendra place sur le patch vide. Si l'une des conditions précédentes n'est pas respectée, la fonction se poursuit. La logique pour déterminer si il y aura pousse d'une invasive, cependant le random 100 doit être supérieur à 10. Comme précédemment, une plante invasive pousse uniquement s'il a respecté les trois différentes conditions. Enfin, si aucune de ces instructions n'a abouti à une nouvelle pousse, la fonction est relancée au prochain « tick », soit le lendemain. Cela signifie que la « *probability-growth* » était supérieur à l'ensemble des dénombrements. La quantité d'énergie puisée par la plante est déterminée par l'utilisateur avec les sliders correspondant. Si cette quantité est supérieure à celle présente dans le sol, la plante augmente son niveau d'énergie, et le sol perd la quantité puisée. Autre cas possible, si la quantité d'énergie dans le sol est inférieure à celle utilisée par la plante, la plante récupère l'énergie et l'énergie dans le sol devient nulle. La mort d'une espèce survient lorsque son énergie est nulle ou que son âge est atteint son âge maximal. La mort de la plante a pour conséquence que le patch sur lequel elle était située devient vide.

Troisièmement, lorsque le fonctionnement des « *plants* » a été programmé, nous avons pu ajouter les invasives sur la même logique de programmation, avec comme seule différence l'effet néfaste qu'elle fait subir à la plante indigène (fonction *invasives-eat-plants* et *invasives-weak-plants*). La première fonction néfaste réalise un dénombrement des plantes invasives autour de chaque « *plants* » et le divise par huit. Si le résultat de cette opération est supérieur à la variable « *kill-with-mates* », la « *plant* » meurt. La variable « *kill-with-mates* » a pour valeur 0.37, cela veut dire qu'il faut au minimum 3 plantes invasives pour tuer une « *plants* ». La seconde fonction néfaste puise l'énergie d'une « *plants* », déterminée par la variable « *energy-drawn-byinvasives* ». La valeur initiale pour cette variable est de 10. En fonction de l'effectif d'invasives se situant autour d'elle, la plante se verra être victime d'un drainage plus ou moins important.

Quatrièmement, les deux variétés végétales étant établies et maîtrisées, il a fallu commencer à réfléchir sur la lutte biologique à utiliser. Après quelques recherches sur le fonctionnement d'une lutte biologique, nous l'avons modélisé avec la logique décrite dans

les lignes qui suivent. Une fonction « *add-counters* » permet de générer une certaine quantité d'agent biologique, dispersée aléatoirement sur le territoire. Tout comme les autres agents, la lutte biologique dispose d'une fonction « *life-counters* », lui retirant de l'énergie, et augmentant son âge à chaque jour de simulation. La fonction de reproduction des « *counters* » (fonction *reproduction-counters*) est sous le contrôle de deux variables : un âge de maturité sexuelle (« *reproduce-age-required* », et une énergie minimum (« *reproduce-age-required* »). Si ces deux conditions sont respectées, et qu'une part d'aléatoire le permet, une certaine quantité de descendants verra le jour (variable « *num-kids* »). Les « *counters* » dans un premier temps choisirons d'attaquer ou non (fonction *attack?*). Une variable « *agress_lv1* », permettra de déterminer le niveau d'agressivité des « *counters* ». Plus cette variable est haute, plus les agents vont se déplacer vers les différentes variétés. Le déplacement vers telle ou telle variété est déterminé par la variable « *preference-for-invasives* ». Une fois la variété ciblée, ils se déplacent toujours vers l'individu le plus proche. Ensuite, le résultat apportant la mort ou non de l'individu (fonctions *counters-eat-invasives* et *counters-eat-plants*) dépend de l'efficacité que possède la lutte pour tuer l'individu ciblé (variables *efficiency-to-kill-invasives* et *efficiency-to-kill-plants*).

Il est important de souligner que nous avons laissé la possibilité à l'utilisateur de modifier plusieurs variables : l'agressivité de la lutte biologique, sa préférence pour une variété, et enfin son efficacité pour tuer sa cible. Il est donc possible au cours de la modélisation de voir l'importance du choix de la lutte en modifiant en temps réel ces paramètres. Par exemple, il est possible de retourner la lutte biologique contre les plantes de l'agriculteur, de diriger la lutte contre les invasives en faisant en sorte qu'elle soit peu efficace afin que l'invasion devienne trop importante, etc... Une multitude de scénarios est possible et nous les caractériserons plus tard dans ce manuscrit.

IV.3- Résultats de quelques simulations :

IV.3.1- Les représentations « témoins » :

Les témoins de culture :

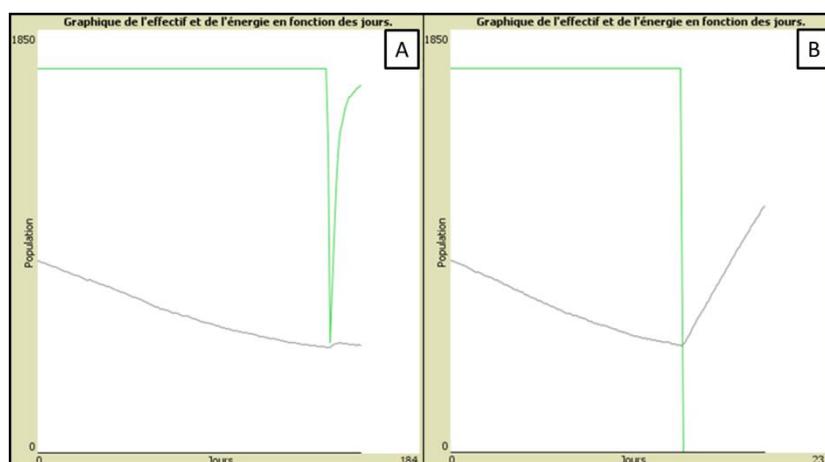


FIG. 1 : EFFECTIF PLANTS (■), QUANTITE D'ÉNERGIE DANS LE SOL (■). « A » REPRESENTE LA CROISSANCE SANS INVASION DE LA CULTURE JUSQU'A LA FIN D'UNE SAISON. « B » REPRESENTE LA CROISSANCE SANS INVASION DE LA CULTURE JUSQU'A LA FIN D'UNE SAISON ET EN L'ABSENCE DE LA FONCTION DE REPRODUCTION.

Ces représentations sont des représentations témoins. Elles permettent de vérifier le comportement stable de la culture en absence d'invasive. La courbe verte représente l'effectif des plantes indigènes sur le champ agricole, elles ont un développement stable jusqu'à la fin de la saison, moment où aura lieu la récolte. Cet effectif se voit fortement diminué dans le « A », mais la fonction de reproduction étant très rapide, les nouvelles pousses apparaissent déjà lors de la récolte. La représentation « B » démontre que sans la fonction de reproduction l'effectif atteint la valeur nulle. La courbe grise correspondant à l'énergie contenue dans le sol, elle évolue en fonction des plantes sur la parcelle, ici on voit qu'elle diminue avec le temps car est utilisée. Après la récolte le sol regagne en énergie.

Les témoins d'invasion :

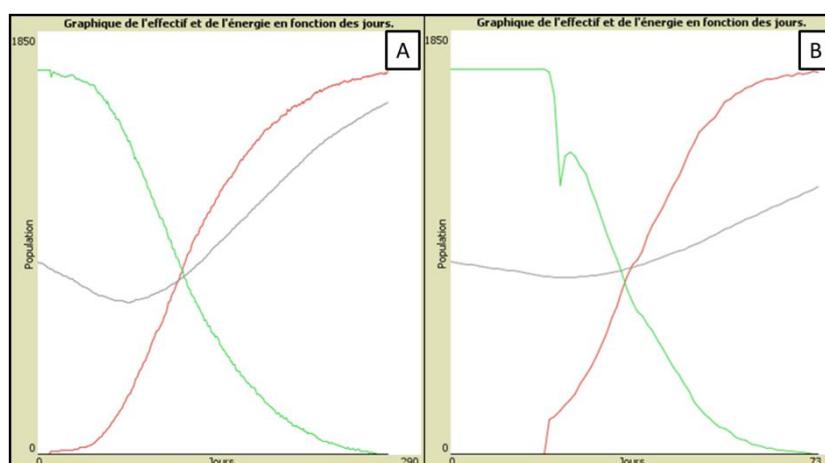


FIG. 2 : EFFECTIF INVASIVES (■), EFFECTIF PLANTS (■), QUANTITE D'ÉNERGIE DANS LE SOL (■). « A » REPRESENTE L'INVASION DE LA PARCELLE AVEC SEULEMENT 15 INVASIVES AU BOUT D'UNE SEMAINE DE CULTURE. « B » REPRESENTE L'INVASION DE LA PARCELLE AVEC 150 INVASIVES AU BOUT D'UNE SEMAINE DE CULTURE.

Ces représentations sont des représentations témoins. Elles permettent de vérifier le comportement instable de la culture en présence d'invasives conduisant à la diminution de l'effectif chez la variété indigène. Dans ce cas, c'est à dire avec l'apparition des plantes invasives, on remarque sans difficultés que ces dernières ont avec les plantes indigènes une évolution inversement proportionnelle. Plus l'effectif des plantes invasives augmente, plus celui des indigènes diminue. D'autre part, l'énergie du sol étant mise quasiment uniquement à contribution des plantes indigènes, elle augmente. Les invasives consomment très peu cette ressource. La quantité de plante invasive présente au début a directement un impact sur le temps nécessaire pour observer un effectif nul chez la variété cultivée. Il faut plus qu'une saison pour 15 invasives (moins de 1% d'occupation du territoire) alors qu'avec 10 fois plus d'invasives il faut seulement attendre 2 mois pour la contamination complète des 1681 patches.

IV.3.2- Les représentations « essais » :

Les représentations dites « essais » permettent d'observer dans un premier temps le comportement instable de la culture en présence d'invasives. Celui-ci conduisant à la diminution de l'effectif chez la variété indigène. Puis en second temps de voir l'évolution des deux variétés selon les paramètres utilisés lorsque la lutte biologique est ajoutée. Les simulations qui suivent se focalisent essentiellement sur la variable « *Efficiency to Kill Invasives* » (EKI).

Les scénarios aboutissant à un échec :

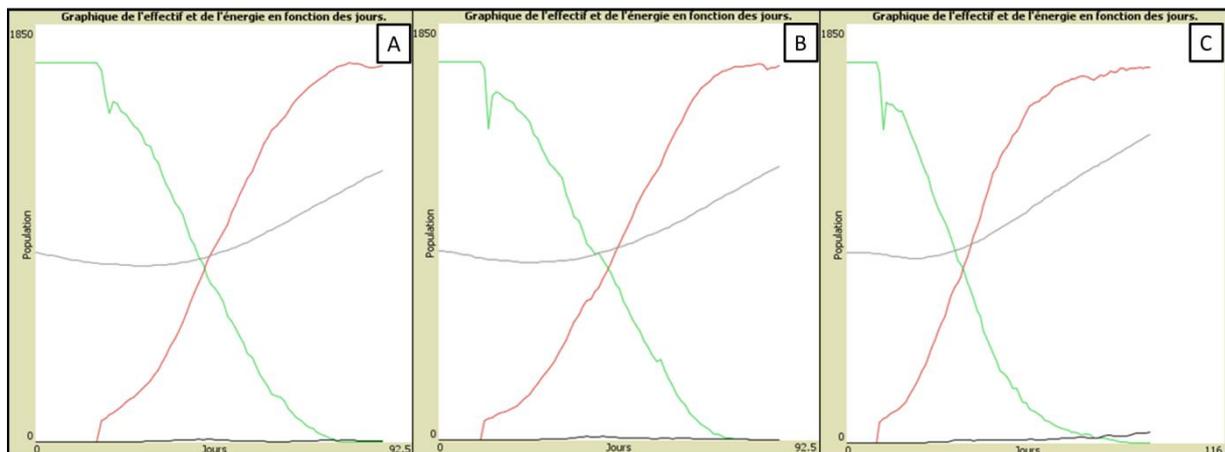


FIG. 3 : EFFECTIF INVASIVES (■), EFFECTIF PLANTS (■), EFFECTIF COUNTERS (■), QUANTITE D'ÉNERGIE DANS LE SOL (■). REPRESENTATIONS GRAPHIQUES D'UNE INVASION PAR 85 INVASIVES AU BOUT D'UNE SEMAINE DE CULTURE. UN EFFECTIF COMPOSE DE 5 COUNTERS EST ENVOYE APRES 7 JOURS D'INVASION. LES SIMULATIONS DIFFERES SUR L'EFFICACITE POUR TUER LES INVASIVES (EFFICENTY TO KILL INVASIVES). « A » : EKI = 10, « B » : EKI = 20, « C » EKI = 30. LES AUTRES PARAMETRES SONT : AGRESS_LVL = 100, PREFERENCE-FOR-INVASIVES = 80, EKP = 40.

Tout comme les simulations témoins d'invasion, la simulation se termine avec un effectif nul pour la variété cultivée. La quantité de lutte biologique ajoutée sur le territoire ne permet pas d'arrêter, ou même de freiner l'invasion, elle n'arrive pas à tuer efficacement les invasives, cela est dû à sa faible capacité de reproduction. On peut voir que la population de « *counters* » commence à augmenter légèrement en fin de scénario lorsque leur efficacité est de 30%. Ces simulations démontrent que bien que la lutte biologique soit très agressive, fortement spécifique des invasives, si cette dernière est peu efficace face à sa cible, l'agriculteur est contraint à une invasion totale de son champ.

Les scénarios aboutissant à une réussite (élimination totale de la variété invasive) :

Ces simulations aboutissent toutes à une réussite, mais il reste tout de même intéressant d'observer des comportements différents même lorsque le résultat escompté est obtenue.

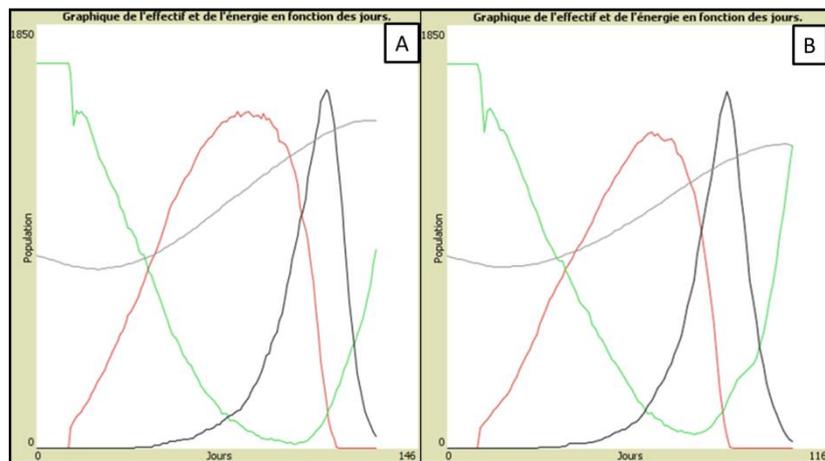


FIG. 4 : EFFECTIF INVASIVES (■), EFFECTIF PLANTS (■), EFFECTIF COUNTERS (■), QUANTITE D'ÉNERGIE DANS LE SOL (■). REPRESENTATIONS GRAPHIQUES D'UNE INVASION PAR 85 INVASIVES AU BOUT D'UNE SEMAINE DE CULTURE. UN EFFECTIF COMPOSE DE 5 COUNTERS EST ENVOYE APRES 7 JOURS D'INVASION. LES SIMULATIONS DIFFERES SUR L'EFFICACITE POUR TUER LES INVASIVES (EFFICENTY TO KILL INVASIVES). « A » : EKI = 40, « B » : EKI = 50. LES AUTRES PARAMETRES SONT : AGRESS_LVL = 100, PREFERENCE-FOR-INVASIVES = 80, EKP = 40.

Lorsque l'efficacité est suffisante, c'est-à-dire lorsqu'elle est supérieure à 40 %, la lutte biologique (seulement 5 « *counters* ») permet d'obtenir l'extinction de l'espèce envahissante sur la parcelle cultivée. Dans ces deux scénarios il semble intéressant de souligner l'importante croissance des « *counters* » dépassant même l'effectif des invasives. Il semblerait donc que pour compenser leur manque d'efficacité pour tuer (individuellement), ils ont choisi d'utiliser le nombre afin de survivre. Certes l'invasion est maîtrisée, mais il semble il y avoir un problème. Avec une telle lutte biologique, il est peut être possible de dégrader le champ avec une quantité peut être trop importante de déchets biologiques.

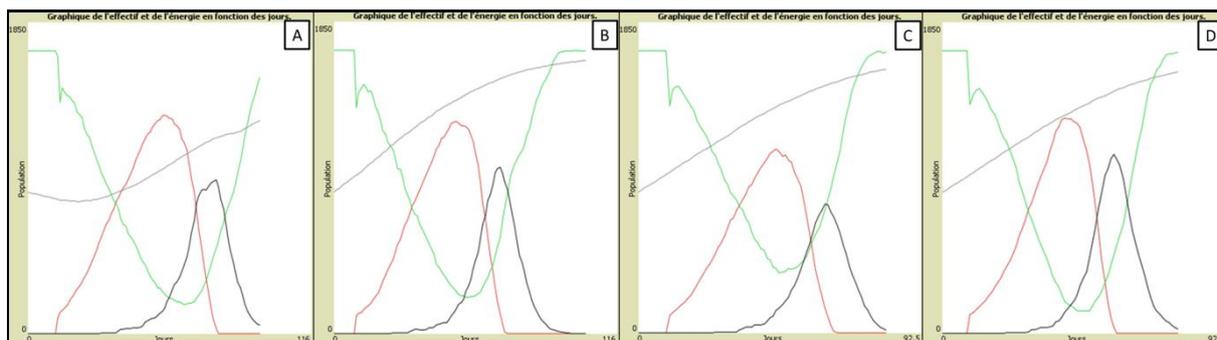


FIG. 5 : EFFECTIF INVASIVES (■), EFFECTIF PLANTS (■), EFFECTIF COUNTERS (■), QUANTITE D'ÉNERGIE DANS LE SOL (■). REPRESENTATIONS GRAPHIQUES D'UNE INVASION PAR 85 INVASIVES AU BOUT D'UNE SEMAINE DE CULTURE. UN EFFECTIF COMPOSE DE 5 COUNTERS EST ENVOYE APRES 7 JOURS D'INVASION. LES SIMULATIONS DIFFERES SUR L'EFFICACITE POUR TUER LES INVASIVES (EFFICENTY TO KILL INVASIVES). « A » : EKI = 60, « B » : EKI = 70, « C » : EKI = 80, « D » : EKI = 90. LES AUTRES PARAMETRES SONT : AGRESS_LVL = 100, PREFERENCE-FOR-INVASIVES = 80, EKP = 40.

Ces scénarios suivent la dynamique précédente. Il semble clair que lorsque l'efficacité augmente, l'invasion est plus vite maîtrisée. En revanche, contrairement aux simulations précédentes, la population de la lutte biologique ne dépasse jamais celle de la plante invasive.

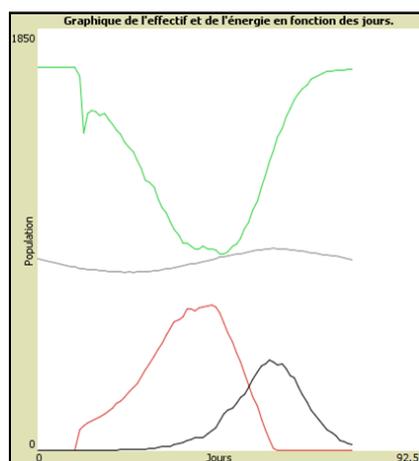


FIG. 6 : EFFECTIF INVASIVES (■), EFFECTIF PLANTS (■), EFFECTIF COUNTERS (■), QUANTITE D'ÉNERGIE DANS LE SOL (■). REPRESENTATIONS GRAPHIQUES D'UNE INVASION PAR 85 INVASIVES AU BOUT D'UNE SEMAINE DE CULTURE. UN EFFECTIF COMPOSE DE 5 COUNTERS EST ENVOYE APRES 7 JOURS D'INVASION. EFFICENTY TO KILL INVASIVES = 100. LES AUTRES PARAMÈTRES SONT : AGRESS_LVL = 100, PREFERENCE-FOR-INVASIVES = 80, EKP = 40.

Ce scénario est intéressant puisque lorsque l'efficacité est de 100% pour tuer les plantes invasives, le nombre d'invasives ne dépasse jamais celui des plantes indigènes. L'efficacité est telle que lorsque la lutte biologique est dispersée dans le territoire, la variété invasive disparaît en quelques semaines.

Les scénarios aboutissant à une réussite (équilibre acceptable) :

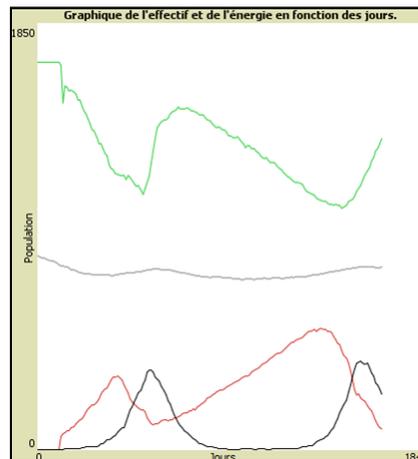


FIG. 7 : EFFECTIF INVASIVES (■), EFFECTIF PLANTS (■), EFFECTIF COUNTERS (■), QUANTITE D'ÉNERGIE DANS LE SOL (■). REPRESENTATION GRAPHIQUE D'UNE INVASION PAR 85 INVASIVES AU BOUT D'UNE SEMAINE DE CULTURE. UN EFFECTIF COMPOSE DE 5 COUNTERS EST ENVOYE APRES 7 JOURS D'INVASION. LA PREFERENCE POUR LES INVASIVES EST DE 55%, L'EFFICACITE EST DE 50% POUR CHAQUE VARIETE, AGRSS_LVL = 100.

Nous avons rarement obtenue ce résultat mais il semblait intéressant de le présenter. Dans certains cas un équilibre sur quelques semaines est observable entre les différents agents. En effet après une première invasion, la lutte biologique est introduite au bout de 7 jours. Elle va ensuite rapidement diminuer l'effectif de l'invasive sans pour autant obtenir un effectif nul et donc à une extinction. Lorsque le nombre d'invasive n'est plus suffisant, la quantité de « *counters* » va diminuer une nouvelle fois. Cette diminution des « *counters* » a pour conséquence l'augmentation soudaine du nombre de plantes envahissantes, mais lors de la deuxième phase d'invasion les « *counters* » vont mettre un terme à cette dernière. La quantité d'énergie varie très peu puisque la simulation est partagée entre la variété fortement consommatrice (indigène), et la variété invasive, peu consommatrice.

Avec le modèle proposé, ce scénario est rare car il dépend de la répartition géographique des invasives et de la lutte biologique. Lorsque nous avons observé ce résultat cela était dû à une « *invasion sphérique* », à partir d'un épicycle, l'invasion se propageait et la lutte travaillait à la limite du cercle. Si le cercle devient trop important, l'invasion est inévitable, si le cercle est trop petit, la lutte prend le dessus, ou alors si le cercle à un diamètre précis, il permet l'équilibre.

V- Discussion

5.1- Conclusions sur la thématique :

Ces dernières années, la simulation multi-agent a révélé être d'un certain intérêt en biologie. Dans le cadre de notre projet pluridisciplinaire, nous avons réussi à obtenir une simulation donnant des résultats cohérents, avec un bon enchaînement des différentes tâches et une durée de la simulation conforme à nos attentes. Néanmoins il s'agit seulement d'une bonne base de départ. En effet, on s'est rendu compte au fil du projet que de nombreux paramètres n'ont pas été pris en compte mais qu'il en existait une multitude et qu'il fallait donc faire un choix.

En conclusion, nous avons obtenu un modèle représentant l'invasion ou non d'une culture agricole par une plante invasive, et qu'il est possible en introduisant une lutte biologique, de diminuer l'espace occupé par ces plantes néfastes. Comme dit précédemment, il existe une multitude de résultats possibles selon les paramètres de simulation choisis. Les simulations présentées ci-dessus se focalisent sur la variable « *EKI* » (*Efficiency to Kill Invasives*). Ainsi, dans les conditions testées, la lutte biologique semble être une réussite efficace lorsque son « *EKI* » est supérieur à 30%. Dans le cas contraire, la lutte biologique se déplace vers l'invasive la plus proche, selon les conditions établies, il est possible qu'elle perde trop de temps à éliminer sa cible, elle restera ainsi sur le même patch suffisamment longtemps pour que l'invasion se propage. En ayant un « *EKI* » suffisant, on évite donc cette propagation. Ce modèle est basé sur un petit nombre de paramètres déjà suffisant pour émettre certaines hypothèses concernant un plan de gestion contre une plante invasive de ce type. Si la simulation avait pour but d'aider un agriculteur, il aurait fallu en trouver une espèce suffisamment agressive, mobile, ayant une forte préférence pour l'envahissante et pouvant éliminer rapidement sa cible.

5.2- Améliorations possibles :

Apprendre à maîtriser le logiciel « *Netlogo* » a été compliqué dans les premiers temps mais une fois dans la lancée, de nombreuses idées nous sont apparues, nous sommes devenus ambitieux et dès qu'une tâche était effectuée, on passait à la réalisation de la suivante. Des améliorations sont toujours possibles en ajoutant plus de paramètres, plus de variables modulables afin d'obtenir un modèle qui renvoie un résultat de plus en plus précis, qui représente plus exactement la situation dans la réalité.

Si l'on avait un peu plus de temps, la première tâche réalisée aurait été, l'optimisation de plusieurs fonctions car indispensable pour de meilleurs résultats. En effet, on a remarqué que lorsque la saison se termine, la fonction de reproduction se réalise avant même que l'ensemble des « *plants* » disparaissent ce qui a pour conséquence une ré-augmentation. Nous avons essayé de corriger cela, en vain. Pourtant les « *plants* » sont censées toutes disparaître à un temps précis, et le jour suivant la fonction reproduction ne devrait pas permettre la repousse ou elle se réalise en même temps que la diminution de récolte. D'autre

part, le modèle que l'on propose met en jeu deux variétés de végétaux seulement. Il serait intéressant d'augmenter le nombre de variété, et ainsi modéliser des interactions différentes entre chacune d'elle. Les variables seraient alors comme pour celles du modèle, sous forme de sliders, que l'utilisateur pourra alors moduler en fonction de ce qu'il recherche, comme entre autre le nombre de variété qu'il veut étudier. Il serait aussi intéressant de visualiser par exemple une invasion sur des parcelles de culture différentes, c'est à dire sur un milieu hétérogène afin d'étudier la résistance propre à chacune. Certaines parties pourraient être soumises à une contrainte qui limiterait l'avancée ainsi que la propagation des différentes espèces ou au contraire les favoriser. Nous avons eu l'idée de donner la capacité à l'utilisateur de générer selon son souhait un territoire découpé en un certain nombre de champs de taille égale. Mais nous avons constaté avec seulement nos deux espèces, et le nombre de variables modifiables disponibles que le modèle était gourmand, alors afin de mettre l'utilisateur dans des conditions optimales nous avons préféré abandonner cette idée.

Il y a eu de nombreuses idées non ajoutées dans le résultat final car elles ralentissaient la simulation mais aussi par soucis de temps : la possibilité de placer directement avec la souris une plante invasive, de supprimer des agents directement selon le gré de l'utilisateur, En ce qui concerne la reproduction des deux variétés, on avait hésité entre deux possibilités, il serait intéressant de les avoir toutes les deux sur le même modèle, c'est à dire d'avoir le choix entre une compétitivité entre les graines et celui d'une compétitivité entre le nombre de plante de chaque variété autour du patch vide afin de pouvoir les comparer. Cependant la qualité de notre matériel informatique ainsi que le temps dont on disposait, nous ont contraints à ne pas les implanter.

5.3- Conclusions personnelles sur le projet pluridisciplinaire :

Tout d'abord, nous sommes reconnaissants envers l'équipe pédagogique nous ayant encadré tout au long de cette expérience. En effet, ce projet constitue une expérience nouvelle que nous avons accomplie, nous permettant ainsi d'avoir un aperçu sur la difficulté que peut être de rendre un aussi gros projet dans les temps.

Il a fallu travailler en binôme, prendre ses propres décisions, débattre pour faire des choix et avoir confiance en ses choix, mener un projet comme bon nous semble, c'est à dire prendre des initiatives, et cela sans instructions précises. Pour mener à bien ce projet, il était indispensable d'acquérir de nouvelles compétences tout au long de ce devoir en respectant des critères de travail, comme par exemple apprendre à rédiger et respecter la « Ganttchart » qui s'est avéré être un moyen utile de se situer dans les étapes d'un projet, elle permet d'organiser son travail dans le délai imparti. Au début, il a été difficile de trouver des repères, savoir par où commencer, quelles voies étaient les plus intéressantes à explorer. Mais lorsque nous avons obtenus plus de connaissances sur le sujet, en faisant des recherches approfondies, le sujet paraissait beaucoup plus clair et attrayant, il a ainsi suscité notre curiosité et notre ambition de produire un résultat de modèle intéressant et utile. C'est donc pour nous une réussite dans le sens où nous vous proposons un travail qui nous convient, et surtout un travail qui de par sa complexité, nous a permis d'obtenir de nombreuses connaissances dans le domaine de la programmation et de la biologie.

VI- Bibliographie & Webographie

6.1- Bibliographie :

- Colautti R.I., MacIsaac H.J. (2004). A neutral terminology to define 'invasive' species. *Diversity Distrib.*, 10 : 135–141.
- Pyšek P, Richardson DM, Rejmànek M, Webster GL, Williamson M & Kirschner J (2004). Alien plants in checklists and floras: towards better communication between taxonomists and ecologists. *Taxon* 53: 131-143.
- Reichard SH & White P (2001). Horticulture as a pathway of invasive plant introductions in the United States. *BioSciences* 51: 103-113.
- Richardson DM, Pysek P, Rejmànek M, Barbour MG, Panetta FD & West CJ (2000). Naturalization and invasion of alien plants: concepts and definitions. *Biodiversity and Distributions* 6: 93-107.
- Weber EF (1997). The alien flora of Europe: a taxonomic and biogeographic review. *Journal of Vegetation Science* 8:565-572.
- Williamson M. (1996). *Biological invasions*. Chapman & Hall, Londres, 256 p.

6.2- Webographie :

- Courrier de l'environnement de l'INRA n°32, décembre 1997
<http://www7.inra.fr/lecourrier/wp-content/uploads/2012/01/C32Breton.pdf>
- Ouvrage publié par le Comité français de l'UICN, Paris, France (2008).
http://www.uicn.fr/IMG/pdf/1_UICN_2008_Especies_envahissantes_OM_-_Synthese_generale_et_recommandations.pdf
- Numéro 25 – Décembre 2008, *Natura* 2000
http://ec.europa.eu/environment/nature/info/pubs/docs/nat2000newsl/nat25_fr.pdf
- Pierre YÉSOU, ONCFS, Délégation régionale Bretagne – Pays de la Loire Source : Lettre *Sagir* 160 - 20007
http://www.oncfs.gouv.fr/IMG/pdf/ibis_sacres_sagir160.pdf
- Etude sur les impacts économiques et écologiques des espèces invasives en Europe (2009) INRA science & impact. Nadja NASDALA
<http://www.actualites-news-environnement.com/21256-etude-impacts-economiques-ecologiques-especies-invasives-europe.html>
- Méthodes et recommandations pour la gestion des plantes exotiques envahissantes
http://www.centrederessources-loirenature.com/mediatheque/especies_inva/manuel/souspartie/Methodes%20VF.pdf
- Convention de partenariat ONEMA-Cemagref 2008. Emilie Mazaubert, Alain Dutartre
http://www.onema.fr/IMG/pdf/2009_022.pdf

- Les espèces exotiques envahissantes en France : évaluation des risques en relation avec l'application de la Directive Cadre Européenne sur l'Eau. Emilie MAZAUBERT (2008)
http://centrederesources-loirenature.com/mediatheque/especes_inva/telechargements/MEMOIRE_EMILIE_MAZAUBERT_2008.pdf
- Documentaire d'Ingo Thöne (Allemagne 2014, 53 min.)
<http://future.arte.tv/fr/les-plantes-invasives>
- Département de Zoologie de l'INRA. La Minière, 78280 Guyancourt. Pierre Jourdheuil, Pierre Grison et Alain Fraval
<http://www7.inra.fr/dpenv/jourdc15.htm>
- Agricultures et territoires. Chambres d'agriculture Picardie (2014)
<http://www.chambres-agriculture-picardie.fr/environnement/paysages-et-biodiversite/publications-biodiversite/publications-lutte-biologique.html>
- Invasions biologiques en milieux aquatiques. Dossier 2 : « Le contrôle biologique des espèces invasives ». Alain Dutartre et Emmanuelle Sarat
<http://www.gt-ibma.eu/le-contrôle-biologique-des-especes-invasives/>
- Office Pour les Insectes et leur Environnement. OPIE
<http://www7.inra.fr/opie-insectes/luttebio.htm>

Annexes

Invasives Project

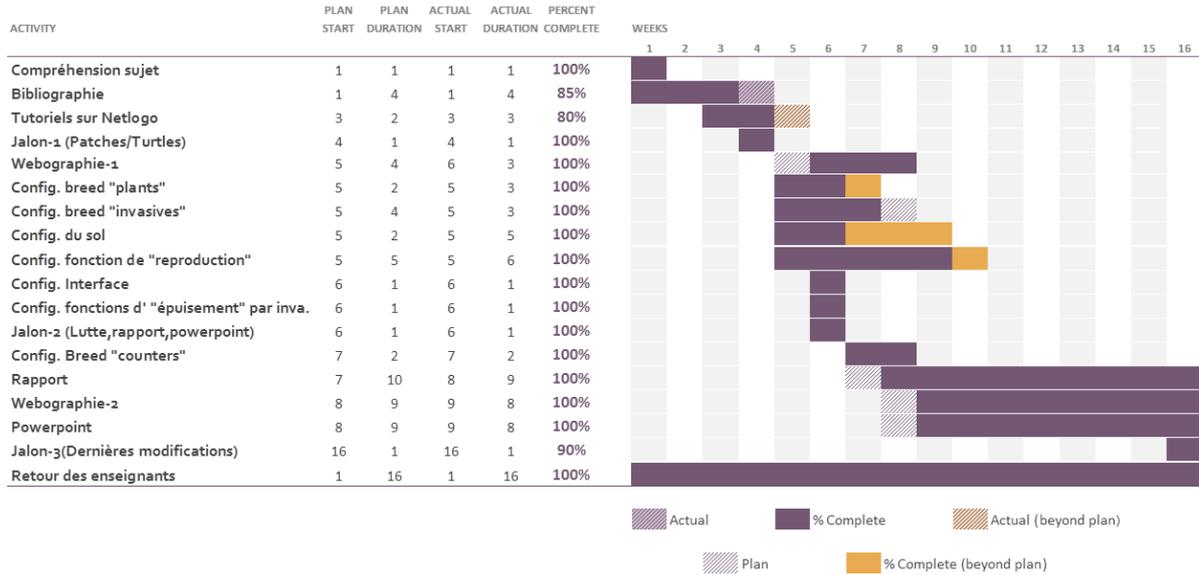


FIG-ANNEXE. 1 : GUNTCHART DU PROJET « INVASIVES ».

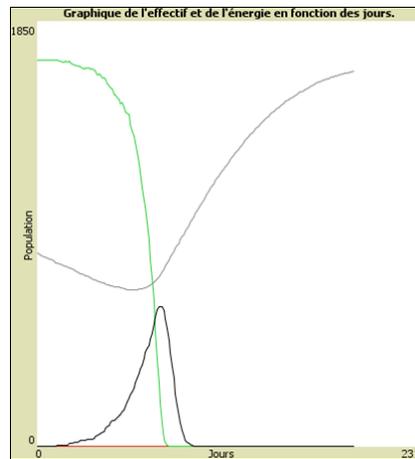


FIG-ANNEXE. 2 : EFFECTIF PLANTS (■), EFFECTIF COUNTERS (■), QUANTITE D'ÉNERGIE DANS LE SOL (■). REPRESENTATION GRAPHIQUE DE LA LUTTE BIOLOGIQUE QUI ATTAQUE UNIQUEMENT LES PLANTS METTANT EN EVIDENCE LA POSSIBILITE DE MODIFIER LE COMPORTEMENT DE LA LUTTE.