Modélisation du transfert technologique par système multi-agent : illustration à l'informatique verte

Christina Herzog, Jean-Marc Pierson, Laurent Lefèvre

▶ **To cite this version:**

Christina Herzog, Jean-Marc Pierson, Laurent Lefèvre. Modélisation du transfert technologique par système multi-agent : illustration à l'informatique verte. 24èmes Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents (JFSMA 2016), Oct 2016, Saint Martin du Vivier, France. pp.223-232. hal-03627061

HAL Id: hal-03627061
https://hal.science/hal-03627061

Submitted on 1 Apr 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Open Archive TOULOUSE Archive Ouverte (OATAO)
OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in : http://oatao.univ-toulouse.fr/
Eprints ID : 17061

The contribution was presented at JFSMA 2016:
http://jfsma2016.litislab.fr/

To cite this version : Herzog, Christina and Pierson, Jean-Marc and Lefèvre, Laurent *Modélisation du transfert technologique par système multi-agent : illustration à l'informatique verte.* (2016) In: 24emes Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents (JFSMA 2016), 5 October 2016 - 7 October 2016 (Saint Martin du Vivier, France).

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository administrator: staff-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr

Modélisation du transfert technologique par système multi-agent : illustration à l'informatique verte

C. Herzog[a,c] herzog@irit.fr

JM. Pierson[a] pierson@irit.fr

L. Lefèvre[b] laurent.lefevre@ens-lyon.fr

[a]Institut de Recherche en Informatique de Toulouse, Université Paul Sabatier – Toulouse III, France

[b]INRIA-Lyon, ENS-Lyon

[c]EfficIT

Résumé

Alors que la masse de recherche académique ne cesse de croître, chacun peut observer la difficulté de transférer certains résultats du laboratoire vers l'industrie. Pour en comprendre les raisons, il est nécessaire d'appréhender chaque acteur de ce transfert (ses motivations, ses contraintes, …). Dans cet article, nous présentons un système multi-agent générique modélisant le transfert technologique entre le monde académique et les entreprises, et nous l'appliquons au domaine de l'informatique verte en s'intéressant plus particulièrement à l'impact de ce transfert sur le développement durable dans la société.

Mots-clés *: transfert technologique, informatique verte, durabilité*

Abstract

While the amount of academic research is increasing, everyone witnesses the difficulty to transfer some results from laboratories to industry. To understand the reasons, it is mandatory to analyse each actor of this transfer (its motivations, its constraints, etc.). In this paper, we present a generic multi-agent-system modeling the technology transfer between academics and industry. We apply it to the Green IT field focusing on the impact of this transfer on the sustainability in the society.

Keywords*: technology transfer, sustainability, Green IT*

1 Introduction et motivation

Depuis 5 à 10 ans, les recherches sont nombreuses sur la réduction de l'énergie en l'informatique (principalement sur la réduction de l'électricité). Plusieurs études ont alerté les organismes environnementaux sur l'urgence du problème de la consommation d'énergie des infrastructures à grande échelle, comme les centres de données. Dans les laboratoires, des techniques ont prouvé leur efficacité sur des données synthétiques, des tâches dédiées ou des applications sélectionnées, pour être en mesure d'économiser de l'énergie au cours de la vie d'une infrastructure, dans plusieurs contexte, depuis le Cloud au HPC. Malheureusement, le transfert (ou même la connaissance de l'existence) de ces techniques aux industries est limité à des partenaires de projets, des entreprises innovantes ou de grands centres de recherche privés.

Afin d'en comprendre les raisons, une modélisation du transfert technologique est exposée dans cet article. La méthodologie passe par l'identification des liens entre les acteurs de l'innovation et sa transcription dans un système multi-agent où chaque acteur poursuit ses propres objectifs tout en interagissant avec les autres au gré de projets communs. Le modèle générique est ensuite

spécialisé pour le champ de l'informatique verte, où une valeur de durabilité change en fonction de l'évolution du système multi-agent, permettant de tester plusieurs scénarios liés au transfert technologique et leur impact sur les acteurs et la durabilité.

Les contributions principales de cet article sont :

- une modélisation des acteurs du transfert technologique et leurs interactions au sein de projets communs
- une formulation de la notion de durabilité et de son évolution
- une étude de l'impact de paramètres du transfert sur l'évolution des objectifs des acteurs et sur la durabilité.

La suite de cet article est organisée comme suit : tout d'abord une identification, une sélection des acteurs du transfert et de leurs liens en Section 2, puis une définition de la notion de durabilité en Section 3. Nous présentons les grandes lignes de l'implémentation du modèle dans un système multi-agent en NetLogo et quelques résultats de simulation en Section 4. La section 5 présente un état de l'art. Enfin nous concluons en Section 6 et donnons des perspectives.

2. Acteurs du transfert technologique

Dans [1], nous avons examiné à travers une étude bibliographique et l'analyse détaillée de 80 réponses à un questionnaire envoyé à des collègues du domaine du GreenIT les motivations et les liens qu'ils entretiennent entre eux dans le contexte d'un transfert de l'académique vers l'industrie et vice-versa. Cela a permis d'identifier les acteurs principaux de ce transfert, les motivations (qui se transforment en objectifs), ainsi que leurs moyens d'actions. Nous nous consacrerons dans cet article aux 5 principaux (chercheurs, centres de recherche, entreprises, centres de transfert technologique et organismes de financement) en laissant aux travaux futurs les autres (organismes de standardisation, groupes d'influence, gouvernements, business angels). Nous présentons les éléments que nous avons retenus afin de transformer ces acteurs en agent dans un système multi agent. Ces choix simplifiés permettent de faire ressortir les grands ressorts du transfert mais ne se veulent pas exhaustifs. Aussi, nous avons fait le choix de nous intéresser seulement aux acteurs de l'informatique verte et à leur activité dans cette direction, en négligeant leurs autres activités pour ne s'attacher qu'au différentiel lié à leur effort vers l'informatique verte.

2.1 Chercheurs

Au coeur du transfert technologique, ils produisent la connaissance à travers des publications (ce sera leur objectif). Les publications sont liées à leurs contacts, contacts créés lors de conférences et/ou de projets collaboratifs, ainsi qu'aux moyens financiers de leur centre de recherche. Ainsi plus de contacts entraine plus de possibilités de publications. Les chercheurs peuvent être permanents ou non-permanents. Ces derniers sont encadrés par des permanents (et leur nombre est donc limité) et leur contrat a une durée limitée (celle d'un projet, sauf si le lien persiste au delà du projet).

2.2 Centres de recherche

Les centres de recherche regroupent les chercheurs. Souvent rattachés à une université, ils essayent de contribuer à la réputation de celle-ci, et de dégager des moyens financiers autonomes par la participation à des projets collaboratifs (plusieurs partenaires) ou des collaborations directes (avec des entreprises). Ce sera leur objectif. Leur réputation est basée sur le nombre de publications et de contrats dans les dernières années (moyenne glissante), alors que les moyens financiers ne comptent ici que les moyens venant de contrats (qui de toutes

manières représentent la majorité de leurs moyens). Les centres peuvent inciter plus ou moins les chercheurs en finançant leur recherche (favorisant les publications), et peuvent embaucher de nouveaux chercheurs si les moyens le permettent (et les débaucher dans le cas contraire).

2.3 Entreprises

Les entreprises cherchent à augmenter leur bénéfices, en prenant une différence concurrentielle (ce sera leur objectif). Participer à un projet collaboratif permet d'augmenter un leadership si le projet est réussi, mais nécessite un investissement humain et financier qui peut être perdu en cas d'échec. Elles embauchent de nouveaux collaborateurs pour participer aux contrats. Elles initient des collaborations directes avec des centres de recherche et participent à des projets collaboratifs. Elles dédient une partie de leur chiffre d'affaires à la R&D pour cela.

2.4 Centres de transfert technologique

Les centres de transfert technologique (SATT en France, TTO: Technology Transfer Offices) sont des structures associées aux centres de recherche, censées faciliter et accélérer le transfert technologique. Leur objectif est donc d'augmenter leur chiffre d'affaires (et donc celui de leurs actionnaires publics) en prenant une part dans la réalisation des contrats. En contrepartie ils fournissent un carnet d'adresse pérenne grace auquel les centres de recherche et les entreprises peuvent mieux se trouver pour créer des collaborations.

2.5 Organismes de financement

Les organismes de financement auront un rôle d'initiateur de projets, mettant en jeu régulièrement des fonds sur lesquels les centres de recherche peuvent initier (avec une réussite à l'appel donné) un projet collaboratif. Les fonds sont limités, entrainant une sélection des projets possibles.

3. Notion de durabilité

3.1 La notion de durabilité

La durabilité est une notion définie par la conjonction de trois facteurs : des aspects environnementaux, sociaux et économiques. Un acteur d'un système améliore sa durabilité si au minimum un de ces facteurs s'améliore. Dans le domaine de l'informatique verte, utiliser un matériel plus récent consomme souvent moins d'électricité (et donc moins d'impact environnemental et économique), mais en même temps la production du nouvel équipement, son transport, son achat, et le recyclage de l'ancien matériel a un impact sur l'environnement, sans parler des aspects sociaux ou économiques. Le choix a été de calculer la durabilité de chaque acteur et de définir la durabilité du système comme leur moyenne. Ainsi nous verrons si la réalisation des objectifs de chaque acteur contribue (et comment) à la durabilité du système.

3.2 Calcul d'un indicateur de durabilité

L'indicateur de durabilité (SPI, Sustainability Performance Indicator) proposé possède 3 facteurs, pondérés à 33% chacun. Chaque facteur est lui-même dépendant de plusieurs éléments pondérés (leurs poids relatifs pour le facteur considéré est noté W ci-dessous).

Le facteur écologique est lié à 4 valeurs :

- awareness: connaissance de solutions informatique verte. Elle augmente avec le nombre de publications et de contrats et décroit avec le temps. W = 10%
- reduce: réduction de la consommation d'énergie. W = 30%
- reuse: réutilisation des matériaux. W = 30%
- recycle: recyclage de matériaux vers de nouveaux produits. W = 30%

Les 3R croissent avec le nombre de contrats avec des probabilités p1, p2 et p3, où p1+p2+p3=1, indiquant qu'un contrat fait progresser dans un des 3R en moyenne. Ils

diminuent avec un nombre d'employés croissant, car chaque nouvel employé entraine plus d'informatique.

Le facteur social est reflété par 5 valeurs :

- greenemployement: les employés enrôlés pour travailler sur les contrats en informatique verte. W = 30%
- awarenessconsumption: la connaissance de la consommation de l'IT dans la société. Elle augmente avec les publications et contrats (en proportion 80/20, car la société est plus impactée par les publications) et décroit avec le temps. W=15%
- rethink: la capacité d'un acteur à repenser sa stratégie en terme d'informatique verte. Elle augmente avec le nombre de contacts et de chercheurs, car cela encourage le brainstorming. Elle décroît quand le nombre de contrats augmente car les chercheurs sont alors occupés à des projets spécifiques, avec moins de liberté de penser. W=20%
- image: l'image d'un acteur dans la société. Elle augmente avec les publications, contrats et la communication et décroit avec le temps. W=25%
- standardisationinfluence: l'influence d'un acteur sur les organismes de standardisation. Elle suit le nombre d'employés et le chiffre d'affaires et décroit avec le temps. W=10%

Le facteur économique est lié à 3 valeurs:

- economicalimpact: l'impact économique des solutions vertes. Il suit le nombre de contrats fructueux. W=20%
- turnover: le chiffre d'affaires, qui augmente au travers des contrats et diminue avec les investissements et le financement de la recherche. W=50%
- attraction: représente l'attractivité d'un acteur pour les investisseurs. Elle augmente avec l'image de l'acteur et son chiffre d'affaires et décroît avec le temps. W=30%

Cette décomposition est modifiable dans le modèle mais elle a l'avantage de relier plusieurs éléments du système vers un objectif de durabilité. Les poids sont également modifiables, mais ceux donnés ici sont issus d'une enquête de terrain et les interviews de collègues.

4. Implémentation du système

4.1 Choix du cadriciel

Nous avons implémenté un système multi-agent avec NetLogo 5.0.4 [2]. Il simule pas à pas l'évolution et l'interaction d'agents dans des mondes complexes. NetLogo est régulièrement mis à jour [3]. Il est utilisé dans de nombreux champs scientifiques : science sociales, économie, psychologie, trafic urbain, diffusion commerciale, biologie, chimie, modélisation des comportements complexes au sein d'une population, etc.

Dans NetLogo les agents sont des *turtles*, des *links*, des *patches* ou des *observers*. Chaque agent évolue indépendamment pas à pas. Les *turtles* représentent les acteurs de notre monde, les *links* sont leurs liens. Les *observers* récoltent les informations de chaque agent au cours de la simulation (ils servent aux statistiques). Nous ne nous sommes pas servis des *patches* (qui représentent la localisation dans l'espace) ici.

4.2 Les acteurs et leurs évolutions

Chaque agent a ses propres attributs, qui évoluent au gré des interactions et du temps. Les attributs pour un chercheur sont :

```
1   researchers-own [
2       permanent
3       my_contract_number
4       ttl ]
```

Un chercheur peut être permanent ou non (ligne 2, *true* ou *false*). S'il n'est pas permanent, il est associé à un contrat (ligne 3) et la durée de son contrat est donné (ligne 4). Ceci correspond à sa durée de vie dans le système multi-agent. Les chercheurs sont membres d'un centre de recherche. Ceci sera représenté par un lien entre ces deux acteurs

(voir Section 4.3).

L'objectif principal pour un chercheur est de publier, et donc devrait avoir un attribut reflétant cet objectif. Cependant cet attribut est partagé avec d'autres acteurs et donc il est commun à toutes les *turtles*, comme d'autres attributs donnés ci-dessous :

```
1        turtles-own [
2            action_period
3            contract
4            newcontract
5            publication
6            newpublication
7            itr_cooling
8            itr_virtual
9            itr_cloud ]
```

Chaque *turtle* agit dans le système à intervalles réguliers (ligne 2). Par exemple un organisme de financement n'est actif que tous les 6 mois, ou une entreprise monte une collaboration tous les 3 mois en moyenne… Cette valeur aléatoire est propre à chaque acteur. Les contrats et publications sont mémorisés (depuis le début -lignes 3 et 5, seulement la dernière itération - lignes 4 et 6). Les lignes 7 à 9 représentent les intérêts de l'acteur pour 3 technologies à potentialité de réduction d'énergie dans les salles serveurs (ainsi chaque acteur sera différent en fonction de ses intérêts).

Les centres de recherche ont comme attributs le montant dédié à la recherche verte, leur budget, leur résultat de recherche (l'accumulation des publications de ses chercheurs au fil du temps), leur réputation (valeur glissante sur 3 ans cumulant les publications et les contrats). Si un centre de transfert technologique (TTO) est attaché à ce centre de recherche (ce qui n'est pas obligatoire), il existera un lien entre eux. Les entreprises possèdent un chiffre d'affaires et un budget de R&D, et un nombre d'employés en R&D. Enfin, les organismes de financement ont été modélisés simplement en lançant régulièrement des fonds pour créer des projets de montants aléatoires compris entre deux bornes.

Les évolutions de tous ces acteurs au cours du temps sont gérées par des algorithmes appelés tous les pas de temps. Dans notre modèle, un pas de temps est égal à une journée.

Nous donnons maintenant l'algorithme simplifié de l'évolution des agents-chercheurs. A chaque pas de temps, si il est non permanent, son *ttl* est réduit. Si il devient nul, ce chercheur est ôté du système. Puis, pour chacun de ses voisins *regular* (définition en Section 4.3), et si le centre de recherche de ce chercheur a un solde suffisant dédié à la recherche (1000 dans notre cas), alors il y a une probabilité de publier avec un de ces voisins (en moyenne tous les 3 mois -écriture- avec une probabilité de 20% -acceptation-). Dans ce cas, le centre de recherche finance (1000) la publication. Chaque chercheur met à jour ses centres d'intérêts (*itr_cooling, itr_virtual, itr_cloud*) en fonction de ses voisins *regular*, et des partenaires de son centre de recherche (il est influencé). Les liens avec ces voisins peuvent disparaître (en moyenne tous les 6 mois), mais aussi apparaître (tous les 3 mois) : l'enquête que nous avons menée nous a appris que les nouveaux contacts se font à 50% au hasard avec les autres chercheurs et entreprises, mais en favorisant la compatibilité des centres d'intérêts, à 25% par le réseau social du chercheur (les voisins de ses voisins), à 25% avec l'aide des centres de transfert technologiques (quand ils existent).

L'algorithme pour un centre de recherche est le suivant. Tout d'abord il met à jour ses centres d'intérêts (moyenne de ceux de ses chercheurs), ses résultats de recherche, sa réputation. Puis si le budget est critique, il termine le contrat d'un non permanent, puis met à jour son budget en payant les non-permanents. En fonction de son *action_period*, il agit à ce pas de temps ou pas

: si le budget est suffisant, il embauche des non-permanents (pour un an, dans la limite de 4 fois plus de non-permanents que de permanents) et dédie *incentive* % du budget à la recherche. Enfin, si un organisme de financement a lancé un appel, alors il tente de lancer un projet collaboratif. Ce sont ces projets qui vont créer du transfert technologique, en fonction de leur réussite.

L'algorithme de création d'un tel projet est trop long pour être inclus ici, mais il peut être résumé par : un centre cherche à former un consortium (entre 3 et 6 partenaires) en fonction de ses propres liens, des liens de ses chercheurs et ceux de son éventuel TTO. Les autres centres comme les entreprises peuvent être partenaires si tous leurs chercheurs permanents ne sont pas déjà dans des projets. Si le projet est accepté (taux de 20%), alors les centres de recherche et les entreprises reçoivent une part du financement (dont une fraction est prélevée comme coûts de fonctionnement), ils embauchent des non-permanents sur la durée du projet (entre 24 et 48 mois), les entreprises investissent ce qu'elles reçoivent. Enfin, des liens (*project*, voir Section 4.3) sont créés entre tous les partenaires.

Pour une entreprise, l'algorithme d'évolution est assez similaire à celui d'un centre de recherche sauf qu'une entreprise tente de créer un partenariat direct avec un seul centre de recherche (liens *partnership*).

4.3 Les liens et leurs évolutions

Dans NetLogo les liens sont aussi des agents. Nous avons défini plusieurs types de liens :

- *regular* : les contacts entre chercheurs (de centres de recherche et de compagnies)
- *project* : les liens entre un centre de recherche et le consortium d'un projet
- *partnership* : les liens entre une compagnie et un centre de recherche
- *belongto* et *ttolink* : les liens entre un centre de recherche et ses chercheurs, et son centre de transfert technologique.

Les liens *project* ou *partnership* réfèrent les caractéristiques de la collaboration (investissement initial pour les entreprises, force de la collaboration -lié à la compatibilité entre les extrémités du lien-, nombre de contrats et chiffre d'affaires généré par le lien, durée de vie du lien, nombre de chercheurs coté centre de recherche et coté entreprise, et enfin numéro de contrat). Pour les autres liens, seule la durée de vie aura un sens.

Comme tous les agents, les liens évoluent pas à pas. Pour les liens non permanents, la durée de vie est réduite de un à chaque pas de temps. Lorsque la durée de vie est nulle :

- si c'est un *project,* il est fini et chaque partenaire retrouve ses chercheurs disponibles, mais surtout, suivant le taux de conversion des projets (*conversion* représente la réussite -ou non- d'un projet), il en retire un bénéfice jusqu'à 4 fois l'investissement cumulé initial.
- si c'est un *partnership*, le principe est le même sauf que seuls une entreprise et un centre de recherche sont impactés, et de plus le partenariat sera étendu si il était positif (favorisant les bons partenariats).
- les autres liens disparaissent.

4.4 Intégration du SPI dans l'évolution du système

Il y a deux possibilités par rapport à l'indicateur SPI : soit le système observe son évolution passivement, soit il est actif en fonction de cette valeur. Pour comparer les deux situations, nous avons intégré le SPI dans le comportement des acteurs :

- Quand un chercheur crée un nouveau contact, il utilise le SPI plutôt que la compatibilité. Les autres chercheurs avec une haute SPI seront favorisés.

- Quand un centre de recherche crée un nouveau projet, il préfère les partenaires ayant une valeur SPI plus élevée.
- Quand une compagnie crée un nouveau partenariat, elle préfère les partenaires ayant une valeur SPI plus haute, et investit en R&D si sa valeur relative est plus basse.
- Quand un TTO est requêté pour trouver des partenaires, il favorisera les SPI élevées.

5. Expérimentations

5.1 Cadre, méthodologie et objectifs des expérimentations

Le système multi-agent proposé est complexe (environ 2000 lignes de code), et il possède un grand nombre de paramètres à tester. Nous nous sommes intéressés au comportement du système en faisant varier ses paramètres principaux. Nous donnons des résultats sur un sous-ensemble représentatif, les autres peuvent être retrouvés dans [1] (au total 4000 simulations ont été effectuées) : montant maximum donné par les organismes de financement, taux de *conversion*, taux d'*incentive*. Nous comparons les résultats des objectifs de chaque acteur et la valeur du SPI en fonction de ces paramètres.

Le système étudié possède 10 centres de recherche (dont 4 ont un TTO), 50 chercheurs, 20 compagnies. Des expériences plus grandes ont été menées mais n'ont pas apporté plus d'enseignements tout en augmentant significativement le temps de simulation (de 10mn à plusieurs heures pour chaque expérience). Aussi, le domaine étudié (informatique verte) est limité et des simulations plus grandes perdent de leur réalité. Les liens *regular* sont choisis aléatoirement au début, le réseau social construit est *scale-free*. D'autres réseaux ont été testés (*random, small-world*) mais les différences ne sont pas significatives car le réseau initial est vite transformé au cours du temps et de l'évolution du système.

Chaque expérience simule 7280 jours (20 ans). Nous présentons ici les moyennes pour 50 exécutions avec les mêmes paramètres.

5.2 Expérimentations sans influence du SPI

Impact du montant maximum financé

La figure 1 montre l'impact du financement sur la réputation moyenne des centres de recherche. Plus les montants alloués sont importants et plus la réputation augmente, ce qui est logique puisqu'alors plus de projets sont lancés, plus de chercheurs sont employés et plus de publications sont générées.

Sur le même cas, l'impact sur la richesse totale de toutes les compagnies n'est pas

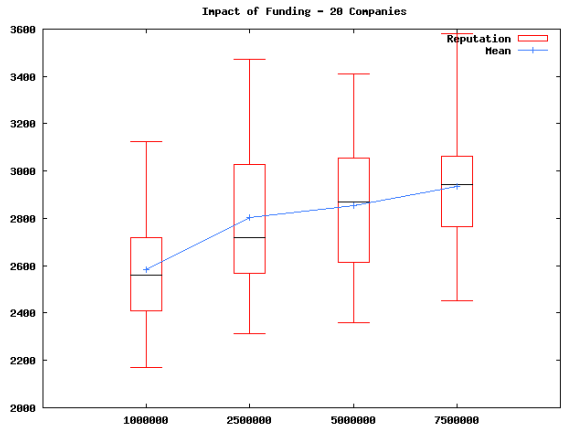

Fig 1: Impact du financement sur la réputation moyenne des centres de recherche

augmentés après 2.5M de financement. Car même si le financement augmente, les compagnies n'ont pas assez de personnels pour participer aux projets potentiels et au final elle ne profite pas plus des financements (laissant en proportion plus de financement aux centres de recherche). Concernant les publications des chercheurs permanents, les résultats montrent que l'impact pour eux est nul : en effet, une fois la taille maximum de leur réseau social atteinte (10 dans nos expériences), avoir plus de projets ne leur permet pas de l'augmenter. On peut voir en passant que les résultats positifs sur la

réputation des centres vient en grande partie des non-permanents embauchés sur projets. Enfin, la valeur du SPI moyen des centres de recherche et des compagnies n'est que peu influencée positivement (1%).

Impact du taux de conversion

Cette partie étudie l'impact du taux de conversion à la fin d'un projet ou d'un partenariat. De manière évidente, plus il est élevé, et plus le bénéfice est haut et donc plus la richesse cumulée des entreprises est haute (Figure 2).

Cette richesse dans les entreprises entrainent plus de collaborations, et donc les centres de

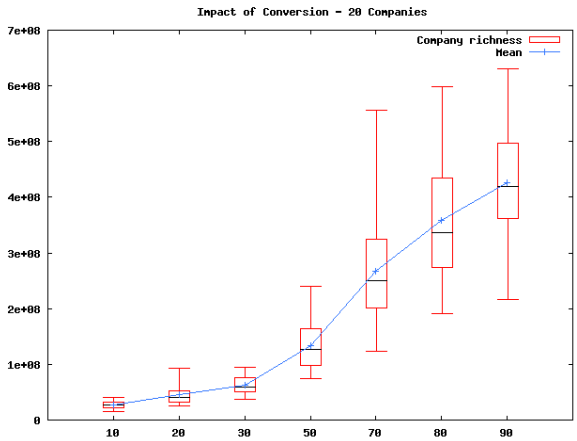

Fig 2: Impact du taux de conversion sur la richesse des compagnies

recherche font plus de projets et sont aussi plus riches, ce qui leur permet d'embaucher des non-permanents qui permettent d'augmenter significativement la réputation et les résultats de recherche de ces centres (+50% entre un taux de *conversion* 10 et 90%). Par contre, pour les chercheurs permanents, il n'y a pas de changements en termes de publication. Enfin, le SPI voit sa valeur augmenter de près de 40%. En effet le calcul du SPI dépend du nombre de chercheurs, soit directement (*greenemployment*), soit indirectement (plus d'employés implique plus de *standardizationinfluence*, plus de publications, etc.).

Impact du taux d'incentive

En moyenne tous les 6 mois, les centres de recherche dédient une partie de leur budget pour financer la recherche (ce qui a un impact sur les publications des chercheurs). On a montré un impact positif avec une augmentation de +5% du nombre de publications des chercheurs permanents entre un taux de 10% et 90%. Par contre, pour les centres de recherche, cette augmentation n'est pas autant observée, et on observe même une diminution : en effet nous avons calculé que ces publications contribuent de l'ordre de 40% sur la recherche générée. En parallèle, les centres de recherche ont moins de moyens pour embaucher des non-permanents, qui eux même génèrent donc moins de publications. Ceci a aussi un impact négatif sur le SPI (-4%), pour les mêmes raisons (mais inversées) que pour le taux de conversion.

5.3 Expérimentations avec influence du SPI

Nous comparons maintenant avec une situation où les agents agissent en tenant compte de la valeur SPI.

Impact du montant maximum financé

La première observation sur la figure 3 est que la situation sans prise en compte de SPI est meilleure que la nouvelle situation pour la richesse des entreprises quand le montant de financement des organismes de financement est au delà de 1M (jusqu'à 14% de plus). La seconde observation est que cette richesse est plus stable quel que soit le montant de financement. Cela indique que l'introduction de ce nouveau comportement n'a pas d'effet négatif et que les compagnies sont moins sensibles au financement externe.

De même les publications (pour les chercheurs), les résultats de recherche et la réputation (pour les centres de recherche) ne sont pas améliorés (baisse de -8% pour

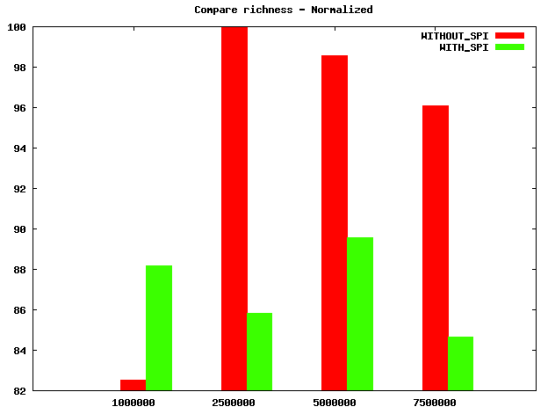

Fig 3: Comparaison de la richesse des entreprises en tenant compte (droite) ou pas (gauche) du SPI

publications, -5% pour résultats de recherche, -6% pour réputation). Pour le SPI lui-même, la différence entre les deux cas n'est que de -2% : les acteurs avec un faible SPI au début garde cette faible valeur (car peu actif finalement), dégradant finalement la valeur moyenne, même si les autres acteurs augmentent leur valeur.

Impact of conversion, incentive

Dans presque toutes les expériences, les objectifs atteints par les acteurs sont très souvent inférieurs au cas sans SPI. Nous en concluons que nos agents ne changent pas suffisamment leur comportement pour améliorer leur SPI (et donc leur durabilité) dans le modèle. Cela fera l'objet de travaux futurs, soit pour changer leur comportement, soit pour améliorer le calcul du SPI.

5.4 Discussion

Dans ce travail, plusieurs paramètres de simulation ont été fixés a priori. Même si ils ont été validés par des études sociologiques préalables des acteurs choisis et corrélés avec une enquête de terrain, une marge d'erreur est étudiée dans des travaux en cours.
Le choix de se projeter sur 20 ans doit aussi être comparé à une période plus courte, cette durée ayant un impact direct puisque l'étude présentée ici ne s'intéresse qu'aux valeurs finales des variables.

6. Travaux antérieurs

Peu de travaux se sont intéressés à modéliser le transfert technologique et les liens entre les acteurs de celui-ci, et nous n'en connaissons aucun dans le cadre de l'informatique verte. Un article de synthèse [5] s'intéresse aux systèmes multi-agents pour la diffusion de l'innovation. Même si le cadre est un peu différent (mettant l'accent vers le marketing et le ciblage client), il apporte un éclairage important. La prédominance du réseau social dans l'adoption d'une innovation est mise en avant [6]. La diffusion dans les réseaux sociaux a reçu beaucoup d'attention ces dernières années [7], [8], [9], [10]. Des acteurs de la diffusion (individus, groupes, organisations), un médium de diffusion (l'environnement de diffusion, les liens forts et faibles entre acteurs, la structure du réseau), et le contenu à diffuser sont les trois éléments de la diffusion. Cette diffusion est décrite comme le comportement collectif d'un ensemble d'acteurs sociaux interagissant dans le réseau social [11]. Le transfert technologique est une sorte de diffusion dans un réseau social, ce qui a inspiré notre modèle de création de liens entre acteurs.

Dans le cas d'une compétition pour un marché, deux catégories de modèles de diffusion sont identifiés [12], [13] : les modèles à seuil où des agents adoptent si un nombre suffisant de voisins l'ont fait, et les modèles en cascade où la probabilité d'adoption augmente avec le nombre de voisins qui ont adopté. Dans notre cas, c'est le modèle en cascade qui a été implanté.

[4] présente un modèle multi-agent pour le transfert technologique. Le modèle n'a que deux sortes d'agents (universités et industries), et 4 états, 'ne rien faire' jusqu'à 'participer activement' dans une collaboration. Le transfert est modélisé entre 0 et 100 pour chaque agent. Les résultats

montrent que les clés pour un bon transfert sont le coût pour chercher une information (distance entre les agents) et la probabilité de trouver un partenaire. L'étude est limitée, omettant par exemple le financement et le chiffre d'affaires influençant sur une direction.

7. Conclusion et Perspectives

L'objectif final de ce travail est de pouvoir donner un outil permettant de comprendre les ressorts du transfert technologique en informatique verte. On notera en passant que la méthodologie et les modèles développés peuvent être étendus à d'autres domaines. Aujourd'hui le modèle développé permet à chaque acteur d'étudier l'impact de ses décisions sur ses objectifs et la durabilité : un organisme de financement peut regarder l'impact des sommes allouées, un centre de recherche peut comprendre l'intérêt d'une politique d'incitation, une entreprise celui de participer dans des collaborations (et à quel prix), un chercheur peut voir l'impact des liens qu'il entretient avec les autres, etc.

Les principales perspectives concernent le calcul du SPI et ses poids (multidisciplinaire sciences sociales et environnementales), l'amélioration de la prise en compte du SPI pour les acteurs et l'ajout d'acteurs.

Références

[1] C. Herzog. Contribution to the modeling of technological transfer in Green IT using multi-agent-systems. PhD. Nov 2015.

[2] NetLogo itself: U. Wilensky, 1999. NetLogo. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University. Evanston, IL.

[3] U. Wilensky, W. Rand, An Introduction to Agent-Based Modeling Modeling. Natural, Social, and Engineered Complex Systems with NetLogo, MIT Press., 2015.

[4] M. Ning, L. Qiang. Influence of information search cost on technology transfer based on multi-agent system," in 16th Int. Conf. on Industrial Engineering and Engineering Management, IE&EM, 21-23 Oct. 2009, pp.443,447.

[5] E. Kiesling, M.Günter, C.Stummer, L.M.Wakolbinger, Agent-based simulation of innovation diffusion: a review, in Central European Journal of Operation Research CEJOR 20 , 2012, pp. 183-270.

[6] L.Kuandykov, M.Sokolov. Impact of social neighbourhood on diffusion of innovation S-curve. in Decision Support System 48, 2010, 531-535.

[7] Y. Jiangs, J.C. Jiang. Diffusion in Social Networks: A Multiagent Perspective. in IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Vol 45 (2).

[8] S. Xu, W. Lu, L. Xu, Push- and pull-based epidemic spreading in networks: Threshold and deeper insights, ACM Trans. Autonom. Adapt. Syst., vol. 7, no. 3,, Art. ID 32, 2012.

[9] T. Valente, Social network thresholds in the diffusion of innovations, Soc. Netw., vol. 18, no. 1, pp. 69-89, 1996.

[10] Y. Jiang. Concurrent collectives strategy diffusion of multiagents: The spatial model and case study. IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. C, Appl. Rev., vol 39, no. 4, , Jul. 2009, pp. 448-458.

[11] Y. Jiang, J. Jiang. Understanding social networks from a multiagent perspective. in IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst., vol. 25, no. 10, Oct. 2014, p. 2743-2759.

[12] B. Libai, E. Muller, R.Peres. Decomposing the value of word-of-mouth seeding programs: acceleration versus expansion. in Journal of Marketing Research, 2013, p. 161 – 176.

[13] D. Kempe, J. Kleinberg and E. Tardos. Maximizing the spread of influence through a social network. in in Proceedings of the ninth ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, KDD'03, ACM, New York, NY, USA, 2003, p. 137 – 146.