



Projet de Recherche Doctoral

TerraNeon : Simuler l'impact des pratiques écologiques individuelles sur le climat

Porteur : Jean-Daniel KANT (Sorbonne Université, LIP6)

Co-encadrant : Cédric Herpson (Sorbonne Université, LIP6)

Contact : jean-daniel.kant@lip6.fr

Introduction

L'Urgence Climatique n'est plus à démontrer. L'année 2020 a été la plus chaude jamais enregistrée sur la Terre. Les rapports du GIEC¹ indiquent sans ambiguïté l'impérative nécessité de diminuer de moitié nos émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) d'ici 2030, et par 4 d'ici 2050, si l'on veut éviter de prochaines catastrophes climatiques, qui concerneront chaque zone de la planète, dont la France.

Le projet *TerraNeon* est un projet ambitieux, de moyen terme, fortement pluridisciplinaire, visant à construire les bases d'un simulateur de l'impact des activités humaines sur le climat et notamment le réchauffement climatique.

Il existe de nombreux travaux permettant de simuler et prédire l'évolution du climat fondés sur des modèles physiques ou statistiques (e.g. GIEC), et la plupart incluent des variables de simulation des activités humaines. Mais, à notre connaissance, ces comportements humains ne sont pas modélisés de façon individuelle mais agrégés sous forme de paramètres d'impact exogènes, l'ensemble des individus humains étant ainsi agrégés sous la forme d'un comportement typique, à la manière du modèle d'agent représentatif comme souvent pratiqué en économie.

Si ces modèles numériques climatiques et environnementaux peuvent fournir des informations précises sur les possibles trajectoires du climat et de l'environnement [1,2,3], ils ne détaillent pas suffisamment la variabilité des comportements humains, économiques et sociaux, pouvant les affecter.

Pourtant, l'urgence climatique nous impose avec force de pouvoir déterminer le plus scientifiquement possible quels seraient les comportements individuels et collectifs les plus dommageables ou vertueux. Disposer d'une telle information permettrait de sensibiliser et aider concrètement chaque acteur de la société (décideur, individu, entreprise, institution, ...). Elle permettrait de contribuer à l'identification, la conception et la mise en œuvre des meilleures actions et politiques susceptibles de changer de trajectoire, pour éviter les catastrophes annoncées et améliorer notre avenir.

Pour cela, nous proposons une approche hybride et innovante, afin de coupler aux meilleurs modèles numériques du climat et de l'environnement des modèles multi-agents des comportements humains (individuels, sociaux et économiques). L'avancée récente des techniques de simulations multi-agents (*agent-based modeling and simulation*), que ce soit pour la simulation économique ou la simulation sociale rendent aujourd'hui une telle approche possible.

¹ <https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/spm/>

Notre Approche

Le Point fort des Systèmes Multi-Agents (SMA)² est de permettre des **émergences collectives** non facilement prédictibles à partir des comportements individuels. Ainsi la simulation sociale [4,5] ou la simulation économique à base d'agents [6] ont respectivement fait leurs preuves pour l'étude des systèmes sociaux ou économiques complexes. Au sein du LIP6, nous disposons d'une expérience significative dans ces deux domaines via l'étude, par exemple, de la diffusion d'innovations [7], de la dynamique des opinions [8] ou du marché du travail avec le modèle WorkSim [9,26]. Ces modèles ont la particularité d'être calibrés automatiquement sur des données réelles. Ainsi, avec WorkSim, nous avons été les seuls à proposer une évaluation quantitative de la loi travail « El Khomri », évaluation citée et reconnue par le FMI [23] et par la Commission Européenne [24].

Par ailleurs, nous avons récemment proposé une méthode pour optimiser automatiquement une politique à l'aide d'une simulation multi-agents [10].

Afin de pouvoir amorcer l'ambitieux projet que représente TerraNeon, nous proposons de construire en 3 ans un premier modèle qui servira de *Preuve de concept* : Modéliser et simuler l'Impact des Pratiques Écologiques Individuelles (PEI) sur le réchauffement climatique⁴. C'est dans ce cadre que nous sollicitons un financement de PRD EDITE.

Objectifs

Trier ses déchets, manger moins de viande, ne plus prendre l'avion, isoler un bâtiment, ..., voilà une liste, non exhaustive, des actions individuelles que l'on cite souvent pour lutter contre le réchauffement climatique. Malheureusement il n'est aujourd'hui pas possible d'identifier automatiquement le taux d'adhésion nécessaire pour rendre leur impact significatif, pas plus que d'en estimer le coût économique ni l'acceptabilité sociale.

Dans ce projet, nous visons à construire un **outil d'aide à la décision** novateur afin :

- **d'étudier les effets de seuil** émergents pour ces différents pratiques PEI : quelle serait la proportion minimale de personnes requises pour qu'une action commence à avoir un effet significatif sur le réchauffement (et notamment les émissions de Gaz à Effet de Serre (GES))?
- de comprendre l'impact des **interaction sociales** sur l'adoption : diffusion des innovations, dynamiques des opinions...
- d'évaluer les **effets de politiques incitatives** (communication, *nudging*, subventions...) pour accroître l'adhésion.
- de **trouver automatiquement quelles politiques permettront de réduire les émissions de GES** des individus le plus efficacement possibles. Nous couplerons pour cela le simulateur TerraNeon à notre outil d'optimisation OptiPol [10].

Simuler l'impact des interactions humaines et montrer qu'une mesure est vertueuse (ou l'optimiser pour qu'elle le devienne) permettront de mieux convaincre les acteurs et décideurs de l'appliquer.

² On parle également d'approche ABM (*Agent-Based Models*) ou basée agents.

⁴ Ainsi dans ce PRD nous nous concentrons sur les impacts des individus. Celui des entreprises et des activités économiques fera l'objet d'un projet ultérieur.

En effet, notre hypothèse est que les individus ont du mal à adopter des pratiques écologiques pour trois raisons principales :

1. leur coût estimé, certain, individuel et immédiat, comparativement à un bénéfice collectif, espéré et lointain.
2. ils ne sont pas convaincus qu'un effort individuel aura un impact sur le réchauffement. De fait, à l'instar des célèbres travaux de T. Schelling sur la ségrégation urbaine [11], seule une simulation pourra montrer les effets multiplicateurs des actions de chaque acteur (individu, entreprise, institution) sur le climat.

La simulation permettra **de montrer aux décideurs, consommateurs, citoyens, les effets de leurs actions** sur le climat, **et de les expliquer** pour mieux pouvoir **convaincre comment collectivement nous pourrions limiter notre impact sur le Climat**. Car les simulations multi-agents ont l'énorme avantage d'être des «boîtes blanches» totalement explicables, contrairement à d'autres approches concurrentes (réseaux neuronaux, ...).

Déroulement de la thèse

Nous proposons les étapes suivantes :

1. Étude bibliographique sur les approches basées agents (ABM) traitant de l'impact des activités humaines sur l'environnement et vice-versa.
2. Recensement des principales actions humaines pouvant potentiellement impacter le climat, en distinguant suivant les différentes catégories : énergie, transports, alimentation, consommation [12,13].
3. Construction de deux typologies croisées : celles des actions humaines (individus et ménages) et celles des effets sur le climat.
4. Proposition d'un modèle multi-agents d'adoption (ou non) des PEI.
5. Obtention (en collaboration avec des spécialistes du domaine) d'un modèle simplifié du climat et de l'environnement (pollution de l'air, etc.). Notons que ce modèle ne sera pas un modèle multi-agents, mais plutôt une modèle à base d'équations différentielles, comme c'est d'usage en modélisation climatique [14,15].
6. Élaboration, implémentation et simulation d'un système couplé (individus + climat / environnement), et étude de son comportement en fonction des différentes classes de Pratiques Écologiques Individuelles établies.

On pourra s'appuyer sur une littérature ABM récente, dans divers domaines : modélisation économique [16,17], agriculture et ruralité [18,19,20], énergie [21], écologie [22], ... (liste non exhaustive).

Parmi les principaux **défis scientifiques** à relever, nous pouvons souligner :

- La **modélisation fine des comportements humains**, des processus d'adoption (ou non) des pratiques d'écologiques, de leur diffusion et des dynamiques d'opinions sous-jacents qui vont conforter ou entraver les adoptions. Il s'agit de prendre en compte à la fois le point de vue individuel, mais aussi les interactions sociales. Pour ce faire, nous pourrions notamment nous appuyer sur les modèles de diffusion d'innovations [7] et de dynamiques d'opinions [8] que nous avons déjà développé au LIP6, dans les projets Coban et Polias respectivement.

- Une **modélisation systémique à large échelle**, au minimum celle d'un pays (e.g. la France). Pour ce faire, nous pouvons nous appuyer sur notre projet NumJobs, actuellement en cours (<http://numjobs.lip6.fr/>), qui inclut une modélisation multi-agents de l'économie complète de la France, à l'échelle de l'économie réelle. Ici l'aspect systémique concerne le **couplage** entre un modèle de la population française (et de ses pratiques écologiques) et un modèle simplifié du climat et de l'environnement. Une question importante ici sera de décider quel degré de réalisme nous viserons dans la reproduction de la population.
- La **validation** du simulateur couplé agents-climat. Comme toujours avec la simulation multi-agents, la question de la validation est délicate, mais nous possédons avec nos projets précédents (WorkSim, NumJobs, Polias,...) sur expérience solide et reconnue en la matière. Ainsi nous avons développé une méthode fondée sur le réalisme des hypothèses de modélisation, la calibration automatique des paramètres du modèle, et les analyses de robustesse et de sensibilité [25]. Ici, il nous faudra adapter la méthode au simulateur couplé, et recueillir les données réelles adéquates pour la validation.

Environnement du PRD

- Pour la thèse, nous pourrions nous appuyer sur un premier embryon de modèle, développés pendant deux stages préliminaires, effectués dans le M2 ANDROIDE en 2020 et en 2021, qui ont confirmé la faisabilité de notre approche. **Le dernier stagiaire en date, Maël Franceschetti, est notre candidat pour ce PRD.**
- Nous sommes en contact et discussion avec des chercheurs spécialistes de la modélisation du climat et de l'environnement, à travers notamment des contacts au sein l'institut SU-ITE (Institut de la Transition Environnementale⁵) de Sorbonne Université et de l'IPSL (Institut Pierre Simon Laplace⁶, une référence mondiale du domaine). Le doctorant pourra notamment s'appuyer sur leur expertise pour l'identification d'un modèle simplifié mais satisfaisant du climat.

Références

- [1] Climate models and their evaluation, IPCC2018 - <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4-wg1-chapter8-1.pdf>
- [2] Climate Interactive, Massachusetts, USA, <https://www.climateinteractive.org/tools/#simulations>
- [3] P. Voosen. *New climate models forecast a warming surge*, *Science* : 222-223, VOL. 364, ISSUE 6437, PP. 222-223, 2019. <https://science.sciencemag.org/content/364/6437/222>
- [4] N. Gilbert. K. G. Troitzsch *Simulation for the social scientist*. Second Edition. Open University Press, 2005
- [5] W. Jager et al. (eds). *Advances in Social Simulation 2015* (Advances in Intelligent Systems and Computing Book 528), Springer, 2017.
- [6] L. Tesfatsion, K.L. Judd, (eds), *Agent-Based Computational Economics, Handbook of Computational Economics, Volume 2*, Elsevier, 2006.
- [7] S. Thiriot et J.-D. Kant (2008). Using associative networks to represent adopters' beliefs in a multi-agent model of innovation diffusion. *Advances in Complex Systems, Vol.11 (2)*, pp. 261-272.
- [8] K.-L. Brousmiche, J.-D. Kant, N. Sabouret and F. Prenot-Guinard (2016). From Beliefs to Attitudes: Polias, a Model of Attitude Dynamics Based on Cognitive Modeling and Field Data. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 19, 4(2). <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/19/4/2.html>

⁵ <https://www.su-ite.eu/>

⁶ <https://www.ipsl.fr/>

- [9] O. Goudet, J.-D. Kant, G. Ballot (2016). WorkSim - a calibrated agent-based model of the labor market accounting for workers' stocks and gross flows. *Computational Economics*, July 2016, pp. 1-48.
<http://link.springer.com/article/10.1007/s10614-016-9577-0>.
- [10] N. De Bufala et J.-D. Kant (2019). An Evolutionary Approach to Find Optimal Policies with an Agent-Based Simulation. *Proc. of the 18th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2019)*, May 13-17, 2019, Montreal, Canada
- [11] Hatna, Erez and Benenson, Itzhak (2012) 'The Schelling Model of Ethnic Residential Dynamics: Beyond the Integrated - Segregated Dichotomy of Patterns' *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 15 (1) 6.
<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/15/1/6.html>
- [12] C. Dugast et A. Soyeux. Faire sa part ? Pouvoir et responsabilité des individus, des entreprises et de l'État face à l'urgence climatique. Rapport Carbone 4. Juin 2019. www.carbone4.com/wp-content/uploads/2019/06/Publication-Carbone-4-Faire-sa-part-pouvoir-responsabilite-climat.pdf
- [13] Rapport 2019 sur l'écart entre les besoins et les perspectives en matière de réduction des émissions, Organisation des Nations Unies. <https://www.unenvironment.org/fr/resources/rapport-sur-lecart-entre-les-besoins-et-les-perspectives-en-matiere-de-reduction-des>
- [14] Goosse H., P.Y. Barriat, W. Lefebvre, M.F. Loutre and V. Zunz, (2008-2010). Introduction to climate dynamics and climate modeling. Chap. 3. http://www.climate.be/textbook/pdf/Chapter_3.pdf
- [15] Dommenget, D. and Nice, K. and Bayr, T. and Kasang, D. and Stassen, C. and Rezny, M. (2019). The Monash Simple Climate Model experiments (MSCM-DB v1.0): an interactive database of mean climate, climate change, and scenario simulations. *Geoscientific Model Development*. 12 (6):2155-2179.
- [16] F. Lamperti, G. Dosi, M. Napoletano, A. Roventini, A. Sapio, Faraway, So Close: Coupled Climate and Economic Dynamics in an Agent-based Integrated Assessment Model, *Ecological Economics*, Volume 150, 2018, Pages 315-339, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921800917314623>
- [17] Cambridge Centre for Climate Change Mitigation Research,
<https://www.4cmr.group.cam.ac.uk/research/projects/agent-based-modelling>
- [18] Berger, Thomas & Troost, Christian. (2013). Agent-based Modelling of Climate Adaptation and Mitigation Options in Agriculture. *Journal of Agricultural Economics*. 65. 10.1111/1477-9552.12045.
https://www.researchgate.net/publication/259545522_Agent-based_Modelling_of_Climate_Adaptation_and_Mitigation_Options_in_Agriculture
- [19] <https://d-nb.info/1065723156/34>
- [20] Hailegiorgis, A., Crooks, A. and Cioffi-Revilla, C. (2018) 'An Agent-Based Model of Rural Households' Adaptation to Climate Change' *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 21 (4) 4 .
<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/21/4/4.html>
- [21] E. J.L. Chappin, L. J. de Vries, J. C. Richstein, P. Bhagwat, K. Iychettira, and S. Khan. 2017. Simulating climate and energy policy with agent-based modelling. *Environ. Model. Softw.* 96, C (October 2017), 421–431.
<https://dl.acm.org/doi/10.1016/j.envsoft.2017.07.009>
- [22] C. Troost, [Agent-based modeling of climate change adaptation in agriculture: A case study in the Central Swabian Jura](https://www.sciencedirect.com/journal/ecological-economics/vol/35/issue/3), *Faculty of Agricultural Sciences*, 2014. <https://www.sciencedirect.com/journal/ecological-economics/vol/35/issue/3>
- [23] International Monetary Fund, IMF Staff Country Reports, France : Selected Issues, 12/07/2016, p. 20 <https://www.imf.org/en/Publications/CR/Issues/2016/12/31/France-Selected-Issues-44081>
- [24] European Commission, Country report France 2017, Commission Staff Working Document, 22/02/2017, p. 33.
<https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/2017-european-semester-country-report-france-en.pdf>
- [25] J.-D. Kant (2019). An agent-based simulation approach to evaluate and design policies. *Keynote Lecture*. 20th International Workshop on Multi-Agent-Based Simulation (MABS 2019), May 2019, Montreal, Canada.
- [26] J.-D. Kant, G. Ballot, O. Goudet (2020). WorkSim, an Agent-Based Model to Study Labor Markets. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 23 (4)