

Débat sur la GÉO-INGÉNIERIE¹

Catherine Jeandel,
directrice de recherche au CNRS, laboratoire LEGOS, Toulouse

INTRODUCTION

Deux grandes familles de projets de géo-ingénierie : les émissions négatives de CO₂ et l'amoinissement de l'effet de serre.

Les accords de Paris ont pour objectif de limiter l'augmentation de température moyenne de l'atmosphère due au réchauffement climatique sous le seuil de 2°C de plus que sa valeur préindustrielle (moyenne entre 1850 et 1900). Depuis 2018, le rapport spécial du GIEC commandé par les « petits pays » a abaissé ce seuil à 1,5°C, démontrant qu'un réchauffement de 2°C mettrait particulièrement en danger les zones intertropicales et polaires. Dans les deux cas, mais encore plus dans le second puisqu'il s'agit d'une réduction plus drastique, remplir les objectifs fixés impose des « émissions négatives » c'est-à-dire de piéger (ou d'éliminer) du CO₂ de l'atmosphère.

Cet enjeu conduit naturellement au développement de techniques intitulées « Negative Emission Technologies » (ou NETs). On notera ici qu'il s'agit de « techniques » et non de recherches. Ces techniques sont connues en France sous le nom d'*élimination du CO₂*. Ces technologies sont dans la grande majorité en cours de développement même si quelques prototypes commerciaux commencent à voir le jour (ORCAS de ClimeWorks en Islande, Prototype US dans le Dakota, etc.). La plupart présentent un aléa associé qui incite à l'application du principe de précaution. Sans être exhaustif, nous balayons ci-après quelques exemples parmi les plus discutés dans les médias (section 1).

Nous détaillons dans un second temps la face cachée de certaines de ces techniques qui poussent les industriels et grandes entreprises numériques ou commerciales à justifier leurs émissions par le biais de la « compensation carbone », dont nous exposerons les dangers et limites dans la section 2.

Ces deux premières sections se sont basées sur le travail collectif de Berlan *et al.*, 2022. Les rapports sur la géo-ingénierie dans le monde, proposés par Min Ha Duong (2013) Bekki *et al.* (2021) et M. de Guglielmo Weber (2023) sont aussi riches en détails.

1 « Terme qui se rapporte à un vaste ensemble de méthodes et de techniques visant à modifier délibérément le système climatique pour lutter contre les effets du changement climatique » (IPCC, 2014).

Ces émissions négatives ne doivent pas être confondues avec d'autres projets (qui défraient aussi la chronique) d'ensemencement de l'atmosphère par des aérosols dans le but d'atténuer les effets du réchauffement (effet parasol) en modifiant l'albédo². Les contraintes imposées par la trajectoire 1,5°C font que des recherches ont repris très récemment sur la possibilité de modifier le bilan énergétique de la Terre en modifiant l'albédo de la planète ou en réduisant l'effet de serre (section 3).

La section 4 décrit l'état actuel des recherches et ouvre les réflexions sur ces manipulations du climat, qui sont sujettes à de nombreux débats que nous ébauchons aussi.

1. QUELQUES PROJETS DE TECHNIQUES D'ÉMISSION NÉGATIVE (NET)

1.1 La plus prisée par les entreprises et surtout les « philanthropes » tels que Microsoft, Amazon... est la bioénergie. Le principe est de combiner un processus naturel : la photosynthèse avec un dispositif de captage de CO₂ industriel. Le processus naturel intervient dans un premier temps à travers l'utilisation de cultures (colza, switchgrass, miscanthus, cannes, etc.) pour créer de la biomasse végétale. Se distinguent ensuite deux cas. Dans celui de la bioénergie, cette biomasse est convertie en biocarburant sous forme de bioéthanol ou biodiesel. Le bilan de l'opération en termes d'émissions est presque neutre. Dans l'autre cas, la biomasse végétale est brûlée dans des centrales à biomasse pour créer de l'énergie électrique. Les émissions de CO₂ issues de la combustion sont captées pour l'enfouir dans des failles géologiques. Cette famille de techniques est appelée « Biomasse Energy with Carbon Capture and Storage » (BECCS). Cependant, respecter les trajectoires (2 ou 1,5°C) demande de déployer ce type de projet de façon faramineuse. Les surfaces de forêt requises sont telles qu'il faudrait utiliser jusqu'à un tiers des terres agricoles mondiales, augmentant la pression sur les ressources alimentaires et la biodiversité. Enfin, des études très récentes soulèvent le risque du stress hydrique pour des techniques très demandeuses en eau.

1.2 La reforestation : très populaire auprès des philanthropes déjà cités et des grandes compagnies industrielles, entreprises de transport voire tertiaires. Planter des arbres « permettrait » à Air France de compenser ses 450 vols nationaux quotidiens. Face à l'urgence climatique, la frénésie de « greenwashing » sylvestre est réelle. Or les forêts posent leurs propres

2 L'albédo est le pouvoir réfléchissant d'une surface, c'est-à-dire le rapport du flux d'énergie lumineuse réfléchi au flux d'énergie lumineuse incidente (Wikipédia).

problèmes : le temps de croissance des arbres fait qu'ils ne seront pas efficaces assez vite, l'extension des forêts se ferait au détriment des terres agricoles, les forêts elles-mêmes peuvent se transformer en émettrices de carbone car plus fragiles sous l'effet du réchauffement. Un autre risque est que certaines essences détériorent la qualité de l'air... En d'autres termes, les spécialistes préfèrent de loin l'arrêt de la déforestation.

1.3 La manipulation des océans : que ce soit la fertilisation par le carbonate de calcium ou ses dérivés chimiques (pour stimuler la soustraction directe du CO_2 atmosphérique par l'océan) ou celle induite par le fer (pour stimuler le développement des algues et donc la séquestration du CO_2 par l'activité biologique), ces projets sont aussi irréalistes que potentiellement dangereux.

La fertilisation par le carbonate de calcium vise à augmenter l'alcalinité de l'océan. La théorie suggère que cette technique est très efficace par rapport aux autres techniques (le CO_2 se dissout très facilement dans l'eau) et qu'elle a le bénéfice de contrecarrer l'acidification des océans.

Cet effet « vertueux » a malheureusement généré un effet d'aubaine des industriels et des philanthropes voulant compenser leurs émissions de CO_2 . Par exemple, les bourses « Shell » ou le « Xprize » de la Fondation Musc ont subventionné les premières études (ou les premiers développements commerciaux) bien avant qu'un consensus scientifique émerge sur les risques encourus de l'ajout de pollution (métaux lourds, nutriments, radioactivité) combinés avec l'alcalinité. La fertilisation par le fer risque de conduire à l'anoxie des eaux (l'oxygène étant consommé par les bactéries qui détruisent la matière organique morte). En outre, l'immensité de l'océan doublée de la faible solubilité du fer conduirait à réinjecter en permanence celui-ci. De plus, apporter du fer ne servirait à rien si un autre nutriment (ex : la silice) est absent des eaux de surface, bloquant le développement des diatomées, très efficaces pour entraîner le carbone en profondeur : la chimie marine est bien trop complexe pour accrédi-ter un raisonnement basé sur un seul nutriment ! Enfin, pour les deux méthodes, il s'agit de déployer des myriades de super bateaux-citernes, avec les conséquences en émission de gaz à effet de serre (GES) associées. En outre, manipuler la chimie de surface a potentiellement des conséquences inconnues sur la biodiversité tant les modifications de la chimie de l'eau posées par ces approches sont sans commun analogue sur l'histoire récente de la Terre. Si les Académies des sciences et sociétés savantes internationales ont clairement pris position contre le développement de ce type de manipulation, certains pays comme les USA ou l'Allemagne continuent de financer des essais (Bekki *et al.*, 2021)

1.4 Les projets de capture de CO₂ émis par les installations industrielles pour le transporter par gazoduc vers des sites géologiques se multiplient aussi. Dix-neuf « usines » de ce type existent dans le monde, cinquante sont en construction. Le coût énergétique et les émissions générées par de telles installations ne compensent pas aujourd'hui le flux de carbone piégé et le nombre de sites de stockage est limité ; cependant les effets secondaires estimés à ce jour ne sont pas insurmontables et les recherches menées comportent a priori un risque moindre que les projets cités plus haut.

1.5 Le piégeage direct du gaz carbonique atmosphérique. Ce piégeage repose sur un procédé développé en Suisse et dont la première installation a été faite en Islande. En 2021, une usine baptisée Orca, en référence au mot islandais « orka » signifiant « énergie », a vu le jour. Elle peut soustraire 4000 tonnes par an de CO₂ de l'atmosphère, soit les émissions annuelles de 24 américains (1,75 million de litres d'essence) ce qui reste symbolique (même si prometteur). L'installation, située près de la capitale islandaise, est équipée de douze ventilateurs qui aspirent l'air. Le CO₂ est ensuite filtré et chauffé pour être séparé de l'air « pur », qui est, lui, rejeté dans l'atmosphère. Le dioxyde de carbone est ensuite mélangé à de l'eau pour être injecté à 1000 mètres de profondeur, dans le basalte, où il se transformera en roche en deux ans environ. Une réaction chimique du gaz avec le calcium, le magnésium et le fer contenus dans le basalte permet au CO₂ de s'insérer dans la roche brune et poreuse sous la forme de cristaux blancs calcaires. Cette technique « de fossilisation » du carbone par altération des basaltes reproduit en deux ans seulement un processus naturel appelé la minéralisation qui peut prendre plusieurs milliers d'années. Le CO₂ est donc retiré de l'atmosphère de manière permanente. Cette technique reste encore limitée par les coûts énergétiques induits par le fonctionnement de l'usine.

1.6 Un espoir : le Biochar ? Le Biochar s'inspire de méthodes très anciennes. Identifié par les archéologues en Amazonie, baptisé terra preta, il semble être utilisé depuis 800 ans avant notre ère par les paysans à des fins de fertilisation des sols tropicaux, fortement lessivés et réputés comme très pauvres (latérites). Le principe aujourd'hui est de générer un charbon de bois équilibré en teneurs en carbone, azote et phosphore par pyrolyse sans oxygène de déchets végétaux (ex : café, canne à sucre...). Ce fertilisant, qui n'a pas émis de CO₂ lors de sa fabrication, est ensuite mélangé aux sols pour en augmenter la fertilité, ce qui accroît leur capacité à fixer du CO₂ donc à lutter contre l'effet de serre tout en produisant de l'agriculture nourricière. C'est donc, au moins sur le papier, gagnant-gagnant et de nombreuses « start up » se développent autour du Biochar. Cependant, comme pour

toute solution « miracle », des gardes fous sont nécessaires : bien veiller aux équilibres minéraux du « charbon » (ni trop ligneux, ni trop organique : tous les déchets végétaux ne conviennent pas) et attention à ne pas détruire de la biomasse pour générer du Biochar si celui-ci est intégré dans la grande foire des marchés carbone. De nombreux articles sont proposés sur le Biochar sur internet, dont celui de wikipedia (<https://fr.wikipedia.org/wiki/Biochar>).

2. LA COMPENSATION : NOTRE IMPACT SUR LE CLIMAT EST-IL MONNAYABLE ?

La « compensation carbone » a pour objectif de compenser les émissions de gaz à effet de serre par des mesures de séquestration du carbone ou d'évitement ou de réduction d'autres émissions. Les processus de séquestration les plus prisés aujourd'hui sont décrits dans la section précédente. La compensation carbone a été formalisée dans le protocole de Kyoto en 2017. Comme la compensation écologique (qui contrebalance les impacts sur la biodiversité), elle répond à des dispositifs réglementaires. C'est aussi un argument de communication très utilisé par les États et les entreprises. Cependant, la compensation n'est pas sans défaut. En premier lieu, la compensation propose souvent de réparer des dégradations faites au présent par des actions qui ne seront efficaces que dans le futur. Ce décalage est illustré par la reforestation : une plantation d'arbres mettra 5 à 10 ans avant de capter du CO₂ de façon efficace. De plus, le flux de carbone qu'une forêt peut capturer à l'hectare est limité, comme discuté en 1.1.

En outre, la mise en œuvre concrète de la compensation carbone soulève un certain nombre de questions éthiques, illustrées par l'exemple du secteur aéronautique : le programme CORSIA (*Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation*), vise à imposer la compensation carbone à l'aviation internationale. De nombreuses études ont souligné son inefficacité, ce qui n'empêche pas le secteur aéronautique d'en faire le pilier pour vanter sa politique de réduction des GES. Un autre problème d'éthique sociale réside entre le caractère « délocalisé » des impacts des GES et celui des compensations. Les grandes entreprises internationales émettent surtout dans les « pays du Nord » et mènent des reforestations souvent douteuses, la plupart du temps dans les « pays du Sud ». On peut citer par exemple les reforestations de monocultures d'eucalyptus sur des terrains pas forcément adaptés à leur culture (ex : savanes, zones arides). Et c'est ainsi que l'on peut faire peser sur les habitants du Sahel les pollutions engendrées entre Paris et New-York. Enfin, il n'échappe pas à l'analyse que compenser est à mettre en regard avec ce qui « justifie » la compensation. En d'autres termes, les

entreprises émettent et compensent, deux actions opposées et qui peuvent donner l'illusion que l'on peut continuer à polluer, puisqu'on compense. Le message politique sur le caractère urgent et essentiel de la sobriété en est totalement brouillé. Ce brouillard entretient le déni collectif face aux transformations sociétales qu'il est plus qu'urgent de mettre en œuvre.

3. LA MODIFICATION DU RAYONNEMENT SOLAIRE (SOLAR RADIATION MANAGEMENT, OU SRM)

La SRM n'est pas déployée à ce jour et fait l'objet d'études académiques visant à contrecarrer le réchauffement climatique. En effet, nous allons le voir, les risques encourus sont grands et le niveau d'acceptation social bas.

Se basant sur l'observation des effets de panaches de poussières sulfatées consécutifs à des éruptions volcaniques majeures (ex : Pinatubo en 1991, qui a conduit à un refroidissement de plusieurs dixièmes de degrés), les protocoles proposent d'injecter des aérosols dans l'atmosphère afin de créer un gigantesque « parasol » autour de la planète. Cela peut être de l'eau au-dessus des océans afin d'augmenter la réflectivité des nuages marins (Latham *et al.*, 2012), « vaporisée » à partir de navires injecteurs. Ou encore des aérosols sulfatés, comme l'ont développé des équipes britanniques entre 2010 et 2012 (projet SPICE vite arrêté par un souci de brevet), alors que les Russes sont allés plus loin : l'académicien Yuri A. Izrael (2009a,b,c ;2011) et son équipe ont pratiqué une recherche de terrain en géo-ingénierie sur la gestion du rayonnement solaire. L'injection d'aérosols s'est faite à partir d'hélicoptères à 200 m d'altitude.

Dans le contexte de la trajectoire 1,5°C, la SRM pourrait être vue comme une solution de court terme permettant de gagner du temps pour mettre en place des techniques de mitigation efficaces (Lawrence *et al.*, 2018). L'idée étant de dépasser un niveau de température globale devenu trop dangereux.

C'est dans ce contexte que des approches plus « locales » ont commencé à être étudiées. En 2021, une mission d'ensemencement de nuages marins a été réalisée en Australie au-dessus de la Grande barrière de corail. Le but était de voir si ce genre de technique pouvait être combiné à des prévisions météorologiques afin de limiter les impacts des vagues de chaleur marines sur les écosystèmes coralliens.

Ce regain d'intérêt pour la SRM pose une question d'éthique majeure. En effet, le coût d'injection d'aérosols sulfatés pendant 15 ans – en incluant la

R&D – est équivalent à celui des dégâts dus au feu de forêt « camp fire » de Californie en 2018. Une autre comparaison : il ne représente que 15 % des coûts induits par les cyclones aux USA. En d'autres termes, il paraît faible, ce qui le rend attractif. En effet, résoudre le problème du CO₂ à l'échelle globale par un changement de société doublé de la mise en place de NET (voir ci-dessus) coûterait au moins un ordre de grandeur de plus. Une des difficultés est que les techniques de gestion du rayonnement solaire se rapprochent – ne serait-ce que dans l'esprit des gens – des techniques de modification de la météorologie, dont la pratique est acceptée et continue dans de nombreux pays, malgré une efficacité qui est loin d'être établie. Enfin, si l'on devait avoir recours à la gestion du rayonnement solaire, celle-ci présenterait de nombreux effets secondaires, incertitudes, risques et défauts. Beaucoup d'éléments semblent indiquer qu'elle conduirait à une diminution faible, mais significative, des précipitations mondiales (avec de plus grandes différences à l'échelle régionale). On pourrait probablement observer aussi une déperdition modeste d'ozone stratosphérique polaire associée à la gestion du rayonnement solaire par des aérosols stratosphériques. Quoi qu'il en soit, ce type de gestion ne préviendrait ni les incidences du CO₂ sur les écosystèmes, ni l'acidification des océans qui ne sont pas liées au réchauffement (car les gaz à effet de serre continueraient d'être présents dans l'atmosphère). Il pourrait également y avoir d'autres conséquences inconnues à ce jour.

Des questions de gouvernance sont aussi posées, telles que résumées par Ludovic Royer (2021).

« Bien que le recours aux technologies d'ingénierie climatique fasse peser des risques majeurs à l'échelle globale, celles-ci sont perçues par certains acteurs comme des moyens de lutte efficace contre les effets des changements climatiques. De nombreux projets sont d'ores et déjà à l'œuvre dans le monde malgré l'absence d'accords internationaux permettant d'encadrer la recherche et le déploiement de ces technologies. Dès lors, la question de la gouvernance est centrale. Deux visions semblent se faire face concernant la manière la plus efficace d'encadrer le développement de ces technologies. D'un côté, certains acteurs appellent à une régulation de type volontaire, afin d'écartier tout risque d'intervention législative débouchant sur un encadrement plus ou moins strict. De l'autre, le rôle des pouvoirs publics, aux niveaux national et international, et leur capacité à légiférer, sont avancés comme essentiels pour assurer la recherche de l'intérêt général. La probabilité que soit créé un traité international paraît aujourd'hui assez faible. Pour autant, certains États conscients des risques encourus, comme la Suisse, souhaitent entamer des discussions sur la scène internationale. Par le

passé, l'usage d'autres types de technologies avait déjà forcé la communauté internationale à imposer un cadre juridique contraignant, comme ce fut le cas du nucléaire. Si le contexte géopolitique est différent, certains outils pourraient servir d'exemple pour la géo-ingénierie. Quel que soit le cadre de gouvernance, le recours à l'ingénierie climatique n'est pas anodin. Si ces technologies sont déployées, il ne sera plus possible de faire marche arrière, transformant radicalement nos rapports à la nature et au vivant ».

4. BASES DE RÉFLEXIONS SUR LES POSSIBILITÉS D'ENCADREMENT DE LA GÉO-INGÉNIERIE : LES PRINCIPES D'OXFORD

Les méthodes suggérées ci-dessus soulignent que « réparer » les effets d'une économie carbonée est a priori complexe, cher, impactant et que ces impacts sont encore incertains. Les projets actuels ne sont pas rentables. Cependant, l'exigence de développer des émissions négatives pour respecter les trajectoires 2°C voire 1,5°C fait que même les plus prudents des climatologues ne nient pas le besoin de recourir aux « NET » (alors que l'engouement pour les SRM est bien moindre : encore une fois ils ne sont pour l'instant « qu'étudiés »). Par conséquent, des consortiums de chercheurs ont tenté d'établir des principes pour encadrer la géo-ingénierie. On citera ici les « principes d'Oxford » ; ceux-ci s'énoncent comme suit :

1. Geoengineering to be regulated as a public good
2. Public participation in geoengineering decision-making
3. Disclosure of geoengineering research and open publication of results
4. Independent assessment of impacts
5. Governance before deployment

Source : Oxford Geoengineering Programme <http://www.geoengineering.ox.ac.uk>

Principe 1 : La géo-ingénierie doit être régulée comme un bien public

Si le développement de techniques de géo-ingénierie se fait par le secteur privé (pas exclu par ce principe), la régulation de telles techniques devrait être contrôlée par les institutions appropriées et publiques. À noter que les expériences privées sur la fertilisation en fer ou toute autre manipulation du climat échappent à ce principe.

Principe 2 : Participation du public à la prise de décision sur la géo-ingénierie

Il s'agit ici de transparence : avant de développer toute technologie, il est recommandé d'informer, de consulter et d'obtenir le consentement éclairé

préalable de ceux qui sont touchés par les activités de recherche. Si la technique touche un territoire (captage dans réservoir local), une consultation territoriale devrait suffire ; si la technique est mondiale (manipulation de l'albédo de la planète), un accord mondial serait requis.

Principe 3 : Révélation des résultats de la recherche en géo- ingénierie et libre accès aux résultats publiés

La mise à disposition des projets et résultats des développements technologiques aurait pour but une meilleure compréhension (appropriation) du public, voire des décideurs. Ce principe rejoint les débats sur l'intégrité scientifique (voir la recommandation du COMETS sur ce sujet). Cette mise à disposition des résultats n'est pas non plus dans la culture de la recherche privée. En outre, les journaux scientifiques devraient être accessibles gratuitement (principe de la Science Ouverte) ce qui n'est pas le cas et est un frein à la diffusion des résultats.

Principe 4 : Évaluation indépendante des impacts

L'évaluation des impacts de la technologie développée doit non seulement être faite, mais produite par un organisme indépendant de ceux qui développent ladite technologie. Comme pour le principe n°2, l'échelle du dispositif mis en place pour l'évaluation dépendra de l'échelle concernée par la technique (territoriale ou mondiale).

Principe 5 : La gouvernance avant le déploiement

Toute décision en matière de déploiement ne doit être prise qu'avec des structures de gouvernance solides déjà en place, en utilisant les règles et les institutions existantes chaque fois que possible.

Quelques références

Bekki S., Boucher, O., Jammes, L., Séférian, R., et Viovy, N., « INTERVENTIONS » SUR LE CLIMAT : ÉTAT DES LIEUX DES INITIATIVES AUX ÉTATS-UNIS. Rapport d'ambassade, Service pour la Science et la Technologie – Ambassade de France aux États-Unis.

Berlan, A, G. Carbou, L. Teulières, 2022, Greenwashing, Manuel pour dépolluer le débat public, Ouvrage collectif, collection Anthropocène, Seuil

Marine de Guglielmo Weber M., 2023, Problèmes et risques de la géo-ingénierie solaire https://www.iris-france.org/wp-content/uploads/2023/02/19_ProgClimEnerSec.pdf

COMETS (avis du), 2021, Science, risques et Principe de Précaution <https://comite-ethique.cnrs.fr/2470-2/>

Duong Min-Ha, 2013, Les recherches en géo-ingénierie dans le monde Rapport d'étude dans le cadre de l'ARP RÉAGIR https://cmc.ipsl.fr/wp-content/uploads/2017/09/Rapport_compl%C3%A9mentaire-g%C3%A9oing%C3%A9nierie-dans-le-monde.pdf

Izrael, Y.A. *et al.*, 2011. A field experiment on modeling the impact of aerosol layers on the variability of solar insolation and meteorological characteristics of the surface layer. *Russian Meteorology and Hydrology*, 36(11), p. 705-711.

Izrael, Y.A., Zakharov, V.M., Petrov, N.N., Ryaboshapko, A.G., Ivanov, V.N., Savchenko, A.V., Andreev, Y.V., Puzov, Y.A., *et al.*, 2009a. Field experiment on studying solar radiation passing through aerosol layers. *Russian Meteorology and Hydrology*, 34(5), p. 265-273.

Izrael, Y.A., Zakharov, V.M., Petrov, N.N., Ryaboshapko, A.G., Ivanov, V.N., Savchenko, A.V., Andreev, Y.V., Eran'kov, V.G., *et al.*, 2009b. Field studies of a geo-engineering method of maintaining a modern climate with aerosol particles. *Russian Meteorology and Hydrology*, 34(10), p. 635-638.

Izrael, Y.A., Ryaboshapko, A.G. & Petrov, N.N., 2009c. Comparative analysis of geo-engineering approaches to climate stabilization. *Russian Meteorology and Hydrology*, 34(6), p. 335-347 *et al.*, Marine Cloud Brightening, 2012, *Physical Transactions of the Royal Society A*, <https://doi.org/10.1098/rsta.2012.0086>

Lawrence, M.G., Schäfer, S., Muri, H. *et al.* Evaluating climate geoengineering proposals in the context of the Paris Agreement temperature goals. *Nat Commun* 9, 3734 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05938-3>

Royer, L., 2021, https://www.iris-france.org/wp-content/uploads/2021/02/G%C3%A9o-ing%C3%A9nierie-_-NOUVEL-enjeu-de-gouvernance-internationale-Royer-Ludovic.pdf

L'auteure remercie sincèrement Roland Séférian (Méto-France, Toulouse) pour sa relecture attentive et enrichissante du document.