



**HAL**  
open science

## Regards croisés sur les concepts d'ingénierie environnementale et d'ingénierie climatique

Thierry Dutoit, Roland Séférian, Alexandra Langlais, Marion  
Lemoine-Schonne

### ► To cite this version:

Thierry Dutoit, Roland Séférian, Alexandra Langlais, Marion Lemoine-Schonne. Regards croisés sur les concepts d'ingénierie environnementale et d'ingénierie climatique. Langlais Alexandra; Lemoine-Schonne Marion. Construire le droit des ingénieries climatiques. Au croisement des enjeux climatiques et écosystémiques, UGA éditions, pp.17-29, 2024, 9782377474691. 10.4000/books.ugaeditions.33757 . hal-04476113

**HAL Id: hal-04476113**

**<https://cnrs.hal.science/hal-04476113v1>**

Submitted on 17 Dec 2024

**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.

Entretien préliminaire

Regards croisés  
sur les concepts  
d'ingénierie  
environnementale et  
d'ingénierie climatique

Thierry Dutoit  
Roland Sférian

Interview réalisée par  
Alexandra Langlais  
Marion Lemoine-Schonne

Les chercheurs Thierry Dutoit et Roland Séférian présentent et comparent dans cet entretien les concepts d'ingénierie environnementale et d'ingénierie climatique. L'ingénierie environnementale regroupe une multitude d'actions souvent locales et surtout axées sur la restauration de la biodiversité et des services écosystémiques, mais dont les effets cumulés auront un impact indéniable sur les changements climatiques. L'ingénierie climatique regroupe pour sa part l'ensemble des techniques et pratiques mises en œuvre ou projetées dans une visée corrective à grande échelle d'effets de la pression anthropique sur l'environnement. Elle recoupe certaines approches centrales à l'ingénierie environnementale, notamment en ce qui concerne la restauration des biomes et le maintien d'espèces clés de voûte pour renforcer la capacité des biomes à stocker du carbone.

*Comment définissez-vous l'ingénierie environnementale et l'ingénierie climatique ?*

**Thierry Dutoit (T. D.) :** On peut trouver une définition de l'ingénierie environnementale accessible sur Wikipédia à savoir «... la branche de l'ingénierie qui étudie les problèmes de la planète de forme scientifique et intégrée, considérant ses dimensions scientifiques : chimiques, physiques, écologiques, biologiques, géologiques, sociales, économiques et technologiques, avec l'objectif de promouvoir un développement durable. Il s'agit donc d'une branche des sciences environnementales basée sur la création, application et gestion des procédures, produits et services technologiques destinés à la prévention, le contrôle et le remède de problèmes environnementaux; au développement de l'usage durable de ressources naturelles dans les processus productifs et de consommation, en ayant comme priorité l'amélioration de la qualité de vie avec la préservation des ressources naturelles».

Ces termes et cette définition semblent cependant pour moi surtout utilisés dans le monde des grandes entreprises et de l'ingénierie car, dans le domaine de la recherche en

écologie, on parle plutôt, de manière plus ciblée, d'ingénierie écologique qui est alors définie comme « l'ensemble des connaissances scientifiques, des techniques et des pratiques qui prend en compte les mécanismes écologiques, appliqué à la gestion des ressources, à la conception et à la réalisation d'aménagements ou d'équipements, et qui est propre à assurer la protection de l'environnement » (*Journal officiel de la République française* du 18 août 2015). On parle aussi plus couramment d'actions par et pour la nature ou encore de solutions fondées sur la nature.

Ces définitions sont plus ou moins synonymes, et ce sont leurs points communs qu'il faut retenir plutôt que les différences qui existent par rapport à l'emploi de tel ou tel mot, ou de telle ou telle structure de phrase.

L'écologie en tant que science qui « étudie les relations des êtres vivants entre eux et avec leurs milieux » (Haeckel, 1866) et toutes ses déclinaisons appliquées (écologie industrielle, ingénieriale, etc.) est bien évidemment la discipline scientifique qui doit être au centre des actions d'ingénierie, qu'elle soit écologique ou environnementale, même si toutes les autres disciplines scientifiques sont nécessaires pour une approche plus interdisciplinaire *via* la co-construction de questions de recherches partagées pour la mise en place d'un développement plus durable ou pour accompagner la nécessaire transition écologique de nos sociétés.

Il s'agit alors, dans ces domaines, d'hybrider les sciences de l'ingénieur avec l'écologie pour créer une véritable écologie ingénieriale basée sur les concepts et théories de l'écologie au niveau scientifique. Mais également de prescrire les nouvelles connaissances ainsi produites au niveau de l'ingénierie dans les bureaux d'études pour enfin les appliquer sur le terrain dans le cadre du génie écologique (Rey, 2017).

**Roland Séférian (R. S.) :** L'ingénierie climatique, souvent identifiée de façon restrictive sous le terme de géo-ingénierie, correspond à l'ensemble des techniques et pratiques mises en œuvre ou projetées dans une visée corrective à grande

échelle d'effets de la pression anthropique sur l'environnement. Il importe de bien distinguer la géo-ingénierie, qui met en jeu des mécanismes ayant un impact global sur le système planétaire terrestre, des techniques et pratiques d'atténuation ou ayant simplement un impact local.

Le terme de géo-ingénierie recouvre un ensemble de technologies apparues dans le cadre de mesures envisagées pour lutter à l'avenir contre le réchauffement climatique. Le but commun de ces technologies est de ralentir, voire de stopper le réchauffement de la biosphère par le biais d'une manipulation à l'échelle globale du système Terre (Keith & Dowlatabadi, 1992). Les moyens envisagés pour atteindre cet objectif peuvent être classés selon deux visées principales : soit l'on agit sur le réfléchissement solaire, on parle alors de gestion du rayonnement solaire ; soit l'on agit sur la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, dans ce cas on parle de technique de retrait de CO<sub>2</sub> de l'atmosphère. Aujourd'hui, le terme de géo-ingénierie est de plus en plus abandonné au profit de la terminologie et de l'appellation des techniques elles-mêmes.

*Quelles technologies, pratiques voire expérimentations visent-elles ?*

**T. D. :** L'ingénierie écologique ou environnementale recoupe un très vaste panel d'interventions allant des opérations de restauration écologique de la biodiversité, des fonctions ou services écosystémiques qu'elle fournit jusqu'à la création de nouveaux écosystèmes comme les toits ou façades verts en milieu urbain, mais également toutes les opérations de dépollution basées sur l'utilisation du vivant comme la phyto-épuración des eaux usées en lagunage naturel ou encore la phyto-extraction des sols pollués par des éléments traces métalliques ou des éléments radioactifs.

**R. S. :** Comme énoncé plus haut, il faut distinguer les familles de techniques selon qu'elles agissent sur le bilan énergétique de la Terre ou sur la teneur des gaz à effet de serre.

Tous les projets prévoyant une intervention sur la concentration de CO<sub>2</sub> ne relèvent pas de la géo-ingénierie *stricte sensu*. Le captage et le stockage du carbone constituent une technologie déjà utilisée à l'échelle locale. Elle consiste à séparer le CO<sub>2</sub> de la fumée de combustion issue des centrales à charbon, par exemple, pour le séquestrer dans le sol ou dans les grands fonds marins, principalement en lieu et place des réservoirs de gaz et de pétrole prélevés. Les spécialistes ne rangent pas d'ordinaire une telle technologie dans le domaine de la géo-ingénierie (Volken, 2008). Cette famille de technique inclut également toutes les approches basées sur la nature telle que l'afforestation ou l'agriculture orientée climat.

D'autres technologies de la géo-ingénierie visent non pas le stockage de CO<sub>2</sub> atmosphérique, mais le réfléchissement solaire. L'une d'elles, celle du Prix Nobel hollandais Paul Crutzen (2006), s'inspire des effets des éruptions volcaniques. Elle consiste à projeter plusieurs millions de tonnes d'hydrogène sulfuré (H<sub>2</sub>S) dans la stratosphère. La réaction avec l'air produirait du dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) qui resterait ainsi en suspension. Il se formerait alors, à l'image de l'éruption du volcan Pinatubo en 1991, un écran permettant de diminuer sensiblement la température au sol durant une période d'un à deux ans. Les tonnes d'hydrogène sulfuré seraient transportées dans la stratosphère par des ballons.

*Ces techniques existent-elles déjà ? À quel stade en sont leurs niveaux de recherche, développement et déploiement ?*

**T. D. :** Contrairement au génie civil, dont la naissance pourrait être datée aux années qui ont suivi la Première Guerre mondiale, l'ingénierie écologique telle que définie

précédemment ne prend réellement son essor que dans les années 1980 après les crises énergétiques et socio-économiques des années 1970. Il ne faut cependant pas oublier que les connaissances liées aux savoirs empiriques quant à l'utilisation du vivant au bénéfice de l'homme peuvent remonter jusqu'à la période antique où l'on connaissait déjà le rôle fixateur du sol des arbres face aux processus érosifs liés au surpâturage ou aux cultures laissant le sol nu une grande partie de l'année.

La très grande majorité des techniques qui pourraient être opérationnelles à ce jour, en ingénierie écologique, sont donc encore en phase expérimentale bien que certaines, comme le lagunage naturel des eaux usées ou l'utilisation du génie végétal pour la fixation des berges et pentes soumises à l'érosion, soient mises en place à grande échelle depuis de nombreuses années. Elles ont su prouver leur durabilité et supériorité face aux techniques issues du génie civil (dépollution physico-chimique, enrochement des berges).

**R. S. :** Le type de maturité des techniques dépend énormément de la technique elle-même. Dans le cas des techniques de retrait de CO<sub>2</sub> de l'atmosphère, que ce soit par des procédés chimique/industriel ou naturel (agroforesterie), le niveau de maturité de ces techniques ou approches est relativement important à l'échelle locale. L'enjeu et le manque de connaissances se reportent donc sur le déploiement à plus grande échelle de ces approches et les impacts collatéraux que ce genre d'approches et techniques pourraient engendrer.

En ce qui concerne les techniques de gestion du rayonnement solaire, le niveau de maturité est bien plus faible même si tous les ingrédients nécessaires au déploiement de cette technique sont matures et grandement inféodés aux technologies aérospatiales. Cette famille de techniques est principalement étudiée à l'aide de simulation numérique.

*Quels sont les différences et les points de convergence entre ingénierie climatique et environnementale ?*

**T. D. :** L'ingénierie écologique ou environnementale se déploie dans bien d'autres domaines que dans celui de la lutte contre le réchauffement climatique, mais on peut dire qu'elles contribuent toutes d'une certaine façon à cet objectif car les toitures végétalisées apportent bien de la biodiversité en ville mais permettent aussi d'accroître la durabilité d'un bâtiment et de réduire l'albédo. Toute opération d'ingénierie environnementale peut avoir une action favorable vis-à-vis de la lutte contre les changements climatiques. Restaurer une tourbière pour les plantes et insectes rares qu'elle abrite permet aussi de fixer plus de carbone ; on pourrait multiplier ainsi les exemples à l'infini. C'est donc la multiplicité des projets d'ingénierie écologique qui permettra d'avoir une action globale sur le climat en lieu et place des projets titanesques et quelquefois farfelus issus de la géo-ingénierie (miroirs géants dans l'espace, injection de particules réfléchissantes dans la stratosphère, capture directe du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, etc.).

Ces techniques sont basées sur l'utilisation de matériaux renouvelables ou recyclés et souvent dans des systèmes d'économie circulaire. Même si elles peuvent avoir prioritairement des objectifs concernant la conservation ou la restauration de la biodiversité ou de certains services écosystémiques, *in fine*, elles peuvent avoir des effets bénéfiques pour lutter contre les changements climatiques *via* l'augmentation de la séquestration du carbone dans les arbres ou encore la réduction de l'albédo ou de la bulle de chaleur en ville *via* l'accroissement des surfaces végétalisées.

**R. S. :** L'ingénierie climatique a une portée sur la géophysique de la Terre alors que l'ingénierie environnementale porte plus sur la biodiversité et l'habitabilité des grands biomes. Ces deux types d'ingénieries soutiennent des enjeux autour de l'adaptation aux changements environnementaux et de

l'atténuation des émissions. Par contre, il me paraît plus évident qu'il existe des vraies synergies et points d'ancrage entre les techniques d'ingénierie climatique basées sur la nature et l'ingénierie environnementale. La restauration des biomes et le maintien d'espèces clés de voûte pour renforcer la capacité des biomes à stocker du carbone sont un bon exemple de synergie.

Comme mentionné plus haut, chacune des approches n'est pas un va-tout en soi, elles doivent être utilisées avec raison. C'est ce que le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), dans son rapport spécial sur l'usage des terres, considère comme une « bonne pratique » dans un objectif de limiter les impacts collatéraux. Chacune de ces approches doit être mise en regard aussi de nos modes de consommation et de nos modes de vie.

Pour le déploiement des approches basées sur la nature telles que l'agriculture orientée climat, il y a et il y aura des tensions sur l'allocation de terres. Une transition vers des diètes moins carnées permettra de libérer des terres qui pourront ensuite être utilisées à des fins de restauration ou de séquestration de carbone par les écosystèmes.

En ce qui concerne les approches basées sur le rayonnement solaire, même si ces dernières sont encore un tigre de papier et donc bien loin d'être déployées dans le monde réel, elles doivent s'accompagner de réductions massives de nos émissions de gaz à effet de serre.

*Sur un plan scientifique, comment peut-on évaluer la faisabilité technique, le niveau de risques pour l'environnement et la santé humaine versus les opportunités offertes pour l'environnement et le climat ?*

**T. D. :** Manipuler le vivant aux plus grands niveaux d'organisation (populations, communautés, écosystèmes, paysages) peut s'avérer aussi dangereux que les manipulations génétiques. Dans un projet de restauration, une mauvaise évaluation de

certaines inter-relations entre espèces ou des relations de certaines espèces avec leur habitat peut ainsi conduire à la prolifération d'espèces indésirables, ce qui va avoir un impact durable sur la biodiversité et les fonctions de l'écosystème qu'on voulait cependant restaurer ou réhabiliter. Comme le signalait à juste titre une personne lors d'une visite de terrain, « ce n'est pas parce que c'est écologique que c'est sans danger ».

Se pose également la question du caractère opérationnel de ces techniques aux échelles d'espace et de temps et dans le contexte économique actuel, où il est bien plus facile pour un opérateur de faire appel à des entreprises du BTP, qui sont nombreuses et concurrentielles par rapport aux quelques entreprises homologuées en génie écologique. Seules la prise en compte du coût environnemental (consommations de ressources non renouvelables, émission du CO<sub>2</sub>) ou l'attribution d'aides pourraient alors rétablir l'équilibre ou faire pencher la balance vers les entreprises utilisant des techniques plus douces et plus durables.

**R. S. :** La question de la faisabilité est extrêmement compliquée car le niveau de connaissance entre environnement et santé est relativement faible. Toutefois, le progrès des connaissances sur ces questions a été considérable au cours des dernières années.

En ce qui concerne les questions relatives aux approches de retrait de CO<sub>2</sub> de l'atmosphère, il y a beaucoup de questions qui tournent autour de l'agriculture : l'arbitrage entre culture de bioénergies et culture vivrière ou le changement des pratiques comme la fertilisation ou l'irrigation. L'état des connaissances suggère qu'un déploiement massif de ce genre de techniques pourrait nous amener à transgresser des limites géophysiques sur la disponibilité en eau et nutriments dans les sols.

Les techniques de gestion du rayonnement solaire ont aussi des impacts sur l'agriculture, notamment à travers des modifications du rayonnement incident ou des changements

du régime des pluies. Plus récemment, des travaux de modélisation ont permis de consolider des connaissances sur l'impact de ce genre d'approches sur la couche d'ozone, qui peuvent avoir une influence sur la quantité d'UV arrivant au sol et jouer sur la santé des êtres humains.

Si la mise en marché des actifs naturels est une réponse aujourd'hui apportée, elle ne marche pas dans tous les cas si l'on prend l'exemple de la Californie et de l'Australie, qui ont un marché de l'eau (et pour la Californie un marché du carbone aussi). En effet, on observe désormais assez clairement que certaines exploitations se sont transformées en véritables centrales de stockage de l'eau, jouant ainsi sur le tarissement de certaines rivières. Le cours de l'eau explose au moindre incendie, ce qui pose de vrais problèmes à la société civile mais aussi aux agriculteurs.

De mon point de vue, il faut protéger nos ressources sur les plans moral et éthique (*via* l'éducation) et par la loi. Prendre conscience des limites géophysiques et environnementales du monde dans lequel nous vivons me semble être une nécessité pour les années et décennies à venir.

*Dans vos travaux en collaboration avec les sciences humaines et sociales (SHS) et le droit, quels ont été les principaux questionnements de recherche, voire quels sont les résultats auxquels vous êtes parvenus ? Quelles seraient vos attentes à l'égard des SHS et du droit en particulier sur ces questions ?*

**T. D. :** Les collaborations avec les SHS ont été constantes et multiples. Nous avons notamment fait appel aux anthropologues, sociologues environnementaux et psychosociologues pour nous aider notamment à mieux appréhender, par rapport aux savoirs empiriques qui existaient déjà, les savoirs et perceptions en matière de naturalité en fonction des objectifs visés en termes de restauration (socio-écosystème ou espace naturel) ou concernant l'utilisation de certaines espèces (ingénieurs des écosystèmes) pour la restauration

ou l'entretien de certains espaces (herbivores, fourmis, plantes nurses, etc.). Les archéologues, historiens et géographes ont également travaillé avec nous pour bien définir les actions passées de l'homme, leur amplitude et leurs variations afin que nous puissions définir au mieux la trajectoire de l'écosystème de référence dont la restauration est l'objectif. Les philosophes nous ont permis de nous interroger sur les concepts de nature et du rapport des humains à la nature, tandis que les socio-économistes nous ont beaucoup aidés à analyser les coûts, les bénéfices, la faisabilité et l'intégration des différents projets mis en place.

Quant aux juristes, ils nous ont particulièrement aidés à comprendre les arcanes des processus impliquant la mise en œuvre de mesures de compensation, et notamment les textes qui encadrent la création des nouvelles réserves de compensation écologique permettant à un opérateur de provisionner des unités de compensation *via* des opérations de restauration, celles-ci étant ensuite revendues aux aménageurs soumis à l'obligation de compenser. Cela nous aide, par ailleurs, à traduire dans les textes les concepts nouveaux de « nature ordinaire » ou de « nature temporaire », insuffisamment pris en compte dans la séquence éviter-réduire-compenser, encore trop axée sur la conservation et la restauration des espèces et habitats rares ou extraordinaires, aux dépens de la nature commune ou des espèces qui coexistent momentanément pendant des phases d'aménagement en ville ou en campagne (friches urbaines ou agricoles). Ces natures, ordinaire ou temporaire, rendent de nombreux services écosystémiques. Leur conservation ou restauration doit donc aussi être mise en place.

**R. S. :** Le dialogue entre climat et droit en est à ses débuts. Même si beaucoup d'éléments juridiques avaient déjà auparavant été mis en place au niveau national ou régional, l'Accord de Paris a été un vrai initiateur dans la traduction au point de vue légal des connaissances climatiques, notamment en ce qui concerne les budgets carbone ou la neutralité carbone.

On peut, en revanche, déplorer le fait que l'ingénierie climatique soit très mal encadrée au niveau légal. Son caractère global impose en effet une approche dans le cadre de réglementations internationales. La Convention sur la diversité biologique de 1992, complétée par la décision COP de 2010, mentionne l'interdiction de la géo-ingénierie dans un contexte de protection de la biodiversité. Mais cette interdiction n'est pas contraignante et ne porte pas de mention sur les enjeux climatiques, tandis que la Convention sur l'interdiction d'utiliser des techniques de modification de l'environnement à des fins militaires ou toutes autres fins hostiles (Convention ENMOD) limite les interdictions aux applications militaires ou à visée hostile. Il en est de même pour la Convention de Londres de 1972 sur les océans et le mémorandum de 1996 qui concernent l'interdiction de l'immersion des déchets, ce qui ne s'applique explicitement ni au CO<sub>2</sub>, ni aux carbonates ou à la chaux (technique de retrait de CO<sub>2</sub> *via* l'océan).

Seul un code de conduite a été élaboré en 2009 par un groupe d'universitaires d'Oxford. Il est basé sur un certain nombre de critères visant à guider la recherche en géo-ingénierie, comme la nécessité de réaliser une évaluation indépendante des impacts environnementaux et socio-économiques par un organisme de préférence international.

Plus récemment, en 2020, l'Académie des sciences aux États-Unis a édité un rapport portant sur la gouvernance de techniques d'ingénierie climatique. Ce rapport motive en particulier la mise en place d'une veille sur ce genre de techniques et la mise en place d'un cadre légal mondial autour de la modification délibérée du climat.

L'adresse Internet citée dans cette synthèse a été consultée en octobre 2023.

- CRUTZEN P. J., 2006, « Albedo enhancement by stratospheric sulfur injections: A contribution to resolve a policy dilemma? », *Climatic Change*, vol. 77, n° 3, p. 211-220.
- HAECKEL E., 1866, *Generelle Morphologie der Organismen*, Berlin, Reimer.
- KEITH D. W. & DOWLATABADI H., 1992, « A serious look at geoen-gineering », *EOS, Transactions, American Geophysical Union*, vol. 73, n° 27, p. 289-293.
- REY F., 2017, Écologie ingénieriale : une recherche finalisée au service de l'ingénierie et du génie écologiques, *Revue d'écologie. La Terre et la Vie*, vol. 72, p. 107-115.
- VOLKEN E., 2008, « La géo-ingénierie pour combattre le réchauffement climatique : un dilemme entre possibilités et risques », *Climate Press*, n° 24.