

Jacques de Gerlache

Mettre en œuvre les transitions énergétiques

**Stratégie intégrative
et gestion opérationnelle**

DUNOD

Un grand merci à Aloïs Michielsens, Jean-Marie Postiaux, Pierre Laconte, Éric De Keuleneer, Philippe Joye, Guillaume Clapeau et Aurélie Cauvin pour leurs apports, relectures, commentaires et suggestions précieuses.

Jacques de Gerlache

Les figures suivantes ont été dessinées par Rachid Marai : p. 8, p.12, p. 13, 1.1, 1.2, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 2.6, 2.7, 3.1, 3.2, 3.3, 5.1, 5.2, 5.3, 6.2, 7.3, 7.4, 8.1, 8.2, 8.3, 8.4, 8.5, 8.8, 8.11, 9.1, 9.2, 9.3, 10.2, 10.5, 11.1, A1.3, A1.4, A2.1, A2.3, A2.4, A3.1.

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.

Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du

Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod 2019

11, rue Paul Bert, 92240 Malakoff

www.dunod.com

ISBN 978-2-10-078801-9

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2^o et 3^o a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Synopsis

« Au pessimisme de l'intelligence, il faut associer l'optimisme de la volonté. »

Romain Rolland

Les bouleversements climatiques actuels et surtout à venir ainsi que, au-delà, leurs conséquences tant environnementales que démographiques, socio-économiques et politiques, imposent l'accélération de la mise en œuvre des stratégies d'atténuation de leur importance et de leurs conséquences. Ces réponses sont aussi urgentes qu'indispensables. Nos sociétés ont en effet atteint un point critique : les transitions opérationnelles vers la production et la consommation d'énergies à teneur en carbone faible, voire nulle, doivent se matérialiser plus concrètement et à plus grande échelle.

Dans ce contexte, une des limites majeures à cette matérialisation est la difficulté méthodologique à intégrer les étroites interrelations qui existent entre les multiples enjeux qui y sont liés. L'absence de cette dimension intégrative, pour ne pas dire « systémique », est un des obstacles majeurs à leur pleine mise en œuvre opérationnelle. En effet, son absence dans beaucoup de démarches est ce que déplorent de plus en plus fréquemment de nombreux rapports traitant des transitions énergétiques, en évoquant les délais et l'absence de progrès à la hauteur des enjeux. La mise en œuvre de tels projets, c'est comme celui d'un orchestre qui interprète une symphonie en intégrant ses partitions et ses instruments dans un ensemble harmonieux.

La perspective proposée ici rassemble les principaux éléments factuels permettant d'esquisser une démarche intégrant ces multiples enjeux partiellement indissociables et donc irréductibles liés à l'ensemble des chaînes énergétiques dont les maillons, tant technologiques que géo-politiques ou socio-économiques sont constitués en réseaux qui, à tous les niveaux de leur gestion, ne peuvent être aucunement dissociés.

Cette démarche débute par un état des lieux synthétique des « besoins », présents et futurs, des différentes formes de ressources énergétiques, actuelles et potentielles, de leurs transformations, stockage, transport et usages. Elle aborde ensuite les enjeux liés à une gestion réellement globale et intégrative de ces différentes dimensions dans la perspective d'une maîtrise des émissions de carbone qui y sont plus ou moins directement liées. Ceci inclut les options qu'offre le développement des stratégies de meilleure efficacité de leurs (non)usages, comme celles offertes notamment par des économies dites « circulaires » et de fonctionnalité. Un chapitre propose une synthèse de ces enjeux prenant en compte les différentes options et recommandations proposées dans ce domaine par de grandes institutions internationales.

La seconde partie développe une méthodologie intégrative opérationnelle, intégrant les principes de démarches existantes. Elle offre une meilleure efficacité dans la mise en œuvre de plans d'actions spécifiques (nationaux, régionaux, locaux) de transition(s)

énergétique(s), souvent préexistants, en associant plus efficacement toutes les parties prenantes dans leur accomplissement et l'évaluation globale de leur efficacité.

À la lumière de cette perspective élargie sont alors passés en revue dans une troisième partie divers états des lieux, scénarios et propositions déjà formulés, qui peuvent et doivent s'appliquer depuis le niveau du « territoire » jusqu'au niveau planétaire en dépassant enfin les limites réductrices de chacun des enjeux considérés individuellement. Ainsi, parmi d'autres qui seront évoqués, le rapport « Réussir la transition énergétique dans les territoires »¹ affirmait déjà que l'action la plus importante est d'améliorer l'efficacité systémique. En effet, elle apporte des améliorations significatives dans tous les secteurs. Il soulignait que seule une telle approche intégrée peut répondre aux multiples défis à la fois techniques, économiques et sociétaux liés à l'énergie, notamment urbaine. Le scénario de développement durable du World Energy Outlook 2018 propose également une stratégie intégrée pour atteindre les objectifs d'accès à l'énergie, de qualité de l'air et de climat, avec tous les secteurs et technologies à faibles émissions de carbone, y compris le captage, l'utilisation et le stockage du carbone – contribuant à une vaste transformation de l'énergie mondiale.

Serait ainsi franchi le seuil critique au-delà duquel émergeront enfin les réelles mutations de grande ampleur qu'impose la matérialisation rapide de transitions énergétiques indispensables, sinon vitales, au sens propre du terme.



Une forme de transition énergétique... (Photo : Jacques de Gerlache.)

Préface de Jean-Pascal van Ypersele

Nous vivons dans un monde complexe, où l'avenir du vivant est menacé par notre course constante vers plus de ressources, plus d'énergie ou de kilomètres parcourus, sans suffisamment de souci pour l'avenir, ni pour les autres occupants de notre petite planète.

Parmi les grands problèmes auxquels l'humanité doit faire face, les changements climatiques occupent une place importante. Dès la fin du XIX^e siècle, on savait déjà que l'usage des combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel) risquait de dérégler le climat des siècles suivants. Aujourd'hui, la température moyenne globale a augmenté de près d'un degré Celsius depuis la Révolution industrielle, et les conséquences en deviennent de plus en plus visibles. Si nous restons sur la trajectoire actuelle, nous risquons de dépasser 3 °C de réchauffement d'ici la fin du siècle, ce qui nous prépare, entre autres, de très fortes vagues de chaleur et une élévation du niveau des mers de plusieurs mètres au cours des siècles suivants. En continuant à utiliser l'atmosphère comme poubelle à CO₂ et à épaissir ainsi la couche d'isolant thermique autour de la Terre, nous scions la seule branche sur laquelle il est possible de s'asseoir dans le système solaire.

On sait cependant aussi à quel point l'énergie est fondamentale au développement. Un être humain a une puissance propre d'environ 100 watts. Un habitant du monde bénéficie aujourd'hui en moyenne de sources d'énergie correspondant à une puissance continue de 2 400 watts (avec de fortes variations : environ 9 000 watts pour un États-Unien et 500 watts pour un Africain). Une partie au moins de ces « esclaves énergétiques » est nécessaire, même si beaucoup de gaspillages ont lieu, en particulier dans les pays « développés ».

Dans ce contexte, il est essentiel de comprendre au moins trois choses :

1. Qu'est-ce qui constitue une demande « raisonnable » en énergie ?
2. Comment la satisfaire ?
3. Comment ne pas aggraver au passage la dégradation de l'environnement et du climat ?

Ce livre aborde ces trois questions de manière très documentée, et insiste sur la nécessité de les aborder en sortant des « silos » dans lesquels les experts, les acteurs économiques et les responsables politiques se complaisent trop souvent.

De très nombreuses sources ont été consultées, analysées, synthétisées et mises en perspective par Jacques de Gerlache, qui a une expérience de l'industrie (Solvay), mais aussi du conseil et de la communication à propos du développement durable. Le fil rouge de ce livre est celui du travail de son auteur : comment faciliter le changement de paradigme nécessaire pour que la transition puisse se faire vers un système énergétique qui satisfasse les besoins humains essentiels, tout en respectant les ressources limitées, les écosystèmes et la santé humaine.

Le sujet de ce livre est un des défis les plus essentiels auxquels l'humanité doit faire face en ce XXI^e siècle.

La consommation d'énergie va augmenter dans les populations qui ne disposent pas aujourd'hui d'une qualité de vie décente. Cette consommation va par contre devoir baisser chez ceux qui utilisent une part disproportionnée des ressources limitées que la nature nous offre. Les technologies les plus efficaces et les plus propres à long terme devront être utilisées, mais la technologie ne suffira pas.

Si les civilisations qui ont basé leur développement sur l'usage intensif d'énergie ne comprennent pas mieux les interactions complexes entre leur système énergétique, leur économie, leur culture, leur système politique, et les limites de leur environnement naturel, elles risquent de se trouver assez rapidement dans une impasse.

Puisse ce livre aider ses lecteurs, qui ont été touchés dans leur cœur par la gravité de la situation, à comprendre cette complexité, pour mieux la maîtriser, et avoir le courage d'agir pour construire une société et un modèle de développement économique vraiment « durable ». Cela veut dire respecter tous les humains tout en respectant pleinement les limites des cycles naturels et des écosystèmes qui assurent la viabilité de la Terre.

Jean-Pascal van Ypersele (twitter : @JPvanYpersele),
ancien vice-président du GIEC, professeur de climatologie et de sciences
de l'environnement à l'université catholique de Louvain

Préface de Bertrand Piccard

Est-il encore besoin de rappeler que l'humanité est en péril ? Toutes les études récentes nous le rappellent davantage et chaque année la planète tente, en vain, de nous mettre en garde, souvent de manière brutale. Pourtant, je constate avec consternation que beaucoup choisissent encore d'ignorer le fléau climatique à venir, pensant ainsi préserver le dogme du court-termisme. Sommes-nous pour autant condamnés à devoir choisir entre l'économie et la protection de la planète ? Certainement pas.

Depuis maintenant plusieurs années, j'ai la conviction qu'une troisième voie est possible : celle de la croissance propre, durable et qualitative, permettant dans les pays les plus pauvres comme dans ceux les plus riches, de créer des emplois et de la richesse, de réduire les inégalités, d'accroître la stabilité sociale tout en protégeant l'environnement. En effet, grâce aux progrès technologiques, la lutte contre le réchauffement climatique n'est plus une contrainte. Bien au contraire : elle est aujourd'hui une énorme opportunité.

Depuis le succès de mon tour du monde en avion solaire, j'ai rencontré, à travers la Fondation Solar Impulse, des centaines d'entrepreneurs et d'innovateurs proposant des solutions dans les domaines de l'eau, de l'énergie, de la mobilité, de l'urbanisme, de l'agriculture et de l'industrie. Et si les nouveaux systèmes, produits et technologies sur lesquels sont fondées ces solutions n'étaient pas financièrement viables il y a dix ans, ils le sont aujourd'hui. Le remplacement d'infrastructures dépassées et polluantes par des infrastructures modernes et performantes est au XXI^e siècle la plus grande opportunité du secteur industriel. Quel gâchis ce serait de ne pas agir !

Saviez-vous que les bâtiments peuvent maintenant être si bien isolés qu'ils sont neutres sur le plan énergétique ? Ou que l'énergie nécessaire au chauffage peut être divisée par quatre et celle nécessaire à l'éclairage public et privé par dix ? Nous sommes même capables aujourd'hui de dessaler l'eau de mer avec l'énergie solaire. Des systèmes de contrôle intelligents peuvent être installés pour équilibrer la production, le stockage et la consommation d'énergie au point de réduire de moitié la consommation d'une population, le plastique biodégradable peut être produit à partir de protéines de lait, les émissions de méthane de vache peuvent être réduites de 30 % avec un simple additif alimentaire et, en attendant que les véhicules électriques deviennent la norme, nous pouvons réduire de 80 % les émissions de particules des moteurs à combustion interne grâce à un système d'amélioration de la combustion. De plus, dans la moitié des pays du monde, l'énergie solaire et éolienne produit déjà de l'électricité jusqu'à trois fois moins cher que le gaz, le charbon et le pétrole.

Voilà pourquoi, même s'il n'y avait pas de changement climatique, diminuer les émissions de CO₂ serait logique encore plus qu'écologique.

Nous concentrer sur l'environnement nous oblige à faire des sacrifices de comportement et de croissance. Ne prendre en compte que l'économie nous amène à une planète invivable. D'où la nécessité impérieuse d'une approche systémique où le salut viendra de la combinaison des apports écologiques, industriels, économiques, éducatifs et sanitaires. Et que manque-t-il pour que le puzzle soit complet ? Des leaders compétents dans le monde politique pour mettre toutes les pièces à la bonne place.

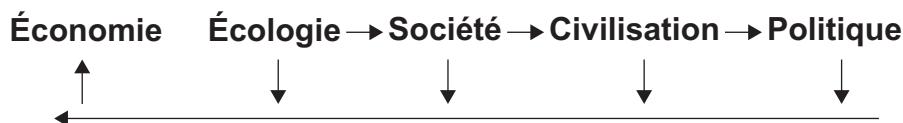
Bertrand Piccard
Fondation Solar Impulse

Extrait de *L'an I de l'ère écologique* d'Edgar Morin

En soutien à la gestion plus systémique et intégrative des transitions énergétiques promue dans cet ouvrage, Edgar Morin a accepté la retranscription du texte ci-dessous, extrait de l'un de ses ouvrages *L'an I de l'ère écologique*, publié en 2007². Il y évoque le fait que dans les consommations énergétiques au sein du « complexe social », il est essentiel d'éviter les « expertises compartimentées et envisager des expertises capables de situer leur objet dans son contexte ».

« L'énergie nous pose non seulement directement des problèmes techniques et économiques, mais aussi indirectement les problèmes de transport, de l'habitat, de la production, de la consommation, de la ville, du mode de vie. Elle nous amène à considérer des problèmes clés de société. La société est complexe dans le sens où le mot « *complexus* » signifie « ce qui est tissé ensemble » et, si nous suivons les fils énergétiques, nous arrivons au complexe d'ensemble. Ce complexe comprend les comportements de finalités individualistes qui marquent nos habitudes de vie, nos genre de vie, nos styles de vie, c'est-à-dire notre vie quotidienne et personnelle.

Il nous faut donc nous situer dans le complexe :



Dire complexe signifie enfin que nous devons toujours considérer les données particulières en relation avec l'ensemble dont elles font partie, et de même considérer l'ensemble toujours en relation avec les parties. Il faut éviter les expertises compartimentées et envisager des expertises capables de situer leur objet dans son contexte. Enfin, ce complexe comporte en lui des problèmes de civilisation puisque ce qui caractérise notre civilisation, c'est le développement ininterrompu de son caractère technique-économique-industriel, qui comporte la croissance ininterrompue des besoins, productions, et consommations, dont la croissance de la consommation énergétique.

Nous commençons seulement à prendre conscience que cette consommation comporte des gaspillages et dilapidations, et qu'elle détermine des dégradations et des raréfactions ; nous devons prendre conscience que cette situation nécessite des innovations et des réformes dans tous les domaines. En effet, au-delà d'un certain seuil, la modification de nos comportements énergétiques signifie modifications dans nos genres et modes de vie, dans les transports, l'habitat, la consommation, la ville. »

Préface de Pierre Laconte

Les changements climatiques, globaux par région et par leur histoire, sont bien consignés, mais leurs causes – humaines et non humaines – et les outils supposés disponibles pour stabiliser le climat restent un sujet de controverse parmi les observateurs. Dans ce contexte, la consommation de combustibles fossiles – principale source d'émissions – augmente toujours au lieu de diminuer, comme cela est indispensable pour limiter la concentration atmosphérique des gaz à effet de serre (GES). Cela parce que la consommation de ces combustibles, comme le montrent les statistiques de l'AIE, reste politiquement soutenue et subventionnée au niveau des pays.

De plus, le caractère virtuel du CO₂ et des gaz à effet de serre (GES) ne parle pas nécessairement à l'émotion des citoyens et donc à leurs élus, comme l'exprime le slogan des « gilets jaunes » : « avant de penser à la fin du monde, penser à la fin du mois ». Avec une communication strictement concentrée sur les politiques énergétiques affectant la qualité de vie des citoyens, et non sur leur résultante en termes de GES, le climat risque de cacher la forêt, comme le montre Guillaume Sainteny³.

L'avenir de la production et de la consommation d'énergie et de ressources, tant au niveau **global** que **local**, sont alors des éléments qui doivent être complémentaires dans une approche intégrée de l'environnement en général et urbain en particulier, notamment la santé, la qualité du sol, de l'eau, de l'air et des aliments, et la biodiversité.

Une transition énergétique équilibrée nécessiterait à la fois une gouvernance **publique** – appuyée par l'opinion publique – et la responsabilité **civique** des entreprises en matière d'économie de ressources, sans oublier l'économie **coopérative** et son potentiel sous-exploité. Le rôle du secteur **privé** à l'appui des politiques d'économie d'énergie doit donc être souligné.

Un problème est que les politiques de l'UE et celles des États mettent l'accent plus sur la limitation des émissions estimées de GES que sur la pollution réelle affectant la qualité de la vie locale, par exemple dans les directives sur le « verdissement » de l'industrie automobile.

La Fondation pour l'environnement urbain (FFUE)⁴ soutient cet ouvrage sur une vision intégrée des transitions énergétiques dans sa complémentarité avec son projet de nouvelle publication à venir sur les enjeux énergétiques.

Pierre Laconte
Fondation pour l'environnement urbain (FFUE)

Table des matières

Introduction	1
Préliminaire : les limites thermodynamiques intrinsèques à tout usage d'énergie	11
Partie 1	
Des enjeux climatiques aux enjeux énergétiques : un état des lieux	15
1 Contexte : démographie et émissions de gaz à effet de serre	16
1. La dimension démographique	16
2. Les émissions de gaz à effet de serre et leurs conséquences	17
3. Des options pour l'atténuation des effets climatiques liés aux émissions de gaz à effet de serre	20
4. Les engagements politiques de l'accord de Paris dans la pratique	21
5. Le monde financier face aux enjeux climatiques et énergétiques	22
2 Consommations énergétiques et perspectives futures	28
1. La consommation énergétique globale et sa dimension économique	28
2. Les perspectives futures de la consommation énergétique globale	32
3. Les transitions fondamentales dans les marchés de l'énergie	35
4. L'aperçu global des enjeux énergétiques vus par le World Energy Council	38
5. Les types d'énergies produites et utilisées dans l'UE	39
6. L'enjeu des ressources hydriques et leur lien particulier avec la production énergétique	41

3	Les principales formes de ressources énergétiques disponibles	42
1.	Les types de ressources énergétiques	42
2.	La révision de la méthode de calcul comparative de l'énergie produite à partir de différentes ressources	43
3.	Une synthèse des moyens de production d'énergies renouvelables	46
4	Le stockage et le transport de l'énergie non électrique	51
1.	Le stockage de l'énergie	51
2.	Le transport et la distribution de l'énergie non électrique	53
5	L'énergie électrique : production et transformation, stockage, transport et distribution	55
1.	La production de l'énergie électrique	56
2.	Le stockage de l'électricité : un profil comparatif des diverses options	59
3.	Le transport de l'énergie électrique : courant alternatif ou continu ?	60
4.	La distribution d'énergie électrique en Europe : les réseaux et leur décentralisation	62

Partie 2

La diversité des enjeux liés aux transitions énergétiques

65

6	Les initiatives réglementaires en matière de transitions énergétiques	66
1.	La stratégie européenne d'une gestion réglementée des transitions énergétiques	68
2.	Le soutien européen aux initiatives d'innovation en matière de transitions énergétiques	71
3.	Une question essentielle : la gestion éthique et équitable des fonds de transitions énergétiques	74

7	Les enjeux d'une gestion opérationnelle des émissions de carbone	75
	1. Adopter des initiatives volontaires de réduction des émissions de carbone	76
	2. Accroître l'efficacité énergétique	77
	3. L'économie circulaire et de fonctionnalité comme atouts de l'efficacité énergétique	88
	4. Les initiatives opérationnelles de transitions énergétiques au niveau national, régional ou local	94

Partie 3

Mettre en œuvre des plans spécifiques de transitions énergétiques

8	Une approche méthodologique de mise en œuvre intégrée de transition(s) énergétique(s)	110
	1. Une approche non réductrice pour structurer les interactions irréductibles d'un « projet »	110
	2. Les principes d'une méthode intégrative spécifique de gestion des interactions irréductibles	112
	3. L'identification de tous les enjeux interagissant dans la gestion des transitions énergétiques	117
	4. Mettre en œuvre un plan d'actions intégrées et en assurer le(s) suivi(s)	121
	5. L'enjeu de l'acceptation publique des projets de transitions énergétiques	123
9	Mettre en œuvre la méthode intégrative dans des plans concrets de transitions énergétiques	132
	1. Les réponses intégratives aux enjeux énergétiques majeurs	132
	2. Quelques options qui, intégrées, permettent d'atteindre un véritable « seuil de rupture »	140

10	Matérialiser localement une politique fonctionnelle et circulaire de transitions énergétiques	155
	1. Combiner approches analytique et intégrative dans les plans « locaux » de transition énergétique	155
	2. Les enjeux de transitions énergétiques dans les entités urbaines et les territoires	157
	3. Les suggestions du CESE pour accélérer la transition énergétique et la croissance verte	167
	4. Les enjeux d'une transition énergétique vus au travers de la méthode d'évaluation intégrative	169
	5. Construire un plan intégré de transitions énergétiques	173
	6. Concrétiser l'intégration des enjeux : climat, énergies, pollution atmosphérique et santé	174
11	En guise de synthèse : une transition paradigmatique comme préalable aux transitions énergétiques	178

Annexes

	Annexe 1 : Aperçu des principales ressources énergétiques	182
	Annexe 2 : Les principales options de stockage de l'énergie et du CO₂	219
	Annexe 3 : Les technologies de capture, de séquestration et de réutilisation du CO₂	241
	Annexes 4 à 6 : disponibles en ligne sur le site dunod.com	
	Annexe 4 : Transitions énergétiques et économies dites « circulaire » et « de fonctionnalité »	
	Annexe 5 : Bref aperçu de la situation des transitions énergétiques en Belgique	
	Annexe 6 : Méthode d'utilisation des « bilans » d'émissions de carbone	



	Références	251
	Index	269

Introduction : entre contraintes climatiques et énergétiques

« Un homme politique pense à la prochaine élection.
Un homme d'État, à la prochaine génération. »

James Freeman Clarke

« Si nous ne changeons pas de cap d'ici 2020, nous risquons de manquer le point où nous pouvons éviter un changement climatique incontrôlé, avec des conséquences désastreuses pour les personnes et tous les systèmes naturels qui nous soutiennent. (...) Malheureusement, l'ambition de notre action est loin d'être là où elle doit être. (...) Nous sommes maintenant à un carrefour existentiel. (...) Nous avons vraiment atteint un seuil critique : "saisissons-le ou perdons-le" ».

Allocution du secrétaire général des Nations unies sur les changements climatiques,
New York, 10 septembre 2018⁵

« Un déluge de désinformation et de malinformation inhibe la prise de décision factuelle. »
Rapport DNV-GL, 2018

1 Quelle sera l'ampleur du réchauffement climatique ?

Une grande quantité de ressources, notamment (mais pas uniquement) énergétiques, est nécessaire pour subvenir aux besoins, fussent-ils strictement élémentaires, de la population humaine (~ 7 milliards d'individus en 2016). En ce qui concerne les ressources énergétiques, au-delà des enjeux géopolitiques, socio-économiques, alimentaires sanitaires et environnementaux, émerge aujourd'hui de façon aiguë la dimension climatique, même si celle-ci ne peut d'aucune manière être dissociée des autres dimensions. Néanmoins, il existe toujours une grande variabilité d'opinions dans la perception des risques climatiques extrêmes et de leur importance, et donc de la place à leur accorder dans l'ordre des priorités. Certains considèrent que le monde a commencé à abandonner l'idée qu'il serait possible de limiter les émissions de CO₂ pour atteindre l'objectif de limiter le réchauffement global de la planète à 2 °C. Ils se préparent à s'adapter aux changements climatiques dans la lignée de l'accord de Paris où, dans l'ensemble, les pays participants ont opté pour des objectifs de réduction des émissions non réellement contraignants tout en encourageant les dépenses d'adaptation.

Contrairement à l'*atténuation*, affirmait déjà le rapport Stern de 2006⁶, dans la plupart des cas, l'*adaptation* aux changements climatiques apporte en effet à courte échéance des bénéfices au niveau local. Mais faut-il pour autant renoncer à atténuer l'importance du réchauffement et les bouleversements climatiques qui seront liés à son intensité ? On

s'intéressera notamment aux résumés strictement factuels des rapports du GIEC proposés par le site Internet de GreenFacts ainsi qu'à ceux d'autres rapports scientifiques sur le sujet⁷. Selon le rapport 2018 de l'Organisation météorologique mondiale (OMM)⁸, la température moyenne à la surface du globe en 2017 a dépassé de quelque 1,1 °C celles de l'époque pré-industrielle. À l'échelle du globe, la moyenne de la température pour la période 2013-2017 est la moyenne quinquennale la plus élevée jamais constatée. Les neuf années les plus chaudes qui aient été répertoriées sont toutes postérieures à 2004 et les cinq années les plus chaudes, à 2009. Parmi les principales leçons du rapport 2017 du Lancet Countdown⁹, il ressort clairement que, par rapport à la période précédente, l'exposition à des vagues de chaleur plus fréquentes et intenses augmente, avec environ 125 millions d'adultes vulnérables supplémentaires déjà exposés aux canicules entre 2000 et 2016. Une étude scientifique récente note à ce sujet que l'intensité et la fréquence des vagues de chaleur sont désormais déjà au moins deux fois plus probables en Belgique, quatre fois plus en France, en Suisse, aux Pays-Bas et dans le centre de l'Angleterre. Pour l'Espagne et le Portugal, la probabilité est multipliée par 10 au moins. Au milieu du XXI^e siècle, les chaleurs extrêmes en juin deviendront la norme en Europe occidentale, sauf si nous prenons des mesures immédiates pour réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES).

L'Agence internationale de l'Énergie (AIE) considérait déjà dans un rapport de 2015¹⁰ que les données disponibles suggèrent qu'en réalité le niveau de réchauffement de la planète d'ici la fin du XXI^e siècle serait d'environ 2,6 °C supérieur aux niveaux moyens préindustriels. Le rapport spécial d'octobre 2018 du GIEC¹¹ affirme avec une « grande confiance statistique » que « dans le cadre d'émissions conformes aux engagements pris dans le cadre de l'accord de Paris (connu sous le nom de contributions déterminées au niveau national), le réchauffement planétaire devrait dépasser de plus de 1,5 °C les niveaux préindustriels, même si ces engagements sont complétés par des accroissements de l'échelle et des ambitions d'atténuation qui seront très difficiles à mener après 2030 ». Ce qui sera dramatique pour la plupart des nations et des populations du monde. En effet, malgré les engagements des signataires de l'accord de Paris à maintenir l'augmentation de la température moyenne mondiale « bien en dessous de 2 °C » par rapport à ces niveaux préindustriels et poursuivre « les efforts visant à limiter l'augmentation de la température à 1,5 °C » selon certaines analyses¹², les émissions de carbone atteintes d'ici 2021 pourraient correspondre déjà à une hausse de la température moyenne de 1,5 °C. Cela indique la tendance toujours plus inquiétante des émissions de CO₂ liées au secteur énergétique, qui ont encore augmenté de 3 % en 2017, notamment avec les hausses toujours observées en Chine et en Inde, où le déploiement des énergies renouvelables a été important mais où le charbon a comblé l'écart entre l'offre et la demande. Paradoxalement, le même rapport du GIEC affirme que « le réchauffement provoqué par les émissions anthropiques de la période préindustrielle à nos jours persistera pendant des siècles, voire des millénaires, et continuera de provoquer de nouveaux changements à long terme du système climatique, tels que l'élévation du niveau de la mer, mais il est peu probable que ces émissions causent à elles seules (?) un réchauffement planétaire de 1,5 °C (confiance statistique moyenne) »¹³.

Lors d'une intervention dans l'émission les *Dossiers de l'écran*, il y a 40 ans, Haroun Tazieff anticipait déjà (en présence du commandant Cousteau) les conséquences d'un réchauffement de 2-3 °C associé aux émissions de CO₂ industrielles¹⁴...

Même en intégrant et en combinant diverses mesures comme recommandé par la Commission de transition énergétique (ETC 2017), les options pour éviter cette trajectoire de réchauffement supérieure à 1,5 °C évoquées par le rapport du GIEC seront difficiles à respecter. Il reste possible en revanche de conserver l'objectif de limiter une augmentation de température de 2 °C en intégrant efficacement des réductions des émissions de carbone, des améliorations rapides en matière d'efficacité énergétique, du « marché du carbone » ainsi qu'une modification significative des comportements des citoyens et des entreprises et des changements dans leurs pratiques, notamment via la mise en place d'une économie plus circulaire et partagée.

Tout cela étant, même si les pays sont globalement disposés à respecter les engagements pris dans le cadre de l'Accord de Paris, la tendance des émissions projetées représente un échec collectif majeur. Le scénario des nouvelles politiques du rapport World Energy Outlook 2018 place les émissions de CO₂ liées à l'énergie sur une lente tendance à la hausse jusqu'en 2040, une trajectoire très décalée par rapport aux objectifs nécessaires selon les connaissances scientifiques pour lutter contre le changement climatique.

2 Le risque de changements climatiques abrupts et planétaires

Au-delà de cette perspective, une dimension physique souvent sous-estimée est que les phénomènes climatiques sont parfois fortement non linéaires ou discontinus et présentent des effets de seuil, un peu comme les avalanches et les tremblements de terre. Ils pourraient donc passer par des seuils critiques et singuliers (*tipping points*) et soudainement s'accélérer en cascade (effet « domino ») au niveau planétaire en induisant des changements abrupts de grande ampleur pouvant créer en peu de temps des bouleversements irréversibles planétaires dont dépendra la (sur)vie de nombreux écosystèmes et d'une grande part de l'humanité.

Ainsi, les événements climatiques ayant prévalu au milieu de l'Holocène sont un cas flagrant de seuil critique où les interactions entre l'atmosphère, les océans, la cryosphère (partie des terres recouverte de glace en permanence) et la couverture végétale ont entraîné la transition critique et irréversible du Sahara « vert » vers le Sahara désertique, transition qui s'est accompagnée d'importantes extinctions et/ou évolutions d'espèces. Les prévisions de la NASA envisagent ces changements abrupts du climat et les travaux du GIEC prennent cet enjeu en considération, même s'ils sont moins faciles à modéliser que des évolutions plus ou moins linéaires de températures planétaires moyennes et donc d'un prévoir l'échéance pourtant très préoccupante par la violence de type « tsunami » qui en résulterait.

Les risques de changements abrupts du climat planétaire

Une caractéristique frappante dans l'histoire de la Terre est que la majorité des transitions brusques se produisent dans les glaces océaniques. Celles-ci sont plus sujettes à ces changements que les autres composantes, car elles peuvent réagir sur une très courte échelle de temps (peu d'inertie) à des phénomènes comme l'effet de rétroaction de l'albédo (réflexion des rayons solaires sur la glace). L'un des seuils physiques les plus simples dans le système climatique, *le point de fusion de la glace*, est un seuil naturel de rupture fort qui pourrait induire des impacts singuliers par la décongélation des régions de pergélisol produite par quelques degrés de réchauffement, ce qui affecterait gravement les sols, avec des effets désastreux sur la structure de l'écosystème arctique.

Un nombre particulièrement important de changements climatiques abrupts est déjà prévisible pour des niveaux de réchauffement inférieurs à 2 °C par rapport au niveau de température planétaire préindustriel. Les changements brusques de la circulation océanique se produisent le plus souvent pour un réchauffement modéré et, par conséquent, cela pourrait être dans la fourchette des prévisions les plus récentes de température du GIEC. Il y a en effet des éléments de preuve de la possibilité de 37 changements abrupts régionaux pour l'océan, la glace de mer, la couverture neigeuse, le pergélisol et la biosphère terrestre en liaison avec l'augmentation de la température moyenne planétaire, mais avec peu de cohérence entre les modèles utilisés¹⁵. Les modèles climatiques actuels ne tiennent en effet pas compte de plusieurs autres mécanismes susceptibles d'entraîner ces changements abrupts, comme l'effondrement de la calotte glaciaire, la décomposition du carbone dans le pergélisol et la libération d'hydrates de méthane. Si des mécanismes possibles ont été proposés, certaines caractéristiques propres des événements possibles (moment, localisation) sont, comme pour les tremblements de terre (le prochain Big One de la faille de Santo Andre en Californie par exemple), spécifiques au modèle utilisé, ce qui explique l'incertitude associée à la prévision précise d'événements particuliers. Selon un rapport récent¹⁶, le système terrestre pourrait approcher ce seuil planétaire susceptible de se verrouiller dans une trajectoire rapide et continue vers des conditions planétaires beaucoup plus chaudes. Cette voie serait imposée par des réactions bio-géophysiques intrinsèques fortes, difficiles à influencer par les actions humaines, voie qui ne pourrait être ni inversée, ni dirigée, ni considérablement ralentie.

En particulier, la croissance du contenu thermique dans les couches supérieures des océans jusqu'à une profondeur de 2 000 mètres produit des transitions brusques dans les glaces océaniques, qui ajouteraient des quantités considérables d'eau douce à l'océan Arctique et contribueraient à accélérer un processus de renversement du Gulf Stream. Or, en 2017, la température de surface de la mer se plaçait au troisième rang des plus élevées jamais constatées (un peu inférieure, en moyenne mondiale, à ce qu'elle était en 2015 et 2016) et l'étendue de la banquise arctique a été bien inférieure à la normale calculée pour la période 1981-2010, tant dans l'Arctique qu'en Antarctique son maximum saisonnier ayant atteint la valeur la plus basse pour un maximum hivernal qui ait été constatée depuis le début des observations par satellite. Par ailleurs, des changements abrupts dans la circulation des moussons et dans les sécheresses à long terme n'ont pas été identifiés, peut-être ici encore en raison des limites des modèles encore axés sur des données exprimées seulement en moyennes annuelles.

- En résumé, s'il y a une prise de conscience de la possibilité de ces possibles « points de basculement » abrupts et soudains du climat, peu d'informations concrètes sont encore disponibles sur ce qui pourrait être réellement attendu dans les années, les décennies ou les siècles à venir. Ces évolutions en sont encore à leurs débuts et si les points de basculement n'ont pas encore été franchis, la porte du chemin vers une planète Terre stabilisée qui l'éloignerait de la trajectoire actuelle risque de se fermer rapidement.

Ces dernières années, presque tous les facteurs d'élévation du niveau des mers ont gagné en importance, en particulier la fonte de l'inlandsis du Groenland et, dans une moindre mesure, de celui de l'Antarctique.

Ainsi un effondrement de la dérive nord-atlantique (extension du Gulf Stream) devient plus que possible, transformation qui aura des impacts profonds sur les écosystèmes, les ressources et la population mondiale. De même, la désintégration de la couche de glace de l'ouest Antarctique (WAIS), aurait comme conséquence une élévation du niveau de global des océans de 4 à 6 mètres, ce qui dépasserait largement la capacité d'adaptation de la plupart des structures côtières et des écosystèmes. Compte tenu de la proportion croissante de la population mondiale vivant dans les zones côtières, cela se traduira par des migrations forcées de centaines de millions de personnes, dépassant de loin les crises politiques et humanitaires de réfugiés que nous connaissons et défiant la gouvernance et la sécurité mondiales. Les estimations du nombre de futurs migrants liés aux bouleversements climatiques varient largement, mais elles vont de 25 millions à 1 milliard de personnes d'ici 2050¹⁷. Cette variation indique la complexité liée à la nature multifactorielle de la migration humaine, qui dépend des interactions entre facteurs environnementaux, sociaux, économiques et politiques.

Le rapport du Lancet Countdown 2017 déjà évoqué rapporte que, dans l'ensemble, la fréquence des catastrophes liées aux intempéries a augmenté de 46 % depuis 2000, sans tendance claire à la hausse ou à la baisse de la létalité liée à ces événements extrêmes, ce qui suggère potentiellement qu'une réponse adaptative au changement climatique se manifeste déjà. Les pays vulnérables ont été durement touchés, comme le montre une étude récente du Fonds monétaire international (FMI)¹⁸, qui attire l'attention sur le fait qu'un accroissement de 1 °C de la température réduirait sensiblement le taux de croissance économique de nombreux pays à faible revenu. L'analyse confirme l'existence d'un effet linéaire statistiquement significatif de la température sur la croissance économique par habitant. Dans les pays à température moyenne élevée, une hausse de la température freine l'activité économique, alors qu'elle a un effet opposé dans les pays à climat beaucoup plus froid. La valeur totale des pertes économiques résultant d'événements liés au climat a augmenté depuis 1990. Elle est estimée à 129 milliards USD en 2016, 99 % de ces pertes économiques s'étant produites dans les pays à faible revenu dont les biens n'étaient pas ou mal assurés. Pendant cette période, l'augmentation des températures ambiantes a notamment entraîné une réduction estimée à 5,3 % de la productivité du travail manuel extérieur dans le monde¹⁹.