

---

# Introduction

---

## 1.1. Contexte

Le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) ou IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) est né en 1988 sous l'égide de l'ONU. Il a pour mission d'étudier scientifiquement les causes du réchauffement climatique observé au cours du XX<sup>e</sup> siècle, ses évolutions prévisibles, ses conséquences environnementales et humaines, et de susciter des décisions politiques adaptées<sup>1</sup>.

Fin septembre 2013, réuni en assemblée plénière à Stockholm, le GIEC a présenté une version intermédiaire de son cinquième *Rapport d'évaluation du groupe de travail n° 1* : « *Changement climatique 2013, les éléments scientifiques* » [STO 13]. Il en a discuté et approuvé le *résumé à l'attention des décideurs*, anticipant ainsi l'approbation du rapport lui-même (octobre 2014, à Copenhague). Ces deux documents, AR5 (*Fifth Assessment Report*) et SPM (*Summary for Policy Makers*)<sup>2</sup> constituent l'expression actualisée d'un certain consensus scientifique. Ils sont disponibles sur le site internet de l'IPCC, et nous nous y référerons constamment par la suite<sup>3</sup>.

Selon le communiqué de presse final, repris du SPM (p. 15 de la version française) : « Il est extrêmement probable que l'influence de l'homme a été la cause

---

1. Le GIEC n'est pas à proprement parler un organisme de recherche international, comme peut l'être le CERN. Il s'organise autour d'un secrétariat. Ses experts sont des scientifiques du monde entier, qui analysent et synthétisent l'ensemble des travaux de recherche publiés dans leur domaine. Outre ses rapports quinquennaux, il coordonne des actions diverses, comme le Projet d'intercomparaison de modèles climatiques (CMIP5 : *Coupled Model Intercomparison Project, Phase 5*).

2. Ce dernier, d'une vingtaine de pages, le plus connu car le plus concis, est approuvé mot à mot en présence des représentants des gouvernements et des scientifiques auteurs du rapport.

3. [http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5\\_SPM\\_brochure\\_fr.pdf](http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_SPM_brochure_fr.pdf).

principale du réchauffement observé depuis le milieu du XX<sup>e</sup> siècle. » A l'issue du quatrième rapport (AR4, 2007) cette assertion était seulement qualifiée de « très probable ». Dans le langage strictement codifié du GIEC (voir tableau 5.1), cela signifie que la confiance dans l'attribution humaine du réchauffement a doublé, passant de 90 % à 95 %.

Cette confiance apparaît moins clairement dans les textes. De toutes les évaluations quantifiées du SPM, la plus importante est sans doute celle de la *sensibilité climatique* de la planète, paramètre qui quantifie le réchauffement que provoquerait, à l'équilibre, un éventuel doublement de la concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique<sup>4</sup>. Selon le SPM (p. 14) : « Il est probable que la sensibilité climatique à l'équilibre se situe entre 1,5 et 4,5 °C (degré de confiance élevé), extrêmement improbable que celle-ci soit inférieure à 1 °C (degré de confiance élevé) et très improbable que celle-ci soit supérieure à 6 °C (degré de confiance moyen) ».

Selon les scénarios de concentration future du GIEC, le taux de CO<sub>2</sub> pourrait facilement quadrupler au cours des siècles à venir. Si l'on considère les sensibilités extrêmes (1 à 6 °C), les conséquences seraient respectivement bénignes ou terrifiantes : 2 °C ou 12 °C. D'ailleurs, la plage probable s'est élargie depuis 2007. Le GIEC souligne en effet que « la limite inférieure de la plage probable évaluée (1.5 °C) est ainsi inférieure aux 2 °C indiqués dans AR4 ». Conscient de ce que le côté alarmiste du message pourrait en être brouillé, les scientifiques se justifient auprès des délégués gouvernementaux (toujours en p. 14) : « Cette évaluation reflète une meilleure compréhension de la sensibilité climatique, des données d'observation sur une durée plus longue portant sur l'atmosphère et l'océan, et de nouvelles estimations du forçage radiatif ». L'incertitude a donc en fait augmenté au fur et à mesure de la progression des connaissances, ceci malgré les 95 % annoncés. Ce sont sur ces bases que sont engagés des accords internationaux impliquant des dépenses annuelles de plusieurs milliers de milliards de dollars (plusieurs points de PIB mondial).

Scientifiquement, les probabilités mentionnées ci-dessus ne doivent pas être prises au pied de la lettre. Leurs niveaux sont débattus en sorte de parvenir à un consensus<sup>5</sup> en présence des politiques (plus de 190 délégations gouvernementales réunies à Stockholm). D'ailleurs, le GIEC précise (AR5, 1.4.4) qu'elles ne résultent pas

---

4. Cette formulation anodine recouvre une loi logarithmique : si un doublement de CO<sub>2</sub> provoque un accroissement de température de  $S_{clim}$  (°C), un nouveau doublement ne conduira pas à  $4 S_{clim}$ , mais seulement à  $2 S_{clim}$ . Un troisième doublement, soit huit fois le niveau initial, provoquerait un accroissement de  $3 S_{clim}$ , et ainsi de suite. Noter qu'il s'agit d'une loi empirique dont l'extrapolation aux concentrations élevées est hasardeuse.

5. Consensus (Larousse) : « Procédure qui permet de dégager un accord sans procéder à un vote formel, ce qui évite de faire apparaître les objections et les abstentions ». Définition ou oxymore ?

nécessairement de calculs statistiques effectifs, mais peuvent simplement exprimer la confiance des experts dans leur propre jugement.

Dans ce contexte, tout ce qui pourra contribuer à affiner l'évaluation des paramètres climatiques planétaires sera bienvenu. C'est le cas des techniques d'identification de modèle, et c'est le domaine de compétence de l'auteur de cet ouvrage.

## 1.2. L'identification

Identifier un processus consiste à déterminer un modèle mathématique, souvent réduit au comportement externe, à partir de l'observation des entrées et des sorties (causes et effets). S'agissant du processus climatique, les entrées répertoriées sont ici la concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub>, l'activité solaire et l'activité volcanique. La sortie est la température de surface planétaire globale. La théorie de l'identification des systèmes dynamiques est parvenue à maturité depuis plusieurs dizaines d'années [LJU 87, LJU 99]. Ainsi, tous les ingrédients sont disponibles pour l'appliquer au système climatique planétaire global : l'existence de modèles admissibles simples, dotés d'un nombre restreint de paramètres, des observations de signaux d'entrée et sortie, des boîtes à outil éprouvées (*Matlab*<sup>®</sup> : *System Identification toolbox*).

On devrait donc s'attendre à trouver dans la littérature pléthore de travaux sur le sujet. Il n'en est rien : le terme identification (au sens systémique) n'est pas énoncé une seule fois dans les 1550 pages de l'AR5, ni dans le titre d'aucune des 9 200 publications recensées. Sur l'internet, une recherche par mot clé (*identification, climate, model, etc.*) ne donne rien. La seule publication sur le sujet dont nous avons eu connaissance s'intitule : « A fractal climate response function can simulate global average temperature trends of the modern era and the past millennium » [VAN 13]. Mais rien dans ce titre ne renvoie à l'identification. Parmi les mots clé inclus, celui qui s'en approche le plus est *modeling*, et aucune des références bibliographiques citées ne renvoie aux grands maîtres de la théorie de l'identification (Aström, Ljung, Stoica, Soderström, etc.) Peut-être l'auteur pratique-t-il l'identification sans le savoir, comme Monsieur Jourdain faisait de la prose – ce qui n'est pas une critique. A l'exception de l'excellent papier ci-dessus, nous n'avons découvert aucun autre travail significatif relatif à la modélisation globale du processus climatique par identification.

Bien entendu, le GIEC confronte depuis longtemps ses modèles aux données climatiques historiques disponibles : aussi bien ses grands modèles numériques, basés sur les lois de la physique, que des modèles simplifiés, à base de bilans énergétiques. Mais il ne s'agit pas d'identification, tout au plus d'ajustement partiel (*closure parameters tuning*), ou de *fingerprinting* (détection et attribution d'empreintes anthropiques).

Selon Hervé Le Treut [LE 04], directeur de l'Institut Pierre Simon Laplace<sup>6</sup> : « Les modèles numériques (*c'est-à-dire les grands modèles physiques, simulés par calculateurs numériques*) jouent un rôle clef dans le dossier de l'effet de serre, puisqu'il s'agit du *seul outil* qui permette d'évaluer ce que seront les climats futurs : l'analogie avec les climats des époques passées qui ont pu connaître des niveaux de CO<sub>2</sub> différents, l'extrapolation vers le futur des données climatiques recueillies au cours du XX<sup>e</sup> siècle fournissent certes des indications précieuses, mais qui ne peuvent être interprétées qu'à l'aide de modèles physiques ».

Dans cet ouvrage, nous proposons au contraire d'aller jusqu'au bout de la logique de l'identification, en laissant parler librement les chroniques climatiques, vues comme des entrées et sorties (causes et effets) d'une « boîte noire », sans contraindre celles-ci par quelques connaissances *a priori* que ce soit. Cela ne va pas sans difficulté : le processus climatique terrestre se trouve en effet à la limite de l'identifiable. Pour aboutir, l'identification demande que les données soient suffisamment précises et riches en événements. En l'occurrence, les effets déterminés par les entrées sont en partie masqués par les fluctuations aléatoires du climat. Concernant le CO<sub>2</sub>, les premières évolutions significatives remontent à moins d'un siècle, et leurs effets sont difficiles à distinguer des variations naturelles, tous deux atteignant le même ordre de grandeur, en amplitude et en durée. Par ailleurs, pour observer des variations de température d'assez grande amplitude, il faut s'étendre sur plus d'un millénaire, où les incertitudes propres aux reconstructions paléoclimatiques se superposent aux fluctuations naturelles. De plus, la structure du modèle doit être précisément adaptée aux objectifs ainsi que la méthode d'identification, sans quoi les données restent illisibles et les analyses d'incertitudes confuses.

L'ensemble de cet ouvrage montre pourtant qu'il est possible de parvenir à des résultats marquants, et l'on peut s'étonner de ce que la communauté des climatologues ignore une technique enseignée dès le premier cycle des cursus universitaires, alors que tous les ingrédients et outils d'application sont disponibles. A moins que tous les résultats obtenus jusqu'ici aient été incohérents au point de ne pouvoir en faire état, ou encore qu'ils n'aient été autocensurés pour défaut de cohérence avec les grandes lignes des autres résultats présentés par le GIEC.

### 1.3. Attentes et résultats

Nous avons déploré plus haut que l'état actuel des connaissances physiques ne permette pas d'évaluer avec précision les paramètres climatiques fondamentaux de la planète. Sans faire de miracles, l'identification apporte néanmoins des résultats de

---

6. Organisme participant au CMIP5.

nature à remettre en question le consensus scientifique établi sur ce qu'il est convenu d'appeler le « changement climatique ».

Tout d'abord, on verra que l'assertion selon laquelle le réchauffement observé au siècle dernier serait dû à l'action humaine n'est ni confirmée, ni infirmée par les observations. Elle reste donc basée uniquement sur des considérations physiques, entachées d'incertitudes sur lesquelles on reviendra (section 5.8). L'identification conduira au moins à éliminer les valeurs hautes extrêmes de la sensibilité climatique présumée.

Ce résultat est en deçà des espérances, mais il permet d'infirmier un argument longtemps exprimé par le GIEC, selon lequel la simple observation des données climatiques montre à l'évidence la cause humaine du réchauffement.

Ensuite, l'estimation du coefficient de sensibilité à l'activité solaire et de sa plage d'incertitude permet d'affirmer que les fluctuations de l'activité solaire constituent la cause prépondérante du réchauffement récent. Le GIEC s'oppose à cette hypothèse en arguant que les variations du flux énergétique solaire sont trop faibles, et en excluant l'existence de tout autre mécanisme par lequel le soleil pourrait agir. Pourtant, les analyses statistiques sont formelles : le soleil explique les grandes et petites variations climatiques, apparentes malgré la variabilité naturelle du climat. Ces analyses reposent sur des chroniques climatiques qui sont, dans leur ensemble, admises par le GIEC (AR5, chap. 5).

Au-delà des analyses statistiques, une confirmation de la validité des modèles identifiés est apportée par leur pouvoir prédictif. Sur la base des seules informations connues en l'an 2000, nos modèles identifiés anticipent remarquablement la « pause climatique » apparue après cette époque et qui se poursuit encore maintenant. En regard, les températures globales effectivement observées sortent systématiquement par le bas du faisceau des projections à court terme des modèles du GIEC, même réinitialisées en 2006.

Quant aux prédictions à long terme, elles sont hautement tributaires du futur de l'activité solaire, et l'auteur n'a pas de compétence lui permettant d'évaluer la validité des anticipations émanant des spécialistes de la physique solaire. Il n'a pas compétence non plus pour confirmer ou réfuter les hypothèses en présence concernant les modalités de l'effet de serre, ni le coefficient de sensibilité climatique qui en résulte. A travers les modèles identifiés, il ressort du large éventail des extrapolations du climat millénaire passé que, dans le pire des cas, un réchauffement de deux degrés au-dessus de la température préindustrielle aura bien du mal à être atteint à la fin du XXI<sup>e</sup> siècle, et que l'étale climatique actuelle ne constitue peut-être que les prémisses d'un retour au petit âge glaciaire des XVII<sup>e</sup> et XVIII<sup>e</sup> siècles.

#### 1.4. Contenu de l'ouvrage

L'objet de cet ouvrage est de décrire notre démarche méthodologique avec suffisamment de précision pour que le lecteur muni de quelques connaissances en théorie des systèmes, en modélisation et en simulation, puisse d'abord en contrôler formellement la validité, et le cas échéant la reproduire et l'exploiter<sup>7</sup>. Seuls quelques paragraphes des chapitres 4 et 6 peuvent présenter quelques difficultés de lecture, mais ils peuvent être omis sans dommage pour la compréhension de l'ensemble de notre propos.

Le chapitre 2 présente les variables et les données climatiques. Les grands instituts et organismes (NOAA, GISS, CRU) mettent des chroniques climatiques à la disposition du public. Les températures « historiques » se recoupent bien à partir de 1850 ou 1880, époques où les relevés thermométriques ont commencé à se généraliser à la surface du globe. Celles des périodes antérieures sont qualifiées de paléoclimatiques, et se présentent sous forme de reconstructions, élaborées à partir des traces, marqueurs, ou mesures de substitutions (*proxys*) laissés par le climat sur la terre et dans les océans. Ces deux types de données (instruments et marqueurs) ne sont pas utilisables à l'état brut aux fins de l'identification : elles doivent être raccordées en vue d'un traitement continu dans le temps.

Le chapitre 3 évoque une polémique fâcheuse, une *guerre des graphes* où les protagonistes échangent des arguments inconsistants, souvent réduits à la visualisation de tracés de signaux climatiques. Tracés parfois contestés, au point que l'on en viendrait à douter de la crédibilité des données paléoclimatiques en général, ruinant ainsi le principe même de l'identification d'un modèle climatique. En pratique, nous ferons totalement abstraction de cette polémique en traitant l'ensemble des données collectées sans parti pris. Cet ensemble ne prétend pas à l'exhaustivité, mais sa diversité est telle qu'on ne pourra pas opposer à nos conclusions l'objection du *cherry picking*<sup>8</sup>.

Le chapitre 4 introduit la structure des modèles que nous nous proposons d'identifier. Elle est issue de la classe des modèles dits à bilan énergétique (EBM : *Energy Balance Model*). Les plus simples sont des modèles *statiques*, réduits à trois ou quatre coefficients. Ils sont trop sommaires et incapables de traduire correctement la réalité. Les plus complexes constituent déjà des ébauches de modèles de circulation générale couplés atmosphère/océan (GCM : *General Circulation Models*). Ceux-là sont *sur-paramétrés*, non identifiables, car redondants du point de vue du comportement entrée/sortie. Le point caractéristique de la structure retenue est que chaque entrée

---

7. Les programmes développés à cet effet (sous Matlab<sup>®</sup>) sont téléchargeables : <http://www.iste.co.uk/fr/delarminat.zip>.

8. *Picorage* de données favorables à une thèse.

est affectée d'un coefficient de sensibilité à l'équilibre, et que toutes les entrées sont soumises aux mêmes dynamiques de transmission de la chaleur. Il en résulte une « boîte noire », dans laquelle certains coefficients physiques apparaissent sous forme de combinaisons et restent individuellement hors d'atteinte. A ce prix, on réalise un juste équilibre entre le sous et le sur-paramétrage.

Le chapitre 5 réunit les présomptions relatives aux paramètres climatiques fondamentaux des modèles à bilan énergétique, ainsi que leurs plages d'incertitude. Nous les extrayons, directement ou indirectement, des publications officielles du GIEC : SPM et AR5.

Le chapitre 6 expose la méthode d'identification. On s'en tient à la méthode la plus simple et la plus robuste qui soit, celle des moindres carrés d'erreur de sortie (OE : *Output Error Method*). Compte tenu de la nature des données, elle n'est pas statistiquement optimale, mais rien ne laisse présumer qu'elle en soit très éloignée. Par ailleurs, ne relevant pas de l'estimation par le *maximum de vraisemblance*, le calcul des incertitudes est développé ici tout spécialement – ce qui ne pose pas de difficulté notable. En fin de compte, il en résulte un instrument sûr, tant pour la détermination des estimations paramétriques que des incertitudes associées.

Le chapitre 7 donne un premier aperçu des résultats de l'identification. Dans notre catalogue d'archives climatiques, on a sélectionné<sup>9</sup> une première combinaison parmi seize (quatre reconstructions de température et autant d'irradiance solaire). On définit deux modes d'identification. Le premier est une identification « libre », où les six paramètres de la structure retenue au chapitre 4 minimisent, sans aucune contrainte *a priori*, l'erreur entre la température globale simulée et la chronique des températures historiques. La seconde est une identification « forcée », où l'on contraint des paramètres à respecter les présomptions du chapitre 5. Les paramètres issus de l'identification libre se situent, pour certains, très loin hors des fourchettes présumées, surtout en ce qui concerne la sensibilité climatique à l'irradiance solaire. Tant qu'il ne s'agit que du réchauffement récent (fin du XX<sup>e</sup> siècle), l'examen visuel des sorties simulées par les deux types de modèle montre qu'ils reproduisent aussi bien l'un que l'autre ce réchauffement. La différence est que, selon l'identification libre, la contribution de l'irradiance solaire est prépondérante sur celle du CO<sub>2</sub>, à l'inverse de l'identification forcée. En revanche, les températures millénaires sont objectivement mal reproduites par l'identification forcée. Pourtant, les experts du GIEC assurent qu'il est physiquement impossible que l'irradiance solaire puisse avoir une influence appréciable sur le climat. On ne peut donc pas en rester là, ni s'en tenir à une simple impression visuelle. Les analyses statistiques commencent par l'examen de la fonction d'autocorrélation de l'erreur de sortie, et de son intercorrélacion avec les signaux d'entrée. Elles confirment que les contraintes de

---

9. Celle qui nous a paru, *a posteriori*, la plus représentative.

l'identification forcée laissent subsister une forte corrélation avec l'irradiance solaire, indice d'une relation de cause à effet non prise en compte. Mais surtout, les domaines d'incertitudes associés montrent que la présomption du GIEC, d'une faible sensibilité à l'irradiance solaire, doit être rejetée, et ceci avec une très faible probabilité d'erreur. Ce rejet est fondé, non sur des considérations de physique théorique, exclues de notre étude, mais sur le traitement statistique des observations. Si les observations et leurs traitements sont corrects, il faut bien conclure alors que les présomptions sont fausses.

Le chapitre 8 étend ces analyses aux seize combinaisons réalisables à partir des quatre paléotempératures et des quatre reconstructions d'irradiance solaire. A la grande majorité, toutes confirment les analyses précédentes. Et les exceptions sont toutes issues de la même reconstruction de température, celle de Phil Jones et Michael Mann [JON 04], protagonistes actifs de la guerre des graphes évoquée plus haut. Et même si l'exploitation de leur reconstruction ne permet pas de rejeter l'hypothèse d'une faible sensibilité à l'irradiance solaire, elle ne la confirme pas non plus. A l'inverse, la forte sensibilité à l'activité solaire, dûment validée statistiquement, ne peut pas être contestée sous prétexte que l'on ne sait pas exactement quel pourrait en être le mécanisme d'action. Du côté de la sensibilité au CO<sub>2</sub>, la fourchette du GIEC est très large, les valeurs extrêmes allant du simple au sextuple. La nature des données climatiques historiques et paléoclimatiques est telle que, malheureusement, l'identification ne permet pas de réduire cette dernière fourchette. Elle conduit en revanche à la décaler vers le bas, en réduisant les valeurs apparemment les plus exagérées. Il n'est pas exclu non plus que l'activité humaine puisse avoir un impact négatif sur les températures globales.

Le chapitre 9 confronte les résultats de simulation du GIEC, sur la période dite historique (1850 à nos jours), avec les simulations issues des modèles identifiés. Les reproductions des températures observées se valent, mais les contributions des facteurs naturels et anthropiques se retrouvent pratiquement inversées. Il apparaît que la conclusion d'une cause humaine au réchauffement climatique est prédéterminée par le mode d'élaboration des données d'entrée du GIEC.

Le chapitre 10 présente des projections climatiques à long terme. Pour cela on se base sur les scénarios élaborés par le GIEC lui-même, les RCP (*Representative Concentration Pathways*), qui proposent toute une série de profils de concentrations futures de CO<sub>2</sub>. Sans surprise, les simulations sous contrainte sont alarmantes, d'autant plus que nous avons retenu le pire des scénarios, le RCP8.5 : « *business as usual* ». Les projections issues de l'identification libre sont beaucoup moins inquiétantes. Seule une minorité dépasse à l'horizon 2100 le seuil réputé critique d'un réchauffement de deux degrés au-dessus de l'équilibre préindustriel.



Le chapitre 11 exploite les facultés prédictives à court terme (quelques années à quelques décennies) des modèles à bilan énergétique. Les modèles climatiques identifiés sont convertibles en *modèles d'état* (état au sens de la théorie des systèmes). Les observations disponibles jusqu'à l'instant présent permettent d'estimer l'état par des techniques classiques (filtrage de Kalman), et l'on effectue ensuite la prédiction du climat futur à partir de l'état présent estimé. L'état en question inclut aussi bien celui du processus climatique proprement dit que celui des entrées perturbatrices, en particulier l'activité solaire. Les premières prédictions n'apportent rien de spectaculaire : il faudra bien attendre encore une décennie pour que l'on puisse discerner au milieu des aléas climatiques si la stagnation actuelle des températures n'est qu'une pause dans la poursuite du réchauffement, ou les prémices d'un véritable retournement. En revanche, si l'on se replace dans la situation de l'an 2000, où personne n'aurait misé sur un possible ralentissement, les simulations effectuées à l'aveugle, sans y incorporer la moindre information postérieure à l'an 2000, prédisent avec une exactitude surprenante le palier de température que nous connaissons actuellement.

Le chapitre 12 conclut que, sur la base des observations climatiques, rien ne prouve que l'activité humaine ait une influence significative sur le climat, et tout indique que l'activité solaire est déterminante. La position du GIEC est exactement inverse, en se fondant sur des modèles physico-mathématiques. Et pourtant, jusqu'ici, toutes les prédictions fondées sur les modèles du GIEC ont été infirmées par les observations ultérieures, alors que le modèle identifié à partir d'observations recouvrant plus d'un millénaire est confirmé par l'évolution climatique actuelle.