

Comment arrive-t-on à fixer des cibles à atteindre pour la réduction de gaz à effet de serre ? Quel est l'impact de les négliger ? Ou même d'en dévier un peu ? Pour répondre à de telles questions, on gagne à se tourner vers la modélisation et la simulation.

# Modéliser Le réchauffement cli

**France Caron**  
Université de Montréal

## Un monde en profond changement

Pour avoir une idée de ce que nous réserve l'avenir, il est souvent d'usage d'extrapoler à partir du passé. Une telle approche ne peut suffire lorsque des changements importants modifient en profondeur la structure du système étudié. Il nous faut alors étudier de plus près les différentes dynamiques en jeu.

C'est le cas avec les changements climatiques qui résultent de l'impact des activités humaines sur l'environnement. Quand on considère l'ensemble des dynamiques qui régissent les conditions sur notre planète, il est clair qu'il s'agit d'un système extrêmement complexe et qu'il faut pour le comprendre cibler ce qui nous intéresse en le mettant en relation avec les éléments susceptibles de l'influencer.

De tous les phénomènes associés aux changements climatiques, nous avons choisi d'examiner de plus près le réchauffement planétaire. Un des éléments susceptibles d'influencer la température est la quantité des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, parmi lesquels le CO<sub>2</sub> est dominant. Ce gaz, présent dans la nature et nécessaire à la photosynthèse des plantes, a vu sa concentration dans l'atmosphère augmenter de façon importante avec la combustion des

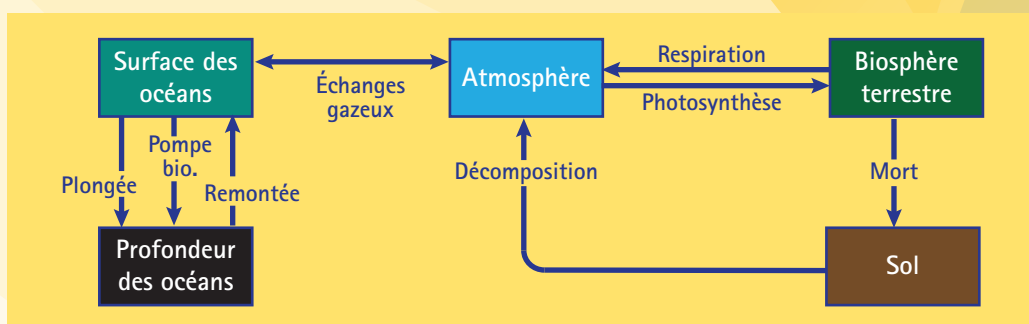
énergies fossiles. Pour mieux comprendre la perturbation climatique que cela engendre et les effets des restrictions éventuelles, on gagne à considérer le cycle du carbone qui se déploie sur notre planète, c'est à dire l'itinéraire que parcourt le carbone dans les différentes composantes du système terrestre. Pour modéliser ce système complexe, il peut être intéressant d'adopter l'approche de la *dynamique des systèmes* (voir encadré).

## Un modèle simple du cycle du carbone

Au regard du cycle du carbone, la planète Terre peut être vue comme un système fait de cinq réservoirs : la biosphère terrestre, l'atmosphère, le sol (lithosphère), l'océan de surface et l'océan profond (hydrosphère).

Cette représentation est à la base du modèle simple que proposait en 2005 le professeur émérite William M. White de l'Université Cornell à ses étudiants en sciences de la terre.

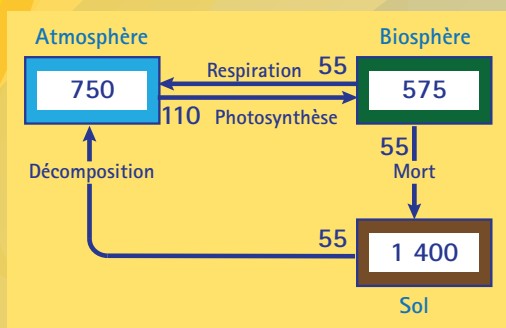
Le modèle proposé fait l'hypothèse qu'en l'absence de combustion des énergies fossiles, le carbone circule dans un système fermé et à l'équilibre. Ça ne veut pas dire que rien ne s'y passe ou qu'il n'y a aucune variabilité saisonnière ou entre les régions. Mais de façon globale, à l'échelle de la planète et pour une période couvrant quelques siècles



voire quelques milliers d'années, le mouvement est passablement le même d'une année à l'autre, et les stocks de carbone dans les réservoirs restent à peu près stables. Voyons comment en examinant de plus près la façon dont le modèle caractérise le déplacement du carbone entre les différents réservoirs.

# imatique

Considérons d'abord la triade terrestre du modèle, constituée de l'atmosphère, de la biosphère terrestre, et de la lithosphère (ou sol). La version la plus simple du modèle proposé par White considère constants les flux annuels entre ces réservoirs. Le schéma ci-dessous montre les valeurs attribuées aux différents flux annuels (55 ou 110 gigatonnes/année) entre les réservoirs que sont l'atmosphère, la biosphère et la lithosphère; ces trois réservoirs contiennent respectivement 750, 575 et 1400 gigatonnes<sup>1</sup> de carbone, toujours selon ce modèle.



Si la biosphère terrestre absorbe chaque année 110 gigatonnes (Gt) de carbone de l'atmosphère pour la photosynthèse, elle lui retourne en revanche 55 Gt par la respiration des animaux et végétaux. La mort de ceux-ci transfère annuellement 55 Gt de carbone au sol, tandis que la décomposition en relâche tout autant du sol à l'atmosphère. En somme, au sein de cette triade, le modèle suppose que dans une année, chacun des réservoirs absorbe autant de carbone des

1. Une gigatonne correspond à un milliard de tonnes :  $1 \text{ Gt} = 10^9 \text{ tonnes} = 10^{12} \text{ kg}$ .

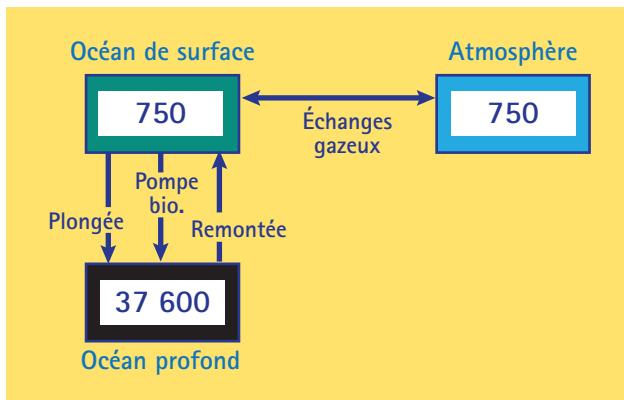
## La dynamique des systèmes

La dynamique des systèmes, conçue par Jay W. Forrester, est une façon d'aborder l'étude d'un système complexe en considérant les relations entre différentes composantes qui interagissent entre elles, possiblement avec un délai ou des boucles de rétroaction. On représente souvent de tels systèmes comme des ensembles de réservoirs communiquant entre eux. En décrivant le mouvement de substances (ou de populations) depuis, vers ou entre ces différents réservoirs (ou compartiments) et en définissant des valeurs initiales pour le contenu de chacun de ces réservoirs (ou stock), on peut construire un modèle qu'il est possible de simuler. Les mouvements (ou flux) sont décrits par la quantité de substance entrant dans ou sortant d'un réservoir par unité de temps. Ces quantités peuvent dépendre de différents éléments du système.

Si tous les mouvements se font d'un réservoir à l'autre, le système est dit fermé. S'il peut entrer quelque chose dans un réservoir qui provient de l'extérieur du système ou s'il est possible que quelque chose sorte du système depuis l'un de ses réservoirs, le système est dit ouvert.

deux autres qu'il leur en refile, maintenant donc constante la quantité de carbone contenue dans chaque réservoir. En fait, c'est même la connaissance (ou, plus justement, l'hypothèse) de l'équilibre qui a permis de déterminer certaines des « données » présentées ci-haut.

Regardons à présent ce qui se passe du côté de l'océan. On peut conceptuellement le diviser en deux réservoirs de carbone : l'océan de surface et l'océan profond.



Les transferts de carbone entre les deux couches de l'océan s'expliquent d'abord par la circulation océanique, où les écarts de température, de densité, de salinité ainsi que la rotation de la terre, engendrent selon le lieu géographique des mouvements de plongée (des eaux de surface, froides, salées et riches en  $\text{CO}_2$ ) ou de remontée (des eaux profondes, chaudes, moins salées et moins riches en

$\text{CO}_2$ ). La « pompe biologique » constitue un autre mécanisme qui fait passer le carbone de l'océan de surface à l'océan profond : ici, le carbone absorbé par la photosynthèse des plantes aquatiques de l'océan de surface se transmet aux autres organismes vivants qui se succèdent dans la chaîne alimentaire, et finit par aboutir aux matières inertes associées aux sédiments de l'océan profond. Réflétant essentiellement la dynamique de l'océan comme écosystème, la pompe biologique est d'abord considérée dans le modèle proposé comme un flux de carbone constant, de 4 Gt par année. En revanche, les flux annuels de carbone associés à la plongée et à la remontée, sensibles à la concentration en carbone, sont définis de façon relative aux stocks de carbone dont ils émanent : 3/100 du stock de carbone de l'océan de surface pour la plongée et environ 7/10 000 du stock de carbone de l'océan de surface pour la remontée. Ainsi, comme

$$4 + 0,03 \times 750 \approx 0,0007048 \times 37600,$$

le modèle nous présente l'océan dans un état initial d'équilibre, si l'on ne considère pas ses échanges avec l'atmosphère.

De leur côté, les échanges gazeux entre l'océan de surface et l'atmosphère peuvent aller dans les deux sens. Considéré dans le modèle comme proportionnel à la différence des stocks de carbone dans ces deux réservoirs, le flux va du réservoir avec la plus grande quantité de carbone vers celui qui en a le moins. Comme l'intensité du flux dépend de l'importance de cette différence, on peut voir dans cette relation une application de la loi de diffusion de Fick (voir encadré), si l'on suppose que le volume de l'océan de surface a été défini de façon telle que la simple comparaison des stocks puisse se substituer à celle des concentrations. Le coefficient de diffusion utilisé par White (1/75) reflète à la fois la surface d'échange entre les réservoirs et l'efficacité de cet échange.

## La loi de diffusion de Fick (1855)

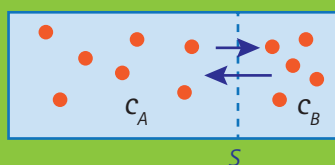
La première loi de diffusion de Fick postule que le flux de diffusion  $J$  d'une substance va des régions de forte concentration vers les régions de faible concentration, avec une ampleur proportionnelle à la différence des concentrations ( $c$ ). De façon continue, pour un flux qui s'écoule dans une dimension :

$$J = -k \frac{dc}{dx},$$

où  $J$  correspond à la quantité de substance traversant une unité de surface par unité de temps et où  $k$  est le coefficient de diffusion. En 3D, le flux de diffusion s'exprime par un vecteur et la variation de concentration par un gradient :

$$J = -k \nabla c.$$

Dans une dynamique de réservoirs et de stocks, on peut considérer que le flux de diffusion d'un réservoir à l'autre correspond aux échanges qui se font à travers la surface qui sépare les deux milieux.



La loi de Fick peut alors s'exprimer ainsi :

$$J = -\hat{k}(c_A - c_B),$$

où  $\hat{k}$  est proportionnel à l'aire de la surface  $S$ .

Or, ici, comme les stocks associés à l'océan de surface et à l'atmosphère ont la même valeur initiale, le flux demeure nul et les deux réservoirs maintiennent leur stock de 750 Gt de carbone. Par conséquent, autant dans les mers que sur les terres, l'équilibre est maintenu dans le modèle. Jusqu'à ce qu'on y considère l'impact de l'activité humaine ...

### Un équilibre rompu

Extraits par l'homme des profondeurs de l'océan ou du sol et émettant, par la combustion qu'on en fait, du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, les combustibles fossiles constituent un apport extérieur au cycle du carbone. Leur utilisation transforme ce système fermé en un système ouvert, et perturbe l'équilibre qui avait été atteint en cette période interglaciaire. Pour apprécier l'ampleur de cette perturbation, il nous faut retourner aux données.

Depuis 1950, les émissions mondiales annuelles de CO<sub>2</sub> ont presque été multipliées par 6, passant de 6,4 Gt/année à plus de 36 Gt/année. Comme le carbone constitue 12/44 de la masse du CO<sub>2</sub>, cela signifie que l'ajout annuel de carbone dans l'atmosphère lié aux émissions de CO<sub>2</sub> est passé dans les 70 dernières années de 1,75 Gt/année à presque 10 Gt/année. Quand on additionne tout ce carbone envoyé dans l'atmosphère en 70 ans, c'est près de 400 gigatonnes de carbone que les émissions de CO<sub>2</sub> produites par la combustion des énergies fossiles ont introduites artificiellement dans le cycle du carbone.

Durant cette même période, on a par ailleurs constaté que la concentration en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère est passée de 310 parties par millions (ppm) à 410 parties par millions. Comme il est établi que 1 ppm de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère correspond à 7,81 Gt de CO<sub>2</sub> et donc à 2,13 Gt de carbone, les 100 ppm de CO<sub>2</sub> additionnels correspondent à 213 Gt de carbone supplémentaire dans l'atmosphère. C'est déjà une quantité phénoménale, mais bien inférieure aux 395 gigatonnes qu'on lui a envoyées. Où est passée la différence?

Si l'on se fie au modèle proposé, elle ne peut

### Jay W. Forrester (1918-2016)

Jay Wright Forrester est considéré comme le père de la dynamique des systèmes. Né au Nebraska, il prit en charge l'électrification du ranch familial avant la fin de ses études secondaires. Après un diplôme en génie électrique, il entra au MIT en 1939 et se spécialisa dans la conception de servomécanismes. Directeur du laboratoire informatique du MIT (1945 à 1951), il accepta en 1956 une chaire de professeur à l'École de gestion Sloan de cette institution. Il reconnaitra dans les problèmes de gestion des occasions d'application des principes du génie et de la simulation informatique; c'est là que naîtra la dynamique des systèmes comme approche de modélisation. Dans ses livres *Industrial Dynamics*, *Urban Dynamics* et *World Dynamics*, il montre la portée de ces idées pour traiter de problématiques émanant autant des organisations humaines que de l'environnement physique.



qu'être passée dans l'océan, puisque les flux du côté terrestre, tous supposés constants, ne paraissent pas affectés par la quantité de carbone dans l'atmosphère. (On pourra revenir plus tard sur ces simplifications initiales.)

Il reste qu'il est admis dans la communauté scientifique que la quantité accrue de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère contribue de façon importante à l'effet de serre et au réchauffement climatique. Entre 1950 et 2019, pendant que la concentration en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère augmentait de 14 ppm par décennie, la température globale moyenne gagnait tout un degré Celsius, pour une augmentation moyenne et presque régulière de 0,14°C par décennie. Cette corrélation est reflétée dans l'équation suivante, incluse dans le modèle de White, et liant par une relation affine la température globale moyenne annuelle ( $T$ ) à la concentration ( $c$ ) de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère :

$$T = T_0 + (c - c_0)/100.$$

$T_0$  et  $c_0$  sont des valeurs de référence associées à une année dans l'intervalle où la relation s'applique. L'illustration en bas de page représente le modèle ainsi complété.

On peut à présent définir différents scénarios d'utilisation des énergies fossiles pour en évaluer, par la simulation, l'impact sur le système ainsi modélisé.

## Simuler pour évaluer

La façon la plus simple de simuler ce système consiste à initialiser les différents réservoirs avec les valeurs qui leur sont associées pour une même année, et à y additionner, d'une année à l'autre, la valeur des flux annuels entrants (positifs) et sortants (négatifs).<sup>2</sup>

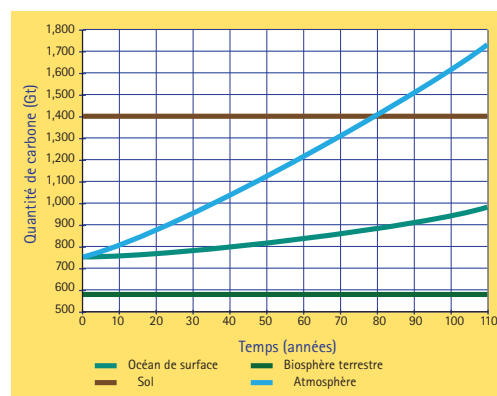
Les données de stocks et de flux utilisées dans le modèle correspondent à peu près à l'état de la planète en 1990, même si le système n'était déjà plus à l'équilibre. En partant de cette année de référence pour initialiser le système, on peut commencer par valider les capacités de prédiction du modèle en cherchant à lui faire reconstruire l'histoire récente.

En 1990, la température globale moyenne ( $T_0$ ) se situait à 13,4°C. La concentration moyenne de  $CO_2$  ( $c_0$ ) dans l'atmosphère y était de 352 ppm, en cohérence avec la valeur de 750 Gt de carbone associée à ce

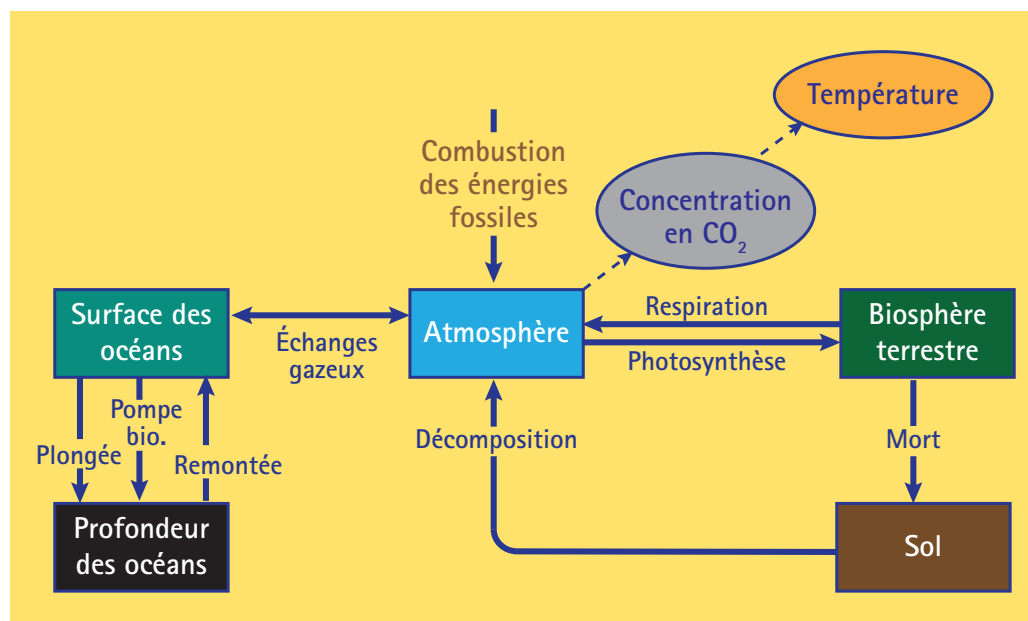
2. Si l'on considère les flux comme des dérivées par rapport au temps, une telle approche équivaut à les intégrer numériquement avec la méthode d'Euler et un  $\Delta t=1$ .

réservoir. Les émissions de  $CO_2$  liées à la combustion des énergies fossiles en 1990 correspondaient à un afflux externe de 6 Gt de carbone dans l'atmosphère.

Depuis, les émissions de  $CO_2$  ont augmenté de 0,14 Gt/année en équivalent carbone. On peut donc définir comme premier scénario ce test de la réalité, en décrivant le flux d'apport en carbone lié à la combustion des énergies fossiles avec la fonction suivante :  $F_e(t) = 6 + 0,14 t$ , où  $t$  est le nombre d'années écoulées depuis 1990.

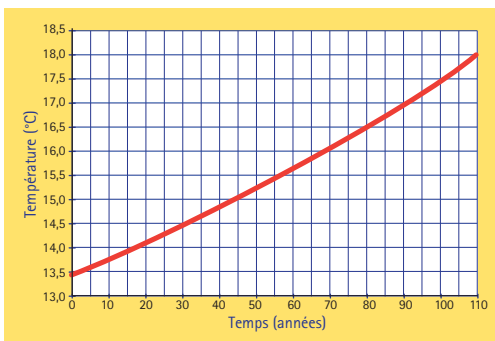


La figure ci-haut représente l'évolution ainsi simulée des quantités de carbone dans les différents réservoirs autour de l'atmosphère. Avec un accroissement linéaire des émissions de  $CO_2$  qui constituent des ajouts à la quantité de carbone en circulation, de façon cohérente avec l'intégration d'une fonction linéaire et malgré la contribution croissante de l'océan pour absorber ce carbone supplémentaire, la simulation révèle une croissance plus rapide



que linéaire de la quantité de carbone dans l'atmosphère. En  $t=30$  (qui correspond à l'année 2020), les calculs effectués par la simulation chiffrent le stock de carbone dans l'atmosphère à 956 Gt, ce qui équivaldrait à une concentration de 449 ppm. Alors que la concentration réelle de  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère vient de franchir la barre historique des 410 ppm, le modèle, dans toutes ses simplifications, paraît donc plus sévère que ne l'est la réalité.

Cela nous est confirmé en examinant la courbe de la température globale moyenne, telle que simulée en utilisant la relation  $T = 13,4 + (c - 352)/100$ . La température paraît croître de 1 degré en 30 ans (de 13,4°C à 14,4°C), alors que sa croissance « n'a été que » de 0,7°C entre 1990 et 2020.



Il est heureux que le modèle ne soit pas une représentation tout à fait juste de la réalité, car il prédit un réchauffement de 4,6°C entre 1990 et 2100. Cela dit, il met en lumière des phénomènes bien réels, et le risque qu'on court à laisser croître les émissions de  $\text{CO}_2$ . Il permet aussi de comparer différents scénarios et de mieux en comprendre les implications.

Par exemple, que se passerait-il si l'on ramenait instantanément aujourd'hui les émissions de  $\text{CO}_2$  à 95% du niveau de 1990?<sup>3</sup> Et si l'on arrêterait toute émission de  $\text{CO}_2$  en 2030? Ce sont là des scénarios assez peu réalistes mais qui permettent de mieux cadrer les gains envisageables. C'est la beauté de la simulation que de nous permettre d'entrevoir l'horizon des possibles, en ratissant aussi large que souhaité.

3. Comme le visait initialement le Protocole de Kyoto, mais pour l'année 2012.

Toutefois, pour mieux chiffrer les gains possibles, on gagnerait à améliorer la précision du modèle, en revoyant certaines hypothèses utilisées.

### Des pistes d'amélioration du modèle

On pourrait d'abord, comme le suggère White dans une seconde version du modèle, considérer que l'augmentation des émissions de  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère s'accompagne d'une augmentation de nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ) et donc de l'activité de photosynthèse et de la productivité de l'ensemble de la biosphère terrestre. Ainsi, de constants, les flux de respiration, de mort et de décomposition deviendraient dynamiques à leur tour. On pourrait aussi vouloir prendre en compte la déforestation dans la modélisation des changements de cette biosphère. On pourrait même s'intéresser aux boucles de rétroaction associées à la fonte des glaces et du pergélisol. Réduisant l'albédo et libérant du  $\text{CO}_2$  et du  $\text{CH}_4$ , ces fontes causées par le réchauffement planétaire contribuent à l'accélérer.

On pourrait ensuite revoir les flux entre les couches de l'océan, en se demandant aussi si l'on ne gagnerait pas à y ajouter une couche intermédiaire, à étendre entre ces couches l'application de la loi de diffusion de Fick, à considérer de façon explicite d'autres forces en jeu, etc. Certains de ces raffinements pourraient demander toutefois une modélisation de l'espace beaucoup plus fine que ce à quoi nous nous sommes limités avec nos cinq réservoirs. Et on entrerait là dans le domaine des équations aux dérivées partielles, ce que font les spécialistes du domaine<sup>4</sup>.

Mais si le but visé par le modèle est d'aider à faire comprendre le phénomène à un plus grand nombre, on gagne à chercher à en maximiser la simplicité, sans pour autant trahir la réalité.

4. Voir les articles de Philippe Drobinski, *Accromath*, 2016, vol. 11.1, et de René Laprise, 2011, vol. 6.1.