

BULLETIN N° 262
ACADÉMIE EUROPÉENNE INTERDISCIPLINAIRE
DES SCIENCES

INTERDISCIPLINARY EUROPEAN ACADEMY OF SCIENCES



Lundi 5 Décembre 2022 (en format mixte présence-distance) :

15h00 :

Conférence :

« En quête du Graal : la fusion thermonucléaire contrôlée »

Par Jean-Louis BOBIN

Membre de l'AEIS

Professeur émérite (Sorbonne Universités ex-P6)

Notre Prochaine séance aura lieu le lundi 09 Janvier 2023 de 15h00 à 17h00

Salle Annexe Amphi Burg

Institut Curie, 12 rue Lhomond – 75005 Paris

Elle sera consacrée, à **15h précises**, à la conférence invitée :

***« Des modèles climatiques aux évolutions environnementales :
comment s'en saisir »***

Par le Pr. Hervé LE TREUT

Membre de l'Académie des Sciences

Professeur à Sorbonne Université et

à l'École Polytechnique

Ancien directeur de l'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL)

ACADÉMIE EUROPÉENNE INTERDISCIPLINAIRE DES SCIENCES

INTERDISCIPLINARY EUROPEAN ACADEMY OF SCIENCES

PRÉSIDENT : Pr Victor MASTRANGELO
VICE-PRÉSIDENTE : Dr Edith PERRIER
VICE PRÉSIDENT BELGIQUE(Liège) : Pr Jean SCHMETS
VICE PRÉSIDENT ITALIE(Rome) : Pr Ernesto DI MAURO
VICE PRÉSIDENT Grèce (Athènes) : Pr Anastassios METAXAS

SECRÉTAIRE GENERAL : Eric CHENIN
SECRÉTAIRE GÉNÉRALE adjointe : Irène HERPE-LITWIN
TRÉSORIÈRE GÉNÉRALE : Françoise DUTHEIL

MEMBRES CONSULTATIFS DU CA :
 Gilbert BELAUBRE
 Michel GONDRAN

PRÉSIDENT FONDATEUR : Dr. Lucien LÉVY (†)
PRÉSIDENT D'HONNEUR : Gilbert BELAUBRE

CONSEILLERS SCIENTIFIQUES :
SCIENCES DE LA MATIÈRE : Pr. Gilles COHEN-TANNOUJDI
SCIENCES DE LA VIE ET BIOTECHNIQUES : Pr Ernesto DI MAURO

CONSEILLERS SPÉCIAUX :
ÉDITION : Pr Robert FRANCK
RELATIONS EUROPÉENNES : Pr Jean SCHMETS
RELATIONS avec AX : Gilbert BELAUBRE
RELATIONS VILLE DE PARIS et IDF : Michel GONDRAN et Jean BERBINAU
MOYENS MULTIMÉDIA et UNIVERSITÉS : Pr Victor MASTRANGELO et Éric CHENIN
RECRUTEMENTS : Pr. Sylvie DERENNE, Pr Anne BURBAN, Pr Jean-Pierre FRANÇOISE, Pr Christian GORINI, Pr Jacques PRINTZ, Jean BERBINAU
SYNTHÈSES SCIENTIFIQUES : Dr Jean-Pierre TREUIL, Marie Françoise PASSINI
MECENAT : Pr Jean Félix DURASTANTI, Jean BERBINAU, Anne BURBAN
GRANDS ORGANISMES DE RECHERCHE NATIONAUX ET INTERNATIONAUX : Pr Michel SPIRO
THÈMES ET PROGRAMMES DE COLLOQUES : Pr Jean SCHMETS et Dr Johanna HENRION-LATCHE

SECTION DE NANCY :
PRÉSIDENT : Pr Pierre NABET
SECTION DE REIMS :
PRÉSIDENTE : Dr Johanna HENRION-LATCHE

Septembre 2022

N°259

TABLE DES MATIERES

- p. 03 Séance du 5 Décembre 2022 : conférence de Jean-Louis BOBIN
 p. 11 Conférence du 9 Janvier 2023 : notice biographique succincte du Pr. Hervé LE TREUT
 p. 12 Ouvrage de notre collègue Daniel COURGEAU, membre de l'AEIS :
 « Understanding human life »
 p. 13 Documents

Prochaine séance : lundi 9 Janvier 2023 de 15h00 à 17h00

**« Des modèles climatiques aux évolutions environnementales :
 comment s'en saisir »**

Par le Pr. Hervé LE TREUT

Membre de l'Académie des Sciences
 Professeur à Sorbonne Université et
 à l'École Polytechnique
 Ancien directeur de l'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL)

ACADÉMIE EUROPÉENNE INTERDISCIPLINAIRE DES SCIENCES INTERDISCIPLINARY EUROPEAN ACADEMY OF SCIENCES

Séance du Lundi 5 Décembre 2022 mixte présence-distance

La séance est ouverte à 15h, sous la Présidence de Victor MASTRANGELO

- **Étaient présents physiquement nos Collègues membres titulaires** de Paris : Jean BERBINAU, Jean-Louis BOBIN, Éric CHENIN, Françoise DUTHEIL, Irène HERPE -LITWIN, Édith PERRIER, Denise PUMAIN, René PUMAIN, Jean SCHMETS, Jean-Pierre TREUIL.
- **Étaient présents physiquement nos Collègues membres correspondants** : Benoît PRIEUR et Jacky ROUSSELLE
- **Étaient connectés à distance nos Collègues** : Gilbert BELAUBRE, François BOUCHET, Anne BURBAN, Gilles COHEN-TANNOUDI, Ernesto DI MAURO, Jacques FLEURET, Abdel KENOUI, Jacques PRINTZ.

Conférence de Jean-Louis BOBIN :

« En quête du Graal : la fusion thermonucléaire contrôlée »

1. Présentation du Conférencier par notre Président Victor MASTRANGELO

Jean-Louis BOBIN est professeur émérite à Sorbonne-Université.

Le Docteur Jean-Louis BOBIN est ingénieur de l'École Polytechnique, ingénieur de l'Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires (INSTN) de Saclay et Docteur d'État en sciences physiques de l'Université Pierre et Marie Curie Paris VI.

La première période de sa carrière s'étale de 1958 à 1980 : ingénieur de recherches au CEA à la Direction des Applications Militaires (DAM), recherches sur les matériaux nucléaires puis à partir de 1961 par des recherches expérimentales sur les décharges dans les gaz et interactions laser. Il a été responsable d'une unité où ont été obtenus en 1969 de façon contrôlée des neutrons par impact laser sur le deutérium. Dans les années 70, il a travaillé sur les effets non linéaires dans les interactions laser-plasma. Il a été professeur invité à l'Université du Québec à Montréal, à l'Université d'Osaka et à l'Université de Californie.

La deuxième période de sa carrière s'étale de 1980 à 2002 : professeur à l'Université Pierre et Marie Curie Paris VI, Directeur pendant 12 ans du laboratoire de physique optique corpusculaire avec des travaux de recherches sur la création de plasma par interaction de lasers résonnants et sur l'accélération d'électrons par des ondes de plasma. Il a participé à l'organisation du Congrès Général de la Société Française de Physique de 1997 et création d'un Bar des Sciences au Salon du Livre en 1999.

La troisième période démarre en 2002 : Professeur Émérite à Sorbonne-Université, contributeur à Prospective énergétique dans le cadre de Prospective 2100, participation à la rédaction d'ouvrages édités par l'association Sauvons le Climat, pendant 4 ans Président de la Commission Energie et Environnement de la Société Française de Physique, reconstitution 2005 Année Mondiale de la Physique d'une expérience de mesure de la lumière entre l'Observatoire de Paris et la Butte de Montmartre.

Rédacteur d'ouvrages : 'Introduction à la relativité' paru chez Diderot multimédia en 1997, 'Introduction à la fusion thermonucléaire contrôlée' EDP sciences 2011, et version anglaise de l'ouvrage précédent éditée en 2014.

Ouvrages grand public : 'L'énergie' dans la collection Dominos de Flammarion 1996 ; 'Quelle est la vraie vitesse de la lumière ?' Collection les Petites Pommes du Savoir, Le Pommier 2004 ; $E=mc^2$?

'Collection les Petites Pommes du Savoir, Le Pommier 2005 ; 'Demain, Quelle terre ? Dialogues sur l'environnement et la transition énergétique' EDP Sciences 2015.

Ouvrages sur l'énergie : 'L'énergie dans le Monde : bilan et perspectives' , coauteurs :Hervé Nifenecker et Claude Stéphane EDP Sciences 2001 et réédité 2007; 'L'énergie de demain' coauteurs Nifenecker et Elisabeth Huffer Grenoble Sciences 2005 ; 'Prospectives énergétiques à l'horizon 20100 ,données, contraintes et scénarios'EDP Sciences 2013 ;....

Publications dans revues scientifiques : 'Compte-rendus de l'Académie des Sciences, Journal of Quantum Electronics, Physic Letters, Physical Review Letter, Annales de physique, Annales des Mines,.

2. Résumés de la conférence

En quête du Graal : la fusion thermonucléaire contrôlée

Jean-Louis BOBIN

Professeur émérite à Sorbonne-Université

Résumé

Après avoir présenté quelques bases physiques de la fusion nucléaire, l'essentiel de l'exposé sera consacré au confinement magnétique et plus précisément aux machines appelées tokamaks. Elles ont fait l'objet de vastes programmes de recherches lancés vers 1970 en même temps que se développaient les lasers multifaisceaux pour le confinement inertiel. On attend vers la fin de la présente décennie les premiers résultats significatifs du projet international ITER, un tokamak, initié en 1985. Après plus d'un demi-siècle de recherches et de développement, la preuve n'est toujours pas apportée d'une énergie de fusion supérieure à l'énergie investie par quelque procédé que ce soit. Il faudra encore de longs délais avant d'envisager une exploitation industrielle : un autre demi-siècle peut être.

Abstract

Some physical basis of nuclear fusion will be presented first. Most of the talk will be devoted to magnetic confinement, more precisely to the devices dubbed tokamaks. Large research programs aiming at bigger and bigger systems started ca 1970 as did the development of multi beam lasers for inertial confinement fusion. Significant results from the international ITER project (initiated in 1985) are expected by the end of the present decade. More than half a century of research and development did not produce any evidence of a fusion energy larger than the invested energy. It is still a long way before considering a commercial reactor. Another fifty years might be needed.

3. Synthèse de la conférence

INTRODUCTION ET PRESENTATION D'ENSEMBLE

Deux mythes sont reliés à la fusion : d'abord cette énergie est présentée comme le Graal de toutes les sources d'énergies du fait de la grande disponibilité des ressources et de la minimisation des déchets radioactifs par rapport à l'énergie de fission. Puis le deuxième mythe : la fusion qui veut reproduire le feu du soleil est une entreprise prométhéenne par deux voies : le feu doux par confinement magnétique (ITER,..) et le feu explosif par le confinement inertiel (National Ignition Facility -NIF ; Laser MegaJoule -LMJ,..).

Le Pr Bobin présente successivement les bases physiques de la fusion, le tokamak, ITER, la fusion inertielle et l'avenir de la fusion.

Sur les bases physiques, la fission de l'uranium 235 d'une part, et la fusion du deutérium et du tritium d'autre part, produisent respectivement 60 000 fois et 10 millions de fois plus d'énergie que la combustion du charbon à masse équivalente.

La fusion nécessite dans les tokamaks des températures supérieures à 100 millions de degrés Kelvin (soit plus de 10 keV). Elle ne produit que des déchets radioactifs limités aux matériaux activés par les neutrons de 14 MeV (pour la réaction D-T). C'est Jean Perrin qui en 1919 a postulé que le soleil tire son énergie de réactions nucléaires de fusion d'atomes d'hydrogène en hélium. En 1938 George Gamow et Edward Teller réalisent les premiers calculs sur les réactions de fusion. Parmi les réactions de fusion envisageables, la plus accessible, soit celle avec la plus grande section efficace pour le minimum d'énergie, est la fusion du deutérium (D) et du tritium (T) qui donne de l'hélium 4 (énergie 3,5 MeV) et un neutron possédant une très haute énergie de 14 MeV.

Pour le confinement magnétique, il faut maintenir le plus longtemps possible à 100 millions de degrés un plasma ténu contenant 10^{14} ions/cm³ et isolé de toute paroi par du champ magnétique : c'est du vide, en comparaison la densité de l'atmosphère terrestre est de $3 \cdot 10^{19}$ molécules/cm³. Il convient de limiter la densité du plasma à 10^{14} ions/cm³ au regard de la tenue des matériaux de structure. A 100 millions de degrés Kelvin, il faut aussi que le produit $n\tau_c$ soit supérieur à 10^{14} cm⁻³s (critère de Lawson (1957), où n est la densité d'ions dans le plasma, et τ_c est le temps pendant lequel le plasma reste confiné). L'atteinte d'un équilibre stable en confinement magnétique est conditionnée par la maîtrise des pertes d'énergie par rapport au gain d'énergie de la fusion. Pour minimiser ces pertes, il faut augmenter le rapport volume/surface, d'où les générations successives de tokamak de plus en plus volumineux.

La voie inertielle de la fusion fait exploser une très petite quantité de matière (quelques microgrammes) après l'avoir comprimée avec des lasers de forte puissance. Un plasma est un milieu très complexe, excellent conducteur électrique à haute température, siège d'instabilités.

Le tore est la configuration la plus simple pour du confinement magnétique (et non la sphère) car imposée par les équations de Maxwell. C'est la géométrie du tokamak et en particulier celle d'ITER. L'anneau de plasma joue le rôle du secondaire d'un transformateur. Le courant est créé par induction, ce qui implique un régime pulsé. Le champ magnétique poloïdal créé par ce courant azimuthal est combiné à celui de bobines de champ toroïdal et à celui de bobines de champ axial. La densité d'énergie du plasma ne doit représenter qu'une fraction de la densité d'énergie magnétique. Le champ magnétique rend aussi le plasma anisotrope : les mouvements des ions sont différents dans le sens parallèle au champ et dans le sens perpendiculaire. D'autres configurations de confinement magnétique existent, comme le « stellarator ».

L'effet Joule pour chauffer le plasma n'est plus efficace au-delà de quelques millions de degrés donc il convient d'injecter de l'énergie dans le plasma. La compression adiabatique a été utilisée avec succès mais a été abandonnée. L'injection d'énergie dans un tokamak se réalise actuellement par **l'injection de neutres de haute énergie** et par **l'injection d'ondes électromagnétiques**. Cette dernière technique de chauffage, à condition d'être correctement appliquée, induit un courant toroïdal pouvant maintenir la configuration magnétique au-delà de la durée de l'impulsion fournie par le transformateur (« *current drive* »).

Le réacteur thermonucléaire est :

- un amplificateur d'énergie (confinement inertiel, fonctionnement pulsé)
- ou bien un amplificateur de puissance (confinement magnétique, régime semi-continu).

Dans ce cas, le régime d'allumage n'est pas indispensable (ITER ne le prévoit pas). Le gain $Q = P_{\text{fusion}}/P_{\text{chauffage}}$ est une fonction très rapidement croissante dépendant du produit $nT\tau_E$ avec n : densité d'ions, T température en keV et τ_E le temps de confinement de l'énergie.

Le temps de confinement de l'énergie τ_E est le temps expérimental caractéristique de décroissance de la température jusqu'à environ le tiers de sa valeur initiale lorsque tous les chauffages sont coupés.

Pour ITER, il est visé la valeur de Q de 10 pour la valeur de $26.10^{20} \text{ m}^{-3} \cdot \text{keV} \cdot \text{s}$ du produit $nT\tau_E$

Globalement, toute machine de fusion doit respecter :

- Le critère de Lawson (1957)
 $n\tau_c > 10^{14} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}$; $T : 10^8 \text{ K}$; τ_c : temps de confinement du plasma
- Le triple produit $nT\tau_E \geq 3.10^{22} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{K} \cdot \text{s}$; τ_E le temps de confinement de l'énergie
- Critère spécifique au tokamak :

Goldston (1984) pour dimensionnement de la machine :

$$I^2 \text{ (MA)} = 1,4 \cdot 10^{-20} nT\tau_E \text{ (m}^{-3} \cdot \text{keV} \cdot \text{s)}.$$

LE PROJET ITER

Il a démarré en 1985 par la rencontre du président des Etats-Unis Ronald Reagan et le premier secrétaire du parti communiste de l'Union Soviétique Mikhaïl Gorbatchev. ITER est une organisation internationale à 7 partenaires : l'Europe via Euratom, la Chine, la Corée du Sud, Les Etats-Unis, l'Inde, le Japon et la Russie.

Le projet ITER en 1998 visait une puissance supérieure au GW pour un volume de plasma de 2000 m^3 , avec démonstration de l'allumage et avec un budget de 7 G\$. Jugé trop onéreux le projet a été revu en 2001 pour un budget divisé par 2 pour la puissance de 400 MW de fusion D-T pendant 400 s (facteur Q de 10) pour un volume de plasma de 800 m^3 , un courant de plasma de 15 MA, moins de 1 gramme de D-T et avec renoncement à l'allumage. C'est le projet en construction à Cadarache depuis cette date. Il est attendu pour ITER un temps de confinement de l'énergie τ_E dans une plage comprise entre 1,5 s et 5 s.

La phase de montage d'ITER vient d'être interrompue après la découverte de fissures dans les éléments livrés par la Corée du Sud : bouclier thermique et secteur de l'enceinte à vide. Après le décès en mai 2022 de Bernard Bigot, directeur du projet de 2015 à 2022, Pietro Barabaschi assure à présent la direction du projet.

LES PROJETS FUTURS DE MACHINES A CONFINEMENT MAGNETIQUE

Un tokamak DEMO de 1 GW de puissance thermique due à la fusion pourrait succéder à ITER au cours du XXI^{ème} siècle. Un réacteur de fusion avec la réaction D-T est une énorme source de neutrons de 14 MeV.

Ceux-ci peuvent être utilisés pour :

- Céder leur énergie à un caloporteur (eau, ...).
- Régénérer le tritium nécessaire à la réaction D-T par réaction du lithium avec les neutrons (couverture tritigène).
- Fissionner des noyaux lourds (uranium, plutonium, thorium, actinides mineurs) et extraire l'énergie de fission induite
- Fabriquer des noyaux fissiles : U233, ...
- Induire des transmutations de produits de fission, d'actinides mineurs pour leur élimination.

Il en ressort le concept de réacteur hybride fusion-fission qui permettrait de mieux valoriser l'énergie des neutrons plutôt que de faire uniquement de l'énergie thermique via un caloporteur. De plus, il ne serait pas nécessaire d'avoir des machines avec de gros volumes de plasma. C'est une vieille idée de Hans Bethe (1976). Un facteur d'amplification de l'ordre de 10 est ainsi attendu par rapport à la fusion pure. Des études détaillées en ce sens ont été menées en particulier par Paul Henri Rebut (premier responsable du projet ITER dans sa phase préparatoire) avec le concours de scientifiques du centre d'études russe de Sarov (Arzamas 16) pour la partie calculs.

Les hybrides peuvent se concevoir aussi bien à partir du confinement inertiel (LIFE à Livermore avec des lasers, InZinerator à Sandia avec la machine électromagnétique Z) que du confinement magnétique (nombreuses études : en particulier celles de Wallace Mannheimer, retraité du NRL, pour un tokamak compact couplé avec d'autres installations nucléaires du cycle du combustible uranium ou thorium). Il y a de nombreuses start-ups dans le monde qui s'activent sur la fusion nucléaire.

LA FUSION INERTIELLE

Le principe de la fusion inertielle se base sur une compression du mélange à fusionner par du rayonnement laser ou pas ou bien par des particules, puis son allumage et enfin son explosion (similitude avec le moteur à explosion !). Dans les années 70, on démontrait par simulation numérique qu'avec 50 kJ de lumière laser, on obtenait 2,5 MJ d'énergie de fusion.

Il était aussi constaté que la fusion était plus facile en augmentant l'échelle : passage de microgrammes de matière à environ 1 mg. Ce qu'on a trouvé de mieux pour faire fonctionner le système, c'est l'installation d'implosion indirecte par laser : on n'utilise pas directement l'impact du faisceau laser sur l'objet à comprimer mais on fait un impact sur la cavité interne d'une cavité cylindrique. Il y alors du rayonnement secondaire qui se produit qui est beaucoup plus homogène pour comprimer la matière. Le 8 août 2021, il a été obtenu au NIF (National Ignition Facility) 1,3 MJ de fusion pour 1,9 MJ d'énergie laser dans l'ultraviolet. Donc rapport de 0,7 sur les énergies.

4. Échanges avec l'auditoire

Une question sur les perspectives de la fusion inertielle. JL Bobin précise qu'il y a eu un engouement de programmes pour la fusion inertielle à partir des simulations numériques entreprises dans les années 70 qui donnaient des résultats encourageants. Mais il a fallu augmenter au fil du temps l'énergie des lasers (cf. ci-dessus) et qu'on n'est pas encore parvenu à au moins un gain de 1. (hors conférence : une communication de décembre 2022 d'un gain de 1,2 obtenu récemment au NIF est à analyser). L'installation du laser Mégajoules en France est opérationnel mais toujours en construction.

Françoise Duthel : les murs et les fondations d'ITER seraient fissurés. Il y aurait un défaut d'étanchéité. JL Bobin répond qu'il y a confusion, que les fissures sont dans les livraisons coréennes de pièces métalliques.

Jean Berbinou (ou Jean Schmets ?) : Où en sont les chinois ? JL Bobin répond que le gouvernement chinois a fait un gros effort d'éducation scientifique depuis une quarantaine d'années. Les chinois ont un tokamak et de temps en temps ils annoncent des résultats crédibles. Ils font partie de la communauté de la fusion à part entière et reconnue.

Victor Mastrangelo : Les chinois auraient un projet hybride. JL Bobin : Au NIF il y a un projet hybride basé sur les lasers. En Chine, il ne sait pas.

Remerciements d'une participante pour la clarté de l'exposé de JL Bobin.

Abdel Kenoufi : Des projets de recherche ont des retombées technologiques. Qu'en est-il pour ITER ?

JL Bobin : dans le cadre d'ITER, la technologie développée des supraconducteurs a des applications industrielles.

Gilles Cohen-Tannoudji remercie l'orateur pour son exposé extrêmement riche et intéressant.

Gilles Cohen-Tannoudji a publié dans la revue 'Diasporique' de Philippe Lazare un article qui présente 3 problématiques à l'échelle du siècle : la première, c'est comment vivre avec le réchauffement climatique et comment arriver à une situation supportable, la deuxième, c'est l'entreposage des déchets nucléaires à vie longue qui peut être éventuellement réversible, la troisième problématique c'est la fusion. Il pense que les systèmes hybrides fusion-fission sont envisageables à l'échelle du siècle.

Il y a une 4^{ème} problématique qui peut intervenir et qui est redoutable : l'équilibre de la terre est trop instable. Il faut la démilitarisation totale du nucléaire. Il faut s'y prendre dès maintenant. Ce point devrait être mis en avant pour le futur congrès de l'AEIS qui se situe dans le cadre de l'année internationale sur le développement durable.

Victor Mastrangelo : au niveau de la table ronde le thème pourrait être abordé.

Quand le bore 10 capte un neutron pour produire du B11 est-ce que cela produit de l'énergie ?

Victor Mastrangelo : c'est une simple capture, pas une réaction de fusion.

Jacky Rousselle : avantages du stellarator ?

JL Bobin : c'est une idée qu'avait eu Spitzer dans les années 50 à Princeton. Il n'y a pas de courant dans le plasma. Le champ est uniquement produit par les bobines extérieures qui sont de géométrie particulière.

Les avantages de cette machine : cela évite une source de forts courants. La machine construite en Allemagne est à peu près de la taille de Tore Supra (à présent WEST). On rattrape les dérives avec des géométries compliquées qui exigent des calculs extrêmement compliqués et des usinages très précis.

Jacky Rousselle : disruption du plasma : comment le limiter sur ITER ? (perte de confinement du plasma avec décharge de court-circuit sur l'enveloppe) en particulier via le contrôle-commande de la machine ?

JL Bobin : Les disruptions sont apparues dès le début des tokamaks. Il y a eu une seule disruption grave : c'était au tokamak de Fontenay-aux-Roses dans les années 70 avec percée de l'enceinte à vide. Le phénomène a été étudié dans tous les sens il y a 50 ans, depuis on a appris des tas de choses et on a quand même de bonnes idées pour prévenir le phénomène qui commence effectivement par un court-circuit intérieur, à l'intérieur du tore. C'est un problème qui est lié à la stabilité de la configuration magnétique. Dans un monde bien fait, tous les courants dans le plasma sont de même sens mais il peut arriver des zones suite à des instabilités où le courant est en sens inverse. Il se trouve que c'est quelque chose qu'on connaît et qu'on maîtrise. C'est quelque chose qui se produit et s'autorépare plus ou moins. Le phénomène de disruption majeure dans lequel tout le système rentrerait en court-circuit, ça s'est produit une fois. Ce n'est pas de probabilité nulle, c'est un phénomène extrêmement rare. On ne voit pas pourquoi cela se produirait préférentiellement dans ITER alors que depuis 50 ans il ne s'est pas produit dans différentes machines. Voilà tout ce que je peux dire à ce sujet. Il y a eu une thèse de calcul sur les disruptions qui a été faite à Cadarache, qui a servi à un détracteur d'ITER local, Jean-Pierre Petit, pour affirmer qu'ITER il faut arrêter tout de suite, ça ne va pas marcher, qu'il y aura des disruptions majeures. Non il n'y a pas de raison pour qu'il y ait plus de disruptions majeures dans ITER qu'il y en a eu dans toutes les machines depuis 50 ans. Il y a eu un cas à Fontenay aux Roses. Je ne sais pas s'il a été analysé dans le détail. A l'époque c'était Paul-Henri Rebut qui s'occupait de ça. Il pensait à l'avenir et pas tellement à analyser les événements passés. A partir du moment où cela ne s'est pas reproduit, il s'est senti satisfait. La disruption a eu lieu sur un tokamak relativement petit de 10 à 15 cm de diamètre à comparer aux mètres de la machine ITER.

Question : qui va gagner ? de la fusion par confinement magnétique ou bien inertielle ?

JL Bobin : il y a 50 ans j'aurais dit la fusion inertielle parce que j'étais partie prenante, impliqué.

Maintenant je dirai que le meilleur gagne.

Question : il y a plus d'argent pour le magnétique que pour l'inertiel, non ?

JL Bobin : je ne sais pas. Pour ITER, la construction de la machine, ce sera une bonne vingtaine de milliards d'euros. Pour le laser Mégajoule, ce n'est pas loin de la dizaine. Un facteur 2 à ce niveau-là, ce n'est pas tellement significatif.

L'enregistrement intégral de la conférence et des échanges qui ont suivi est disponible sur le site de l'AEIS (<http://www.science-inter.com>) dans la rubrique « Comptes-rendus conférences mensuelles ».

Adendum : à propos d'une annonce concernant la fusion nucléaire

Jean Louis Bobin
Sorbonne universités

Étrange coïncidence, le 5 décembre dernier, quelques heures avant ma conférence devant l'AEIS, un essai en confinement inertiel avait libéré 3.15 mégajoules d'énergie de fusion à partir de 2.05 Mégajoules d'énergie lumineuse répartie en 192 faisceaux irradiant une cible contenant une sphérule emplie d'un mélange Deutérium Tritium (DT). Le 13 décembre, au cours d'une conférence de presse retransmise sur le net, Jennifer M. Granholm, Ministre en charge du Département de l'Énergie (DOE) des États-Unis d'Amérique, annonçait urbi et orbi l'événement du 5. Une équipe de la « National Ignition Facility » (NIF), laser de la classe Mégajoule implanté au laboratoire de Livermore en Californie, avait pour la première fois dépassé un seuil de parité énergétique (« *scientific energy breakeven* ») dans une expérience de fusion nucléaire. C'était une marque de parcours que s'étaient fixée les chercheurs travaillant sur le sujet depuis la fin des années 1960.

Cette annonce n'était-elle qu'une opération de communication à des fins politiques ?

Si cet aspect des choses ne doit pas être totalement absent, il s'est produit une véritable avancée scientifique. Dans le confinement inertiel, idéalement, une boule de combustible DT est comprimée jusqu'à obtenir des conditions de densité (10 000 fois le liquide) et de température, propres à amorcer une réaction thermonucléaire explosive qui libérera son énergie avant la dislocation du système. Le principe, appuyé sur des simulations numériques, en est connu depuis le début des années 1970. Pour le mettre en œuvre, le laboratoire de Livermore a développé un programme de lasers à verre au néodyme de plus en plus puissants jusqu'à l'installation NIF mise en service en 2009¹.

Au niveau de puissance atteint par NIF (>3 000 térawatts), la cadence des tirs laser est faible : un par jour, plutôt la nuit, et encore, pas tous les jours. De plus peu d'essais sont en réalité consacrés à un programme de fusion contrôlée. Ils sont donc fortement instrumentés de façon à extraire de chaque tir le maximum d'informations et d'enseignements. La figure 1 montre un historique de l'énergie de fusion obtenue au cours de différentes expériences effectuées depuis 2011 en mode indirect. Ce procédé a l'avantage d'une meilleure uniformité d'éclairement de la surface de la cible à impluser, mais au détriment du rendement global.

¹ Il existe aussi un laser de la classe mégajoule en France dans un centre CEA proche de Bordeaux.

Energie de fusion (MJ)

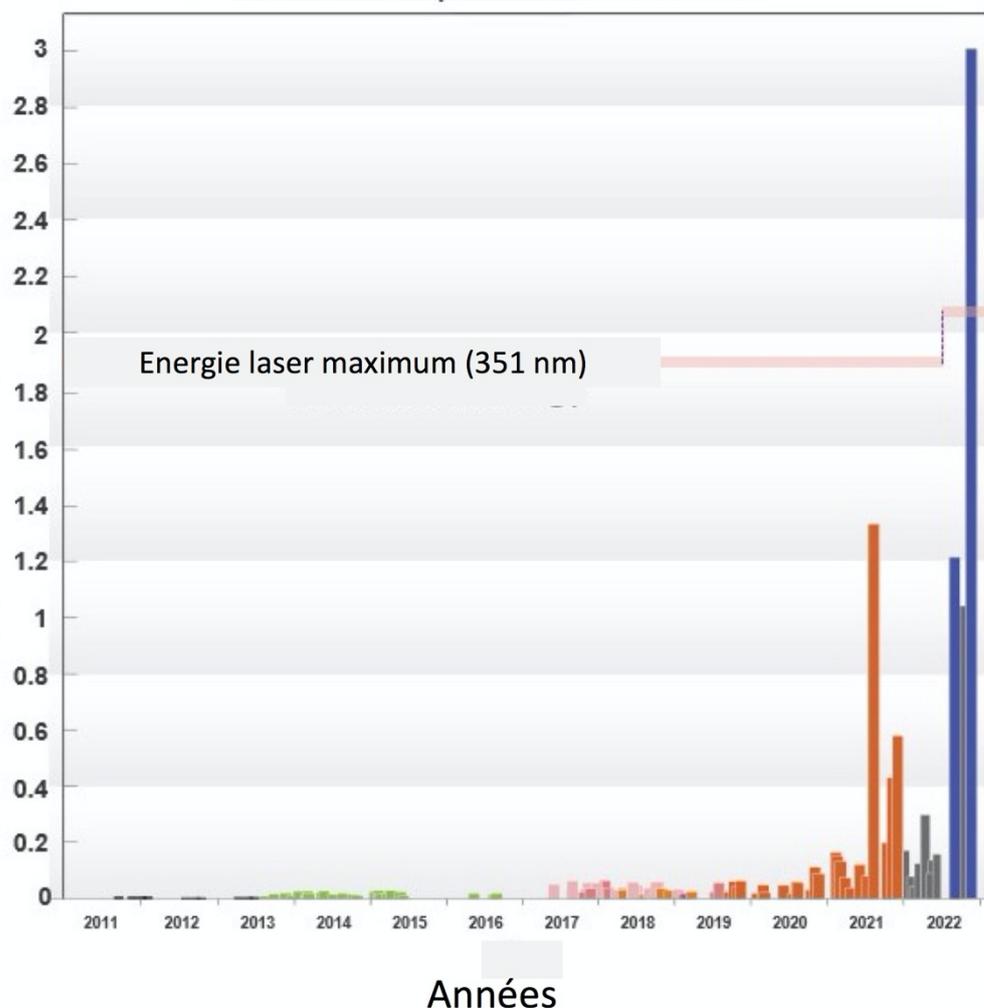


Figure 1. Historique des expériences de fusion inertielle menées auprès de NiF. Les couleurs des barres d'histogramme correspondent à différentes architectures de cible. D'après Mark Herrmann (LLNL), et Physics Today.

Pour obtenir le saut quantitatif amorcé en 2021, le travail d'optimisation a porté d'une part sur la forme temporelle des impulsions laser et d'autre part sur le dessin des cibles. La structure complexe et le choix des matériaux de ces dernières doivent favoriser le transfert d'énergie vers la poussée qui produira la compression tout en minimisant les causes d'instabilité nuisant à cette même compression. Le triplement de l'énergie libérée, obtenu entre 2021 et 2022, illustre l'importance de l'optimisation de l'architecture des cibles.

Le résultat obtenu le 5 décembre 2022 conforte et amplifie celui du 8 août 2021. Il a été prouvé que lors de ce premier succès, un allumage de la réaction thermonucléaire s'est effectivement produit dans une petite partie de la masse de DT comprimée [1]. On a donc commencé à détecter des effets qui jusque-là avaient été observés uniquement dans les simulations numériques. L'étape suivante est que cet allumage de point chaud, que l'on pourrait qualifier de « proto ignition », se propage à une fraction importante du combustible ce qui, toutes choses égales par ailleurs, décuplerait au moins l'énergie libérée par la fusion et validerait définitivement le principe du confinement inertiel.

1 Physical Review Letters, **129** 075001 2022

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier vivement M. Yann TRAN et Mme Annabelle POIRIER de l'Institut Curie pour la qualité de leur accueil.

Conférence du 9 Janvier :

« *Des modèles climatiques aux évolutions environnementales : comment s'en saisir* »

par le Pr Hervé le TREUT



**Hervé Le Treut, Professeur à Sorbonne Université et à l'Ecole Polytechnique
Membre de l'Académie des Sciences**

Courte biographie

Hervé Le Treut a étudié la physique à l'Ecole Normale Supérieure, et s'est orienté très tôt vers l'étude du système climatique. Après une longue carrière au CNRS, il est actuellement professeur à Sorbonne Université et à l'Ecole Polytechnique. Ancien directeur de l'Institut Pierre Simon Laplace, membre de l'Académie des Sciences, il a participé à 5 rapports du GIEC, a été membre du Comité Scientifique Joint du programme Mondial de Recherche sur le Climat et a fait partie du comité de suivi de la COP21. Une grande partie de son travail a été consacrée au développement des modèles climatiques planétaires, mais dans les dernières années il s'est surtout consacré à la dimension régionale des changements climatiques, au travers du projet Acclimaterra, en région Nouvelle-Aquitaine

Ouvrage de notre collègue Daniel COURGEAU, membre de l'AEIS :

« Understanding human life »

Daniel COURGEAU a publié récemment chez Springer dans la collection « Methodos » le n°19 de la série (ISBN: 978-3-031-16142-1), intitulé *Understanding human life*

Voici ci-dessous la quatrième de couverture ; un résumé plus substantiel et la table des matières sont joints dans les documents en fin de bulletin.

« Understanding human life » : quatrième de couverture

This book addresses the challenge of understanding human life. It compares our life experience with the attempts to grasp it by astrologers, astronomers, eugenicists, psychologists, neuroscientists, social scientists, and philosophers. The main opposition among these specialties lies between understanding and misunderstanding. We also address the central methodological difficulty of capturing a human life.

First, we examine how certain approaches may lead to a misunderstanding of human life. We contrast the example of astrology—an accepted practice in ancient civilizations, but now classified among the pseudosciences—with astronomy, a full-fledged science since Galileo's time. Another, more recent approach regards human life as predetermined by genes: the methods used by eugenicists, and later by political regimes under the name of hereditarianism, came to compete with genetics. A broader analysis will show how astrology and eugenicism are not truly scientific approaches.

Next, we look at the ways of capturing an imaginary or real human life story. A comprehensive approach will try to fully understand their complexity, while a more explanatory approach will consider only certain specific phenomena of human life. For example, demography studies only births, deaths, and migration. Another crucial factor in the collection of life histories is memory and its transmission. Psychology and psychoanalysis have developed different schools to try to explain them.

We conclude with a detailed discussion of the concepts and tools that have been proposed in more recent times for understanding the various aspects of life stories: mechanisms, systems, hermeneutics, and autonomy.

Documents

Pour préparer la conférence du Pr Hervé LE TREUT, nous vous proposons les articles associés suivants, librement téléchargeables et *disponibles sur le site de l'AEIS* :

- Le climatologue Hervé le Treut sur le 6e rapport du Giec sur le climat « l'important est d'agir maintenant au plus vite en faisant les bons choix » - GoodPlanet mag', interview du 16 Août 2021. (joint ci-dessous)
- Modèle de climat, par Hervé Le Treut - Le climat en questions (joint ci-dessous)
- Changements climatiques : perspectives et implication pour le XXI^{ème} siècle, par le Pr. Hervé LE TREUT

Nous vous proposons ensuite un résumé et la table des matières de l'ouvrage de notre collègue Daniel COURGEAU.

Le climatologue Hervé le Treut sur le 6e rapport du Giec sur le climat : « l'important est d'agir maintenant au plus vite en faisant les bons choix »

CHANGEMENT CLIMATIQUE GAZ À EFFET DE SERRE

16 Août 2021 6 minutes 

1



Au cours de cet interview, le climatologue Hervé Le Treut réagit au 6^e rapport du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). Ce dernier a, une fois de plus, sonné l'alarme climatique en insistant sur l'irréversibilité du réchauffement et son ampleur. Hervé Le Treut, est spécialiste de la simulation du climat, membre de l'Académie des sciences, professeur à l'École polytechnique et à Sorbonne Université.

Qu'apporte ce 6^e rapport d'évaluation du GIEC aux connaissances scientifiques sur le climat ?

Il s'inscrit dans la continuité des précédents travaux du Giec et de ce qui se produit aujourd'hui avec le changement climatique. Dans les années 1980, on savait déjà dans quelles directions le climat pouvaient évoluer. Puis, dans les années 1990, on a vu apparaître les premiers symptômes vraiment clairs du changement climatique. Le travail de suivi précis des connaissances reste néanmoins nécessaire pour passer d'un diagnostic général et proposer des formes d'actions.

De plus, le rapport apporte des nouveautés sur l'irréversibilité de certains phénomènes. Le premier concerne le stockage de la chaleur dans l'océan et le second concerne les événements extrêmes. Ils sont plus fréquents, plus violents. Ils ont donc un impact très fort dans les deux hémisphères. La planète se réchauffe, le niveau des précipitations augmente, il y a donc plus d'eau dans l'atmosphère, la fonte des glaces s'accélère. Les conséquences peuvent se révéler extrêmement violentes.

En 30 ans, le changement climatique est passé du stade de futur hypothétique un peu lointain et évitable à une réalité tangible immédiate pour tout le monde. Aujourd'hui, qu'est ce qui est désormais irréversible dans le réchauffement ?

Ce qui le rend irréversible est l'accumulation et le stockage du CO2 dans l'atmosphère car ce dernier conserve son pouvoir de réchauffement une centaine d'années. Donc, quand on rejette du CO2 dans l'atmosphère, il agit pour une période assez longue. Actuellement, il n'existe pas de solution pour retirer le CO2 déjà émis dans l'atmosphère.

Par conséquence, tout les processus qui en découlent, comme le relèvement du niveau des mers ou la dégradation des écosystèmes, prennent du temps. Les empêcher devient alors très difficiles puisqu'ils sont déjà enclenchés.

Or, les gaz à effet de serre s'accumulent non seulement dans l'atmosphère



Le climatologue Herve Le Treut
© JACQUES DEMARTHON / AFP

mais proviennent aussi de tous les pays du monde. À eux-seuls, la Chine et les États-Unis en rejettent la moitié. Les gaz se mélangent, ce qui implique que la solution devra forcément être mondiale.

« L'important est d'agir maintenant au plus vite en faisant les bons choix. La question de savoir si ça suffira ou pas se posera après. »

Que pouvons-nous encore faire pour limiter le phénomène ? Le 6^e rapport du Giec indique que pour ne pas dépasser le seuil de 1,5 degré de réchauffement, il faudrait parvenir à ne pas émettre plus de 300 milliards de tonnes de CO2 supplémentaires dans l'atmosphère, est-ce possible et réaliste ?

Je n'aime pas poser la question sous cette forme-là. En effet, cela paraît difficile vu l'ampleur des problématiques soulevées de passer sous la barre des 1,5 degrés cependant il faut parvenir à avancer dans un cadre cohérent. Je crois qu'il faut trouver les chemins les plus pertinents à moyen et long terme. L'important est d'agir maintenant au plus vite en faisant les bons choix. La question de savoir si ça suffira ou pas se posera après.

Il y a 2 types d'actions. Il y a les négociations climatiques. Je suis navré quand j'en entends du mal car les COP sont indispensables pour réduire et empêcher les émissions de gaz à effet de serre. Je suis aussi très déçu quand les COP ne donnent pas les résultats qu'on souhaite.

[lire aussi Hervé le Treut : « la difficulté est de passer d'une phase d'alerte à l'action »]

L'autre impératif est de protéger les territoires qui sont menacés, on a vu que les situations peuvent évoluer rapidement et de manière irréversible. L'échelle locale est très importante parce qu'on ne regarde pas seulement ce qui peut se passer du point de vue de la physique du climat mais aussi en termes de biodiversité, de problèmes sociaux. Ces réflexions vont au-delà de la science car toutes les actions à envisager interrogent les valeurs de la société. Peut-on prendre certaines solutions en ne tenant pas en compte les droits humains ? ces réflexions doivent permettre de définir ce qu'il est possible d'envisager en termes de solutions.

« L'échelle locale est très importante parce qu'on ne regarde pas seulement ce qui peut se passer du point de vue physique du climat mais aussi en termes de biodiversité, de problèmes sociaux. »

Le dernier rapport du GIEC s'arrête sur les gaz à effet de serre à durée de vie courte, en quoi est-ce une piste pour rapidement limiter l'action humaine sur le climat ?

Jusqu'à présent, on n'accordait pas beaucoup d'importance aux gaz à durée de vie courte comme le méthane. Or, agir sur ces derniers représente une occasion de réduire les gaz à effet de serre le plus rapidement possible. Mais, cela ne suffira pas, ils sont un levier parmi d'autres dans la réduction des émissions.

[À lire aussi sur les gaz à effet de serre à durée de vie courte Réduction des gaz à effet de serre, n'oublions pas les gaz à effet de serre à durée de vie courte dont le méthane]

« On devra sans doute faire des arbitrages parce qu'une partie des processus en cours est déjà bien avancé et qu'il n'est plus possible de tout concilier. »

Ce 6^e rapport met aussi en exergue le lien entre le vivant et le climat, pouvez-vous expliquer dans quelle mesure ne pas se focaliser uniquement sur le lien énergie fossile gaz à effet de serre peut-il être bénéfique ?

Effectivement, sur un territoire, les objectifs de réduction des gaz à effet de serre et de préservation de la biodiversité ne se montrent pas nécessairement compatibles les uns avec les autres. On a donc besoin de définir ce qu'est un risque climatique, un risque en termes de biodiversité et un risque social. Ainsi, on pourra et on devra sans doute faire des arbitrages

parce qu'une partie des processus en cours est déjà bien avancé et qu'il n'est plus possible de tout concilier.

Comment ce rapport a-t-il été reçu ? Comment faire en sorte que la science soit entendue ?

En ces temps où la science et la vérité sont malmenées, pensez-vous que le lien entre activités humaines et réchauffement soit définitivement acquis pour tout le monde ?

Ce risque de remise en cause du lien entre les activités humaines et le réchauffement demeure. Il faut le combattre en permanence en ouvrant le débat à la totalité des enjeux parce qu'avoir une vision purement physique n'aide pas à résoudre lesdits problèmes. Ce n'est pas à la science elle-même de donner les clefs du problème mais plutôt d'apporter des éclairages sur les solutions.

N'est-ce pas regrettable que la prise de conscience des modifications du climat ne se fasse bien souvent que par le seul prisme des catastrophes naturelles dont l'ampleur ces derniers mois fait écho aux messages des rapports du GIEC précédents ainsi que du dernier ?

Nous avons perdu du temps en ne prenant pas des décisions qui auraient pu être prises il y a quelques années en tenant compte des choses déjà visibles ou mises en avant par la science. La perte de temps est réelle, mais il faut avant tout regarder vers l'avant afin de ne pas reproduire les mêmes erreurs. De plus, il faut accorder plus de place au climat dans l'éducation et la formation.

« Il faut accorder plus de place au climat dans l'éducation et la formation. »

Qu'attendre des travaux des groupes 2 et 3 du GIEC prévus début 2022 ?

Leurs travaux permettront de voir les impacts et les espaces de solutions. Sauf que tout sera lié aux moyens financiers internationaux mis en place pour lutter contre le réchauffement climatique. Il faut mettre en phase et rendre compatible les différentes échelles de l'action dans la réduction des gaz à effet de serre. Celle-ci doit être prise en compte du niveau international au niveau local avec une vision et des objectifs précis sur le long terme. Il faut maintenant aller vite dans la prise de décision.

Auriez-vous un dernier mot ?

On n'est pas dans un désert d'initiatives face au changement climatique.

Partout dans le monde, des choses concrètes se font, il y a plein d'endroits où on investit et expérimente des solutions. Elles se mettent en place et il faut les suivre afin de s'assurer qu'on va dans la bonne direction. Il faut veiller à ce que les énergies que nous développons soient durables. Et, il faut raisonner de manière ouverte dans un cadre régional et international.

Promis recueillis par Julien Leprovost

En savoir plus sur le rapport du GIEC

6e rapport du GIEC : le réchauffement s'accélère, « alerte rouge » pour l'humanité

Au milieu des catastrophes, de nouvelles prévisions climatiques très attendues

L'humanité à l'aube de retombées climatiques cataclysmiques, selon le prochain rapport du GIEC

Quels enseignements tirer de la crise du coronavirus pour le changement climatique, entretien avec le climatologue Jean Jouzel

Le message de Valérie Masson Delmotte : « Chaque demi-degré compte, chaque année compte, chaque choix compte »

« Le plus grand échec n'est pas le Jour du Dépassement, mais de refuser d'y prêter attention » Mathis Wackernagel, créateur de l'empreinte écologique à l'occasion du Jour du Dépassement

Les collapsologues Pablo Servigne et Raphaël Stevens : « c'est un sevrage très dur qui nous attend car tout le monde est drogué aux énergies fossiles »

ça s'est passé il y a 31 ans : le 1er rapport du GIEC

Le site Internet du GIEC

Avion, mode, viande, vidéo en ligne ou voiture, à quoi les Français, les Européens, les Américains et les Chinois sont-ils prêts à renoncer pour lutter contre le changement climatique ?

Propositions pour un retour sur Terre de Dominique Bourg, Philippe Desbrosses, Gauthier Chapelle, Johann Chapoutot, Xavier Ricard-Lanata, Pablo Servigne et Sophie Swaton

30 ans de discours sur le climat, si peu d'actions

Qu'est-ce qu'un modèle de climat ?

Thème : *Fonctionnement du climat*

Niveau avancé

| La réponse de



Hervé Le Treut

Hervé Le Treut est Professeur à l'Université Pierre et Marie Curie, directeur de l'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL) et membre de l'Académie des sciences. Ses travaux portent sur la modélisation numérique du système climatique et la compréhension des perturbations radiatives du climat, en particulier le rôle de l'effet de serre additionnel lié aux activités humaines. Il s'intéresse aussi aux impacts des changements climatiques et à l'analyse des risques environnementaux associés. Il est éditeur du chapitre 1 du volume 2 du 5e rapport du *GIEC*. Il est l'auteur ou co-auteur de plusieurs ouvrages pour le grand public, dont le dernier traite de l'adaptation au changement climatique en Aquitaine.

Publié le 25 Février 2014

Le mot « modèle » désigne une approche scientifique très générale, consistant à définir une représentation simplifiée du monde réel, nécessairement réductrice, mais suffisante pour permettre un travail de réflexion, de compréhension, voire de prévision. Ce mot de « modèle » recouvre en fait des approches très différentes qui, d'un extrême à l'autre, peuvent être purement conceptuelles, s'écrivant avec des mots sans aucun recours aux mathématiques, ou, au contraire, purement statistiques et s'écrivant avec des chiffres sans le soutien d'aucune idée explicative. La modélisation du climat a ceci de particulier qu'elle est à la fois conceptuelle, parce qu'elle s'appuie sur des lois physiques qui proposent une explication de l'évolution des systèmes naturels, mais qu'elle conduit aussi à des résultats chiffrés.

Le « **système climatique** » est le système créé par l'évolution interactive de l'atmosphère, des océans, des calottes glaciaires, des systèmes hydrologiques continentaux, de la biosphère marine ou terrestre. Une multitude de modèles de différentes natures a été utilisée pour décrire le comportement du système climatique, depuis plus d'un siècle que son étude a commencé. L'observation de ce système nous montre qu'il comporte des éléments d'ordre, et ce sont ces éléments organisés que les modèles cherchent à reproduire. Dès le début du XX^e siècle, par exemple, la classification du géographe allemand Wladimir Peter Köppen a permis de dresser des cartes des différents types de climat : climats secs, climats équatoriaux, etc. Plus récemment, l'apparition des images satellitaires a permis de visualiser de

manière directe l'organisation à grande échelle de la circulation atmosphérique et, de manière plus indirecte, celle de la circulation océanique.

Dans ce système climatique, l'atmosphère joue un rôle déterminant en distribuant l'eau et la chaleur et donc, dans une très large mesure, la géographie des climats. Or les équations qui déterminent le mouvement de l'atmosphère, les équations de Navier-Stokes, ont été formulées au XIX^e siècle. Il a donc été tentant, dès cette époque, d'essayer de reconstruire une planète « sœur » de la nôtre, une planète numérique, sur la base des équations fondamentales de la physique appliquées au mouvement de l'atmosphère.

Une des premières tentatives de modéliser ainsi le système climatique est régulièrement citée dans tous les ouvrages sur la recherche climatique : c'est celle de l'anglais Lewis Fry Richardson¹, publiée en 1922. Mais les moyens dont disposait Richardson étaient trop limités et les véritables avancées scientifiques ne sont venues que plus tardivement. De fait, la description de notre environnement au travers de **modèles numériques** réclame des capacités de calcul énormes, ressources qui ne se sont développées qu'à partir des années 1950 avec l'arrivée des premiers ordinateurs. Le progrès en matière de modélisation climatique a donc suivi l'augmentation de la puissance des ordinateurs. (Cette augmentation est colossale : les ordinateurs d'aujourd'hui sont environ un milliard de fois plus rapides que ceux des années 1960.)

Mais les difficultés ne se sont pas limitées à des problèmes techniques : l'utilisation des équations elles-mêmes a posé un très grand nombre de problèmes théoriques ou conceptuels. Les équations de Navier-Stokes n'ont pas de solution mathématique connue : il s'agit là d'un des grands défis mathématiques du XXI^e siècle, et cette situation oblige à résoudre ces équations en utilisant la « force brute » des ordinateurs. Ces équations sont « non-linéaires », ce qui signifie que toutes les échelles spatiales et temporelles des écoulements atmosphériques et océaniques interagissent. Ceci oblige à pondérer la « force brute » des machines par une bonne intelligence de ce que l'on cherche à simuler, en écrivant des équations adaptées.

La première étape du travail de modélisation consiste à couvrir la Terre d'un maillage maillage tri-dimensionnel. On écrit alors, aux nœuds de ce maillage, des équations d'évolution qui permettent, d'un pas de temps à l'autre, de faire varier des paramètres tels que la pression, la température, les vents ou les courants.

Le « pas d'espace » des modèles – la résolution spatiale – a évolué au fil du temps : pour les modèles atmosphériques, il est passé de 500 km environ, dans les années 1970 ou 1980, à souvent moins de 100 km aujourd'hui. Les modèles d'océan ont souvent besoin d'un maillage plus fin (désormais de l'ordre de la dizaine de kilomètres) car la taille des tourbillons océaniques est plus faible que celle des grands systèmes dépressionnaires ou anticycloniques que l'on trouve dans l'atmosphère. Le « pas de temps » des modèles atmosphériques doit au contraire être beaucoup plus petit que celui des modèles océaniques car les vents circulent beaucoup plus vite que les courants marins : les modèles atmosphériques évoluent souvent de demi-heure en demi-heure environ, et les modèles océaniques de jour en jour.

Cette approche permet ainsi de faire vivre une « planète numérique » : si on lui donne un état initial,

cette planète va évoluer d'elle-même en suivant ses lois constitutives, et va créer son propre climat. Cette approche n'a bien sûr de sens que si le climat de la planète numérique est proche de celui de la planète réelle. Le pari peut paraître immense et beaucoup, dans les années 1960 ou 1970, le croyaient voué à l'échec. Comment est-il possible que la modélisation numérique permette de recréer, de manière réaliste et utile, les éléments statistiques principaux des circulations atmosphériques et océaniques sur des périodes longues de plusieurs décennies, comme le réclament les études climatiques ? Le caractère extrêmement sensible de ces aspects théoriques et numériques a été renforcé par la découverte de Lorenz en 1963, montrant que l'atmosphère n'est pas prévisible de manière déterministe au delà de quelques jours, parce que la croissance des petites échelles (créées, par exemple, par des battements d'aile de papillon) vient alors contaminer l'ensemble de sa circulation.

La réponse à ces questions s'appuie sur un fait que nous avons souligné : en dépit d'une composante chaotique qui rend les évolutions climatiques partiellement imprévisibles, les écoulements atmosphériques et océaniques présentent des éléments d'organisation très forts, qui, eux, peuvent être compris, analysés, simulés - avec l'espoir aussi de pouvoir évaluer leurs évolutions futures. Un coup d'œil à n'importe quelle image satellitaire montre des structures spirales de plusieurs milliers de kilomètres associées aux dépressions des moyennes latitudes. Dans les tropiques, l'air montre près de l'équateur, déterminant des zones de pluie intense, pour redescendre à des milliers de kilomètres de là, dans des régions où il détermine au contraire des déserts. Les éléments pour expliquer ces formes d'organisation se sont accumulés depuis le XVII^e siècle, car elles ont fait, dès cette époque, l'objet d'une très grande attention scientifique. On sait que les circulations atmosphériques et océaniques s'établissent en réponse à plusieurs forçages externes. Le premier d'entre eux est le contraste de température entre le pôle et l'équateur. Un autre élément d'organisation des circulations est la rotation de la Terre : près de l'équateur le sol tourne très vite d'ouest en est et entraîne l'atmosphère. Quand ces masses d'air se rapprocheront de l'axe de rotation de la Terre, aux hautes latitudes, elles seront animées par de forts vents d'ouest. Cette propriété, la même que celle qui fait qu'une patineuse à glace tourne de plus en plus vite sur elle-même quand elle replie les bras, s'appelle la conservation du moment cinétique.

La rotation de la Terre induit, par ailleurs, des forces appelées forces de Coriolis : ce sont celles qui font tourner les écoulements autour des basses pressions (dans le sens cyclonique, c'est-à-dire inverse aux aiguilles d'une montre, pour l'hémisphère nord) ou autour des hautes pressions (dans le sens anticyclonique). Les fluides géophysiques ont une autre propriété extrêmement importante : ils sont stratifiés, c'est-à-dire que leur densité décroît fortement avec l'altitude (pour l'atmosphère, qui est un fluide compressible, les choses sont un tout petit peu plus complexe). On peut montrer que la combinaison de ces lois physiques détermine, en partie, la dimension des systèmes météorologiques, qui est souvent de plusieurs milliers de kilomètres, et qui détermine à son tour une partie des circulations océaniques.

Cette connaissance des circulations atmosphériques et océaniques, très rapidement esquissée ici, repose sur des analyses initiées dès la première moitié du XX^e siècle par des chercheurs comme le suédois Gustav Rossby ou l'américain Jules Charney, et elle a servi à établir les caractéristiques essentielles des premiers modèles. Les modèles atmosphériques globaux, par exemple, ont retenu depuis l'origine une grille de résolution dont le pas spatial était de 500 km environ : cette résolution, qui est allée ensuite en s'affinant, permettait déjà de résoudre les structures de quelques milliers de kilomètres que nous venons de décrire. Un pari explicite a été, dès l'origine, de penser qu'il était possible

de décrire les petites échelles de la circulation atmosphérique ou océanique à partir des paramètres de grande échelle : ainsi un modèle atmosphérique incorpore-t-il des équations supplémentaires (que l'on appelle des paramétrisations) pour représenter l'effet collectif des nuages près du sol (les stratus), comme des grands nuages convectifs (les cumulonimbus), la présence de végétation, le débit des rivières, etc.

Le pari a rapidement été tenu et, de fait, dès les années 1970, il était possible de décrire les grands traits des circulations atmosphériques par des modèles numériques. Les contraintes imposées à l'atmosphère ou à l'océan numériques, telles que le chauffage radiatif ou la rotation de la Terre, étaient effectivement suffisantes pour générer des vents, des courants, des régimes de pluie ou des températures structurellement semblables à ceux de la planète réelle. Depuis cette époque, le gain en puissance de calcul a été considérable et il a permis des progrès dans tous les domaines. D'abord une capacité à mieux prendre en compte la géographie : montagnes et tracé des côtes. Ensuite une précision beaucoup plus grande dans la représentation de toutes les paramétrisations des processus d'échelle inférieure à la maille, atmosphériques comme océaniques.

L'allongement de la durée des simulations a aussi permis d'explorer le comportement de la planète numérique sur des périodes de plus en plus longues, et de tester la capacité des modèles à reproduire des climats passés. Par exemple, le dernier maximum glaciaire, il y a 21 000 ans, ou encore le climat chaud de l'Holocène entre 10 000 et 5 000 ans avant l'époque actuelle, quand le Sahara était humide. Mais le plus important a sans doute été de pouvoir passer d'une modélisation de la circulation atmosphérique à une représentation du système climatique complet : les modèles actuels associent l'atmosphère, l'océan et les continents, en prenant en compte leurs interactions physiques, chimiques et biologiques. Le travail qui a permis de passer de modèles essentiellement atmosphériques à des modèles que l'on appelle « **Modèles du Système Terre** » n'a pu être entrepris que par des équipes organisées. Il faut le travail de 50 à 100 personnes pendant une décennie environ pour développer de tels modèles, et il existe une vingtaine de laboratoires à l'échelle mondiale qui ont entrepris de relever ce défi.

La formulation des modèles climatiques suit des règles précises : elle s'appuie sur des choix mathématiques ou physiques, très nombreux, qui sont souvent étayés par des campagnes de mesures. Tout ceci permet de définir un jeu d'équations très complexe. (Les modèles climatiques sont des codes informatiques constitués d'environ un million d'instructions.) Ce jeu d'équations a une double validité :

- globale (on ne définit pas les nuages convectifs dans un modèle de manière différente sur l'Afrique et la Chine car la paramétrisation qui sert à les décrire doit avoir une portée générale) ;
- et applicable à des changements très variés (cycle diurne, cycle saisonnier, reproduction de climats anciens, capacité à simuler des événements El Niño ou La Niña, etc.).

Contrairement à une idée souvent exprimée, il n'est pas facile d'optimiser les résultats d'un modèle en jouant avec les paramètres qui servent à le définir. Par exemple, on peut détériorer gravement les précipitations neigeuses sur les régions polaires en améliorant les circulations océaniques tropicales car il s'agit d'un système composé d'une myriade de processus interdépendants.

Le développement de la modélisation a été accompagné d'un effort international d'évaluation. Chaque

groupe de modélisation participe ainsi à un protocole expérimental défini de manière internationale (expériences « CMIP² » du Programme Mondial de Recherche sur le Climat), et les résultats de chaque modèle sont confrontés à la réalité par des groupes de recherche très nombreux (près d'un millier) qui ne font pas un travail de modélisation mais d'analyse des modèles, pour une région du monde ou pour un processus ciblé. Jusqu'à présent, il n'a jamais été possible de trouver un modèle universellement meilleur ou universellement moins bon que les autres : c'est très souvent la moyenne des modèles qui fournit le résultat le plus réaliste. Pour l'évaluation du climat futur, il n'existe pas de référence observée et c'est la dispersion des modèles qui fournit une estimation des incertitudes affectant le diagnostic scientifique actuel.

Notes

1. Richardson, Lewis F., 1922: Weather prediction by numerical process, *The University Press*, Cambridge.
2. Coupled Model Intercomparison Project

Glossaire

Modèle numérique

Un modèle numérique est une représentation d'un milieu par un jeu d'équations dont la solution nécessite l'utilisation d'un ordinateur.

Maillage

Opération d'échantillonnage qui permet de limiter les valeurs étudiées d'un milieu à celles qui existent aux nœuds d'un filet imaginaire (en deux ou trois dimensions). Cette étape est indispensable car un ordinateur ne sait pas gérer directement un milieu continu qui contient une infinité de points.

Source : Club des Argonautes

Résolution spatiale

Taille des boîtes élémentaires définies pour résoudre numériquement les équations d'un modèle. On réserve généralement le terme de « maille » au découpage sur l'horizontal et celui de « niveaux » pour le découpage sur la verticale. Les modèles à haute résolution sont ceux qui ont les mailles les plus petites ou le plus grand nombre de niveaux.

D'après « *Le climat à découvert* »

Forçage externe

Facteur de variabilité du climat externe au système climatique. Il peut être d'origine naturelle comme la variabilité solaire ou le volcanisme, ou d'origine anthropique comme les modifications de la composition chimique de l'atmosphère via l'émission de gaz à effet de serre ou de l'utilisation des sols.

D'après « *Le climat à découvert* »

Force de Coriolis

Force décrite par Gaspard Coriolis, tendant à dévier les corps en mouvement vers la droite dans l'hémisphère Nord. Elle est primordiale à l'échelle de l'atmosphère et des océans mais le plus souvent imperceptible à l'échelle humaine sauf pour l'expérience du pendule de Foucault. Notons qu'il s'agit d'une force fictive qui

n'apparaît que pour un observateur associé à un repère en rotation.

D'après « *Le climat à découvert* »

Paramétrisation

Prise en compte d'un phénomène physique par une formulation correspondant à la taille de la maille élémentaire du modèle qui simule le phénomène.

Source : Club des Argonautes

El Niño (ENSO)

Phénomène climatique ayant lieu à une fréquence de 2 à 7 ans dans l'océan Pacifique tropical qui se traduit par des variations intenses des échanges d'énergie entre océan et atmosphère, modifie la circulation océanique, la température, les vents, les précipitations, ainsi que les échanges de CO₂ avec l'atmosphère.

ENSO désigne l'oscillation de pression entre Darwin (Australie) et l'île de Pâques (Chili) qui induit l'ensemble des déséquilibres climatiques décrits ici. L'événement El Niño décrit l'élévation de température de la mer, généralement en fin d'année, à l'est du Pacifique et le long des côtes de l'Amérique du Sud.

D'après « *Le climat à découvert* »

La Niña

Phénomène inverse d'El Niño.

CHANGEMENTS CLIMATIQUES : PERSPECTIVES ET IMPLICATIONS POUR LE XXI^E SIÈCLE

par

M. Hervé LE TREUT

délégué de l'Académie des sciences

Si la perspective d'un changement climatique global résultant de l'augmentation des gaz à effet de serre constitue désormais un risque dont la réalité est très largement reconnue, c'est parce que la communauté scientifique s'est organisée, depuis plusieurs décennies, pour développer un diagnostic de plus en plus étayé, puis le répercuter très largement, au niveau du grand public ou des décideurs. Cette phase d'alerte a posé, pose encore, des problèmes difficiles. Comment traduire de manière suffisamment forte et audible un sentiment d'urgence face à l'évolution de notre environnement global, - sentiment partagé par la plupart des scientifiques -, tout en gardant un discours rigoureux, qui fasse la part des certitudes mais aussi des multiples incertitudes qui affectent toute tentative de prévision quantitative des changements à venir ? Comment traduire le consensus général de la communauté scientifique, en laissant néanmoins leur place aux différences de sensibilité, inévitables dès qu'il s'agit de déterminer l'importance pour nos sociétés des perturbations prévisibles ? Pour apporter une réponse partielle à ces questions, il est nécessaire de rappeler, de la manière la plus simple et factuelle possible, les points clef du dossier scientifique et les conditions dans lesquelles il a été élaboré.

L'atmosphère, les océans, les grands glaciers ou les banquises constituent des milieux complexes et fragiles, qui interagissent constamment au-travers de processus mécaniques, physiques, chimiques ou biologiques, et déterminent ainsi ce que l'on appelle le système climatique. Au cours des milliards d'années de l'histoire de la planète, les conditions climatiques ont fluctué largement, sous l'effet de multiples causes : augmentation de la puissance du Soleil, dérive des continents, consommation partielle du dioxyde de carbone par le développement de la vie... Plus près de nous, les deux millions d'années de l'ère quaternaire ont vu les hominidés se développer dans un climat oscillant constamment entre des conditions glaciaires et interglaciaires : nous savons que des causes d'origine astronomique expliquent la plus grande part de ces fluctuations. Par rapport à ces conditions climatiques mouvementées, nos civilisations se sont au contraire développées dans une période bien particulière par sa stabilité : nous vivons depuis 10 000 ans dans des conditions interglaciaires, une situation d'une durée inhabituelle, dont la théorie astronomique rend compte et qui est appelée à se poursuivre encore quelques milliers d'années. C'est dans cette très longue période

interglaciaire que se sont développées nos civilisations. Nous avons certes connu dans la première moitié de cet interglaciaire des conditions un peu différentes des conditions actuelles, avec par exemple des moussons intenses sur l'Afrique : la Terre était alors au plus près du Soleil pendant les étés de l'hémisphère Nord, - une configuration qui s'est modifiée avec la précession de l'axe de rotation de notre planète, dont la période est de 20 000 ans. Mais depuis 5 000 ans, le climat de Terre est globalement très stable. Les fluctuations qui nous ont malgré tout affectés pendant cette période, telles que le petit âge de glace du XVIII^e siècle ou l'optimum climatique du Moyen Âge, et quel que soit l'impact social ou économique considérable, si précisément documenté par M. Le Roy Ladurie, qu'elles ont pu avoir, ces fluctuations ne se sont traduites que par des variations globales de la température de quelques dixièmes de degrés, bien inférieures aux quelques degrés de réchauffement que laisse présager, comme nous le verrons, l'augmentation des gaz à effet de serre, ou aux quelques 5 à 6 degrés de réchauffement qui accompagnent la sortie d'un âge glaciaire. Cet interglaciaire très long, globalement très stable, a permis à l'environnement de la planète d'atteindre un état d'équilibre global très fin, caractérisé par exemple par une très grande constance de la teneur atmosphérique en gaz à effet de serre : le niveau de dioxyde de carbone (ou CO₂), par exemple, a constamment gardé une valeur proche de 280 parties par millions (ou ppm).

Depuis plus d'un siècle, c'est-à-dire depuis le début de l'ère industrielle, les activités humaines sont venues rompre de manière brutale cet équilibre. Le niveau de CO₂ atmosphérique atteint désormais 370 ppm, - une valeur jamais approchée tout au long du dernier million d'années, où les fluctuations du CO₂ associées aux variations glaciaires-interglaciaires se sont toujours inscrites dans une fourchette beaucoup plus basse, allant de 180 à 300 ppm. La plus grande part de ces variations a été acquise au cours des dernières décennies, - une évolution dont la brutalité est sans équivalent à l'échelle du climat observé. Ce CO₂ additionnel est injecté dans l'atmosphère par la combustion du pétrole, du charbon et du gaz, - phénomène presque inexistant avant 1850 -, qui a atteint peu après 1950 le taux de 2 milliards de tonnes de carbone émises chaque année, pour dépasser maintenant les 6 milliards de tonnes par an. Au-delà du CO₂, d'autres gaz ont vu leur teneur atmosphérique augmenter rapidement. La teneur en méthane, tributaire de l'extension des rizières ou de l'élevage des ruminants, a plus que doublé. D'autres gaz ont subi une augmentation exponentielle : l'oxyde nitreux, les fréons (avant leur bannissement par le protocole de Montréal lié à leur action sur l'ozone stratosphérique ; mais les produits qui ont leur ont été substitués sont aussi des gaz à effet de serre), l'ozone troposphérique. L'action de l'homme sur le système climatique prend par ailleurs des formes multiples, qu'il s'agisse de l'émission de poussières ou d'aérosols, ou encore de modifications des paysages naturels par la déforestation, l'irrigation, l'érosion des sols. Parmi toutes ces perturbations, toutefois,

l'augmentation de la teneur atmosphérique en gaz à effet de serre constitue un phénomène bien spécifique, qui tient à la très longue durée de vie atmosphérique de ces gaz : plus d'un siècle par exemple pour le CO₂, contre quelques semaines pour les poussières ou aérosols qui sont souvent émis de manière simultanée. Il s'agit donc d'un effet cumulatif, appelé à dominer très fortement toutes les autres perturbations anthropiques, et largement irréversible. Ses conséquences s'étendront aux siècles à venir, d'autant que certaines composantes lentes du système climatique, telles que les océans ou les grands glaciers, en prolongeront les effets sur des durées plus longues encore. C'est aussi un effet global, puisque les gaz émis en un point quelconque de la planète se mélangent rapidement à la surface du globe, et affectent l'humanité tout entière. Nous sommes donc face à un problème qui appelle une solidarité double, à l'échelle de la planète, et vis-à-vis des générations futures.

Le risque de changement climatique repose sur un mécanisme physique qui peut être décrit de manière très simple : l'augmentation de la teneur atmosphérique en gaz à effet de serre empêche le sol de la Terre, chauffé par le Soleil, de perdre librement son énergie par rayonnement infrarouge direct vers l'espace. Ce rayonnement est absorbé par l'atmosphère et partiellement réémis vers le sol. Cet effet, appelé « effet de serre » par une analogie avec le réchauffement que produit une surface vitrée (vitrage d'une serre, ou encore pare-brise d'une voiture laissée au soleil), conduit inéluctablement à un réchauffement des basses couches de l'atmosphère. Cet effet est en premier lieu naturel et bénéfique : l'effet de serre dû à la vapeur d'eau, aux nuages, à certains gaz comme le dioxyde de carbone, permet à la planète d'être habitable, avec une température qui est en surface de 15 °C environ, au lieu de -18 °C si la Terre était dépourvue d'atmosphère. C'est aussi un effet fragile : les principaux gaz atmosphériques, l'azote et l'oxygène, ne jouent presque aucun rôle. Seuls interviennent des gaz qui représentent bien moins d'un centième de la masse atmosphérique. Cette fragilité explique qu'un effet systématique des activités humaines, poursuivi pendant plusieurs décennies, puisse avoir un impact important.

Bien sûr, cette description simplifiée du rôle des gaz à effet de serre est aussi une description simpliste, et la formulation du problème qui a été effectuée par notre communauté scientifique est beaucoup plus respectueuse de la complexité du monde réel : elle s'est faite sur la base de plusieurs générations de modèles numériques, allant dans le sens d'une représentation toujours plus complète et géographiquement précise de notre planète. Le développement de ces modèles a constitué une aventure scientifique de très grande ampleur, d'abord motivée par un questionnement d'ordre fondamental : les équations de la mécanique, de la physique, nous permettent-elles de rendre compte des caractéristiques essentielles de notre planète, des grands régimes de vents, de précipitations, des courants océaniques, de la position des déserts, de

l'extension de la banquise ? Après trente ans de recherches impliquant plusieurs milliers de scientifiques sur toute la planète, la réponse est clairement positive. Il a été ainsi possible de créer des planètes numériques, des répliques informatiques (imparfaites, bien sûr) de la planète Terre. L'éventail d'application très large de ces modèles (prévision météorologique, prévisions marines, diagnostic des fluctuations interannuelles du climat) constitue à la fois une preuve de leur pertinence et une démarche qui permet leur validation, complétée par l'étude de climats très différents, glaciaires par exemple. Nous disposons ainsi d'un outil, bien sûr imparfait, mais largement éprouvé, à partir duquel évaluer les conséquences possibles d'une augmentation des gaz à effet de serre.

Une synthèse régulière de ce travail a été menée au niveau international par le Groupe intergouvernemental pour l'évolution des climats (GIEC, en anglais *IPCC*), mis en place par le programme « environnement » des Nations unies et l'Organisation météorologique mondiale – dans le respect très strict des normes habituelles de l'évaluation scientifique par les pairs et dans les journaux et publications de la communauté scientifique. Le premier rapport du GIEC, en 1990, indiquait une évolution possible de la température de surface de 2 à 5 degrés Celsius environ, pour un doublement du CO₂ atmosphérique, sur la base de modèles encore assez simples, sans représentation explicite de l'océan. Malgré l'incertitude quantitative importante affectant ces résultats, leur structure géographique était cohérente. L'augmentation des températures était plus rapide dans les régions polaires et sur les continents, les précipitations augmentées dans les régions pluvieuses, avec au contraire un risque de sécheresse accru dans les régions semi-arides. Depuis cette date, deux autres rapports ont été publiés, en 1995 et en 2001, et un quatrième est à venir prochainement en février 2007, qui résumera un travail énorme d'analyse des simulations climatiques les plus récentes (près de 200 articles étudiant les résultats d'une quinzaine de modèles sont déjà publiés ou soumis pour publication). Les modèles d'aujourd'hui sont souvent bien différents de ceux d'il y a quinze ans : ils incluent tous une représentation active de l'océan, une physique atmosphérique plus cohérente et complète, une représentation plus précise de l'hydrologie et de la végétation sur les sols continentaux. Les résultats de ces simulations dépendent bien sûr des évaluations forcément incertaines de ce que pourront être les émissions de gaz à effet de serre en l'absence de mesures dédiées (et intègrent à cet effet un spectre assez large de futurs possibles, allant d'une stabilisation des émissions à une multiplication par trois) ; ils sont bien sûr aussi tributaires des imperfections qui subsistent dans les modèles, et du fait que le système climatique est un système complexe qui n'est pas entièrement prévisible. Mais il est frappant de voir que les simulations les plus récentes confirment les scénarios déjà établis à la fin des années quatre-vingts et synthétisés dans le premier rapport du GIEC : même avec les modélisations les plus complexes actuellement disponibles, utilisant des ordinateurs à la puissance colossale tel que le *Earth Simulator* japonais, le

système climatique réagit à l'augmentation des gaz à effet de serre selon les ordres de grandeurs que détermine une analyse plus simple, qui était déjà celle de la communauté scientifique il y a plus de vingt ans : ces processus simples sont bien les processus dominants.

Par ailleurs, depuis quelques années, les indices se multiplient qui témoignent d'une évolution caractérisée du système climatique, que l'on ne sait plus expliquer sans tenir compte d'un premier effet de l'augmentation des gaz à effet de serre – même si d'autres facteurs tels que les changements d'insolation ou le volcanisme ont pu jouer un rôle. Les caractéristiques globales de ces changements sont très cohérentes avec la prévision des modèles globaux. Au réchauffement de 0,8 °C environ depuis le début de l'ère industrielle, s'accéléralant au cours des dernières décennies, s'ajoutent un recul général des glaciers de montagne, de la banquise et des surfaces enneigées, un relèvement du niveau de la mer de 3 millimètres par an, en forte augmentation par rapport aux valeurs plus proches de 1 millimètre par an observées tout au long du XX^e siècle, une évolution de l'hydrologie globale cohérente avec les anticipations des modèles, et des impacts désormais significatifs sur des paramètres très variés : dates de floraison, migrations d'espèces...

Il s'agit là de constatations qui sont, au plan technique, complètement indépendantes des résultats des modèles, et établies sur la base d'observations largement postérieures aux premières simulations réalisées à la fin des années quatre-vingts. Sans constituer des preuves absolues, cette notion même n'a pas de sens dans nos disciplines, elles confortent donc de manière importante les scénarios établis par les modélisateurs. Mais il faut par contre se garder d'en faire une référence intuitive pour évaluer l'importance de l'évolution future du climat. Si le réchauffement que prévoient les modèles pour l'année 2000 (quelques dixièmes de degrés par rapport à la période préindustrielle) est globalement cohérent avec ce qui s'est produit, les scénarios futurs évoquent un réchauffement de 2 à 6 degrés en 2100, - un réchauffement qui est donc supérieur à ce que nous avons connu, et dont la seule analogie récente en termes d'amplitude est constituée par la sortie de l'âge glaciaire. Un dérèglement aussi rapide du climat de la planète affectera tous les aspects de notre environnement et sera susceptible d'entraîner des processus irréversibles graves : modification des courants océaniques, fonte des glaciers polaires, modifications fortes des écosystèmes et de leur action en retour sur le climat. Il est impossible de prévoir dans le détail ces évolutions, mais plusieurs de leurs caractéristiques générales méritent d'être signalées. Le danger le plus fort est lié à la vitesse considérable des transformations à venir, qui sera responsable d'une difficulté d'adaptation accrue des écosystèmes ou des sociétés. Le système climatique va réagir de manière très différenciée à ces évolutions : il existe des seuils de danger, encore mal définis, au-delà desquels certains risques (fonte de glaciers par exemple, ou dégazage du méthane

contenu dans le pergélisol) grandissent de manière extrêmement forte. Enfin les émissions de gaz à effet de serre qui ont déjà eu lieu rendent certaines évolutions presque inéluctables : une réduction immédiate des gaz à effet de serre permettrait de limiter très rapidement la tendance au réchauffement de la planète ; elle n'aurait d'impact significatif sur le relèvement du niveau de la mer que bien plus tard, probablement au siècle prochain. Ces caractéristiques vont très certainement faire du changement climatique à venir l'un des facteurs de tension importants du monde de demain, dont les effets se croiseront de manière complexe avec une longue série de contraintes : démographie, santé, usage de l'eau, biodiversité. La complexité et la vitesse des évolutions en cours militent pour une action rapide de réductions des gaz à effet de serre, et pour une adaptation préventive de leurs conséquences.

Face à ces évolutions, l'attente de la société vis-à-vis de la science et des scientifiques a aussi considérablement évolué : à la nécessité de l'alerte s'est ajoutée progressivement une demande d'aide beaucoup plus précise au dimensionnement de politiques environnementales. Les incertitudes scientifiques prennent alors une importance bien plus déterminante : même s'il est permis d'imaginer qu'au fil des années à venir, alors que se poursuivra le changement climatique en cours, il deviendra possible de rendre plus précis encore le diagnostic scientifique, il demeurera toujours affecté par une part d'imprévisibilité. Comme dans bien des domaines, nous sommes confrontés à un risque dont nous savons cerner les contours généraux sans être pour autant capable d'en prévoir de manière quantitative toutes les manifestations. Nous devons néanmoins déterminer une politique qui traduise la responsabilité des pays pollueurs vis-à-vis de ceux qui souffriront des impacts climatiques les plus forts, et qui prenne en compte l'engagement probablement irréversible que nos choix déterminent vis-à-vis des générations futures. Ces choix, où le problème climatique doit être mis en regard des autres problèmes de la planète, ne peuvent être l'affaire des seuls scientifiques : ils réclament un débat plus large, éthique, politique et citoyen.

Understanding human life

Daniel Courgeau

Ouvrage publié par Springer : Methodos Series n°19: ISBN: 978-3-031-16142-1

Back cover:

This book addresses the challenge of understanding human life. It compares our life experience with the attempts to grasp it by astrologers, astronomers, eugenicists, psychologists, neuroscientists, social scientists, and philosophers. The main opposition among these specialties lies between understanding and misunderstanding. We also address the central methodological difficulty of capturing a human life.

First, we examine how certain approaches may lead to a misunderstanding of human life. We contrast the example of astrology—an accepted practice in ancient civilizations, but now classified among the pseudosciences—with astronomy, a full-fledged science since Galileo's time. Another, more recent approach regards human life as predetermined by genes: the methods used by eugenicists, and later by political regimes under the name of hereditarianism, came to compete with genetics. A broader analysis will show how astrology and eugenicism are not truly scientific approaches.

Next, we look at the ways of capturing an imaginary or real human life story. A comprehensive approach will try to fully understand their complexity, while a more explanatory approach will consider only certain specific phenomena of human life. For example, demography studies only births, deaths, and migration. Another crucial factor in the collection of life histories is memory and its transmission. Psychology and psychoanalysis have developed different schools to try to explain them.

We conclude with a detailed discussion of the concepts and tools that have been proposed in more recent times for understanding the various aspects of life stories: mechanisms, systems, hermeneutics, and autonomy.

Summary:

The introduction of this book addresses the varieties of understanding and misunderstanding human life. We look first at the meaning of the term “to grasp,” used to characterize the attempts made by different approaches to understand human life, and very often adopted by epistemologists. This work examines the intimate grasping that we can have of our own life and that of others. Another important distinction is found in Wilhelm Dilthey's hermeneutic approach between *comprehension* (German: *Verstehen*) and *explanation* (German: *Erklären*). We will see here how *comprehension* is essential for autobiography and, at the same time, allows a reconstruction of history. While used in the natural sciences, *explanation* is not excluded from the social sciences. First, the physical and biological constitution of man must legitimately be subjected to this form of reasoning. Second, as Dilthey recognized, there was the possibility of a descriptive and analytical psychology that did not set out to *comprehend* lived experiences. All these ways of understanding life, however, come up against the *elusiveness* of life. The notion of elusiveness embraces all that is hard to understand—in all the meanings of the verb identified above. We look then to a multi-perspective methodological view. Life stories are by nature multidisciplinary. With their varying degrees of completeness, they serve as the basic tools in all social sciences and also in hermeneutics. We must therefore assess the different methods and approaches for studying them. Some methods regard biographies as partly predetermined by external factors: one example is astrology—not only the sort practiced by ancient

civilizations, but also the kind practiced today by many pseudo-savants; another, more recent approach regarded human life as predetermined by genes: eugenics. The methods used by eugenics, which totally negate individual freedom, were introduced by men whose scientific status was undisputed in their time. Apart from these attempts to treat life stories as if they were predetermined, it is important to recall how the stories were generated by humanity. They have existed since earliest times, and they were initially produced as imaginary narratives before becoming more realistic. In more recent times, different methodological approaches were developed for dealing with life stories: the first consisted of population science, founded by Graunt in 1662, and. It began to analyze several important phenomena of human lives; the second, more modern approach was philosophical hermeneutics, introduced in the early twentieth century, and unlike population science, it gave precedence to the study of a specific biography—applicable to one or more *individuals*—in all its dimensions; the third approach seeks to understand how our memory works and it has been followed by successive schools of psychology.

After this introductory chapter, Part 1 looks at how certain approaches may lead to misunderstanding human life before it unfolds.

First, we contrast the example of astrology—an accepted practice in ancient civilizations, but now classified among the pseudosciences—with astronomy, a full-fledged science since Galileo’s time. By observing celestial phenomena such as the paths of planets and stars, it was believed that one could foretell future events both in human societies and in individual lives. The disciplines spread to the Greek world in later centuries in the form of horoscopes predicting the fate of a given person. However, the scientific revolution that took hold in the sixteenth century introduced a clear distinction between astrology as a divination art and astronomy as a science describing the movements of celestial bodies. Astronomy became a leading science, achieving major discoveries such as those of Kepler and Newton, whereas astrology was increasingly rejected. Yet, in the twentieth century and especially since the 1950s, there have been ever more attempts at a scientific demonstration of the validity or invalidity of astrology, and we examine their findings. We also try to identify the reasons why astrology, despite its rejection on scientific grounds, retains a strong worldwide appeal.

Another, more recent approach regards human life as predetermined by genes: the methods used by eugenicists, and later by political regimes under the name of hereditarianism, came to compete with genetics. Eugenics became a formidable concept with the advent of fascist and Nazi regimes, which sought to impose the supremacy of certain “races” by eliminating other ethnic groups. World War II ended these regimes, making the promotion of eugenics impossible. However, many former eugenicists such as Osborn continued to pursue the same goals under another label: hereditarianism. We describe the different forms of this theory and show the reasons for their scientific and political failure. In conclusion, eugenics in all its forms leads individuals and human societies in harmful behavior whose effects—in many circumstances—can even be dramatic.

A broader analysis will show how astrology and eugenicism are not truly scientific approaches. We move on to a more general view of religious practices, which facilitate these beliefs in supernatural forces. Cicero’s analysis, produced in a context of polytheistic religion, gives us a better insight into the motives for such beliefs. In more recent periods, monotheistic religions have prevailed, and psychology, bio-cultural anthropology, and cognitive sciences have tried to identify the factors driving these faiths. But the detailed examination of the findings does little to explain the complexity of these phenomena—and even less to account for atheism, whose prevalence is far from negligible. We conclude the chapter with a discussion of the current concept of freedom, which—some argue—offers people a way out

of these beliefs, and an ethical discussion on the different approaches presented in this first part.

Part 2 looks at whether one can attempt to understand a human life, and at how different social sciences can do so despite some failures.

We look first at the ways of capturing an imaginary or real human life story. A comprehensive approach will try to fully understand their complexity, while a more explanatory approach will consider only certain specific phenomena of human life. For example, demography studies only births, deaths, and migration. We extensively describe the evolution of the paradigms adopted by these sciences and the relevance of the “explanatory” approach, which we compare with the “comprehensive” approach. We then discuss the methods used by the social sciences to analyze the outline of a human life recorded in one or more interviews and depending on whether the survey is retrospective or prospective. While the approaches to event histories may differ substantially from one science to another, the basic material is the same: the collection, in an interview, of a very small portion of the life of one or more persons. We describe these different methods in detail, including the statistical tools used for the analysis and the scientific foundations of the methods.

Another crucial factor in the collection of life histories is memory and its transmission. Psychology and psychoanalysis have developed different schools to try to explain them. The structuralist school, which used introspection, makes no contribution to the study of autobiographical memory, but it does offer interesting findings on the memorization of syllables alone, not of life stories. The functionalist school is barely interested in biographical memory. Its only representative, Galton, provided some elements—some important, others debatable—which we analyze. The behaviorist school, which enjoyed great success in the United States in the first half of the twentieth century, totally rejected the study of mental imagery. In the end, it was the cognitive school that made memory the focus of its study in 1950. We show its many contributions to this field, with the use of data from official registers to verify major life events, and the use of neuroimaging. While evolutionary psychology contributes little to the study of memory, psychoanalysis takes us into new territory. This discipline, introduced by Freud in 1895, relied on Cajal’s discovery of neurons in 1888 as possible storehouses of memory. We describe and critique the way in which Freud incorporated this notion into psychoanalysis with the aid of the unconscious, and compare this with the picture provided by today’s neuroscience. The chapter’s conclusion looks at the challenges to the psychological approach generated by the *replication crisis* and to the broader notion of “statistical significance.”

We conclude with a detailed discussion of the concepts and tools that have been proposed in more recent times for understanding the various aspects of life stories: mechanisms, systems, hermeneutics, and autonomy. We go on to examine theories of memory and show that artificial intelligence, despite its successes, cannot constitute a theory of human memory. We must turn to neuroscience to see a productive application of *mechanistic theories* by Bechtel, Craver, and others, who try to describe how the parts of a mechanism are organized to produce human memory—while voicing doubts about the theories’ exhaustivity. We then discuss *systemic theory*, and in particular Maturana and Varela’s *autonomy theory*, which focuses on the organism as a whole and on how memory allows it to activate self-maintenance. These two approaches, which developed independently at first, have encountered each other very recently. To conclude this book, we show how, in combination, they offer a more effective approach to more general biological phenomena, while hermeneutics resist to a more scientific approach of human life.

Contents:

General introduction

1 Understanding and misunderstanding human life

- 1.1 Varieties of understanding and misunderstanding
- 1.2 A multi-perspective methodological view
- 1.3 Book outline

Part I How certain approaches may lead to misunderstanding human life

2 Predestination versus human liberty

- 2.1 Diversity of predictions in the world
- 2.2 The origins of eugenics
- 2.3 The notion of freedom
 - 2.3.1 Freedom in ancient civilizations
 - 2.3.2 Freedom in the monotheistic religions
- 2.4 Conclusion

3 Astronomy and astrology: once indistinguishable, now clearly separate

- 3.1 Astronomy and astrology in antiquity
 - 3.1.1 Astronomy and astrology in Mesopotamia
 - 3.1.2 Hellenistic astronomy and astrology
- 3.2 Astronomy ascendant, astrology discredited
- 3.3 Statistics and astrology in the current period
- 3.4 Why is the belief in astrology still so strong?
- 3.5 Conclusion

4 Eugenics and the theory of inheritability

- 4.1 Galton establishes eugenics
- 4.2 Development of eugenics in the first half of the twentieth century
- 4.3 A new face for eugenics
- 4.4 Conclusion
- 4.5 Annex: definitions and genetic terminology

5 Why and how to restrict freedom

- 5.1 Axioms used to predict the future or establish a true science
 - 5.1.1 Principles and axioms for astronomy and astrology
 - 5.1.2 Principles and axioms for eugenics and Mendelism
- 5.2 Reasons to believe in the prediction of the future
 - 5.2.1 Why and how do people continue to believe in divination?

5.2.2 Why and how should one still believe in eugenics in its present form?

5.3 Human freedom

Part II What can one capture of a human life, and how?

6 Imaginary life stories to forge and nourish our minds

6.1 What are the distinctive features of these narratives?

6.2 The Epic of Gilgamesh

6.3 Sophocles' tragedy: Oedipus Tyrannus

6.4 Romances about the life of Henry de Joyeuse

6.5 What role will these imaginary life stories play in our own life?

7 Real-life stories to study or celebrate humans

7.1 Life stories in antiquity

7.2 From the Edict of Milan to the early twentieth century

7.3 How to study these real-life stories

7.4 Conclusions

8 Autobiographical memory and its critics

8.1 Psychology and verification of remembrances

8.2 From the Freudian unconscious to neuroscience

8.3 Conclusions

General conclusion

9 Mechanisms, systems, autonomy, hermeneutics and understanding human life

9.1 How demographic theories consider human life

9.1.1 From the origin of population science to the nineteenth century

9.1.2 Industrial revolution in the nineteenth century: the ascendancy of economics

9.1.3 The demographic revolution in the twentieth century: the comeback of demography

9.1.4 Three contemporary theories

9.2 How can we explain the complexity of memory and the human brain: from artificial intelligence to neuroscience

9.2.1 The limits of artificial intelligence

9.2.2 The contribution of neuroscience to explaining memory

9.3 Can autonomy theory be associated with hermeneutics?

9.4 How can we associate system biology, mechanisms and autonomy?