

BULLETIN N° 258
ACADÉMIE EUROPÉENNE INTERDISCIPLINAIRE
DES SCIENCES

INTERDISCIPLINARY EUROPEAN ACADEMY OF SCIENCES



Lundi 13 Juin 2022 (en format mixte présence-distance) :

15h00 : hommage à notre regretté collègue Alain STAHL, décédé le 27 Avril

15h30 : Conférence

**« *La théorie mathématique de la viabilité au service de la gestion durable :
une vision différente de l'économie* »**

Par **Isabelle ALVAREZ**
Ingénieur en Chef des Ponts, des Eaux et des Forêts
Chercheuse au Laboratoire LISC de l'INRAE

Notre Prochaine séance aura lieu le lundi 12 Septembre 2022 de 15h00 à 17h00
Salle Annexe Amphi Burg
Institut Curie, 13 rue Lhomond – 75005 Paris

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

**« *Atouts potentiels des nouveaux concepts de réacteurs nucléaires
pour un développement durable* »**

Par **Frank CARRÉ**
CEA - Directeur scientifique de la Direction de l'énergie nucléaire (2009-2019),
puis de la Direction des énergies (2020-2021)

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): 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-TANNOUJJI
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 Claude MAURY
MOYENS MULTIMÉDIA et UNIVERSITÉS : Pr Alain CORDIER
RECRUTEMENTS : Pr. Sylvie DERENNE, Anne BURBAN, Pr Jean-Pierre FRANÇOISE, Pr Christian GORINI, Pr Jacques PRINTZ, Jean BERBINAU
SYNTHÈSES SCIENTIFIQUES : Jean-Pierre TREUIL, Marie Françoise PASSINI
MECENAT : Pr Jean Félix DURASTANTI et Jean BERBINAU
GRANDS ORGANISMES DE RECHERCHE NATIONAUX ET INTERNATIONAUX : Pr Michel SPIRO
THÈMES ET PROGRAMMES DE COLLOQUES : Pr Jean SCHMETS

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

Juin 2022

N°258

TABLE DES MATIÈRES

- p. 03 Séance du 13 Juin 2022 : hommage à Alain STAHL
- p. 08 Séance du 13 Juin 2022 : conférence d'Isabelle ALVAREZ
- p. 10 Résumé de la conférence du 12 Septembre de Franck CARRÉ
- p. 12 Documents

Prochaine séance : lundi 12 Septembre 2022 de 15h00 à 17h00

*« Atouts potentiels des nouveaux concepts de réacteurs nucléaires
pour un développement durable »*

Par **Frank CARRÉ**

CEA - Directeur scientifique de la Direction de l'énergie nucléaire (2009-2019),
puis de la Direction des énergies (2020-2021)

Académie Européenne Interdisciplinaire des Sciences
 Siège Social : 5 rue Descartes 75005 Paris
 Nouveau Site Web : <http://www.science-inter.com>

ACADÉMIE EUROPÉENNE INTERDISCIPLINAIRE DES SCIENCES INTERDISCIPLINARY EUROPEAN ACADEMY OF SCIENCES

Séance du Lundi 13 Juin 2022 mixte présence-distance

La séance est ouverte à 15h30, sous la Présidence de Victor MASTRANGELO

- **Étaient présents physiquement nos Collègues membres titulaires** de Paris : Gilbert BELAUBRE, Jean BERBINAU, Anne BURBAN, Éric CHENIN, Françoise DUTHEIL, Édith PERRIER, Jacques PRINTZ, Jean SCHMETS et Jean-Pierre TREUIL.
- **Était présent physiquement notre Collègue membre correspondant** : Benoît PRIEUR.
- **Étaient connectés à distance nos Collègues** : François BOUCHET, Ernesto DI MAURO, Jacques FLEURET, Abdel KENOUIFI et Denise PUMAIN.
- **Était excusée notre Collègue** Irène HERPE-LITWIN.

I. Hommage à notre regretté collègue Alain STAHL, décédé le 27 Avril

Alain STAHL

Ingénieur des mines

Docteur d'État ès Lettres (Épistémologie)



Contribution de Victor MASTRANGELO

Je vais vous livrer quelques propos sur notre regretté collègue Alain STAHL et ensuite donner la parole à des collègues qui ont eu des moments d'échanges privilégiés avec lui.

Contribution de Victor MASTRANGELO

Je demanderai successivement à Jacques PRINTZ, Gilles COHEN-TANNOUDJI, et à Gilbert BELAUBRE de bien vouloir intervenir sachant que nous devons normalement terminer cet hommage pour 15h30, heure du début d'intervention de notre conférencière. Nous observerons pour terminer une minute de silence.

Alain STAHL est décédé de mort naturelle le mercredi 27 avril dernier à l'âge de 96 ans.

Il a fait une scolarité secondaire et supérieure particulièrement brillante.

A l'âge de 16 ans, il reçoit le premier prix de mathématiques au Concours général. Ensuite, il est classé 1^{er} au concours d'entrée à l'ENS de 1944. Il était alors âgé de 18 ans. Pour raisons personnelles, il choisit de poursuivre de 1944 à 1947 ses études à l'Ecole Polytechnique. Il sort major de sa promotion. Il complète naturellement sa formation à l'Ecole des Mines de Paris pour intégrer le grand corps technique de l'Etat des ingénieurs des mines.

De 1949 à 1956, il entame sa carrière industrielle comme ingénieur des mines au Ministère de l'Industrie. De 1957 à 1987, il travaille pour la grande industrie chimique et pharmaceutique. De 1960 à 1969, il est directeur technique de Péchiney (chimie), puis Péchiney-Saint-Gobain. De 1970 à 1976 chez Rhône Poulenc il est directeur du plan de la holding, puis directeur général adjoint de la division chimie fine. De 1977 à 1987, il est membre du directoire, puis directeur général de CDF-Chimie

1988, année de sa retraite, il commence une autre carrière cette fois dans un contexte académique. Les années de 1988 à 2003 sont consacrées à sa remise à niveau scientifique et au projet d'un ouvrage général sur la philosophie de la science.

Dans ce parcours académique, en 1994, il franchit une étape importante par la soutenance d'une thèse de Doctorat d'Etat ès Lettres sous la direction du prof. Jean LARGEAULT. Le titre de sa thèse est « Philosophie de la science contemporaine ». Il obtient ce grade sommital universitaire avec la mention très honorable et les félicitations du jury.

Il fit connaissance des activités de l'AEIS lors du colloque de 2002 sur Biologie et conscience. Il se rapprocha de notre collègue Gilbert Belaubre alors président de l'AEIS qui le fit entrer comme membre titulaire.

Comme cela se pratiquait souvent à l'époque le mémoire de thèse de Doctorat ès Lettres aboutissait à la parution d'un livre en librairie. En Octobre 2004, il publie un ouvrage chez Vrin, dans la collection « Science-Histoire-Philosophie, et sous le titre « Science et philosophie ; rivales, étrangères ou complémentaires » et comme sous-titre « Essai d'une philosophie de la nature, moderne ».

Alain STAHL fait le constat que philosophie et science ont progressivement divergé au fur et à mesure des progrès même de cette dernière. La discipline qui aurait pu les relier, qu'on désigne par philosophie des sciences ou épistémologie était selon lui sinistrée. Son projet a été de partir d'une connaissance globale et actuelle des sciences, commençant par les mathématiques et la physique pour finir aux sciences cognitives sans cependant vraiment aborder les sciences humaines proprement dites. Pour cela il procède en trois étapes. La première qu'il qualifie de « critique scientifique », essaie de discerner les apports et les faiblesses des différentes sciences et de leurs théories. La deuxième étudie, sur les cas concrets de la science contemporaine, les questions traditionnelles de l'épistémologie : hasard et déterminisme, réductionnisme, critères de valeur des théories... La troisième est consacrée à tisser les éléments d'une philosophie personnelle. Je m'arrête là, sachant que les collègues qui prendront ensuite la parole vont probablement compléter et développer ces propos liminaires

Alain STAHL en fit une présentation à l'AEIS lors de sa séance du mardi 9 novembre 2004 dans les locaux de la Maison des sciences de l'homme dans le 6^{ième} où nous étions hébergés.

A cette époque Gilbert BELAUBRE, président de l'AEIS, pris l'initiative de proposer au magazine des alumni de Polytechnique LA JAUNE et LA ROUGE un article de présentation de cet ouvrage. Celui-ci fut publié dans le N° 603 de mars 2005.

Enfin cet ouvrage aura une troisième et dernière édition papier en juillet 2017 avec un ajout sur la science informatique et d'un chapitre sur « matérialisme et spiritualisme »,

Au niveau des activités de l'AEIS, Alain STAHL était très attentif à la qualité scientifique de ses travaux. Je me souviens que lors de la préparation d'un colloque, il n'était pas convaincu de la pertinence des travaux d'un conférencier potentiel à ce colloque. Il avait convaincu les membres du comité scientifiques de l'époque qui avaient décidé de proposer au dit conférencier de présenter ses travaux dans une session réservée aux posters ! Souvent, il était consulté pour demander si des résultats avaient été publiés dans des domaines pointus tels que les différentes interprétations de la mécanique quantique ou bien la biologie quantique. De son côté il n'hésitait pas à poser des questions ardues d'une grande actualité scientifique. Comme président de l'AEIS, j'ai eu d'excellents rapports avec Alain. J'ai toujours trouvé auprès de lui appuis et conseils. Lorsqu'il était satisfait du choix d'un conférencier, il me le signifiait discrètement. Il m'a fait de nombreuses confidences sur sa carrière industrielle comme sur son orientation scientifique. Je garde le souvenir d'une intelligence très vive et appréciant le monde académique avec ses qualités et ses défauts, d'une personne d'une grande sensibilité et malgré son côté apparent rugueux, c'était un homme foncièrement bienveillant mais façon maître d'école.

Pour terminer, j'oserais dire qu'il aurait probablement aimé mener de front une carrière à la fois industrielle et académique. Ce qui est certain, c'est qu'il en avait les capacités intellectuelles !

Contribution de Gilbert BELAUBRE

Alain Stahl a été l'un de mes interlocuteurs préférés pendant les vingt ans de nos relations, interrompues par sa disparition. Mais, même s'il n'est plus là, il est « dans la chambre à côté », comme dit St Augustin.

Nous nous sommes rencontrés en 2002, au cours du colloque sur « Biologie et conscience », Les conférences d'Edelman, Baars, Singer, Jouvét ouvraient la voie à l'élucidation du travail du cerveau, recherches qui trouvent aujourd'hui leur aboutissement et un nouveau départ avec Dehaene et Le Bihan à Neurospin du CEA. Il était enthousiasmé par ces grandes perspectives, et il décida de s'associer aux travaux de l'AEIS. Pendant ces vingt années, il a apporté son immense culture scientifique, ses jugements limpides et sans hésitation et sans nuance, sa rigueur intellectuelle et morale.

Ses convictions philosophiques sur le matérialisme et le spiritualisme étaient aussi un sujet que nous évoquions souvent : né dans une famille agnostique, il a connu, avec Claire, un grand amour partagé sans le moindre nuage. Il a, selon ses termes, partagé par amour la religion de Claire. En paraphrasant Henri IV, je dirai : Claire valait bien une messe. Etant moi-même agnostique jusqu'à une forme d'ascèse, je me tenais à distance du débat « matérialisme – spiritualisme ». Alain Stahl, à l'instar d'autres grands penseurs, tels que Pasteur, séparait le domaine du spirituel privé et celui de la science, un bien commun.

Son ouvrage est le résultat d'une thèse, menée sous la direction de Jean Largeault, qui a donné lieu à l'étude, selon ses évaluations, de 1400 livres. Stahl n'était pas un bourreau de travail, il avait trop de facilités. Peu de temps après notre rencontre, je l'ai invité dans ma thébaïde de Montreuil aux Lions. Il m'a apporté un paquet de plus de 2.500 pages, son manuscrit, et il m'a demandé de lui dire ce que j'en penserais après lecture. Quelques jours après, je lui ai donné mon avis ; Ou bien, il pourrait saucissonner le tout en 8 à 10 volumes, ou en faire une condensation en 300 ou 400 pages en renvoyant les aspects les plus techniques dans un site. C'est cette solution qui lui a permis d'être édité chez Vrin, avec l'appui amical d'Anne Fagot-Largeault. (Largeault était mort entre temps). Cet ouvrage a eu un certain succès, puisqu'il a connu 3 rééditions, avec, à chaque fois, des ajouts et des modifications, car les sciences, désormais, avancent à pas de géants dans tous les domaines. J'ai présenté l'ouvrage dans la rubrique de « La jaune et le rouge » pour l'édition originale et pour la deuxième édition.

Alain Stahl était un homme d'abord simple mais c'était une simplicité aristocratique. D'après ses proches, il pouvait avoir des colères. Je n'ai jamais ressenti chez lui que le calme des grands esprits.

Au fond de ma mémoire, la part de son âme qu'il m'a léguée est présente, et elle restera toujours vivante.

Contribution de Gilles COHEN-TANNOUDJI

Les quelques éléments biographiques rappelés par notre Président concernant la carrière d'Alain Stahl esquissent le portrait de quelqu'un qui a honoré de sa présence notre académie, un « grand monsieur ».

J'ai pu apprécier, en particulier lors de discussions philosophiques qu'avec Gilbert Belaubre j'ai eues avec lui, son immense culture scientifique, une culture dont j'ai pu par ailleurs mesurer l'étendue et la profondeur à la lecture de son livre *Science et philosophie-rivales, étrangères ou complémentaires ?*- (Vrin, 2004) inspiré de son mémoire de thèse, dans lequel il brosse le tableau éclectique des grands disciplines scientifiques qui suscitent des interrogations d'ordre philosophique, comme la physique et les mathématiques (des disciplines pour lesquelles je peux témoigner, en tant que praticien, de la pertinence de son analyse) mais aussi la biologie, une discipline pour laquelle j'aurais été bien incapable de me hisser à son niveau.

Humainement, Alain Stahl impressionnait tous ceux qui l'approchaient par son affabilité, sa gentillesse, sa modestie et aussi sa simplicité : je me rappelle qu'il arrivait à nos séances avec la petite trottinette pliée avec laquelle il se déplaçait dans les rues de Paris...

Contribution de Jacques PRINTZ

J'ai connu Alain Stahl, par hasard, grâce à l'AEIS, après mon adhésion en 2016, puis découvert que nous étions voisins à Versailles, à quelques centaines de mètres l'un de l'autre.

Je n'ai pas souvenir de sa présence à la séance de septembre 2016 où notre Président m'avait proposé de donner un bref aperçu de mes travaux en informatique ; mais il est certain que la mise à jour de son livre, *Science et philosophie. Rivaux, étrangères, ou complémentaires ? Essai d'une philosophie de la nature, moderne* ; 2004, 2^e édition 2010, chez Vrin, le préoccupait, car le statut de l'informatique du point de vue épistémologique reste problématique. Avec son amabilité et sa grande ouverture d'esprit, il m'avait proposé une discussion, chez moi, pour un échange approfondi où nous avons pu aborder différents sujets de fond, pendant presque 2 heures.

L'informatique a ceci de particulier que tout le monde, comme usager, a un avis sur le sujet, mais dont la réunion est incohérente, et – disons-le tout net – généralement à côté de la plaque. Il cherchait donc, tout simplement, à s'informer auprès de quelqu'un qui y a consacré une bonne partie de sa vie ! Un comportement de *gentleman* assez rare qui mérite d'être souligné, car la tendance est plutôt de porter des avis péremptaires, et à ne pas écouter. Il appliquait à la lettre ce vieux précepte de Lao Tse : « Celui qui parle ne sait pas, Celui qui sait ne parle pas ».

Je lui avais parlé des travaux fondateurs de von Neumann à propos de la théorie des automates à laquelle il avait consacré les 10 dernières années de sa vie, théorie dont on ne parle quasiment jamais dans le milieu de la philosophie des sciences & des techniques ; ce qui l'avait à la fois rassuré – il y a du « dur » dans l'informatique – et inquiété, car cela confirmait son sentiment du décrochage de la philosophie des S&T avec ce qui est réellement la vie des scientifiques.

Il connaissait bien sûr von Neumann, mais pas cet aspect de son génie protéiforme.

On avait terminé notre discussion sur les liens profonds qu'il y a entre l'informatique théorique, la complexité, les sciences de l'information ET la physique statistique ; en particulier tout ce qui tourne autour de l'entropie, du « bruit », du traitement de signal. Je lui avais fait part de mon regret de n'avoir pas pu trouver un étudiant tenté par une thèse sur ce sujet, à vrai dire un « oiseau rare », car il faut maîtriser deux domaines de connaissance dont chacun est un univers en soi. Il m'avait prêté son exemplaire du cours de Roger Balian à l'X, chez *Ellipses*, livre devenu introuvable, une référence que j'ai pu parcourir à loisir qui n'a fait qu'amplifier mon regret.

Certains mathématiciens épistémologues comme Ferdinand Gonseth ont pu parler de la logique comme d'une « physique de l'objet quelconque », laquelle est au cœur des sciences de l'information, mais sous une forme « méta » comme les métalangages en logique mathématique. Von Neumann connaissait tout cela de première main car c'est lui qui avait accueilli Gödel à l'IAS de Princeton, et proposé à Turing d'être son assistant après sa thèse supervisée par Church, également à Princeton.

La guerre allait mettre fin à ce projet ; Turing allait prendre en charge à Bletchley Park la petite équipe qui allait casser les codes secrets de l'armée allemande, et von Neumann inventer une organisation de ces *Computing Instruments* – comme il disait – appelée après son décès « Architecture de von Neumann » qui était la mise en œuvre dans le monde réel physico-chimique de l'idée géniale de Turing de *Stored Controlled* où tout transite par la mémoire, permettant ainsi d'explorer cette complexité combinatoire où il se passe tant de choses qui seraient restées inaccessibles sans ces incroyables machines, aujourd'hui à l'échelle nanométrique.

Nul doute que la vaste culture d'Alain Stahl aurait pu lui permettre d'écrire un chapitre intéressant sur ce thème au cœur de l'interdisciplinarité qui, pour ce qui me concerne, me paraît être LE sujet de cette science du 21^e siècle à construire. Une fois de plus, grâce à notre intelligence, il va nous falloir créer du neuf et du VRAI ... et je crois que c'est cela qui passionnait Alain Stahl.

II. Conférence d'Isabelle ALVAREZ : *La théorie mathématique de la viabilité au service de la gestion durable : une vision différente de l'économie*

1. Résumé de la conférence

« La théorie mathématique de la viabilité au service de la gestion durable : une vision différente de l'économie »

Isabelle Alvarez

Chercheur à INRAE, accueillie à l'ISC-PIF. De formation d'ingénieur généraliste (X83, Engref), dans une première vie est chercheur en Intelligence artificielle sur les problèmes d'explication de résultats, au Cemagref et au LIP6 (Thèse en 1992). Applique ses travaux dans le domaine agricole et environnemental. S'intéresse à l'ingénierie des systèmes complexes (codirectrice du RNSC de 2014 à 2017). Bascule de l'IA dans la théorie de la viabilité en 2010.

Résumé

La théorie mathématique de la viabilité (Aubin, 1991) étudie la compatibilité entre un système dynamique et un ensemble de contraintes. Ce formalisme permet de proposer des définitions pour les concepts liés à la durabilité et d'étudier les liens entre ces concepts, comme la robustesse et la résilience (Martin, 2004). Dans ce cadre il est possible d'éviter les arbitrages entre les préoccupations de court terme ou de long terme. Il permet aussi de prendre en compte simultanément plusieurs aspects de la durabilité. L'intérêt suscité par la théorie de la viabilité a entraîné des travaux en informatique pour rendre opérationnels les outils d'analyse proposés. C'est à l'heure actuelle, avec le changement de pratique qu'elle suggère, la principale limite à sa mise en œuvre. En effet, même si elle est rattachée au contrôle optimal, la théorie de la viabilité propose un changement de perspective par rapport à l'optimisation. Avant de se poser des questions en termes d'objectif à optimiser, on s'intéresse à la définition des états souhaitables et des moyens admissibles pour y maintenir le système étudié, ainsi qu'aux conséquences pour les évolutions possibles du système. Plusieurs exemples seront proposés pour expliquer l'intérêt de la démarche au-delà de la théorie mathématique.

Abstract

The mathematical viability theory (Aubin, 1991) offers concepts and methods that are suitable to study the compatibility between a dynamical system and constraints in the state space. It is particularly suitable to study the sustainability of socio-ecosystems. In this framework it is possible to study the links between concepts related to sustainability, such as robustness and resilience (Martin, 2004). It avoids the trade-off between short-term and long-term considerations, and also between different features of sustainability. Related work in computer science has led to approximation algorithms with proved convergence, but the computation of viability kernel and regulation maps are still challenging. It is the main limitation to its implementation along with the change of vision it suggests. Actually, even if it is linked to optimal control, the mathematical viability theory proposes a change of perspective with respect to optimization. Before addressing questions in terms of objective function, it focuses on the definition of the set of desirable states and the admissible means to maintain the system in it, and studies the consequences for the possible evolution of the system. Several examples are discussed to show the interest of the approach beyond the mathematical theory.

Articles liés et références librement téléchargeables

Martin, 2004 : The cost of restoration as a way of defining resilience: a viability approach applied to a model of lake eutrophication. *Ecology and Society* 9(2): 8.

Disponible en ligne : <http://www.ecologyandsociety.org/vol9/iss2/art8>

I. Alvarez, R. de Aldama, S. Martin, R. Reuillon : “Assessing the Resilience of Socio-Ecosystems: Coupling Viability Theory and Active Learning with kd-Trees. Application to Bilingual Societies”, 23rd International Joint Conference on Artificial Intelligence, IJCAI’13, Beijing, China, pp. 2776-2782 (2013)
<http://ijcai.org/Proceedings/13/Papers/409.pdf>

I. Alvarez, L. Zaleski, J-B. Briot, M. Irving. 2022. Collective management of environmental commons with multiple usages: a guaranteed viability approach. ArXiv. <https://arxiv.org/abs/2107.02684>

2. Exposé de la conférencière et échanges avec l’auditoire :

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 ». Où se trouvent également le support de présentation et deux articles téléchargeables recommandés par la conférencière :

- *Assessing the Resilience of Socio-Ecosystems: Coupling Viability Theory and Active Learning with kd-Trees. Application to Bilingual Societies*
- *Collective management of environmental commons with multiple usages: a guaranteed viability approach.*

REMERCIEMENTS

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

III. Conférence de Franck CARRÉ : « *Atouts potentiels des nouveaux concepts de réacteurs nucléaires pour un développement durable* »

Atouts potentiels des nouveaux concepts de réacteurs nucléaires pour un développement durable

Frank Carré

CEA - Directeur scientifique de la Direction de l'énergie nucléaire (2009-2019)
puis de la Direction des énergies (2020-2021)

Résumé

D'abord développée depuis les années 1960 pour renforcer la sécurité énergétique, l'énergie nucléaire est aujourd'hui reconnue internationalement comme l'un des leviers stratégiques de la lutte contre le changement climatique, au même titre que les énergies renouvelables, l'efficacité énergétique et les technologies de flexibilité. En témoigne l'estimation par l'AIE du besoin de porter à ~800 GWe la puissance installée dans le monde pour atteindre la neutralité carbone en 2050. Cependant, cette perspective dépend de progrès nécessaires sur les délais et les coûts de construction du nouveau nucléaire, sur l'harmonisation au plan international des exigences de sûreté, et sur la mise en œuvre de solutions durables pour la gestion des combustibles usés et la maîtrise des risques de prolifération.

A ces visées pour les grands réacteurs de puissance (> 1000 MWe) s'ajoutent aujourd'hui les perspectives ouvertes par les petits réacteurs modulaires en matière de production multi-vecteurs (électricité, chaleur, eau potable, hydrogène, composés de synthèse pour les transports et l'industrie chimique...). Même si leurs conditions de déploiement restent à préciser et si la compétitivité économique de leur production énergétique reste à démontrer, ces petits réacteurs devraient pouvoir étendre, en les diversifiant, les contributions du nucléaire à la neutralité carbone.

Pour inscrire les apports de l'énergie nucléaire dans le long terme, il reste essentiel de poursuivre dans un cadre international les recherches sur les réacteurs à neutrons rapides, capables de valoriser complètement le potentiel énergétique de l'uranium et de minimiser les quantités de déchets à stocker en site géologique, en ouvrant le champ des technologies envisageables au-delà de la filière des réacteurs au sodium qui est aujourd'hui la plus aboutie.

D'autres types de réacteurs dépassant par certains aspects les performances des réacteurs à eau pourront étendre les contributions de l'énergie nucléaire à la neutralité carbone. Les réacteurs à haute température (> 600°C) en particulier pourront compléter les apports du nucléaire à la décarbonation de l'industrie, à la production d'hydrogène et de carburants de synthèse durables, en plus de pouvoir produire une électricité décarbonée avec un haut rendement de conversion (et donc un moindre rejet de chaleur).

Enfin, déjà bien connues pour leurs apports au domaine médical (imagerie, radiothérapie, stérilisation...), les sciences et techniques nucléaires réservent bien d'autres contributions directes ou indirectes au soutien d'un développement durable, qu'il s'agisse de diagnostic environnemental, de conservation des aliments, de production d'eau potable, de techniques de recyclage ou de traitement de pollutions...

Potential assets of new nuclear reactor designs for sustainable development

Frank Carré (Former Scientific Director of the CEA's energy department)

Summary

First developed in the 1960s to strengthen energy security, nuclear energy is now internationally recognized as one of the strategic levers in the fight against climate change, along with renewable energies, energy efficiency and flexibility technologies. This is evidenced by the IEA's estimate of the need to increase installed capacity worldwide to ~800 GWe to achieve carbon neutrality by 2050. However, this perspective depends on necessary progress on the time and cost of building new nuclear power, on the international harmonization of safety requirements, and on the implementation of sustainable solutions for spent fuel management and proliferation risk control.

In addition to these goals for large power reactors (> 1000 MWe), there are now prospects for small modular reactors for multi-purpose production (electricity, heat, drinking water, hydrogen, synthetic compounds for the transport and chemical industries, etc.). Even if the conditions for their deployment remain to be defined and the economic competitiveness of their energy production remains to be demonstrated, these small reactors should be able to extend, by diversifying them, the contributions of nuclear power to carbon neutrality.

In order to ensure the long-term contribution of nuclear energy, it remains essential to continue research on fast neutron reactors within an international framework, capable of fully exploiting the energy potential of uranium and minimizing the quantities of waste to be stored in geological sites, by opening up the field of conceivable technologies beyond sodium reactors, which are currently the most successful.

Other types of reactors that go beyond the performance of water reactors in some respects could extend the contributions of nuclear energy to carbon neutrality. In particular, high-temperature reactors (> 600°C) could complement the contributions of nuclear energy to the decarbonization of industry, to the production of hydrogen and sustainable synthetic fuels, in addition to being able to produce decarbonized electricity with a high conversion efficiency (and therefore less heat rejection).

Finally, already well known for their contributions to the medical field (imaging, radiotherapy, sterilization...), nuclear sciences and techniques have many other direct or indirect contributions to make in support of sustainable development, whether in environmental diagnostics, food preservation, drinking water production, recycling techniques or pollution treatment...

Documents

Pour préparer la conférence de Franck CARRÉ, nous vous proposons les articles associés suivants, librement téléchargeables et *disponibles sur le site de l'AEIS* :

« *Les nouveaux concepts de réacteurs nucléaires* », *Reflets de la Physique* n° 60, 2018, Annick Billebaud, physicienne au CNRS

« *Réacteurs de quatrième génération : note de synthèse* », IRSN, 21 novembre 2007 (*non incluse dans le bulletin car trop volumineuse (55 pages) : à lire ou télécharger sur le site de l'AEIS*)



Les nouveaux concepts de réacteurs nucléaires

Annick Billebaud, physicienne, CNRS

Les recherches sur des nouveaux types de réacteurs nucléaires pouvant succéder aux réacteurs actuels sont des travaux de longue haleine. De nombreux nouveaux concepts sont à l'étude mais, depuis 2000, un forum international incite la recherche à se concentrer sur quelques systèmes prometteurs vis-à-vis des nouveaux critères que devraient remplir des réacteurs de 4^e génération. En France, les systèmes étudiés dans ce cadre sont les réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium et les réacteurs à sels fondus. Les réacteurs pilotés par accélérateur, s'inscrivant dans une stratégie d'incinération de déchets dans des systèmes dédiés, font également l'objet d'études depuis vingt ans.

Pourquoi étudier de nouveaux systèmes ?

Dans un cœur de réacteur nucléaire, les réactions à l'œuvre conduisant finalement à la production d'énergie thermique, et en particulier les fissions, sont bien connues et communes à tous les réacteurs. Cependant, les façons d'exploiter la réaction en chaîne, de la contrôler, de consommer le combustible, ou d'extraire la chaleur du réacteur peuvent être réalisées de différentes manières satisfaisant divers critères prioritaires que nous verrons plus loin.

Or, un nouveau concept, différant de ceux qui ont existé ou sont en cours d'exploitation, prend du temps à être démontré et validé ; il nécessite des travaux de modélisation et, à un moment ou à un autre, des expériences sur maquette puis la construction de prototypes pour étayer sa faisabilité. Il faut bien souvent plusieurs décennies de travail de recherche, de conception, de développement, d'expérimentation pour aboutir à un système prêt à passer à l'échelle industrielle, ce qui dépasse souvent la durée de la carrière professionnelle d'un individu.

Cette échelle de temps est la raison principale pour laquelle les organismes de recherche scientifique et technologique tentent d'anticiper les besoins futurs. Dans le cas du nucléaire, cela implique de revisiter d'anciens concepts de réacteurs ou d'en proposer de nouveaux à la

lumière des dernières connaissances et avancées. La France est un pays qui a de fortes compétences dans les sciences nucléaires et les technologies associées aux réacteurs, et possède donc un creuset favorable à ce type de recherches. L'objectif est de pouvoir disposer, au-delà de 2030 (voire 2040 ou 2050 pour les plus innovantes), de solutions ayant démontré leur faisabilité. Cette recherche explore et prépare de possibles solutions dans son champ de compétences, et ne présage pas des choix futurs qui reviennent aux politiques et à la société. Néanmoins, pour les mêmes raisons d'inertie temporelle, les choix des axes de recherche engagent quelque peu l'avenir.

Qu'est-ce que la « génération IV » ?

Les réacteurs nucléaires en cours d'exploitation en France font partie de ce qui est appelé la deuxième génération. On considère que les versions améliorées en cours de construction, comme l'EPR, sont la troisième génération. Dans de nombreux pays, des recherches prospectives sont menées pour imaginer des réacteurs de quatrième génération tournés vers le futur. Sous l'impulsion du Département de l'Énergie des États-Unis, un forum international, le GIF (en anglais, *Generation IV International Forum*, regroupant une douzaine de pays dont la France) s'est formé en 2000. Son objectif

est d'encourager les recherches à l'échelle internationale sur quelques concepts de réacteurs qui rempliraient des critères spécifiques, et dont la mise en œuvre éventuelle se ferait à l'horizon 2030-2040. Ces critères sont définis comme des objectifs d'amélioration nécessaires sur les plans économique, environnemental et social, si l'énergie nucléaire devait contribuer notablement à répondre à la demande énergétique mondiale du vingt-et-unième siècle. Ils portent sur quatre domaines principaux.

- Durabilité : ce critère a pour but de pouvoir inscrire l'énergie nucléaire dans le temps, en optimisant à la fois les ressources en combustible et la production de déchets, et donc leur gestion à long terme. En effet, les systèmes actuels sont essentiellement basés sur l'utilisation de combustible enrichi en uranium 235, ce qui nécessite de traiter de grandes quantités d'uranium pour extraire cet isotope ; il faut environ 200 tonnes d'uranium chaque année pour faire fonctionner un cœur de réacteur à eau sous pression de 1 GW qui fera fissionner seulement une tonne de matière. Dans le futur, on souhaite pouvoir utiliser un système qui permette d'utiliser tout le potentiel du minerai extrait et d'envisager ainsi plusieurs siècles de production d'énergie à l'échelle mondiale.
- Sureté et fiabilité : il s'agit ici, d'une part, de minimiser les risques d'accidents





nucléaires conduisant entre autres à des catastrophes comme celles de Tchernobyl ou Fukushima, et d'autre part, dans l'éventualité où un accident se produirait, de minimiser l'impact sur les populations et l'environnement. Pour cela, l'accent est mis sur la sûreté passive des systèmes et en particulier l'évacuation de la puissance résiduelle en cas d'arrêt du cœur.

- Compétitivité économique : dans un marché de l'énergie libéralisé où les sources de production sont de plus en plus diverses, un nouveau système doit pouvoir être compétitif.
- Résistance à la prolifération et protection physique : le détournement des installations et des matières nucléaires civiles à des fins militaires est un risque depuis longtemps sous haute surveillance internationale. À ce risque s'ajoute aujourd'hui celui d'actes malveillants, voire terroristes. Par conséquent, il est proposé d'intégrer dès la conception des nouveaux systèmes une protection contre le vol de matières radioactives et les actes de sabotage qui pourraient intervenir dans les installations ou les transports de matière.

Quels systèmes pour répondre à ces critères ?

Un réacteur nucléaire se définit par rapport à ses trois composantes principales que sont : le **combustible**, non seulement sa nature mais aussi sa géométrie, sa composition, sa forme chimique ; le **modérateur**, matériau présent dans le cœur permettant d'optimiser l'utilisation du combustible en ralentissant plus ou moins les neutrons ; et le **caloporteur**, qui sert à transférer la puissance thermique du cœur vers les échangeurs pour la transformer en électricité. Pour la plupart des réacteurs actuels, l'eau joue à la fois le rôle de modérateur et de caloporteur. Il existe un nombre très élevé de combinaisons possibles à partir de ces trois éléments, et donc de nombreuses variantes de réacteurs nucléaires potentiels. Au cours de l'histoire du nucléaire, quelques centaines ont été étudiées sur le plan théorique mais, au total, moins d'une vingtaine ont fait l'objet d'une construction permettant la production de puissance. Pour répondre aux nouveaux critères les possibilités restent nombreuses. Le GIF a procédé à une sélection de six concepts jugés les plus prometteurs, sur lesquels concentrer les recherches.

Trois de ces concepts sont à neutrons dits « rapides », c'est-à-dire conservant autant que possible l'énergie des neutrons telle qu'à leur création. Ceci a plusieurs avantages vis-à-vis du critère de durabilité. En effet, afin d'optimiser l'utilisation du minerai d'uranium, il est possible d'envisager la régénération du combustible, en transformant les noyaux d'uranium 238 dits « fertiles » en noyaux de plutonium 239 « fissiles »^(a). Si chaque noyau d'uranium 238 produit un noyau de plutonium 239 par capture d'un neutron, on utilise ainsi tout le potentiel énergétique du minerai d'uranium, composé à 99,3% d'uranium 238. Les neutrons rapides permettent de minimiser les captures parasites de neutrons et ainsi de maintenir la criticité du système et la régénération du plutonium.

Ces réacteurs à neutrons rapides peuvent utiliser différents fluides modérateurs et caloporteurs ; les trois concepts étudiés sont le réacteur rapide au sodium (*Sodium Fast Reactor*, SFR), le réacteur rapide au plomb (*Lead Fast Reactor*, LFR) et le réacteur rapide à gaz (*Gas Fast Reactor*, GFR). Ils présentent tous une bonne efficacité thermique. Le sodium combine une température de fusion basse avec un point d'ébullition très élevé, ce qui offre une bonne inertie thermique au circuit primaire. Cependant, le SFR et le LFR doivent faire face aux propriétés chimiques d'un métal liquide : réactivité vis-à-vis de l'eau et de l'air pour le sodium, corrosion pour le plomb. Le troisième concept a l'avantage d'utiliser un gaz chimiquement inerte, l'hélium ; en revanche, il a de ce fait une assez faible inertie thermique en cas d'arrêt de la circulation forcée : cela n'est pas optimal pour la sûreté, et nécessite le développement d'un combustible très particulier.

Le concept de réacteur à très haute température (*Very High Temperature Reactor*, VHTR) fonctionne entre 800 et 1 000 °C. Il utilise des neutrons plus lents, dits « thermiques ». Il est lui aussi refroidi à l'hélium, mais modéré avec du graphite. Son avantage principal est que le gaz peut être directement utilisé dans une turbine sur le circuit primaire. La chaleur produite par ces systèmes peut également être utilisée de différentes manières sur le plan industriel, notamment pour la production d'hydrogène.

Un autre concept, revisitant celui des réacteurs à eau, est également étudié : le réacteur à eau supercritique (*SuperCritical*

Water cooled Reactor, SCWR) qui fonctionne avec une température et une pression situées au-dessus de celles du point critique de l'eau (374 °C, 221 bars), d'où son nom ; il peut être conçu pour des neutrons soit thermiques, soit rapides. La vapeur produite, extrêmement chaude, peut être envoyée directement dans la turbine et, après condensation, l'eau est renvoyée dans le cœur. Ce procédé bénéficie de la longue expérience des centrales thermiques à combustible fossile utilisant l'eau supercritique. Il a un avantage de rentabilité économique car son efficacité thermique peut s'élever jusqu'à 44%, à comparer aux 33% des réacteurs à eau sous pression actuels. Cependant, des défis technologiques restent à relever, comme : la modélisation des transferts de chaleur lors des accidents, en cas de dépressurisation et de perte des conditions supercritiques ; la qualification des matériaux aux hautes températures, et notamment des aciers pour les gaines du combustible ; et la démonstration de la sûreté passive du système.

Le sixième concept, un des plus innovants, utilise les sels fondus (*Molten Salt Reactor*, MSR) : il est est présenté plus loin.

Les systèmes de quatrième génération étudiés en France

Sur la base d'estimation de ressources limitées en uranium, et d'une utilisation importante du nucléaire au niveau mondial, la France avait imaginé dès les années 1960 une stratégie qui commençait par l'exploitation des réacteurs thermiques à uranium enrichi. L'idée était de constituer un stock de plutonium (noyaux produits pendant le fonctionnement), permettant ensuite d'alimenter des réacteurs à neutrons rapides surgénérateurs et d'assurer une production d'énergie pérenne. La France a ainsi très tôt concentré ses efforts de recherche sur les réacteurs à neutrons rapides, et a fait le choix technique du sodium liquide comme caloporteur, portant le concept jusqu'à sa réalisation. Cependant, seules deux unités au sodium liquide ont été construites à l'échelle industrielle en France : Phénix (1973-2010), puis Superphénix, arrêté prématurément en 1997 pour des raisons industrielles, économiques, et politiques, associées à un contexte post-Tchernobyl. Ce type de réacteur fait à nouveau l'objet



de recherches dans le cadre de la quatrième génération, en raison de ses qualités indéniables vis-à-vis des critères de ressources et de déchets, et avec l'avantage de reposer sur une technologie déjà mise en œuvre dans plusieurs pays. Ainsi le CEA, EDF et Framatome ont consacré d'importants efforts de recherche pour revisiter ce concept, avec notamment le projet d'un réacteur au sodium de démonstration, de 600 MW, ASTRID.

Le concept de réacteur à sels fondus (MSR) a été étudié aux États-Unis à partir des années 1950 puis abandonné dans les années 1970. Dans ce système, le combustible est dissous dans un sel fluoré liquide, qui joue ainsi aussi le rôle de caloporteur et peut circuler directement dans les échangeurs de chaleur. Réacteur modéré par du graphite dans ses premières versions, il a été revisité récemment comme un réacteur à neutrons rapides par des équipes de recherche académique françaises, notamment pour le rendre régénératif avec un retraitement en ligne simplifié, en utilisant un combustible thorium et uranium. Le combustible sous forme de sels fondus présente de nombreux avantages : d'une part, grâce aux bonnes propriétés thermodynamiques du sel : température d'ébullition élevée, bonne capacité calorifique et conductivité thermique ; et d'autre part, parce que, en cas de dysfonctionnement du système, le sel liquide peut être reconfiguré de façon passive : par exemple dispersé dans un réseau de réservoirs dimensionnés pour tenir de hautes températures, permettant différentes options pour évacuer sa puissance résiduelle. La possibilité de retraiter le sel en ligne permet de maintenir dans le cœur un bilan neutronique favorable à l'utilisation de différents combustibles. En totale rupture technologique avec les réacteurs existants et bien éprouvés, il demande une relecture complète de l'approche de sûreté, et un considérable effort de recherche pour lever les verrous d'abord scientifiques, puis technologiques, pour tout ce qui a trait au sel et aux matériaux (corrosion, retraitement, physico-chimie, ...), et à la neutronique d'un combustible en mouvement (combustible-calporteur, pilotage de la criticité), autant d'étapes avant un prototype industriel. L'inertie naturelle des filières nucléaires est un frein au déploiement de ces technologies très innovantes, même si elles représentent potentiellement des solutions intéressantes pour le futur.

Les réacteurs pilotés par accélérateur

Sans faire partie des systèmes de quatrième génération étudiés par le GIF, les réacteurs pilotés par accélérateur (*Accelerator Driven System*, ADS) font également l'objet d'intenses études de faisabilité en raison de leur potentiel dans un scénario où l'on souhaiterait incinérer, dans des systèmes dédiés, certains déchets nucléaires produits par les filières actuelles : ceci permettrait de réduire leur radiotoxicité et leur chaleur résiduelle et par conséquent les surfaces de stockage. Ces réacteurs ont la particularité d'être « sous-critiques », c'est-à-dire que la réaction en chaîne ne peut ni démarrer ni s'entretenir spontanément sans l'apport de neutrons externes. Dans la plupart des concepts, un accélérateur fournit des protons de haute énergie, qui vont frapper une cible faite d'un métal lourd (par exemple du plomb) située au cœur du réacteur. Cela produit des réactions nucléaires qui libèrent un grand nombre de neutrons. Ceux-ci vont créer des fissions dans le cœur et ainsi générer une certaine puissance qui pourra devenir nulle sur commande, par l'arrêt de l'accélérateur. Ce contrôle de la puissance par l'accélérateur permet d'utiliser des combustibles un peu exotiques comme les actinides mineurs^(b) dont les propriétés ne permettent pas l'usage en réacteur critique. L'ADS est alors exploité en version rapide, avec du plomb liquide comme modérateur-calporteur. Le principal défi à relever pour la mise en œuvre de ces systèmes (en dehors de la chimie du plomb liquide, point commun avec le LFR) est d'atteindre un niveau de fiabilité du faisceau de particules encore jamais atteint. Ces réacteurs sont étudiés depuis plus de vingt ans, en particulier en Europe et en France, avec une intense R&D sur les accélérateurs linéaires. La construction en Belgique d'un démonstrateur d'environ 100 MW, MYRRHA, est désormais programmée en deux étapes : une pour l'accélérateur en 2026 et l'autre pour le réacteur en 2033.

Conclusion

Les recherches sur de nouveaux systèmes de production d'énergie nucléaire ne se limitent pas aujourd'hui à celles réalisées dans le cadre du GIF, dont l'initiative a eu le mérite de fixer des critères d'évolution des concepts toujours plus exigeants,

notamment vis-à-vis de la sûreté nucléaire et de la question des déchets, et de relancer une R&D concertée entre les pays ayant une industrie nucléaire. On peut apprécier que les réticences les plus fortes exprimées par la société envers le nucléaire aient été d'une certaine manière, prises en compte par la recherche. Cependant, développer de nouveaux réacteurs jusqu'au niveau industriel face aux progrès réalisés par les autres sources d'énergie, notamment renouvelables, ne peut s'affranchir des aspects économiques. C'est pourquoi, en dehors de ces nouveaux concepts, de gros efforts sont également mis, notamment par l'industrie française, sur l'étude de réacteurs de troisième génération basés sur l'optimisation des réacteurs à eau actuels.

En résumé, les options pour l'avenir du nucléaire sont nombreuses. Mais l'effort de recherche, qui doit être anticipé sur des décennies, ne peut être mené à force égale sur chaque système. L'enjeu est de mener une R&D pouvant aboutir à un système industriel sans s'interdire d'explorer des voies plus audacieuses pour le futur. ■

En savoir plus

- *Les réacteurs nucléaires à caloporteur sodium*, CEA, Monographie de la DEN, Éditions Le Moniteur (2014).
- *Les réacteurs nucléaires à caloporteur gaz*, CEA, Monographie de la DEN, Éditions Le Moniteur (2006).
- "Technology Roadmap Update for Generation IV Nuclear Energy Systems", Gen. IV International Forum, January 2014, NEA/OCDE.
- Gen. IV International Forum, www.gen-4.org/gif/jcms/c_9260/public
- « Vers un cycle du combustible nucléaire durable : Évolution et tendances », NEA/OCDE (2012) N°6981. www.oecd-nea.org/ndd/reports/2012/6981-trends-sustainability-fuel-cycle-fr.pdf
- "Perspective on the use of Thorium in the Nuclear Fuel Cycle", NEA/OCDE (2015) N°7224. www.oecd-nea.org/science/pubs/2015/7224-thorium.pdf

a. Un noyau d'uranium 238 qui capture un neutron donne un noyau d'uranium 239, noyau radioactif, qui se désintègre en un noyau de plutonium 239.

b. Noyaux lourds très radiotoxiques créés par captures neutroniques dans les réacteurs.