



Fondation de la Maison de la Chimie

Chimie et Énergies Nouvelles



Mercredi

10 Février 2021

RECUEIL DES RÉSUMÉS

Fondation de la Maison de la Chimie
Maison de la Chimie
28 bis rue Saint-Dominique 75007 Paris

Chimie et Énergies Nouvelles



Mercredi

10 Février 2021

Conception graphique : El Defente Images - © photok - © H&J - © nansport - © nulp - © Cavan Images - © M&W / Adobe Stock - © iStockphoto / iStock - le 10/12/20

SOMMAIRE

Pages

Objectifs / Comité d'Organisation

03

Programme

04

Résumés des Conférences Plénières

Jean Eudes MONCOMBLE

06

Un an après la crise, quel paysage de l'énergie en 2050 ?

Benjamin TINCQ

07

Des CleanTech aux Climate Tech : vers une énergie net-zéro carbone.

Résumés des Conférences de la Table Ronde

Jean-Pierre CLAMADIEU

08

Chimie et Energie, acteurs de la lutte contre le changement climatique.

Olivier GREINER

09

Transition énergétique : comment la Recherche de Total trace la route (vers la Neutralité Carbone).

Jean-Philippe LAURENT

10

La R&D au service de la décarbonation de l'industrie.

Jean-Paul MOULIN

11

Les matériaux de la transition énergétique : les attentes et les défis.

Laurent CARME

12

Trajectoire technologique et industrielle : accélérer le passage à l'échelle pour améliorer la compétitivité de l'hydrogène zéro-carbone.



Résumés des Conférences de l'Après-Midi

(par ordre du programme)

Pages

SESSION I - Innovation et énergie ; progrès des énergies non carbonées.

Christophe BEHAR

13

*Le nucléaire de fission dans le futur. Complémentarité avec les renouvelables.***Bernard BIGOT**

14

*Quelles échéances vers la disponibilité de l'option « fusion de l'hydrogène » ?***Catherine RIVIERE**

15

Quelques apports de la R&D à l'accélération de la transition énergétique.

SESSION II - Transports et vecteurs énergétiques.

Jean-Claude BERNIER

16

*Nouveaux véhicules électriques et thermiques : quel impact sur l'environnement ?***Xavier VIGOR**

17

*Vision de l'hydrogène pour une énergie décarbonée.***Dominique LARCHER**

18

*Avancées et perspectives dans le domaine du stockage électrochimique de l'énergie (batteries).***Christine ROUSSELLE**

19

L'ammoniac, un des futurs e-fuel pour une production d'énergie à zéro empreinte carbone.

Conférence de Clôture

Grégory de TEMMERMAN

21

Vitesse de déploiement et acceptabilité des nouvelles technologies dans le domaine des énergies.

Présentation

Il y a urgence que le système mondial de production, distribution et consommation d'énergie soit engagé sur une trajectoire dont les effets seront déterminants pour l'avenir de la planète et celui de ses habitants en limitant ses effets sur le climat : le sujet est plus que jamais au cœur des préoccupations de la Société, notamment de la recherche et de l'industrie. Malgré l'engagement politique des États et la progression des énergies dites « vertes », notamment du solaire électrique ou thermique et de l'éolien offshore pour lesquels on s'attend à des facteurs de croissance record dans les prochaines décennies, toutes les **énergies flexibles, propres, abondantes, décarbonnées** seront nécessaires pour faire face aux besoins toujours croissants de la demande en énergie. Pour cela il est urgent d'innover, mais aussi d'optimiser les technologies existantes en lien avec l'objectif d'un **développement durable** garantissant l'accès de tous à des **services énergétiques fiables à des coûts abordables**.

Nous avons souhaité dans ce 25e colloque « Chimie et... » faire un point scientifique objectif sur une évolution possible du « bouquet énergétique diversifié » en cours de développement. Les conférenciers ont été choisis parmi les experts les plus qualifiés dans les différents domaines concernés, la recherche, l'industrie, la politique et l'économie.

Comité d'Organisation

Présidente

- **Danièle OLIVIER** - Vice-Présidente de la Fondation internationale de la Maison de la Chimie

Vice-Président

- **Paul RIGNY** - Conseiller Scientifique du Président - Fondation internationale de la Maison de la Chimie

Comité Scientifique

- **Jacques AMOUROUX** - ENSCP/PSL
- **Bernard BIGOT** - Président de la Fondation internationale de la Maison de la Chimie
- **Jean-Claude BERNIER** - Université de Strasbourg
- **Gregory de TEMMERMAN** - Zenon Research
- **Edouard FREUND** - Fondation internationale de la Maison de la Chimie
- **Philippe GOEBEL** - Vice-Président - Fondation internationale de la Maison de la Chimie

Relations Publiques

- **Margaret VARKADOS-LEMARECHAL** - Fondation internationale de la Maison de la Chimie

Comité Logistique

- **Pascale BRIDOU BUFFET** - Fondation internationale de la Maison de la Chimie
- **Sophie TATIN** - Fondation internationale de la Maison de la Chimie



Programme

09h00 Introduction

Bernard BIGOT - Président de la Fondation internationale de la Maison de la Chimie

SESSION DU MATIN

Conférences Plénières d'ouverture

09h10 Un an après la crise, quel paysage de l'énergie en 2050 ?

Jean Eudes MONCOMBLE - Secrétaire Général du Conseil Français de l'Énergie,
Président du Comité Énergie de la FMOI (Fédération Mondiale des Organisations d'Ingénieurs)

09h40 Des CleanTech aux Climate Tech : vers une énergie net-zéro carbone.

Benjamin TINCQ - Co-Fondateur et Président de Good Tech Lab, Fondateur de Solve[Climate]

10h10 Débats

Table Ronde

Politique de R&D des industriels dans les prochaines décennies ; apports attendus de la chimie.

Animateur : **Philippe GOEBEL**, Vice-Président de la Fondation internationale de la Maison de la Chimie

10h40 Chimie et Énergie, acteurs de la lutte contre le changement climatique.

Jean-Pierre CLAMADIEU - Président du Conseil d'Administration, ENGIE

11h00 Transition énergétique : comment la Recherche de Total trace la route (vers la Neutralité Carbone).

Olivier GREINER - Directeur Recherche et Développement Raffinage Chimie, Total

11h20 La R&D au service de la décarbonation de l'industrie.

Jean-Philippe LAURENT - Directeur Stratégie et Développement, pôle Clients, Services et Territoires, EDF

11h40 Les matériaux de la transition énergétique : les attentes et les défis.

Jean-Paul MOULIN - Directeur Scientifique Matériaux, Arkema

12h00 Trajectoire technologique et industrielle : accélérer le passage à l'échelle pour améliorer la compétitivité de l'hydrogène zéro-carbone.

Laurent CARME - Directeur Général, McPhy

12h20 Débats



SESSIONS PARALLÈLES DE L'APRÈS-MIDI

**SESSION I - Innovation et énergie ;
progrès des énergies non carbonées.**Animateur : **Paul RIGNY**

Fondation internationale de la Maison de la Chimie

- 14h00 **Le nucléaire dans le futur et la transition énergétique / Complémentarité.**
Christophe BEHAR - Directeur énergie groupe Fayat, Président de la supply chain nucléaire Française
- 14h45 **Quelles échéances vers la disponibilité de l'option « fusion de l'hydrogène » ?**
Bernard BIGOT - Directeur Général de l'organisation ITER
Président de la Fondation internationale de la Maison de la Chimie
- 15h30 **Quelques apports de la R&D à l'accélération de la transition énergétique.**
Catherine RIVIÈRE - Directrice Générale Adjointe, IFP Energies nouvelles

SESSION II - Transports et vecteurs énergétiques.Animateur : **Edouard FREUND**

Fondation internationale de la Maison de la Chimie

- 14h00 **Nouveaux véhicules électriques et thermiques : quel impact sur l'environnement ?**
Jean-Claude BERNIER - Université de Strasbourg
- 14h45 **Vision de l'hydrogène pour une énergie décarbonée.**
Xavier VIGOR - Vice-Président Technologies et Direction industrielle, World Business Line H2, Air Liquide
Avancées et perspectives dans le domaine du stockage électrochimique de l'énergie (batteries).
Dominique LARCHER - Professeur de Chimie à l'Université de Picardie Jules Verne (Amiens), Laboratoire de Réactivité et Chimie des Solides (CNRS UMR 7314)
- 15h30 **L'ammoniac, un des futurs e-fuel pour une production d'énergie à zéro empreinte carbone.**
Christine ROUSSELLE - Professeur Université d'Orléans

SESSION DE CLÔTURE

- 16h25 **Conférence Plénière de Clôture**
Animateurs :
Bernard BIGOT - Président de la Fondation internationale de la Maison de la Chimie
Danièle OLIVIER - Vice-Présidente de la Fondation internationale de la Maison de la Chimie
Vitesse de déploiement et acceptabilité des nouvelles technologies dans le domaine des énergies.
Grégory de TEMMERMAN - Directeur Général, Zenon Research
- 17h10 **Conclusions**
Bernard BIGOT - Président de la Fondation internationale de la Maison de la Chimie



Conférences Plénières d'Ouverture*(par ordre du programme)***Un an après la crise, quel paysage de l'énergie en 2050 ?****Jean Eudes MONCOMBLE***Conseil Français de l'Énergie*

Esquisser le paysage énergétique est un exercice indispensable pour élaborer des politiques énergétiques ou des stratégies d'entreprise. La construction de scénarios est souvent utilisée : ils sont souvent construits sur la base de tendances – démographiques, économiques, énergétiques, technologiques, sociétales – qui n'intègrent qu'assez exceptionnellement des ruptures.

L'année 2020 est une année assez extraordinaire qui semble avoir été marquée par de nombreuses ruptures liées au contexte sanitaire de la Covid-19. Même s'il sera nécessaire de laisser passer les années pour vérifier la pérennité de certaines de ces ruptures qui sont pour beaucoup marquées par de fortes incertitudes, on peut supposer des modifications assez fortes dans la vision que l'on peut avoir du futur de l'énergie.

Quels messages peut-on tirer de l'année 2020 quant à la vision du paysage énergétique de long terme ? Comment caractériser les systèmes énergétiques vers lesquels nos sociétés aspirent ? Que peut-on penser des modifications de comportements des acteurs ? Quels cheminements cohérents sont envisageables et souhaitables et quelles politiques les favoriseront ?

Mots Clés : prospective, Disruption, Politique énergétique, Covid-19.



Des CleanTech aux Climate Tech : vers une énergie net-zéro carbone.

Benjamin TINCQ

Co-Fondateur et Président de Good Tech Lab, Fondateur de Solve[Climate]

Sous forme d'électricité, de chaleur ou de mouvement, notre consommation d'énergie génère les trois-quarts des émissions mondiales de gaz à effet de serre (1). Atteindre les objectifs de l'Accord de Paris nécessite une transition énergétique dont l'ampleur et la vitesse n'ont aucun précédent historique, et ce dans un contexte de forte croissance de la demande globale, ainsi qu'un enjeu d'accès pour tous à l'énergie.

Face à cet enjeu du siècle, le progrès technologique et l'entrepreneuriat ont un rôle décisif à jouer. Selon l'Agence Internationale de l'Energie (2020), 35% des réductions d'émissions nécessaires proviendront de technologies encore à l'état de prototype, et 40% d'innovations n'ayant pas encore largement pénétré leur marché (2).

Bonne nouvelle : après une euphorie dans les années 2000 puis passage à vide, les *cleantech* semblent faire leur grand retour sous une nouvelle bannière : *climate tech*. Alors que l'urgence climatique s'impose comme un thème structurant de la décennie, une nouvelle génération d'entreprises technologiques apporte des solutions offrant de nouvelles prises face à ce défi - en particulier dans l'énergie.

Stockage de longue durée des renouvelables, nucléaire de nouvelle génération, hydrogène, carburants de synthèse, capture de carbone, chaleur industrielle, géothermie, véhicules efficacité énergétique ou encore extraction durable des métaux de la transition : peu de domaines échappent aux *climate tech* de l'énergie.

Entrepreneurs à mission, investisseurs, grands groupes, gouvernements, société civile : quels sont les facteurs clés de développement des *climate tech* ? Peut-on s'attendre à un mouvement pérenne, ou à la désillusion des « *clean tech 1.0* » ? Comment l'Europe peut-elle se positionner face aux Etats-Unis et à la Chine ?

Références :

(1) GIEC, AR5, 2014

(2) International Energy Agency, *Clean Energy Innovation, Energy Technology Perspectives* — juillet 2020

Mots Clés : Énergie, Innovation, Startup, Climate tech, Cleantech.



Table ronde animée par Bernard BIGOT

*Politique de R&D des industriels dans les prochaines décennies ;
apports attendus de la chimie.*

(par ordre du programme)

Chimie et énergie, acteurs de la lutte contre le changement climatique.

Jean-Pierre CLAMADIEU

Président du Conseil d'Administration, ENGIE

Le développement industriel qu'a connu l'économie mondiale au cours du 19^{ème}, puis du 20^{ème} siècle, s'est appuyé sur les transformations technologiques majeurs de deux secteurs à la base de toutes les activités de production : la chimie et l'énergie. Ces deux disciplines sont intimement liées : de l'électrolyse à la radioactivité en passant par les lois de la thermodynamique. S'appuyant sur leurs applications, le secteur énergétique a pu densifier et diversifier ses capacités de génération, tandis que l'industrie chimique trouvait les moyens nécessaires pour faire face à l'intensité énergétique de sa production.

Pleinement associées au progrès économique et social jusque dans les années 1980, les industries énergétiques et chimiques ont été confrontées bien avant à d'autres aux enjeux environnementaux et climatiques et ont ainsi intégré l'impact de leurs activités en termes d'émissions de gaz à effet de serre dans leurs choix stratégiques et opérationnels. Leur transformation s'est accélérée au cours de la dernière décennie, avec le développement des énergies renouvelables, notamment photovoltaïques et éoliens, permettant de verdir les consommations, tout en travaillant sur l'efficacité énergétique des processus industriels.

Aujourd'hui, les énergéticiens et les chimistes, qui ont su prendre rapidement ce virage, disposent de solides avantages compétitifs pour répondre aux besoins des autres filières industrielles qui engagent leur transformation, parmi lesquelles l'aéronautique, le transport, l'électronique, l'agriculture, ... Les opportunités de collaboration demeurent nombreuses, la plus emblématique étant sans nul doute l'hydrogène vert qui offre des perspectives d'application variées en usage direct pour l'industrie chimique, de vecteur énergétique dans les réseaux de gaz ou encore comme moyen de stockage massif d'énergie.

Chimie et énergie partagent une forte culture de la recherche, de l'innovation, de la performance et de la sécurité. Ils constituent les bases du monde résilient qu'il nous faut construire d'ici 2030 pour maintenir l'équilibre de notre écosystème et préserver la biodiversité sur notre planète.

Mots Clés : Transition énergétique, Technologie, Énergies renouvelables.



Transition Énergétique : comment la Recherche de Total trace la route (vers la Neutralité Carbone).

Olivier GREINER

Directeur Recherche et Développement Raffinage Chimie, Total

Le Green Deal Européen et les politiques équivalentes adoptées par un nombre croissant d'économies mondiales, dans le but d'atteindre l'objectif de maintenir l'augmentation de température de la planète en-dessous des deux degrés à la fin du siècle, se traduit pour la plupart d'entre elles par un objectif de neutralité carbone.

Total a annoncé le 5 mai 2020 son ambition d'atteindre la neutralité carbone en 2050 en phase avec la société, pour l'ensemble de ses activités mondiales, depuis sa production jusqu'à l'utilisation par ses clients de ses produits énergétiques vendus.

Cette ambition, loin d'être un vœu sans lendemain, représente un défi majeur pour l'ensemble des composantes du Groupe, et mobilise désormais toutes les énergies des équipes.

En particulier, la Recherche, forte de plus de 4000 personnes et d'un budget annuel d'1 milliard de dollars, a un rôle déterminant à jouer pour tracer la voie en préparant les technologies qui mèneront le Groupe à la neutralité carbone.

Total consacre aujourd'hui 10% de ses budgets de R&D au thème du CCUS (Capture, Transport, Séquestration et Conversion du CO₂), et 40% aux énergies bas carbone. Des thèmes tels que le recyclage, les produits biosourcés, la décarbonation du gaz, la production d'électricité renouvelable solaire ou éolienne, la mobilité électrique, ... occupent une place de plus en plus importante dans nos portefeuilles de programmes.

Cette transition énergétique s'accompagne d'un défi spécifique qui concerne la « transition des compétences ». Comment tirer parti des importantes compétences techniques et scientifiques présentes dans le Groupe pour accélérer sa transformation vers tous ces nouveaux métiers ? Une nouvelle organisation est en gestation pour répondre à ce défi.

Mots Clés : Transition énergétique, Neutralité Carbone, CCUS, Recyclage, Energie Renouvelable.



La R&D au service de la décarbonation de l'industrie.

Jean-Philippe LAURENT

Directeur Stratégie et Développement, Pole Clients, Services et Territoires, EDF

La PPE et la SNBC donnent le cadre global de la trajectoire française en ciblant une neutralité carbone en 2050. Pour l'industrie, la DGEC fixe un mix énergétique à 80% électrique. La SNBC précise la stratégie de fléchage dans l'industrie : remplacer le gaz par le biogaz, électrifier la chaleur basse température, développer l'hydrogène pour le transport.

Le Groupe EDF est un acteur légitime et engagé. Sa raison d'être illustre cet engagement : « Construire un avenir énergétique neutre en CO₂, conciliant préservation de la planète, bien-être et développement, grâce à l'électricité et à des solutions et services innovants ». Depuis plus de 20 ans, le Groupe EDF déploie des services d'efficacité énergétique et vient d'obtenir la note « A » pour la quatrième année par la SBTi. Très concrètement, son engagement se traduit notamment dans quatre plans : le Plan solaire (30 GW), le plan stockage (10 GW), le plan mobilité et le plan hydrogène particulièrement axés sur les industriels.

S'appuyant sur les travaux de sa R&D, active depuis longtemps dans le domaine des utilités et procédés industriels, et des énergies renouvelables, le Groupe EDF a choisi de développer quatre voies pour la décarbonation de l'industrie :

- (1) l'efficacité énergétique ;
- (2) la récupération de chaleur et l'intégration énergétique de pompes à chaleur haute température ;
- (3) la substitution d'énergie fossile par l'électrification des procédés comme par exemple la compression mécanique de vapeur ;
- (4) le développement des ENR, quelles soient photovoltaïque, biomasse ou CSR

Par ailleurs, le Groupe EDF travaille également à réduire l'empreinte carbone des intrants/matières premières des procédés industriels issus du pétrole ou du gaz, en proposant par exemple de l'hydrogène décarboné.

L'ensemble de ces actions sera présenté et illustré par des exemples issus de l'industrie chimique.

Mots Clés : Neutralité carbone, Pompe à chaleur, Biomasse, CSR, Hydrogène décarboné.



Les matériaux de la transition énergétique : les attentes et les défis.

Jean-Paul MOULIN

Directeur Scientifique Matériaux, Arkema

La transition énergétique vers une économie neutre en carbone est en marche. Cette transition va transformer radicalement les modes de production, de distribution, de stockage et de consommation de l'énergie. Cela nécessitera une production d'électricité peu émettrice de CO₂, une efficacité énergétique accrue et une décarbonation des transports, des bâtiments et de l'industrie. Les énergies renouvelables éoliennes et photovoltaïques, les batteries et l'hydrogène sont appelés à jouer un rôle de premier plan.

L'Europe propose ainsi une stratégie portant à 60GW la puissance éolienne offshore en 2030 contre 12GW aujourd'hui et 300GW en 2050¹. L'initiative commune « Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking » (FCH JU) a publié sa feuille de route en Janvier 2019 visant à produire 3,7 millions de voitures particulières à hydrogène, 500 000 utilitaires légers et 45 000 poids lourds et bus hydrogène d'ici à 2030².

Ces objectifs ambitieux se traduisent par des attentes élevées en termes de performances techniques, économiques et de capacités d'industrialisation pour les équipements de production, de transport, de stockage et d'utilisation de l'énergie et donc pour les matériaux mis en œuvre dans ces équipements.

Ainsi, les matériaux composites doivent permettre de construire des pâles de plus de 100 mètres pour l'éolien « offshore », des réservoirs stockant de l'hydrogène à 700 bars dans des conditions économiques (part matière, temps de cycles...) permettant de diviser par 3 les coûts des réservoirs. Les volumes de production escomptés avant 2030 demandent de disposer de lignes industrielles de production opérationnelles dès 2025. Pour la mobilité, il est aussi primordial de réduire la masse des équipements (batteries, réservoirs) et donc de faire appel à des composites fibres de carbone en optimisant leur usage. Enfin, le recyclage en fin de vie de ces matériaux doit être démontré et intégré dans des analyses de cycle de vie permettant de bien peser tous les impacts³ dans une vraie approche économie circulaire.

Pour les matériaux, les défis à relever sont nombreux et multifactoriels. Nous verrons en quoi les thermoplastiques de hautes performances peuvent d'ores et déjà répondre à certains de ces défis et les progrès restant à accomplir pour être au rendez-vous de la transition énergétique.

Références :

¹ European Commission, *An EU strategy to harness the potential of offshore renewable energy for a climate neutral future*, 19.11.2020

² FCH 2 JU, *Hydrogen Roadmap Europe: a sustainable pathway for the European energy transition*, fch.europea.eu, January 2019

³ ADEME, Luc Bondineau. *Prestataires : SPHERA, Cécile Querleu, Alexander Stoffregen, ; GINGKO 21, Hélène Teulon, Analyse du Cycle de Vie relative à l'Hydrogène – Production d'Hydrogène et Usage en Mobilité Légère*, Septembre 2020

Mots Clés : Thermoplastiques, Composites, Hydrogène, Batterie, Éolien.



Trajectoire technologique et industrielle : accélérer le passage à l'échelle pour améliorer la compétitivité de l'hydrogène zéro-carbone.

Laurent CARME

Directeur Général McPhy

L'hydrogène vert s'impose dans toutes les stratégies gouvernementales et plans de relances internationaux comme une énergie alternative idéale pour décarboner à grande échelle les secteurs de l'industrie, la mobilité et l'énergie. Les perspectives d'usages et de marchés sont colossales, avec une accélération très nette prévue jusqu'en 2050 (1).

Aujourd'hui massivement employé dans des procédés industriels, l'hydrogène est majoritairement utilisé sous sa forme « grise », c'est-à-dire produit à partir d'énergies fossiles. Cet hydrogène dit « gris » est responsable d'émissions de CO₂ massives, équivalente aux émissions du fret aérien (2). Dans un contexte de révolution énergétique, l'hydrogène « vert », produit par électrolyse à partir d'électricité zéro- ou bas-carbone, s'impose donc comme l'une des solutions les plus performantes pour décarboner, à grande échelle, les pans de notre économie (3).

Le « passage à l'échelle », à la fois technologique et industriel, est une condition sine qua none pour optimiser la compétitivité (4) de l'hydrogène vert et lui permettre de pleinement jouer son rôle dans la révolution énergétique, économique et sociétale en cours.

Spécialiste des équipements de production et distribution d'hydrogène, McPhy contribue au déploiement mondial de l'hydrogène zéro-carbone (ou « hydrogène vert ») comme solution pour la transition énergétique. Sa stratégie de développement en 4 axes (technologies – références – compétitivité – talents) vise à déployer une trajectoire technologique et industrielle permettant d'accélérer le passage à l'échelle de la société, au rythme du marché, pour participer à l'émergence d'écosystèmes hydrogène verts, sûrs et compétitifs.

Fort de sa gamme complète dédiée aux secteurs de l'industrie, la mobilité et l'énergie, McPhy offre ainsi à ses clients des solutions clés en main adaptées à leurs applications d'approvisionnement en matière première industrielle, de recharge de véhicules électriques à pile à combustible ou encore de stockage et valorisation des surplus d'électricité d'origine renouvelable. Concepteur, fabricant et intégrateur d'équipements hydrogène depuis 2008, McPhy dispose de trois centres de développement, ingénierie et production en Europe (France, Italie, Allemagne). Ses filiales à l'international assurent une large couverture commerciale à ses solutions hydrogène innovantes.

Références :

(1) IEA 2019, Deloitte

(2) IEA 2019

(3) IEA 2019, The American Society of Mechanical Engineers

(4) Hydrogen Council cost roadmap, 2020

Mots Clés : Hydrogène, Décarbonation, Zéro-carbone, Transition énergétique.



Résumés SESSION I

Innovation et énergie ; progrès des énergies non carbonées.

(par ordre du programme)

Christophe BEHAR

Directeur énergie groupe Fayat,

Président des fournisseurs de l'industrie nucléaire Française

1- Le nucléaire restera dans le futur un moyen de production d'énergie électrique important :

- La population mondiale va continuer à croître et aspirera à un meilleur niveau de vie en consommant plus d'énergie,
- Parmi les moyens de production d'électricité, le nucléaire est dans le peloton de tête en termes de CO2 produit par KWh et c'est, par ailleurs, un moyen de production pilotable,
- Les ressources en uranium sont limitées, comme celles de charbon, de pétrole et de gaz mais, selon la technologie de réacteur retenue, on peut l'économiser très fortement, en particulier avec des réacteurs à neutrons rapides (RNR).

2- Un mix énergétique souhaitable regroupant renouvelable et nucléaire est possible (« Ne pas mettre tous ses œufs dans le même panier ») :

- Il est nécessaire d'adapter le fonctionnement des réacteurs à l'intermittence des renouvelables ce qui est déjà le cas,
- Il faut aussi regarder comment les utiliser au mieux, par exemple pour produire de la chaleur ou de l'hydrogène par électrolyse.

3- Quelle technologie de réacteur au-delà des réacteurs à eau légère (REL) :

Le contrat de filière avec l'Etat prévoit la mise en place de quelques RNR avant la fin de ce siècle. Trois raisons à cela :

- Cette technologie préserve la ressource en uranium naturel,
- Elle permet de recycler totalement toutes les matières dans le cadre d'une économie circulaire complète,
- Elle simplifie la gestion des déchets de très haute radioactivité à vie longue.

Mots Clés : Réacteurs à eau légère (REL), Réacteurs à neutrons rapides (RNR), Renouvelables.



Quelles échéances vers la disponibilité de l'option « fusion de l'hydrogène » ?

Bernard BIGOT

*Directeur Général de l'organisation ITER
Président de la Fondation de la Maison de la Chimie*

C'est au début du 20^{ème} siècle que, indépendamment l'un de l'autre, Jean Perrin en France (1919) et Arthur Eddington en Angleterre (1920) proposèrent pour la première fois l'hypothèse que la source d'énergie du Soleil et des étoiles pourrait provenir de la fusion des noyaux d'hydrogène pour donner de l'hélium. Perrin en particulier examine en 1921 cette possibilité en calculant la durée de vie du Soleil qu'une telle hypothèse permettrait. En 1934, Ernest Rutherford réalise la première expérience de fusion d'un isotope de l'hydrogène, le deutérium, en laboratoire.

C'est dans les années 1940 qu'il est proposé de remplacer sur terre les gigantesques forces gravitationnelles à l'œuvre dans les étoiles pour permettre la fusion de l'hydrogène par des forces magnétiques d'une capacité équivalente. Un premier brevet est déposé en ce sens en 1946 par des physiciens britanniques sous forme d'un réacteur formé d'une chambre à vide torique entourée d'une cage magnétique. Les russes réalisent dès 1950 la première installation de recherche de ce type qu'ils intitulent Tokamak. Il produit rapidement ses premières réactions de fusion. Cette réalisation suscita un intérêt considérable dans la mesure où ce mode de production massive d'énergie présenterait des avantages majeurs par rapport aux modes existants. C'est dans ces conditions que de nombreux pays dans le monde construisirent des Tokamaks de taille et performante croissante. La physique, pour une production nette d'énergie, impose cependant une taille de l'installation de démonstration qui rend sa construction en un temps raisonnable incompatible avec les ressources industrielles et humaines d'un seul pays, C'est dans ces conditions qu'en 1985 les Etats Unis d'Amérique et l'Union Soviétique lancèrent l'idée d'un grand programme international de recherche afin de construire le dit équipement, ITER, et ensuite d'en exploiter les potentialités pour démontrer la faisabilité d'usage de l'énergie de fusion. C'est ce projet qui est en cours de réalisation sur le site de Cadarache à Saint Paul lez Durance en Provence depuis 2007, sur la base d'un accord signé entre sept grands partenaires (Chine, Corée, Europe, Inde, Japon, Russie, Etats Unis), représentant 35 pays, et qui les engagent à travailler ensemble avec cet objectif commun de démonstration pour un minimum de 35 ans avec possibilité d'extension jusqu'en 2052. La conférence permettra de présenter l'état actuel d'avancement du projet ITER, son calendrier de réalisation avec un premier plasma fin 2025, les premières expériences de physique fin 2028, la capacité de fusion à pleine puissance fin 2035 et, au vu des résultats des recherches en 2040, la perspective d'une première installation industrielle connectée au réseau en 2050-2060. La probabilité de tenue d'un tel scénario sera débattue.

Références : Alain Becoulet, L'énergie de fusion, Odile Jacob, 2019
Jason Parisi, Justin Balin, The future of fusion energy, World Scientific, 2019

Mots Clés : ITER, Fusion de l'hydrogène, Tokamak.



Quelques apports de la R&D à l'accélération de la transition énergétique.

Catherine RIVIÈRE

Directrice Générale Adjointe, IFP Energies nouvelles

La transition énergétique vers une économie bas carbone est désormais engagée : la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique mondial ne cesse de croître ; les investissements mondiaux dans les technologies vertes se poursuivent malgré la crise sanitaire ; les coûts des technologies solaires et éoliennes baissent de manière continue ; l'électrification croissante de l'énergie et le déploiement des véhicules électriques sont en cours...

Cependant, la transformation globale du système énergétique actuel vers un système neutre en carbone reste un défi de taille qui prendra du temps et nécessitera des investissements conséquents, des politiques publiques incitatives, une recherche mobilisée mais aussi de nouvelles innovations technologiques. Mais le temps est compté et les émissions de gaz à effet de serre ne baissent pas suffisamment vite. Il est urgent d'accélérer les efforts pour déployer largement les technologies bas carbone afin d'atteindre les objectifs climatiques ambitieux fixés par l'accord de Paris en 2015.

La recherche et l'innovation sont des leviers clés pour à la fois diminuer les coûts des technologies, améliorer leur efficacité et déclencher les ruptures technologiques qui permettront d'atteindre plus rapidement la neutralité carbone. Les équipes d'IFP Energies nouvelles, par adjacence de compétence, travaillent à créer les innovations de la transition énergétique. La spécificité de l'Institut est également d'associer très tôt dans sa démarche la valorisation industrielle avec la recherche, ce qui permet une arrivée rapide des technologies sur le marché.

La chimie est une compétence historique forte d'IFPEN, la chimie catalytique étant au cœur des procédés de raffinage et de pétrochimie. Mais cette discipline, bien souvent associée à une autre, électro-chimie, physico-chimie, photo-chimie, bio-chimie... apparaît aussi comme une compétence clé dans le développement de technologies bas carbone. L'« hybridation » entre disciplines est une des caractéristiques de la recherche actuelle et c'est souvent à l'interface entre plusieurs disciplines, comme par exemple entre digital et chimie ou entre biologie et chimie qu'émergent les innovations.

Quelques exemples seront donnés concernant la transformation de la biomasse en carburant pour décarboner le secteur des transports encore très dépendant du pétrole. L'économie circulaire et les procédés chimiques de recyclage des plastiques, présentant un impact important sur l'économie des ressources seront également présentés. Enfin, d'autres enjeux comme l'hydrogène, le stockage d'énergie, le captage de CO₂ seront abordés.

Mots Clés : Énergies renouvelables, Technologies bas carbone, Biomasse, Recyclage.



Résumés SESSION II

Transports et vecteurs énergétiques.

(par ordre du programme)

**Nouveaux véhicules électriques et thermiques :
quel impact sur l'environnement ?****Jean-Claude BERNIER***Professeur émérite de l'Université de Strasbourg*

Après un rappel de la dépense énergétique et des émissions de CO₂ occasionnées par les transports, et les différents moyens de déplacement, on cible préférentiellement les véhicules automobiles et tout d'abord ceux pourvus d'un moteur thermique. Sont décrits les divers moyens que la chimie et la métallurgie ont développé pour diminuer la consommation en carburant et la pollution avec un réel progrès dans l'atmosphère des grandes villes en un peu plus de 10 ans. Cependant la demande sociétale d'assainir l'atmosphère des villes et d'économiser les ressources fossiles conduit à développer des moyens de transport alternatifs. L'Europe engage à marche forcée les constructeurs à fabriquer de plus en plus de modèles électriques encouragé par les États distribuant des primes et certains d'entre eux souhaitant l'arrêt des véhicules thermiques d'ici 2040 voire 2030. Les progrès de l'électrochimie et l'avènement des batteries ion/lithium industrielles entraînent la mise sur le marché de nouveaux véhicules électriques pour particuliers dans le monde entier. On examinera leurs « qualités écologiques » en fonction des « mix » électriques nationaux et des différents Kwh plus ou moins décarbonnés. Avec le plan de relance viennent aussi se greffer les véhicules à hydrogène qui font fonctionner leurs moteurs électriques grâce à la pile à hydrogène bien connue des physico chimistes et électrochimistes, devenue maintenant industrielle. On examinera à la lumière de la thermodynamique et de la valeur équivalent - CO₂ de l'hydrogène plus ou moins « vert » l'impact environnemental de ces nouveaux véhicules. En conclusion on discutera du développement économique de ces nouveaux véhicules, leur influence sur le transport ferroviaire, poids lourds et automobiles particulières, leurs avantages et inconvénients et les conséquences sociétales à moyen terme.

Vision de l'hydrogène pour une énergie décarbonée.

Xavier VIGOR

Vice-Président Technologies et Direction industrielle, World Business Line H2, Air Liquide

L'année 2020 a vu l'émergence de la filière hydrogène comme vecteur d'énergie décarbonée, notamment à travers les annonces de nombreux états (notamment Europe, Allemagne, France, Espagne... en compléments des annonces plus anciennes pour la Chine, la Corée, le Japon).

L'exposé propose d'aborder les points suivants :

- Les différents usages envisagés pour l'hydrogène
- Comment produire de l'hydrogène bas carbone, les différentes filières et leur empreinte CO2
- Comment stocker, transporter et distribuer l'hydrogène, à quel coût ?
- Les défis à relever : la baisse des coûts et la croissance des volumes d'ici 2030, les enjeux réglementaires et sécurité.
- La position de la France

Mots Clés : Hydrogène, Énergie, Production, Distribution, Coûts.



Avancées et perspectives dans le domaine du stockage électrochimique de l'énergie (batteries).

Dominique LARCHER^{abc} et Mathieu MORCRETTE^{abc}

^a Laboratoire de Réactivité et Chimie des Solides (LRCS), UMR CNRS 7314, Université de Picardie Jules Verne

^b Institut de Chimie de Picardie (ICP), FR CNRS 3085

^c Réseau sur le Stockage Electrochimique de l'Energie (RS2E), FR CNRS 3459

Le stockage de l'énergie est l'un des éléments clefs pour une évolution de notre environnement énergétique vers une diminution de notre dépendance aux sources d'énergies fossiles, les autres étant i) la collecte/concentration des énergies dites renouvelables, ii) la conception d'un réseau multi-échelles de connexion entre la source et le consommateur. Dans ce contexte, il est clair que le stockage électrochimique est un acteur important, tant pour les applications stationnaires que pour les applications mobiles. Ces deux modes d'utilisation possibles des batteries impliquent des exigences et des critères de sélection parfois très différents, qui guident et justifient les voies d'amélioration actuellement explorées.

Parmi les points faibles présentement identifiés pour les batteries de dernière génération (ex : Li-ion), on peut citer 1) leur forte limitation cinétique qui, bien qu'intrinsèque à leur mode intime de fonctionnement, nécessite d'être fortement réduite, 2) les problèmes de sécurité liés à l'utilisation d'électrolytes liquides organiques dont les solvants sont volatils et inflammables.

Dans cet exposé, nous illustrerons donc l'évolution des recherches dans ce domaine en montrant comment ces deux aspects sont actuellement abordés grâce, d'une part, à la mise au point d'accumulateurs Na-ion capables d'être rechargés très rapidement, et, d'autre part, à la synthèse et étude d'électrolytes solides inorganiques non inflammables. Ces développements ont révélé des problèmes inattendus ainsi que des limitations pour le moment non encore résolues, mais ils constituent également et avant tout la démonstration du fort potentiel d'innovation du domaine et de l'étendue de sa marge de progression et d'adaptabilité, que nous illustrerons finalement par quelques prospectives.

Mots Clés : Batteries, Électrolyte, Na-ion, Énergie, Puissance.



L'ammoniac, un des futurs e-fuel pour une production d'énergie à zéro empreinte carbone.

Christine MOUNAIM-ROUSSELLE

Laboratoire PRISME, Université d'Orléans

Second composé chimique le plus fabriqué au monde (en termes de volume annuel), facile à produire localement, capable de stocker et transporter aisément de l'énergie, l'ammoniac, de formule chimique NH_3 , possède de nombreux avantages, d'où le rôle qu'il aura dans la transition énergétique de demain, en particulier dès qu'il sera produit à partir de l'excès d'électricité issue des ressources renouvelables.

L'ammoniac, un des hydrogènes azotés, **est beaucoup moins coûteux à stocker sur une longue période que l'hydrogène** (0,5 \$/kg- H_2 pour l'ammoniac contre 15 \$/kg- H_2 pour l'hydrogène sur une période de 6 mois), **et au moins trois fois moins coûteux à transporter en mer ou sur terre**. Une fois produit et transporté, l'utilisation de NH_3 peut être envisagée selon 2 solutions : soit comme un vecteur de l'hydrogène, en le décomposant en H_2 , soit comme combustible dans les systèmes énergétiques industriels stationnaires ou instationnaires (brûleurs industriels, générateur d'électricité ou le transport) ou même dans une pile à combustible. Son avantage est considérable : la combustion de NH_3 ne génère, comme pour H_2 , que de l'eau et de l'azote : **aucune émission de molécules carbonées (CO_2 , CO), ni de particules de suies**.

L'idée d'utiliser l'ammoniac comme carburant n'est pas nouvelle, puisque la Belgique a fait rouler un parc d'autobus pendant la Seconde Guerre mondiale, fonctionnant au gazogène et au NH_3 . Plusieurs autres études réalisées au milieu des années 60-70 ont porté sur l'évaluation du potentiel de l'ammoniac comme carburant dans les moteurs à combustion interne [1,2,3]. En 2019, l'IMO (International Maritime Office) après avoir clarifié sa feuille de route stratégique pour entamer la décarbonisation de ce secteur, annonce clairement que **l'ammoniac fera partie de l'éventail des solutions explorées**. Le secteur aérien commence lui aussi à envisager partiellement cette solution. Toutefois, aucune solution n'est encore sur le marché car l'utilisation de cette molécule pose encore de gros problèmes non seulement d'approvisionnement et de sécurité mais aussi en raison de ses caractéristiques physiques par rapport aux carburants classiques. Bien que plus dense en énergie que l'hydrogène, l'ammoniac occupe toujours beaucoup plus d'espace que le diesel pour la même quantité de propulsion, comme indiqué dans [1]. Dans le cas des groupes auxiliaires de puissance (ou des prolongateurs d'autonomie pour les véhicules à batterie), l'ammoniac peut également être un carburant adapté, car l'autonomie est plus limitée, donc plus efficace. Depuis ces 5 dernières années, dans une vision de *Power to Gas to Power*, le potentiel de l'ammoniac pour des groupes énergétiques stationnaires tels que les turbines à gaz ou les moteurs électrogènes est de plus en plus exploré, que ce soit comme combustible pur ou partiellement prémélangé avec H_2 . De nouvelles études montrent qu'il est intéressant de l'utiliser aussi dans des brûleurs industriels fonctionnant au charbon ou au gaz de cokeries pour décarboner partiellement ce type d'installations.



Références :

1 - K.H.R. Rouwenhorst, O. Elishav, B. Mosevitzky Lis, G.S. Grader, C. Mounaïm-Rousselle, A. Roldan, A. Valera-Medina, Chapter 13 - Future Trends, Editor(s): A. Valera-Medina, R. Banares-Alcantara, Techno-Economic Challenges of Green Ammonia as an Energy Vector, Academic Press, 2021, Pages 303-319, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820560-0.00013-8>.

2 - C. Mounaïm-Rousselle, Ammonia as fuel for land transport: an utopia ?, http://www.smartcats.eu/wp-content/uploads/2019/05/NH3_fuel_smartcatMOUNAIM-ROUSSELLE.pdf

3 - C. Mounaïm-Rousselle, P. Brequigny, Ammonia as Fuel for Low-Carbon Spark-Ignition Engines of Tomorrow's Passenger Cars, Frontiers in Mechanical Engineering, VOL. 6, 2020, <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fmech.2020.00070>

Mots Clés : Ammoniac, E-fuels, Combustible à zéro empreinte carbone, Systèmes énergétiques.



Conférence de Clôture

Vitesse de déploiement et acceptabilité des nouvelles technologies dans le domaine des énergies.**Grégory De TEMMERMAN***Directeur Général, Zenon Research,*

Respecter l'accord de Paris sur le climat, visant à limiter le réchauffement climatique global à 1.5 ou 2 degrés, implique de diviser nos émissions de CO₂ d'un facteur 4, ou plus, d'ici 2050 pour atteindre la neutralité carbone d'ici 2100. Sachant que plus de 80% de l'énergie consommée dans le monde en 2019 provenait de combustibles fossiles (environ 65% si l'on considère seulement l'électricité), une transformation radicale de notre infrastructure énergétique est nécessaire dans les 30 prochaines années.

Les discussions autour des transitions énergétiques sont souvent centrées sur le type de sources d'énergie à exploiter et négligent généralement le temps nécessaire pour mettre en place les technologies associées. Le but de cette présentation est de ré-examiner la notion fondamentale de transition énergétique et les enseignements que l'on peut tirer des transitions passées et de leurs durées, tant au niveau national que mondial. Ainsi, l'étude du déploiement de différentes sources d'énergie (nucléaires, PV, éolien) permet de mettre en avant des similitudes et surtout des limites sur ce qui est physiquement possible; contrastant avec les discours très optimistes souvent mis en avant.

D'autres aspects importants sont à considérer pour la nécessaire transition à venir. L'intégration d'une part croissante de moyens de production renouvelables intermittents, implique que, pour la première fois dans son histoire, l'humanité évolue dans la direction d'une abondance et d'une densité de puissance décroissante et ce alors que la tendance est vers l'augmentation de la consommation énergétique et la concentration d'une part croissante de la population dans des méga-villes. De plus, qu'on parle de nucléaire, d'éolien ou de solaire photovoltaïque, la question de l'acceptabilité sociale de ces différentes technologies se fait de plus en plus pressante. Gestion des déchets, besoin en matériaux, occupation des sols, etc., sont en effet des sujets de controverse qui rendent l'adoption et la réalisation de grands projets difficiles et longs dans un contexte d'urgence climatique croissante.

Mots Clés : Énergie, Transition, Technologie, Déploiement, Climat.





Maison de la Chimie
28bis rue Saint Dominique 75007 PARIS