



COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —

LA RECHERCHE EN CHIMIE AU SERVICE DE LA RÉVOLUTION ÉNERGÉTIQUE

Institut de chimie du Collège de France

Au cœur de Paris, l'Institut de chimie du Collège de France a fait du défi énergétique l'un de ses principaux axes de recherche et se hisse au plus haut niveau de la recherche mondiale sur la transition énergétique.

L'Institut a tous les atouts pour réussir : des chimistes de très haut niveau, une ouverture internationale et un travail en synergie avec d'autres disciplines du Collège de France comme la physique et la biologie. Aujourd'hui, une centaine de chercheurs en chimie travaillent dans ce lieu unique au service d'une indispensable révolution de l'énergie.

Pr Marc Fontecave

Chaire de chimie des processus biologiques
Directeur de l'Institut de chimie

Pr Clément Sanchez

Chaire de chimie des matériaux hybrides

Pr Jean-Marie Tarascon

Chaire de chimie du solide et de l'énergie

LE COLLEGE DE FRANCE, L'EXCELLENCE SCIENTIFIQUE FRANÇAISE	3
L'INSTITUT DE CHIMIE DU COLLÈGE DE FRANCE	6
PROJET SCIENTIFIQUE	7
Transformer et stocker l'énergie solaire Un enjeu scientifique majeur au cœur du projet de l'Institut de chimie	8
Objectifs opérationnels de l'Institut de chimie – Budget	10
ANNEXES	12
Les grandes dates de l'histoire de chimie au Collège de France	13
Projet scientifique (présentation détaillée)	14
Chimie bio-inspirée : aux frontières de la chimie et de la biologie Pr Marc Fontecave- Chaire et laboratoire de chimie des processus biologiques	16
Élaborer des matériaux innovants par la chimie douce Pr Clément Sanchez - Chaire de chimie des matériaux hybrides et laboratoire de chimie de la matière condensée	17
La chimie du solide pour une meilleure gestion de l'énergie Pr Jean-Marie Tarascon - chaire et laboratoire de chimie du solide et de l'énergie	18

LE COLLÈGE DE FRANCE, L'EXCELLENCE SCIENTIFIQUE FRANÇAISE

L'exception du Collège de France réside dans le croisement du niveau le plus pointu de la recherche avec la diffusion la plus large de la connaissance. Les plus grands chercheurs s'y côtoient pour faire avancer tous les domaines de la connaissance : mathématiques, sciences de la matière et du vivant, mais aussi histoire, sciences humaines, économie. Ce savoir, qui a vocation à rayonner partout dans le monde, est enseigné de manière libre et gratuite, au rythme des découvertes.

Le Collège de France doit sa création à François I^{er} qui nomma en 1530 les premiers Lecteurs royaux. Leur fonction était d'enseigner des disciplines qui n'étaient pas encore admises à l'Université. Aujourd'hui, les anciens « lecteurs royaux » sont devenus 50 professeurs travaillant avec plusieurs centaines de chercheurs dans les différents sites parisiens de l'institution (place Marcelin-Berthelot, rue d'Ulm et rue du Cardinal Lemoine).

DES PERSONNALITES D'EXCEPTION POUR UNE RECHERCHE LIBRE ET AUDACIEUSE

La politique de l'institution repose sur le choix de personnalités d'exception. En effet, quand de nouveaux professeurs sont élus par leurs pairs, seules comptent l'importance et l'originalité de leurs travaux. La force du Collège de France réside également dans sa capacité à évoluer en fonction des acquis de la recherche. Depuis l'origine, une disposition essentielle a maintenu la vigueur créatrice de cette communauté savante : les chaires sont créées à l'arrivée des nouveaux professeurs selon leur spécialité et disparaissent à leur départ en retraite. Ainsi, au départ d'un professeur, son successeur est choisi librement par ses pairs dans un nouveau domaine de recherche, en fonction des derniers développements des sciences. Les thématiques des chaires du Collège de France sont donc constamment renouvelées.

UNE RECONNAISSANCE NATIONALE ET INTERNATIONALE

La qualité scientifique exceptionnelle des travaux menés par les professeurs du Collège de France peut se mesurer aux distinctions nationales et internationales qu'ils ont pu obtenir et notamment, entre autres consécration, 4 médailles Fields, 16 médailles d'or du CNRS, 5 grands prix de l'INSERM et 10 Prix Nobel dont, tout récemment, le prix Nobel de physique attribué au professeur Serge Haroche en 2012.

UNE POLITIQUE DE DÉVELOPPEMENT SCIENTIFIQUE AMBITIEUSE

Objectif :

Développer l'action du Collège de France au service du progrès et du rayonnement des sciences françaises avec l'exigence d'une recherche libre, de haut niveau et tournée vers la société et ses enjeux.

Axes stratégiques pour assurer toutes les conditions de développement d'une recherche d'excellence :

- 1/ Mettre à la disposition des professeurs et des équipes de recherche des infrastructures performantes et des équipements innovants ;
- 2/ Mener une politique scientifique ambitieuse basée sur l'interdisciplinarité, la mutualisation et la valorisation de la recherche ;
- 3/ Renforcer significativement l'attractivité scientifique du Collège de France pour attirer les meilleurs talents ;
- 4/ Assurer le rayonnement du Collège de France et des sciences françaises par une politique d'ouverture et de diffusion à l'échelle mondiale.

Réunir ces conditions est un enjeu vital pour permettre à la France de conserver son leadership scientifique dans des domaines stratégiques pour l'avenir.

« La recherche fondamentale, par son originalité et sa liberté, est génératrice des ruptures conceptuelles qui, par-delà leur valeur propre, une fois traduites en innovations technologiques et industrielles, assurent le succès des économies fondées sur la connaissance. »

Pr Alain Prochiantz, Administrateur du Collège de France

1. DES INFRASTRUCTURES ET DES EQUIPEMENTS DE POINTE POUR UNE RECHERCHE DE PREMIER PLAN

Il est essentiel que le Collège de France offre aux chercheurs les conditions nécessaires à la pratique d'une recherche de premier plan sur les sites mêmes de l'institution.

La recherche expérimentale en physique, chimie et biologie du Collège de France a longtemps bénéficié d'une surface de recherche importante sur le site Marcellin Berthelot. Des découvertes majeures y ont été faites, notamment par Frédéric Joliot, Pierre-Gilles de Gennes, Claude Cohen-Tanoudji, Jean-Marie Lehn ou Jean Dausset, pour n'en citer que quelques-uns. Faute de moyens, ces locaux n'avaient pas été rénovés depuis de très nombreuses années. Une politique ambitieuse de rénovation des laboratoires de recherche du Collège de France a été menée depuis les années 2000 pour mettre aujourd'hui à la disposition des chercheurs en physique, chimie et biologie, plus de 25 000 m² de laboratoires équipés des dernières technologies.

Le Collège de France entend poursuivre un effort analogue en faveur de la recherche en sciences humaines et historiques, notamment l'étude des mondes anciens et des grandes civilisations. Ces domaines, dans lesquels le Collège de France a traditionnellement excellé, sont associés sur le site Cardinal Lemoine à des bibliothèques d'une richesse dont il existe peu d'équivalents dans le monde. Le réaménagement et la modernisation de ces locaux d'ici à 2019 permettront la mise en valeur de ce patrimoine et le développement de ces recherches au sein d'un Institut des civilisations.

La rénovation des bâtiments du Collège de France est en passe d'être achevée. Cependant le maintien d'une recherche de niveau international nécessite un investissement permanent, notamment dans l'acquisition d'équipements de haute technologie.

2. UNE POLITIQUE SCIENTIFIQUE AMBITIEUSE

Au-delà de conditions matérielles et technologiques renouvelées, la politique scientifique engagée par le Collège de France consiste à structurer ses activités de recherche de la manière la plus performante possible et supportant la comparaison avec les plus prestigieux centres de recherche au niveau mondial. À la faveur de la rénovation et du réaménagement de ses locaux, le Collège de France a en effet regroupé ses 50 chaires et les laboratoires qui leur sont associés en instituts thématiques pensés non pas comme de nouvelles entités administratives mais comme des pôles d'excellence : biologie, physique, chimie, civilisations, études littéraires, monde contemporain.

Souples dans leur fonctionnement et leur organisation, les instituts permettent aux équipes travaillant sur des sujets proches de mutualiser leurs moyens, de mieux collaborer et échanger entre disciplines, et de promouvoir des projets de recherche communs ambitieux.

Alors que l'avenir des sciences se joue pour beaucoup aux frontières entre les disciplines, les instituts renforcent une interdisciplinarité qui est la marque du Collège de France. Enfin, la formation de ces instituts contribue à une meilleure valorisation des travaux de recherche et à une plus grande visibilité du Collège de France.

3. UNE ATTRACTIVITE SCIENTIFIQUE RENFORCEE POUR ATTIRER LES MEILLEURS TALENTS

Le renforcement de son attractivité est un enjeu majeur pour l'institution. Dès lors, le Collège de France mène une politique engagée d'accueil au sein de ses instituts des meilleurs chercheurs, venus du monde entier, et entend jouer un rôle clé d'incubateur de talents, jeunes chefs d'équipe, doctorants et post-doctorants.

L'accueil de ces chercheurs d'envergure internationale et de ces jeunes talents est un élément essentiel pour la vitalité et la qualité de la recherche mais aussi pour la visibilité et le rayonnement du Collège de France.

L'enjeu est donc de donner l'envie aux jeunes équipes de venir au Collège de France et d'y poursuivre leurs recherches. Pour cela, au-delà d'un environnement intellectuel et scientifique unique, l'institution doit pouvoir continuer d'offrir des conditions de recherche de très haut niveau mais aussi être en mesure d'apporter des compléments de salaire permettant de rivaliser avec ses homologues étrangers, très compétitifs sur ce point.

OUVERTURE SUR LE MONDE

Le Collège de France est une institution résolument ouverte sur l'international. Plusieurs professeurs sont étrangers ou d'origine étrangère ; de nombreux cours sont délocalisés à l'étranger ; des conférenciers étrangers sont invités régulièrement pour des séjours de courte durée. De nombreux jeunes chercheurs, venant du monde entier, sont accueillis au sein des laboratoires. Enfin, une chaire internationale et une chaire européenne viennent d'être créées.

LIBRE ACCES AU SAVOIR ET RAYONNEMENT MONDIAL : UNE POLITIQUE DE DIFFUSION AMBITIEUSE

Depuis 1530, les cours du Collège de France sont accessibles à tous, gratuitement, sans inscription. Ils attirent aujourd'hui plus de 150 000 auditeurs chaque année. Cette audience s'est accrue de manière exponentielle avec la diffusion en accès libre de l'ensemble des enseignements et de leur traduction en anglais sur le site Internet de l'institution et sur les plateformes iTunes et iTunes U. En 2015, près de 14 millions d'heures de cours ont été visionnées. Cette politique volontariste et ambitieuse, entamée dès 2007, a permis de démultiplier de façon vertigineuse la portée des enseignements du Collège de France à une échelle mondiale et de toucher de nouveaux publics.

Le Collège de France accroît chaque année cet axe stratégique de diffusion des connaissances qui répond parfaitement à sa mission d'origine et témoigne de la vitalité de la recherche française dans le monde entier.

Au cœur de Paris et internationalement reconnu pour son excellence scientifique, le Collège de France dispose de véritables atouts dans la compétition mondiale de la connaissance. Maintenir cette recherche au plus haut niveau a un coût matériel et humain de plus en plus élevé et le Collège de France doit diversifier et amplifier ses sources de financement.

« Pour tenir notre rang dans la compétition avec les institutions étrangères les plus prestigieuses, le mécénat permet souvent de faire la différence. Il faut pouvoir garder les jeunes et brillants chercheurs formés en France mais aussi attirer les meilleurs talents étrangers, tous ceux qui inventeront les sociétés de demain. »

Pr Serge Haroche, Prix Nobel de physique 2012

C'est pourquoi la Fondation du Collège de France met tout en œuvre pour s'attacher la collaboration de grands mécènes et donateurs désireux de faire avancer la recherche dans notre pays et d'encourager la diffusion des savoirs.

« Lorsque nous avons créé la Fondation du Collège de France en avril 2008, notre volonté était d'accroître la visibilité et l'attractivité de l'institution pour développer son potentiel de recherche dans tous les domaines de la connaissance et élargir la diffusion de l'information scientifique.

Avec la Fondation du Collège de France, nous voulons nous donner tous les moyens pour être à la hauteur de nos missions et de nos ambitions. »

Pr Marc Fontecave, Président de la Fondation

L'INSTITUT DE CHIMIE DU COLLÈGE DE FRANCE

La chimie joue un rôle central tant par sa place au sein des sciences de la nature que par son importance économique et son omniprésence dans notre vie quotidienne.

Science de la création des molécules et des matériaux, la chimie façonne le monde concret dans lequel nous vivons (médicaments, cosmétiques, polymères, plastiques, verres, pour ne citer que quelques composés chimiques de notre univers) et se retrouve au cœur des grands défis de l'humanité au XXI^e siècle (alimentation, énergie, santé, environnement, etc.). Notre futur prendra forme autour des molécules et des matériaux inventés dans les laboratoires de chimie.

Pour construire une société durable, dans laquelle les hommes sauront enfin satisfaire leurs besoins sans compromettre l'avenir des générations futures, la chimie, et tout particulièrement celle qu'on nomme désormais « verte », sera sollicitée pour trouver des stratégies totalement innovantes, propres, économiques, efficaces et surtout durables pour la production de carburants, d'électricité, de matériaux.

UN PÔLE DE RECHERCHE D'EXCELLENCE

La chimie est présente au Collège de France depuis son avènement en tant que science au XVIII^e siècle. Les 19 professeurs de chimie qui se sont succédé au Collège de France depuis 1774 ont souvent marqué l'histoire de cette discipline depuis la découverte du chrome (1797), du bleu de Thénard (1802) et des anti-oxydants (1914-1918) jusqu'à l'attribution du Prix Nobel de chimie au Pr Jean-Marie Lehn en 1987¹.

Aujourd'hui, plus que jamais, les travaux menés au Collège de France sont à la pointe de la recherche en chimie grâce à une politique scientifique ambitieuse pour cette discipline avec la réunion de trois chaires au sein d'un Institut de chimie. **Rassemblant, dans des locaux rénovés, trois laboratoires et une centaine de chercheurs, doctorants et post-doctorants, l'Institut de chimie constitue un pôle de recherche d'excellence avec un projet scientifique et un positionnement stratégique forts : la révolution de l'énergie.**

Les professeurs et les chercheurs bénéficient, au sein de l'institut de chimie du Collège de France, d'un environnement scientifique unique et extrêmement porteur (laboratoires et équipements de pointe, travail en synergie avec d'autres disciplines du Collège de France comme la physique et la biologie). Cette excellence nécessite d'importants financements, publics et privés, notamment pour attirer les meilleurs chercheurs.

INSTITUT DE CHIMIE²

- **Chaire et laboratoire de Chimie des processus biologiques du Pr Marc Fontecave**
- **Chaire de Chimie des matériaux hybrides et laboratoire de Chimie de la matière condensée du Pr Clément Sanchez**
- **Chaire et laboratoire de Chimie du solide et de l'énergie du Pr Jean-Marie Tarascon**

¹ Voir en annexe, les grandes dates de l'histoire de chimie au Collège de France.

² Voir en annexe, la présentation des professeurs et des travaux des chaires et laboratoires de l'Institut de chimie.

INSTITUT DE CHIMIE DU COLLEGE DE FRANCE

Projet scientifique
pour une révolution de l'énergie

TRANSFORMER ET STOCKER L'ÉNERGIE SOLAIRE UN ENJEU SCIENTIFIQUE MAJEUR AU CŒUR DU PROJET DE L'INSTITUT DE CHIMIE

Les dérèglements climatiques, l'accroissement du dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère, la nécessité de trouver des alternatives aux énergies fossiles et à l'énergie nucléaire dans un contexte d'augmentation continue de la consommation d'énergie, nous invitent plus que jamais à nous engager dans une indispensable révolution énergétique.

Cette révolution c'est le développement à grande échelle des énergies renouvelables et, en premier lieu, le soleil, la plus abondante des sources d'énergie disponibles. En raison de leur dilution et de leur intermittence, l'utilisation de ces énergies renouvelables ne sera possible que si nous sommes capables de développer des technologies robustes et durables de stockage de l'énergie.

C'est précisément sur cette question de la conversion et du stockage de l'énergie que les laboratoires de l'institut de chimie ont décidé de rassembler leurs forces vers un objectif commun : inventer les nouvelles technologies de l'énergie.

L'énergie solaire est la source d'énergie renouvelable la plus abondante, très largement supérieure aux contributions potentielles de l'énergie éolienne, géothermique ou hydroélectrique. **On pourrait exploiter cette énergie en la transformant en énergie chimique et en la stockant sous forme de carburant.**

Le défi est considérable car cette transformation, thermodynamiquement et cinétiquement contrainte, est d'une extrême complexité. Or la conversion de l'énergie solaire en carburant est en fait admirablement réalisée par le monde vivant qui utilise en permanence le soleil pour transformer l'eau et le dioxyde de carbone en molécules à haute valeur énergétique que l'on retrouve dans la biomasse. Il s'agit de la photosynthèse.

VERS UNE PHOTOSYNTHÈSE ARTIFICIELLE RÉALISATION ET OPTIMISATION D'UNE CELLULE PHOTOÉLECTROCHIMIQUE

Le projet mené par l'Institut de chimie consiste donc à mimer les plantes et les microorganismes photosynthétiques (microalgues, cyanobactéries) dans leur capacité à mettre en œuvre la photosynthèse. Pour cela, les équipes de l'Institut cherchent à réaliser et optimiser une cellule photoélectrochimique capable de convertir un mélange d'eau et de CO₂ en molécules carbonées riches en énergie par action de la lumière solaire. **À base de métaux non nobles, donc abondants et peu coûteux, cette cellule sera une première mondiale.**

Deux stratégies sont menées de front par les équipes de l'Institut de chimie : la conversion de l'eau en hydrogène et la valorisation du dioxyde de carbone.

STRATÉGIE N°1 : CONVERSION DE L'EAU EN HYDROGENE

L'hydrogène est, on le sait, une alternative prometteuse à l'utilisation du pétrole, à la fois en raison de la grande quantité d'énergie qu'il restitue lors de son oxydation (piles à combustibles) et du fait que le seul sous-produit de cette oxydation est l'eau. **La première stratégie consiste donc à utiliser l'énergie fournie par le soleil, directement ou après conversion en énergie électrique (photovoltaïque), pour décomposer l'eau en hydrogène et en oxygène, dans un photoélectrolyseur ou un électrolyseur.** Ce faisant, l'énergie solaire se trouve fixée dans la molécule d'hydrogène qui peut redonner cette énergie chimique sous la forme d'électricité dans une pile à hydrogène.

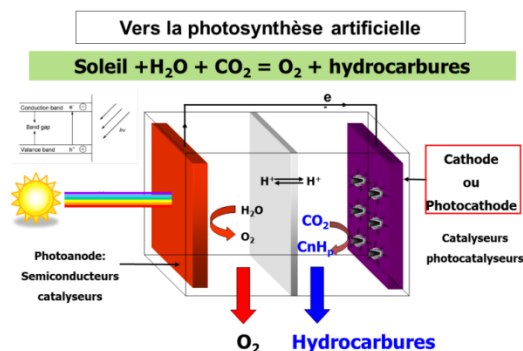
OBJECTIF : CONCEVOIR UN DISPOSITIF ÉCONOMIQUEMENT VIABLE DE PRODUCTION D'HYDROGÈNE GRÂCE À L'ÉNERGIE SOLAIRE

Si des cellules photoélectrochimiques qui décomposent l'eau en hydrogène et oxygène sous l'effet de la lumière sont déjà à l'étude, l'Institut de chimie entend mener un important travail de recherche pour optimiser ces dispositifs bioinspirés et les rendre, à terme, économiquement viables, c'est-à-dire efficaces (rendement), peu coûteuses, durables (utilisation d'éléments chimiques abondants) et stables.

STRATÉGIE N°2 : VALORISATION DU DIOXYDE DE CARBONE

La seconde stratégie consiste à valoriser le dioxyde de carbone (CO₂) en utilisant l'énergie solaire, l'énergie électrique dérivée ou l'énergie chimique contenue dans l'hydrogène (H₂) pour transformer le CO₂ en molécules organiques denses en énergie. Ces dernières peuvent être ensuite utilisées comme matières de base pour l'industrie chimique ou comme carburants.

Représentée ici de façon très schématique, cette cellule photoélectrochimique, capable de convertir un mélange d'eau et de CO₂ en molécules carbonées riches en énergie par action de la lumière solaire, n'a jamais été véritablement réalisée. Il s'agira d'une première mondiale.



OBJECTIF : DÉVELOPPEMENT D'UN DISPOSITIF INÉDIT DE CONVERSION DU CO₂ EN CARBURANT GRÂCE À L'ÉNERGIE SOLAIRE

L'objectif premier est la « preuve du concept », c'est-à-dire atteindre un point suffisamment avancé dans les recherches pour prouver la faisabilité de cette cellule. Cet objectif pourrait être atteint à court terme compte tenu de la richesse des compétences mises en œuvre, des matériaux et molécules disponibles et des moyens expérimentaux présents au sein de l'Institut de Chimie.

À plus long terme, il s'agira là aussi d'optimiser le dispositif pour rendre la cellule électrochimique économiquement viable.

En outre, de nouvelles réactions de valorisation du CO₂, comme source de carbone alternative aux hydrocarbures fossiles, sont attendues de cette recherche.

SOUTENIR LE PROJET SCIENTIFIQUE DE L'INSTITUT DE CHIMIE DU COLLEGE DE FRANCE

Soutenir le projet scientifique de l'Institut de chimie est la marque d'un engagement fort aux côtés du Collège de France et de la recherche française, et cet engagement sera réciproque. La Fondation du Collège de France est à votre écoute pour vous présenter définir avec vous la nature de votre soutien et valoriser cet engagement, dans le respect des valeurs de l'institution.

Plusieurs orientations peuvent être étudiées :

- Admission au Cercle des Mécènes de la Fondation du Collège de France
- Association aux temps forts de la vie du Collège de France (invitations aux événements) ;
- Accès à la communauté des professeurs du Collège de France (rencontres, conférences sur des thématiques données) ;
- Visibilité et mention du mécène, à proportion de son engagement, dans le bâtiment du Collège de France et sur les sites Internet du Collège de France et de la Fondation du Collège de France ;
- attribution d'un prix au nom du mécène ;
- mise à disposition d'une salle du Collège de France pour un événement institutionnel ;
- action médiatique auprès des relais d'opinion à convenir d'un commun accord.

ANNEXES

LES GRANDES DATES DE L'HISTOIRE DE CHIMIE AU COLLEGE DE FRANCE

1774	Première chaire de chimie au Collège de France attribuée à Jean Darcet
1789	Procédé « Leblanc » Procédé d'extraction de la soude artificielle à l'origine du développement de l'industrie chimique en France. Mis au point par Nicolas Leblanc dans le laboratoire de Jean Darcet.
1797	Chrome Découvert par Nicolas Vauquelin
1798	Béryllium Découvert par Nicolas Vauquelin
1802	Bleu de Thénard Pigment à base d'oxyde de cobalt, utilisé pour colorer la porcelaine, découvert par Louis-Jacques Thénard en 1802.
1826	Brome Découvert par Antoine-Jérôme Balard
1862	Synthèse de l'acétylène Réalisée par Marcelin Berthelot dans son « œuf électrique ». Cela met fin au concept de force vitale et montre qu'il est possible de synthétiser un composé organique à partir de ses éléments, carbone et hydrogène.
1884	Principe de « Le Chatelier » Loi qui régit les équilibres chimiques. Publié par Henri Le Chatelier en 1884 à l'Académie des sciences.
	Fermentation Pasteur avait mis en évidence le rôle de micro-organismes tels que les levures lors de la fermentation du glucose. Reprenant les travaux de Claude Bernard, Marcelin Berthelot soutenait qu'il s'agissait en fait d'une réaction due à l'action d'un ferment (enzyme) secrété par les levures. Il en résulta l'une des grandes controverses de l'histoire des sciences à la fin du XIX ^e siècle.
1914-1918	Anti-oxydants Découverts par Charles Moureu et Charles Dufraisse en étudiant l'auto-oxydation des gaz de combat.
1947	Synthèse de la première hormone marquée à l'iode 131 (131I) Réalisée par Alain Horeau. Le procédé permet de suivre l'hormone à travers l'organisme.
1987	Jean-Marie Lehn, prix Nobel de chimie Le Pr J.-M. Lehn était titulaire de Chimie supramoléculaire.
1997	Chimie douce Les deux initiateurs de la chimie douce, Jean Rouxel (chimie douce à précurseurs solides) et Jacques Livage (chimie douce à précurseurs moléculaires), ont été professeurs au Collège de France.
2008	Chimie des processus biologiques Marc Fontecave
2010	Chimie des matériaux hybrides Clément Sanchez
2014	Chimie du solide et des énergies Jean-Marie Tarascon
2014	Inauguration de l'Institut de chimie dans un bâtiment rénové

PROJET SCIENTIFIQUE (PRESENTATION DETAILLEE) VERS UNE PHOTOSYNTHESE ARTIFICIELLE : REALISATION ET OPTIMISATION D'UNE CELLULE PHOTOELECTROCHIMIQUE

1. REALISATION D'UNE CELLULE PHOTOELECTROCHIMIQUE

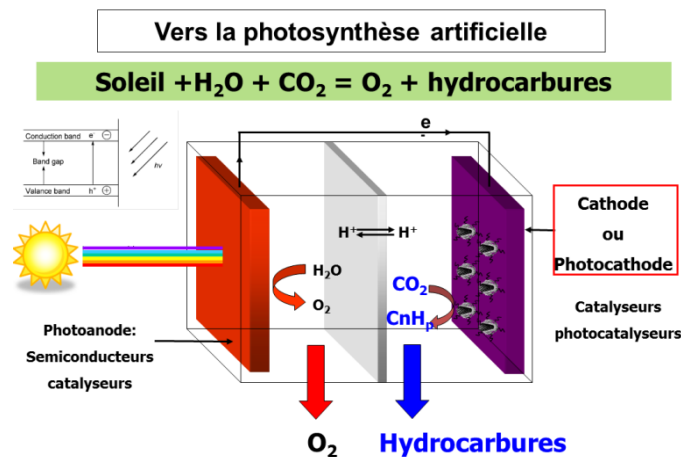


Schéma d'une cellule photoélectrochimique

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Le principe de fonctionnement de la cellule photoélectrochimique est le suivant. Une photoanode est soumise au rayonnement solaire et l'absorbe en partie. Pour ce faire, elle est constituée d'un matériau qui capte les photons solaires (lumière visible), déposé sur une surface conductrice. Il peut s'agir d'un semiconducteur solide ou d'un photosensibilisateur moléculaire greffé (de façon covalente ou non) sur la surface. Cet élément convertit l'énergie solaire en porteurs de charges qu'il faut séparer et faire réagir de manière optimale : des « électrons » excités par la radiation lumineuse passent dans la bande de conduction laissant derrière eux des « trous » dans la bande de valence. Ces « trous », très oxydants, oxydent l'eau en oxygène dans la partie anodique, tandis que les « électrons » très réducteurs circulent jusqu'à la seconde électrode, une cathode, où ils se combinent au dioxyde de carbone et aux protons présents dans le compartiment cathodique pour produire des molécules carbonées riches en énergie : monoxyde de carbone, acide formique, méthanol, méthane et autres hydrocarbures plus complexes.

En absence de CO₂, le même dispositif combine à la cathode les électrons et les protons pour former de l'hydrogène.

Le bilan, dans les deux cas, est donc une conversion d'énergie solaire en énergie chimique, et un processus de stockage de la première sous la forme de carburants (hydrocarbures ou hydrogène).

DES PROCESSUS COMPLEXES

En réalité, les processus mis en jeu dans ces réactions au sein d'une cellule photoélectrochimique sont plus complexes qu'il n'y paraît. Impliquant plusieurs électrons et plusieurs protons, elles sont cinétiquement très contraintes. Il est donc absolument nécessaire d'abaisser la barrière d'activation de ces réactions et de les accélérer à l'aide de catalyseurs également déposés sur les deux électrodes. Ces catalyseurs s'opposent ainsi aux recombinaisons des charges et améliorent les rendements des réactions.

Pour atteindre des rendements intéressants, il faut non seulement trouver des catalyseurs efficaces mais aussi obtenir des densités surfaciques de catalyseurs importantes. Ceci passe par la mise en forme spécifique de ces surfaces d'électrodes, notamment à travers la mise en œuvre des concepts et des méthodes des nanosciences (nanomatériaux, matériaux nanostructurés).

Enfin, il faut envisager la situation dans laquelle l'énergie des électrons excités est trop faible pour réaliser les transformations à la cathode. Dans ce cas le dispositif doit contenir une photocathode composée d'un semiconducteur et d'un catalyseur et également soumise à l'éclairement solaire.

Les matériaux catalytiques et semiconducteurs les plus efficaces (voir ci-dessous) seront donc assemblés sous la forme d'électrodes et de photoélectrodes (par des méthodes d'électrodéposition, de greffage sur surface, etc...) au sein de telles cellules photoélectrochimiques, mais aussi d'électrolyseurs et de piles. Ainsi ils pourront être évalués dans des conditions d'utilisation pratique proches de celles des dispositifs industriels afin de faciliter les transferts technologiques.

2. OPTIMISER LA CELLULE PHOTOÉLECTROCHIMIQUE AVEC DE NOUVEAUX MATÉRIAUX

Tous les processus mis en œuvre dans une telle cellule demandent des matériaux spécifiques. L'Institut de chimie propose plusieurs directions de recherche en rupture avec les approches traditionnelles et susceptibles de lever à moyen terme certains des verrous qui freinent le développement de ces technologies.

DES CATALYSEURS ORIGINAUX, STABLES, PEU COÛTEUX ET EFFICACES

Toutes les réactions mises en jeu dans les processus décrits ci-dessus doivent être catalysées.. Les recherches porteront sur la mise au point de catalyseurs utilisant notamment des métaux non nobles (cobalt, fer, cuivre, nickel, manganèse,...), ce qui constitue encore aujourd'hui un véritable défi pour la chimie.

Dans le cas de la conversion de l'eau en hydrogène et oxygène, des rendements (énergie chimique stockée/énergie solaire) supérieurs à 10 % ont été obtenus récemment avec des matériaux à base de métaux non nobles (*Science* 2014, 1593).

DES PHOTOSENSIBILISATEURS/SEMICONDUCTEURS STABLES, PEU COUTEUX ET EFFICACES

Naturellement, des matériaux sont nécessaires pour absorber le rayonnement solaire et créer les paires électron-trou à l'origine des réactions de transformation de l'eau ou du CO₂. Il s'agit là aussi de découvrir les matériaux ou molécules les plus efficaces pour réaliser ces processus.

C'est ce que développe l'Institut de Chimie à travers la mise au point de semiconducteurs de type oxydes métalliques, des "alliages" ou nanomatériaux mixtes originaux, des composés hybrides nano- et mésoporeux, des complexes inorganiques ou colorants organiques.

DES ÉLECTRODES ORIGINALES

Les différents composés doivent ensuite être étudiés et valorisés dans des conditions de fonctionnement pratique des cellules (photo)électrochimiques. Cela nécessite la mise en œuvre de méthodes de dépôt de ces composés sur des surfaces conductrices. Les électrodes obtenues sont ensuite caractérisées sur le plan de leur composition, de leur structure et de leur activité.

DES PROTOCOLES ANALYTIQUES FIABLES

Une recherche efficace de nouveaux matériaux pour une application ciblée nécessite la mise au point d'un protocole de tests fiables. Le domaine du photovoltaïque s'est aujourd'hui doté d'un banc de tests (NIST) référence. En revanche, les recherches sur la conversion du CO₂ sont des domaines encore peu matures qui bénéficieraient fortement d'une normalisation. Il s'agit là d'un défi qui ouvre une opportunité énorme pour l'Institut de Chimie qui pourrait en prendre l'initiative et qui serait un gage de visibilité forte de ses activités.

CHIMIE BIO-INSPIRÉE : AUX FRONTIÈRES DE LA CHIMIE ET DE LA BIOLOGIE

PR MARC FONTECAVE

CHAIRE ET LABORATOIRE DE CHIMIE DES PROCESSUS BIOLOGIQUES

A l'interface de la chimie et de la biologie, les projets de recherche du laboratoire du Pr Marc Fontecave s'intéressent notamment au domaine de la catalyse et de la biocatalyse à travers l'étude de systèmes enzymatiques complexes (en particulier métallo-enzymatiques).

En effet, la découverte de nouvelles enzymes et la compréhension de leur fonctionnement peut apporter des solutions originales et pratiques pour la transformation chimique de la matière par une approche de chimie bioinspirée (ou biomimétique). Ainsi, le laboratoire du Pr Fontecave développe des approches originales visant à mimer chimiquement les sites actifs des enzymes, pour inventer de nouveaux catalyseurs synthétiques.

Le domaine de la biocatalyse offre notamment des moyens sans précédent pour accélérer, orienter et optimiser les réactions chimiques, y compris à l'échelle industrielle, pour les rendre plus propres et plus économes en matière, en énergie et en déchets.

Les travaux des équipes du Pr Fontecave porte entre autres sur de nouveaux catalyseurs synthétiques potentiellement utiles dans des processus de photosynthèse artificielle conduisant à la conversion de l'énergie solaire en carburants par la production d'hydrogène ou à la valorisation du CO₂.

AXES DE RECHERCHES

- Photosynthèse artificielle, nouveaux dispositifs pour la conversion de l'énergie solaire en carburants ;
- Étude de métalloenzymes (structure et réactivité) impliquées dans des processus de biosynthèse et des réactions métaboliques essentielles à la vie cellulaire (synthèse et réparation de l'ADN, modification des ARNs, synthèse de cofacteurs comme l'ubiquinone,...).



PR MARC FONTECAVE

PARCOURS

- Né le 27 septembre 1956 à Carcassonne.
- École normale supérieure Cachan-ENSET, 1975-1980
- Agrégation de Sciences physiques – option Chimie, 1978
- Thèse d'État à l'Université Paris VI, 1984
- Chargé de recherche au CNRS, 1984-1988
- Professeur à l'Université Joseph Fourier de Grenoble, 1988-2008
- Professeur au Collège de France depuis 2008
- Président de la Fondation du Collège de France depuis 2015.

DISTINCTIONS ET PRIX

- Prix Policart-Lacassagne (Académie des Sciences), 1996
- Médaille d'Argent du CNRS, 2004
- Membre de l'Académie des Sciences, 2005
- Chevalier de l'Ordre national du Mérite, 2010
- Prix Achille Le Bel de la Société Chimique de France, 2012
- Chevalier de l'Ordre de la Légion d'Honneur

ÉLABORER DES MATÉRIAUX INNOVANTS PAR LA CHIMIE DOUCE

PR CLÉMENT SANCHEZ

CHAIRE DE CHIMIE DES MATÉRIAUX HYBRIDES ET LABORATOIRE DE CHIMIE DE LA MATIÈRE CONDENSÉE

Le Pr Clément Sanchez est un spécialiste de la chimie des matériaux. Son laboratoire développe des méthodes de synthèse de matériaux et nanomatériaux originaux, à partir de précurseurs moléculaires, y compris d'origine biologique, permettant un contrôle de la structure cristalline, de l'homogénéité, de la taille, de la porosité, de la morphologie de ces matériaux.

Les méthodes de la chimie douce sont plus particulièrement exploitées, impliquant des conditions de température, de pression et de solvants qui autorisent l'incorporation de molécules biologiques. Cette recherche implique des compétences en caractérisation de matériaux : RMN du solide, diffraction et diffusion des rayons X, microscopies diverses, et analyse des interfaces.

Ces projets s'inscrivent dans des perspectives de développements technologiques et d'applications dans les domaines de l'énergie (matériaux pour la catalyse et la photocatalyse) et de la santé (imagerie, vectorisation thérapeutique, biomatériaux).

AXES DE RECHERCHES

- Concevoir et élaborer des matériaux inorganiques et/ou hybrides originaux permettant de développer des réponses innovantes aux préoccupations sociétales dans les domaines de l'environnement, l'énergie et de la médecine ;
- Étudier les mécanismes de formation des nanomatériaux inorganiques et hybrides de la molécule au matériau final (matériaux denses ou poreux, sous la forme de films, poudres, monolithes) ;
- Comprendre les processus de formation des matériaux inorganiques et hybrides nanostructurés afin de permettre leur fabrication sur-mesure (composition, taille, morphologie, texture) avec un contrôle fin de leur chimie et du procédé d'élaboration associé ;
- Développer une véritable ingénierie bio-inspirée permettant d'accéder à de nouvelles architectures multifonctionnelles (structures hiérarchiques) avec une parfaite maîtrise de la structure, de la texture et de la fonctionnalisation des matériaux formés aux différentes échelles.

PR CLÉMENT SANCHEZ

PARCOURS

- Major de l'École nationale supérieure de Chimie de Paris, 1978
- Doctorat ès Sciences, Université Paris 6 -Pierre et Marie Curie, 1981
- Attaché puis chargé de Recherche, CNRS, 1978-1988
- Directeur de recherche, puis directeur de recherche de classe exceptionnelle CNRS, 1988-2011
- Professeur à l'École polytechnique, 1991-2003
- Directeur du Laboratoire de Chimie de la matière condensée", 1999-
- Directeur adjoint puis directeur du laboratoire de Chimie de la Matière Condensée de Paris, CNRS, 2000-2013
- Professeur au Collège de France, depuis 2011



DISTINCTIONS ET PRIX

- Médaille des anciens élèves de l'ENSCP, 1978
- Lauréat d'une bourse de l'OTAN, 1983

- Prix IBM «Sciences des Matériaux», 1988
- Prix de la Société Chimique de France (Division Chimie du Solide), 1994
- Médaille d'Argent du CNRS, 1995
- Prix Yvan Pueches de l'Académie de Sciences, 2000
- Prix ADFAC – Université de Paris VI pour la valorisation de la recherche sur les hybrides, 2000
- Médaille Lavoisier CEA Le Ripault, 2007
- Prix Catalan-Sabatier de la *Real Sociedad Espanola de Quimica*, 2007
- Prix Gay-Lussac-Humboldt, 2008
- Prix Pierre Süe de la Société Chimique de France, 2009
- Prix de l'Institut Français du Pétrole de l'Académie des Sciences, 2010
- Membre étranger de la *Real Academia Nacional de Farmacia*, Espagne, 2011
- Membre de la *European Academia of Sciences*, 2010
- Membre de l'Académie des Sciences, 2011
- Membre de la *Academia Europaea*, 2012
- Membre de la *Material Research Society*, 2012
- Prix François Sommer Homme et nature, 2014
- Membre étranger de l'Académie royale de Belgique, 2014
- Prix ENI pour la protection de l'environnement, 2014
- Membre de la *Royal Society of Chemistry*, 2014
- Prix pour l'ensemble de carrière de la *International Sol-Gel Society*, 201

LA CHIMIE DU SOLIDE POUR UNE MEILLEURE GESTION DE L'ÉNERGIE

PR JEAN-MARIE TARASCON

CHAIRE ET LABORATOIRE DE CHIMIE DU SOLIDE ET DE L'ÉNERGIE

Le Pr Jean-Marie Tarascon mène des recherches innovantes concernant le stockage de l'énergie, dont il est un spécialiste mondialement reconnu.

Son laboratoire élabore de nouveaux matériaux peu coûteux et efficaces, dans lesquels la nanostructuration joue un rôle majeur, pour la mise au point d'électrodes originales à utiliser dans des batteries de véhicules électriques. Il s'intéresse également aux matériaux organiques issus de la biomasse (sucres, acides organiques) pour inventer de nouvelles batteries « vertes » à électrode renouvelable.



AXES DE RECHERCHE

- Synthèse de matériaux d'insertion à haut potentiels pour batteries à ion Li⁺ ou Na⁺ ;
- Contrôle des interfaces électrochimiques ;
- Nouvelles chimies au-delà de la technologie Li-ion, avec entre autres Na-ion, Na-air et Li-air ;
- Nouvelles pérovskites pour l'électrolyse de l'eau.

PR JEAN-MARIE TARASCON

PARCOURS

- Docteur ès sciences, 1981
- Séjour post-doctorat à l'université de Cornell, 1981
- Chercheur à Bell Laboratory, puis à Bellcore, organisme de recherche des compagnies régionales de Bell, aux États-Unis, 1982-1994
- Professeur à l'université de Picardie Jules Verne et directeur du Laboratoire de réactivité et de chimie des solides (UMR/CNRS 6007) à Amiens, 1994-2008
- Créateur et directeur du Réseau sur le stockage électrochimique de l'énergie (<http://www.energie-rs2e.com>), depuis 2011
- Professeur invité sur la Chaire Développement durable – Environnement, Énergie et Société du Collège de France 2010-2011
- Professeur titulaire au Collège de France, depuis 2014

DISTINCTIONS ET PRIX

- Bellcore President Award, 1993
- Industry Week Best Technology of the Year Award, 1994
- R&D 100 Award, 1994
- Popular Mechanics Design and Engineering Award, 1995
- R&D 100 Award, 1995
- International Battery Association Research (IBA) Award, 1995
- Battery Technology Award from the Electrochemical Society Inc, 1997
- Thomas Alva Edison Patent Award, 2001
- New Jersey Inventors Hall of Fame, 2001
- Volta Medal Award, 2002
- Membre de l'Institut universitaire de France, 2002
- ISI Award, 2004
- Prix du rayonnement français - Sciences mathématiques et physiques, 2004
- Membre de l'Académie des Sciences, depuis 2004
- Chevalier de la Légion d'Honneur, 2009