

les SAVANTURIERS²⁴

AVRIL 2018

LES
12 PRINCIPES
DE LA
CHIMIE VERTE



05

LA CHIMIE VERTE,
pour un
futur
DURABLE

**UN
POSTER**
À TÉLÉCHARGER
ET DÉCOUVRIR
EN VERSION ANIMÉE

**DES INTERVIEWS
ET UN CLIP**

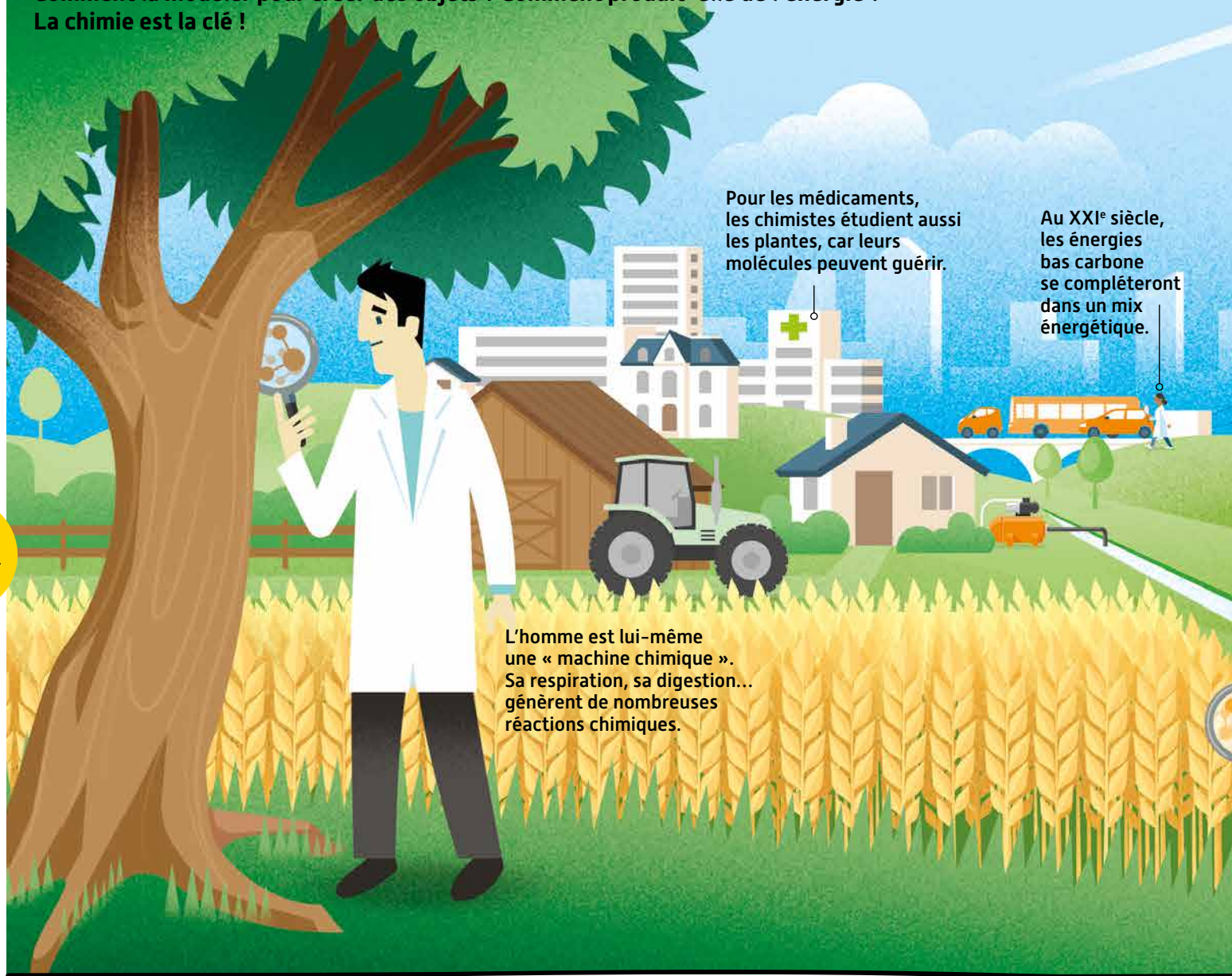
à retrouver sur **cea.fr**



On connaît !

TOUT EST CHIMIE

La matière est composée d'atomes qui, en s'associant, forment des assemblages complexes : les molécules. Les êtres vivants sont formés de milliards de molécules et sont en permanence le siège de réactions chimiques : respiration, digestion... Comment se transforme la matière ? Comment la modeler pour créer des objets ? Comment produit-elle de l'énergie ? La chimie est la clé !



Pour les médicaments, les chimistes étudient aussi les plantes, car leurs molécules peuvent guérir.

Au XXI^e siècle, les énergies bas carbone se compléteront dans un mix énergétique.

L'homme est lui-même une « machine chimique ». Sa respiration, sa digestion... génèrent de nombreuses réactions chimiques.

La chimie est omniprésente au quotidien : dans la maison, la cuisine, la salle de bains, les médicaments, la voiture, le téléphone... L'industrie chimique (et biochimique) met directement en pratique les résultats des recherches fondamentales pour répondre à tous nos besoins. Pour notre subsistance et notre confort, elle doit produire toujours plus de produits chimiques, tout en garantissant la sécurité sanitaire et

en limitant les déchets et les impacts sur l'environnement et la santé. Au niveau individuel, il faut revoir nos habitudes pour éviter la surconsommation et le gaspillage.

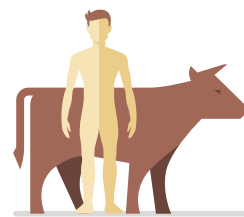
Les ressources naturelles s'épuisent de plus en plus vite. Si le rythme de consommation reste identique dans les pays industrialisés et s'il s'accroît dans les pays émergents, il faudra deux planètes Terre pour subvenir à nos besoins en 2050...

OMNIPÉTRO !

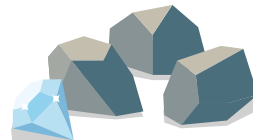
Aujourd'hui, les produits issus de la pétrochimie couvrent tous les secteurs – solvants, détergents, médicaments, colorants alimentaires, cosmétiques, engrais – et l'immense domaine des matières plastique, notamment : résines, fibres synthétiques, plastifiants, élastomères, adhésifs, polyester, nylon...

Il existe 3 grands domaines en chimie

La chimie organique, celle de tous les êtres vivants.



La chimie minérale, pour tous les éléments inorganiques.



La biochimie, issue de la chimie organique, étudie les molécules et les réactions au sein des organismes vivants, en particulier dans les cellules humaines.



REACH

Entré en vigueur en 2007, ce règlement européen porte sur l'enregistrement, l'évaluation, l'autorisation et les restrictions des substances chimiques. Il oblige les industriels à évaluer et gérer les risques induits par leurs produits chimiques et à fournir des informations de sécurité aux utilisateurs.

85 %

des 85 000 produits de consommation recensés sont élaborés à partir de 20 produits simples, eux-mêmes issus de 10 matières premières, principalement le pétrole.

LEXIQUE

Solvant : produit permettant de dissoudre, diluer ou extraire d'autres substances sans les modifier chimiquement et sans lui-même se modifier.



Pour les produits de consommation, les chimistes mettent au point de nouveaux matériaux recyclables, sans recours au pétrole.

Pour l'alimentation, les chimistes explorent de nouvelles voies de production plus respectueuses de l'environnement.



DÉCOUVREZ L'ANIMATION ET LE POSTER TÉLÉCHARGEABLE SUR ceq.fr

Ces constats ont conduit l'industrie chimique sur la voie du développement durable. En ce début de XXI^e siècle, la chimie verte est une nouvelle façon d'appréhender la chimie.

LA CHIMIE VERTE, QU'EST-CE QUE C'EST ?

La chimie verte a pour but de concevoir des produits et des procédés chimiques destinés à réduire ou à éliminer l'utilisation et la synthèse de substances dangereuses. Elle s'appuie sur quatre concepts. Le premier

consiste à utiliser au maximum, voire économiser, les matières premières afin de limiter les sous-produits chimiques. Le deuxième préconise de choisir des solvants propres (non-toxiques pour l'environnement). Améliorer le rendement en utilisant au mieux les sources d'énergie est le troisième. Pour conclure, le quatrième tend à minimiser la production de déchets, et dans des formes adaptées pour les recycler, retraiter ou valoriser. ●



On cherche !

FEUILLE DE ROUTE DE LA CHIMIE VERTE POUR 2050

POURQUOI PRODUIRE PLUS ?

La population mondiale est en constante augmentation. En 2050, elle devrait atteindre 9,5 milliards d'êtres humains. Le Brésil, la Russie, l'Inde et la Chine représenteront la moitié de la population et les outils de production devront être implantés majoritairement dans ces pays.

POURQUOI CONSOMMER MOINS ?

Aujourd'hui, seuls 25 % de ce qui est prélevé dans la nature se retrouvent en produits finis ; un gaspillage énorme à contrer en améliorant l'efficacité des procédés industriels. Il faut optimiser la production, mais aussi la consommation des produits issus de l'agriculture et de l'élevage, ainsi que des biens de consommation (habillement, voitures, objets électroniques...). •



LA CHIMIE DOIT PROPOSER DES SOLUTIONS CONCRÈTES POUR RÉPONDRE AUX ENJEUX DU XXI^E SIÈCLE.



FOURNIR DE LA NOURRITURE ET LES MOYENS DE LA TRANSFORMER

De grandes famines touchent encore des continents entiers : Afrique et Asie principalement. Paradoxalement, dans ces pays, 70 % des matières végétales produites sont perdues car elles ne sont pas consommées immédiatement. Il existe peu de structures de transformation chimique (conserverie, fumage, confiture...) ou de chaîne du froid pour les conserver.

Engrais et pesticides sont contestés, mais encore indispensables en attendant des alternatives moins nocives pour nourrir la population grandissante.



ÉLABORER DES MÉDICAMENTS

Aujourd'hui, on meurt de maladies que l'on sait pourtant soigner : sida, malaria, tuberculose, choléra... Mais une partie des populations touchées ne peut avoir accès ni aux traitements, trop onéreux, ni à des campagnes de vaccination.

D'autre part, les maladies neurodégénératives et les cancers progressent au même rythme que l'augmentation de l'espérance de vie. Il reste de nombreux médicaments à découvrir, à partir de la biodiversité ou facilement synthétisables à grande échelle.



RENDRE L'EAU POTABLE

Tous les ans dans le monde, deux millions de personnes, notamment des enfants, meurent car elles n'ont pas accès à l'eau potable. Cela paraît inimaginable alors que les océans couvrent les trois quarts de la planète !

La chimie peut développer des procédés de filtration et de dessalinisation qui serviront aussi pour le traitement des eaux usées.



PRODUIRE DE L'ÉNERGIE

L'énergie est indispensable pour toutes les actions humaines. L'énergie du XIX^e siècle a été le charbon, celle du XX^e le pétrole.

Pour répondre à la demande du XXI^e siècle, que l'on prévoit doublée, et limiter les émissions de gaz à effet de serre, il faudra associer des énergies renouvelables et bas carbone dans un mix énergétique.



PROTÉGER L'ENVIRONNEMENT

La Terre et l'Homme ne seront durables que si nous répondons à ces quatre enjeux en limitant l'impact des activités humaines, tant lors de l'utilisation des ressources que des rejets, urbains et industriels.





Les 12 principes de la chimie verte

Au début des années 1990, le gouvernement américain a lancé un plan de prévention de la pollution et de réduction des déchets. C'est dans ce cadre qu'est né le concept de Green Chemistry, défini par les chimistes Paul Anastas, John Warner et Tracy Williamson. Ils ont établi les 12 principes fondateurs qui sont encore une référence aujourd'hui.

1

Prévenir la pollution à la source et éviter de produire des déchets.

2

Économiser la matière première en récupérant toutes les molécules d'intérêt.

3

Travailler dans des conditions plus sûres et moins toxiques pour l'homme et l'environnement.

4

Concevoir des produits chimiques moins toxiques.

5

Renoncer à utiliser des auxiliaires de synthèse (solvants, agents de séparation...) ou choisir des produits non toxiques lorsqu'ils sont nécessaires.

6

Économiser de l'énergie : limiter les dépenses énergétiques, mettre au point de nouveaux matériaux pour le stockage, rechercher de nouvelles sources d'énergie bas carbone.

7

Utiliser des ressources renouvelables au lieu des fossiles.

8

Réduire l'utilisation de molécules intermédiaires en privilégiant des réactions directes.

9

Préférer les procédés catalytiques qui accélèrent la vitesse de réaction en nécessitant moins d'énergie.

10

Concevoir un produit chimique en vue de sa dégradation et/ou de son recyclage.

11

Analyser les produits chimiques et leur empreinte dans l'environnement.

12

Développer une chimie fondamentalement plus sûre : choisir les matières premières chimiques pour prévenir les accidents, explosions, incendies et les émissions de composés dangereux.

Les
SAVANTURIERS

Directeur
adjoint
de l'innovation
nucléaire

STÉPHANE
SARRADE

« La chimie n'est
ni bonne ni mauvaise,
elle est ce que
les hommes en font. »

DEPUIS QUAND LA CHIMIE ACCOMPAGNE-T-ELLE L'HOMME ?

Les historiens des sciences ont daté l'apparition de la chimie avec la domestication du feu, lequel a servi aux premières transformations chimiques : cuire ses aliments, cuire des poteries, fondre des minerais métalliques...

Aujourd'hui, la chimie doit apporter des réponses aux grands enjeux sociétaux qui concernent la production de nourriture, de médicaments, d'eau potable et d'énergie, dans un respect croissant et accru de l'environnement.

LA CHIMIE, UNE BONNE OU UNE MAUVAISE SCIENCE ?

La chimie n'est ni bonne, ni mauvaise ; elle est ce que les hommes en font. Les notions « chimique » et « naturel » sont très souvent opposées ; c'est dommage car cela véhicule une image négative ! Associer le mot « chimique » à un objet ou une situation est anxiogène. Il est vrai que de grandes catastrophes industrielles ont eu lieu dans des usines chimiques. Mais cela ne doit pas faire oublier le fait que la chimie, utile dans tous les secteurs liés à la santé et à l'alimentation, sauve des vies humaines.

La chimie verte a été structurée dans les années 1990. De quoi s'agit-il ? C'est, avant toute réaction chimique, réfléchir à : « quelles matières premières utiliser ? », « quels solvants mettre en œuvre ? », « quel niveau d'énergie ? », « quels déchets seront produits et combien seront recyclables ? ». C'est une chimie disruptive car le rendement des réactions n'est plus l'élément le plus important ; il faut réfléchir différemment et concevoir les processus chimiques d'une autre façon. La chimie verte est ancrée dans les enjeux de société.

FORMATION

BAC S

1^{RE} ANNÉE ÉCOLE DE MÉDECINE

LICENCE EN BIOCHIMIE – FACULTÉ DES
SCIENCES DE MONTPELLIER

INGÉNIEUR AGROALIMENTAIRE SPÉCIALISATION
GÉNIE DES PROCÉDÉS – POLYTECH MONTPELLIER

THÈSE SUR LE COUPLAGE DES FLUIDES
SUPERCRIQUES ET PROCÉDÉS
MEMBRANAIRES AU CEA

POURQUOI AVEZ-VOUS CHOISI D'ÊTRE CHIMISTE ?

Travaillant sur des procédés de transformation à base de membranes utilisés dans l'agroalimentaire, j'ai fait de la chimie verte dès le début de ma carrière, avant même qu'elle ne soit nommée ainsi ! Je me suis retrouvé dans cette nouvelle vision de la chimie : produire plus et mieux en consommant moins et en rejetant moins. L'objectif est ambitieux ! Nous devons repenser les processus chimiques, réinventer les matières premières et les solvants, travailler avec le minimum d'énergie et surtout réfléchir à recycler les déchets. Pour moi, c'est un terrain de jeu sans limite, le champ des possibles est très important ! •



Anxiogène : qui produit l'anxiété, l'angoisse.



RETROUVEZ L'INTÉGRALITÉ
DE L'INTERVIEW SUR ceq.fr



Comment on fait

DE LA CHIMIE AUTREMENT

Une réaction chimique se déroule toujours en 4 étapes.
Ce schéma détermine 4 axes de R&D pour la chimie verte.

1 MATIÈRES PREMIÈRES



Le pétrole est, aujourd'hui, la matière première la plus utilisée. Mais c'est une ressource fossile, limitée et polluante. Il faut donc lui trouver des remplaçants renouvelables et propres, biodégradables. Dans le cadre d'une écoconception, les bioproduits sont des candidats prometteurs !

Pour ne pas concurrencer les productions alimentaires, les biocarburants de 3^e génération sont produits à partir d'huiles synthétisées par des micro-algues dans des bioraffineries. Elles devraient fournir 5 à 10 fois plus de biodiesel que le colza. ●

Les **SAVANTURIERS** 15 à (re)lire
« Ça roule avec les algues »

2 SOLVANTS

Il existe deux catégories de solvants : l'eau (qui se raréfie) ou les solvants organiques. Ces derniers sont des hydrocarbures dont aucun n'est inoffensif pour l'homme ; ce sont des composés cancérogènes, mutagènes ou reprotoxiques. Comme ils sont aussi inflammables, ils présentent des risques pour l'industrie et l'environnement. Après utilisation, ils sont incinérés ou recyclés.

Depuis les années 1970, le CO₂ supercritique est l'alternative industrielle aux solvants organiques. Il trouve de nombreuses applications : pour décaféiner le café (il remplace le chloroforme ou le benzène), supprimer le goût des bouchons de liège, nettoyer à sec des vêtements (à la place du perchloréthylène), décoller des métaux... ●

LE PRINCIPE DU CO₂ supercritique

Le dioxyde de carbone sous pression (74 bars) et à température ambiante (30 °C) n'est plus solide, liquide ou gazeux ; il est en phase supercritique. Il peut alors être utilisé comme solvant « vert » totalement neutre, non toxique, non polluant, non inflammable.



Unité d'extraction en CO₂ supercritique.



RETROUVEZ LE LABORATOIRE DES PROCÉDÉS SUPERCRIQUES ET DE DÉCONTAMINATION EN VIDÉO SUR cea.fr

3 ÉNERGIE

En France, l'énergie nucléaire couvre 75 % de nos besoins en électricité. Sur le long terme, elle continuera d'en assurer 50 %. En complément, et pour tourner le dos aux énergies fossiles, il faut utiliser les énergies bas carbone, chercher de nouveaux catalyseurs et intégrer le recyclage dès la conception de nouveaux procédés.

Plusieurs pistes sont explorées : le vecteur hydrogène, les batteries lithium-ion, les piles à combustible, l'énergie solaire photovoltaïque ou thermique... ●

Les **SAVANTURIERS** 9 à (re)lire
« Sous le Soleil exactement »



Tests de panneaux photovoltaïques à l'Institut national de l'énergie solaire.



Assemblage d'un module de batterie lithium-ion.



« Ce terrain de jeu
totalement inexploré,
c'est génial
pour un chercheur ! »

4 DÉCHETS

Il faut que les déchets issus des réactions chimiques soient recyclés afin d'en réduire la quantité résiduelle. Ainsi le CO_2 , produit de la combustion des ressources fossiles et considéré comme un accélérateur de l'effet de serre, pourrait être piégé dans de nouveaux matériaux solides poreux puis transformé en carburant. Grâce à de nouveaux procédés, il pourrait être aussi converti en produits intéressants dans le domaine des engrais, pesticides, solvants et adhésifs.

QUEL EST VOTRE SUJET DE RECHERCHE ?

Nous travaillons sur le CO_2 , nous cherchons à transformer et valoriser cette molécule considérée comme un déchet.

Le CO_2 provient de la respiration, des hommes et des plantes, mais celui-ci ne pose pas de problème. Au contraire, chaque année, 35 milliards de tonnes émises dans l'atmosphère suite à la combustion des ressources fossiles : pétrole, gaz naturel, charbon participent au réchauffement climatique.



Chercheur
en chimie

THIBAUT
CANTAT

FORMATION

BAC S

2 ANNÉES DE CLASSES PRÉPARATOIRES

ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE DE PARIS

THÈSE À L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE

COMMENT PENSEZ-VOUS VALORISER CE CO_2 ?

Refaire des carburants à partir du CO_2 demanderait trop d'énergie, et comme l'énergie la moins chère reste celle des hydrocarbures... on tombe dans un cercle vicieux !

10 % du pétrole sert à produire tous les produits de la chimie : plastique, engrais, pesticide, herbicide... qui ont une valeur ajoutée supérieure au carburant. Notre idée est de fabriquer ces produits à partir de CO_2 .

Les études sont longues. Cela commence par de nombreuses discussions pour trouver quel type de molécule nous pourrions produire. Ensuite, le défi est de casser les liaisons très fortes entre les atomes d'oxygène et celui de carbone, avec juste ce qu'il faut d'énergie et en utilisant des catalyseurs. Enfin, il faut construire des édifices de molécules connues. Il y a une forte demande des industriels vis-à-vis de ces nouveaux procédés.

AVEZ-VOUS UN OBJECTIF À PLUS LONG TERME ?

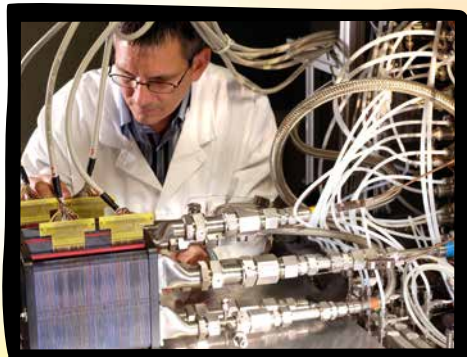
Nombre de verrous restent à lever. Nos travaux ne vont pas permettre de recycler de grands volumes et donc de solutionner le dérèglement climatique. Mais c'est une première brique qui va nous apprendre à travailler avec cette molécule stable et difficile à faire réagir... pour ouvrir la voie à la production de carburants.

QUELLE EST VOTRE MOTIVATION ?

C'est génial, pour un chercheur, de traiter un sujet vierge, inexploré, où une foule de choses restent encore à découvrir. On n'a jamais beaucoup travaillé sur le CO_2 comme source de carbone. C'est un domaine très neuf et actuel, qui motive de nombreux jeunes, étudiants et chercheurs. Grâce à ce flux perpétuel d'idées, nous prenons notre place dans la compétition internationale. ●



RETROUVEZ L'INTÉGRALITÉ
DE L'INTERVIEW SUR cea.fr



Tests de piles à combustible.



Avec les nouveaux catalyseurs, des procédés chimiques respectueux de l'environnement sont élaborés.



LEXIQUE

Catalyseur : substance qui change (le plus souvent accélère) la vitesse d'une réaction chimique.

Décolletage : usinage (polissage et détournage) de pièces métalliques.

Hydrocarbure : molécule organique composée d'atomes de carbone et d'hydrogène faisant souvent référence au pétrole et au gaz naturel.



ENVIE D'EN SAVOIR PLUS SUR LA CHIMIE VERTE, DÉCOUVREZ
LES RESSOURCES DIGITALES SUR



cea.fr/go/savanturiers

À LIRE

SITES

CEA :
www.cea.fr
CEA Jeunes :
www.cea.fr/jeunes
CEA Enseignants :
www.cea.fr/enseignants



LA CHIMIE D'UNE PLANÈTE DURABLE

Stéphane Sarraide
Éditions du Pommier – collection « Essai »

À l'aube d'une nouvelle ère, plus respectueuse de la planète et de notre environnement, cinq grands défis seront à relever et ce n'est pas la chimie industrielle qui pourra le faire, mais une nouvelle chimie qui aura fait le pari du durable.



LA CHIMIE EST UN JEU

Alexandra Bender
et Catherine Rabbe
Éditions Librio

Tout connaître sur la chimie en s'amusant, grâce aux 80 jeux et questions.



LA CHIMIE POUR L'ÉNERGIE

Dans le secteur de l'énergie, la chimie a toute sa place, à découvrir dans ce livret thématique.

Éditeur :
Commissariat à l'énergie atomique
et aux énergies alternatives,
RCS Paris B 775 685 019

Directeur de la publication :
Xavier Clément

Conseiller scientifique :
Stéphane Sarraide

Ont participé à ce numéro :
Sofyane Bouali, Thibault Cantat, Agnès Grandjean,
Margaux Israël, Florence Klotz, Lucia Le Clech,
Guy Lumia, Hubert-Alexandre Turc

Infographies : Antoine Levesque

Crédits : L. Chamussy/Sipa-CEA – P. Dumas
L. Godart – D. Guillaudin – F. Rhodes – P. Stroppa
Thinkstock

Animation : Gary Levesque

Création, réalisation : Alexandre Cheyrou

Secrétariat de rédaction : Ellipse

Impression : Valblor – avril 2018
ISSN 2271-6262



Nous remercions Fabienne
Chauvière d'avoir accepté
que nous empruntons le titre
de son émission.

NE PEUT ÊTRE VENDU

