



# Conférence «Nuclear Chemistry for sustainable fuel cycles»

En partenariat avec l'AIEA

5-10 juin 2016

« Atalante 2016 »

DOSSIER

# **Table des matières**

Les conférences internationales « Atalante » du CEA	A: l'ambition d'un nucléaire durable 3
Des conférences tournées vers les systèmes du fu	ıtur3
La conférence Atalante 2016	4
Le soutien de l'AIEA	4
Les temps forts de la conférence	4
Un tour d'horizon international pour la session d'	inauguration5
La clôture de la conférence « Atalante 2016 »	6
Une journée de visites d'installations nucléaires	6
L'installation ATALANTE du CEA Marcoule	7
Les chiffres-clés d'ATALANTE	
Les programmes de recherche menés à Atalante.	8
Programme de recherche pour l'industrie nucle	éaire
Programme de recherche dans le cadre des lois	s « déchets » de 1991 et 20069
ANNEXES	10
1. Le cycle du combustible	10
2. Programme détaillé d'Atalante 2016	10
Le CEA Marcoule	19





# Les conférences internationales « Atalante » du CEA : l'ambition d'un nucléaire durable

Placée sous le thème des apports du cycle et de la chimie à la durabilité du nucléaire, les conférences internationales Atalante sont des rencontres de haut niveau qui permettent d'enrichir les connaissances et faire évoluer les approches scientifiques.

Les conférences s'appuient sur de très riches contributions, ainsi que sur le savoir-faire des équipes du laboratoire Atalante au CEA Marcoule qui donne son nom à la conférence. Atalante est un laboratoire de chimie nucléaire unique au monde d'environ 20 000 mètres carrés dédiés aux recherches en chimie de haute activité.

Fort de plus de cinquante ans de savoir-faire au service de l'industrie nucléaire française, le centre de Marcoule du CEA est le centre de référence pour les recherches sur le cycle du combustible nucléaire, que ce soit pour le traitement et recyclage des combustibles usés et gestion des déchets radioactifs, comme pour le cycle du combustible des systèmes nucléaires du futur.



Organisée tous les 4 ans par le CEA, la conférence « Atalante » est un rendez-vous mondial de la chimie nucléaire. Réunissant tous les pays impliqués dans la recherche en matière de cycle du combustible, Atalante permet pendant toute une semaine d'échanger sur les dernières avancées en la matière. Toutes les problématiques relatives au cycle du combustible sont abordées, des matériaux d'actinides à la chimie nucléaire environnementale.

La conférence « ATALANTE 2012 » a accueilli plus de 400 participants, dont la moitié d'étrangers, représentant près de 22 nationalités. Elle a donné lieu à 150 présentations orales et 125 posters.

« Atalante 2016 » poursuit les travaux et les débats engagés lors des précédentes éditions. Au-delà de leur apport scientifique, les conférences « Atalante » s'inscrivent dans des problématiques

d'actualité et de développement durable.

### Des conférences tournées vers les systèmes du futur

L'enjeu est d'inscrire l'énergie nucléaire dans un mode de production durable, économe en ressources naturelles et maîtrisant ses déchets. Le CEA est en première ligne pour répondre aux enjeux fixés par la loi du 28 juin 2006 sur la gestion durable des matières et déchets radioactifs et pour préparer, dans la perspective d'un prototype de réacteur nucléaire dit « de 4ème génération », l'entrée en service des systèmes nucléaires du futur. Étudiés par les plus grands pays du monde, ces nouveaux réacteurs ont pour ambition de mettre en œuvre un nucléaire durable grâce à l'utilisation optimale du combustible, la minimisation des déchets produits, la résistance à la prolifération et l'économie des ressources naturelles. Ces « systèmes du futur » doivent permettre de recycler de



manière très optimisée les matières valorisables du combustible (uranium et plutonium) mais aussi une partie des déchets actuels.

La 4<sup>ème</sup> génération opère un saut technologique en matière de cycle du combustible nucléaire, et notamment par des technologies de recyclage nettement améliorées. Les conférences Atalante font état de ces travaux, discutent des progrès obtenus et échangent sur les perspectives.

### La conférence Atalante 2016

### Le soutien de l'AIEA

La conférence Atalante a obtenu pour sa cinquième édition, en juin 2016, le soutien de l'AIEA (Agence Internationale pour l'Energie Atomique). L'association de l'AIEA à la conférence Atalante 2016 est un témoignage de sa légitimité et de la très haute reconnaissance par la communauté scientifique. Par cette distinction, la conférence est reconnue comme un moment essentiel dans les processus de coopération internationale.

### Les temps forts de la conférence

150 contributions orales constituent la conférence Atalante 2016. L'ensemble des aspects liés à la chimie nucléaire est abordé au cours des diverses sessions. Pas moins de 36 sessions sont organisées pour traiter de :

- la chimie des actinides et produits de fission,
- l'amont du cycle,
- les procédés de séparation des actinides,
- la pyrochimie,
- les matériaux actinides,
- la gestion des déchets, la chimie environnementale, la chimie nucléaire en conditions de stockage géologique
- les problématiques transverses
- les garanties et développements analytiques

Les discussions porteront notamment sur les perspectives d'amélioration du procédé de traitement actuel des combustibles (séparation des éléments valorisables (uranium et plutonium) des actinides mineurs et des produits de fission), produits dans les réacteurs nucléaires.

### Lundi 6 juin 2016

08h30-12h00: Session plénière d'inauguration

Tour d'horizon international

14h00 – 18h00 : Sessions thématiques

### Mardi 7 juin 2016:

09h00 – 18h00 : Sessions thématiques

18h00: Session poster

### Mercredi 8 juin 2016

09h00 – 18h00 : Sessions thématiques

### Jeudi 9 juin 2016

09h00 - 12h00 : Sessions thématiques

14h00 : Table ronde

### Vendredi 10 juin

Visite du CEA Marcoule



Le second volet est celui des conditions de déchets. Le développement de matrices durables de conditionnement pour les déchets radioactifs ultimes par l'élaboration de verres ou de céramiques spécifiques est un sujet de vif intérêt pour la définition de leur durabilité dans des conditions d'un stockage géologique profond.



### Un tour d'horizon international pour la session d'inauguration

Pour cette édition 2016, la session inaugurale accueille les représentants des grands organismes de recherche nucléaire du monde entier. La session inaugurale permet des échanges entre les dirigeants de l'énergie nucléaire et de présenter les stratégies énergétiques.

### François GAUCHE, CEA, France

François Gauché est Directeur de l'énergie nucléaire du CEA. François Gauché a mené une carrière internationale en Allemagne, en Angleterre puis en France, notamment au sein de l'organisation Iter. De 2010 à 2015, François Gauché rejoint la Direction de l'énergie nucléaire du CEA en tant que chef du programme « réacteurs de 4<sup>ème</sup> génération ».

### Paul HOWARTH, National nuclear laboratory, Angleterre

Paul Howarth est directeur du Laboratoire Nucléaire National et directeur executif de Battelle Energy UK. Il a occupé différents postes de direction dans le domaine nucléaire, il a travaillé au Japon, notamment sur le plasma.

### Jong Kyung KIM, Korea Atomic Energy research Institute (KAERI), Republic of Korea

Jong Kyung KIM est Président de KAERI et membre du "Nuclear Safety Review Board" (NSRB) pour les Emirats. Il a également été membre du bureau des gouverneurs à L'institut de Sureté Nucléaire de Corée (Korea Institute of Nuclear Safety -KINS).

### Toshio KODAMA, Japan Atomic Energy Agency, Japon

Toshio Kodama est Président de l'Agence pour l'Energie Atomique du Japon. Il a fait sa carrière au sein de Mitsubishi Heavy Industries (MHI) travaillant sur le développement de technologies innovantes.



### John KOTEK, Department of Energy, Etats-Unis

John Kotek est Secrétaire Adjoint au sein du département de l'Energie de l'Office of Nuclear Energy. Il supervise l'ensemble du programme de recherche nucléaire ainsi que de la stratégie énergétique.

### Satya MURTI, IGCAR, Inde

Satya Murti est directeur de l'Indira Gandhi Centre for Atomic Research. Spécialiste des réseaux informatiques, il a coordonné l'un des projets de l'AIEA visant à renforcer l'application des réseaux de capteurs sans fil dans le domaine des réacteurs nucléaires. Il pilote également le développement de Magnetic System Time Domain Electro pour identifier les sources minérales d'uranium dans le pays.

### Vyacheslav PERSHUKOV, Rosatom, Russie

Viacheslav Pershukov est Directeur Général adjoint pour la gestion de l'innovation au Russian Federation national nuclear corporation. Une grande partie de sa carrière a été consacrée à des postes scientifiques à l'Institut de l'énergie Krjijanovski et des postes de direction dans des entreprises privées liées à l'énergie.

### Sun QIN, CNNC, Chine

Sun Qin est Président du Conseil de China National Nuclear Corporation (CNNC). Il a travaillé dans différentes agences gouvernementales, ayant été vice administrateur (vice-ministre) de l'Administration nationale de l'énergie et Président de l'Autorité de la Chine de l'énergie atomique. Il a notamment travaillé sur le mix énergétique, et le développement de l'énergie nucléaire en Chine.

### La clôture de la conférence « Atalante 2016 »

La table ronde de clôture de la conférence Atalante 2016 permettra de remettre en perspective l'ensemble des contenus présentés au cours de la semaine de conférence et de s'inscrire dans une démarche durable vis-à-vis des évolutions du climat.

La table ronde est complétée par un discours de M. Jean-Marc Jancovici qui fera part de son expertise en la matière et apportera une lumière additionnelle sur l'énergie dans l'évolution du climat.

### Une journée de visites d'installations nucléaires

La journée du vendredi 10 juin est consacrée à la visite du Centre du CEA Marcoule. Cette journée de visiter permettra de découvrir les divers laboratoires de recherche du CEA Marcoule, notamment au sein d'Atalante.



### L'installation ATALANTE du CEA Marcoule



Progressivement mise en service à partir de 1992, le laboratoire de recherche ATALANTE reste aujourd'hui sans équivalent dans le monde en matière de R&D sur les différentes étapes du cycle des combustibles nucléaires.

L'installation Atalante réunit, sur 19 000 m², 17 laboratoires dédiés à la recherche et au développement en chimie sous rayonnement (« radiochimie ») pour le cycle du combustible nucléaire. Avec 250 « boîtes à gants » et 9 « chaînes blindées », Atalante constitue ce que les spécialistes appellent un laboratoire « chaud » : ses infrastructures et équipements permettent d'y réaliser, en un seul lieu et en toute sécurité, des travaux allant de la recherche fondamentale jusqu'à des expériences appliquées qui mettent en œuvre de quelques microgrammes à quelques kilogrammes de matières radioactives. La presque totalité des étapes du cycle du combustible nucléaire peut y être reproduite, à l'échelle du laboratoire.

ATALANTE a été conçue pour développer et optimiser des procédés industriels de séparation des constituants du combustible nucléaire usé, tout comme le conditionnement des déchets ultimes. Des études sont également menées sur les procédés du cycle du combustible du futur.

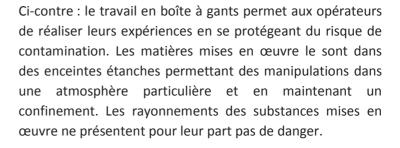
### Les chiffres-clés d'ATALANTE

- 200 chercheurs et techniciens, 70 salariés qui assurent la sûreté et l'exploitation quotidienne de cette installation ainsi que la gestion des déchets produits
- ❖ 19 000m² de locaux,
- 17 laboratoires permettant de travailler avec de la matière radioactive dans 250 boîtes à gants
- 9 chaînes blindées dédiées à la recherche et permettant de travailler en très haute activité, équipées de 59 postes de travail avec télémanipulateurs
- 1 unité de traitement des effluents organiques
- 1 station de mesure de la radioactivité des fûts de déchets
- 2 chaînes blindées permettant de gérer les effluents et déchets de l'installation

Pour mener à bien leurs recherches, les équipes disposent de grands moyens analytiques nucléarisés, c'est-à-dire d'équipements pour mesurer les échantillons mis en œuvre. On peut citer : des outils de mesures physico-chimiques et radiochimiques (Diffractomètres de rayons X, Microscopes Electroniques à Balayage ...), des outils de mesures isotopiques (spectromètres de masse à thermo-ionisation...), des outils de spéciation (spectromètres de résonnance magnétique nucléaire...).









Ci-contre, le travail en « chaînes blindées » permet la réalisation d'expériences en « haute activité » c'est-à-dire sur des matières très irradiantes. Les opérations sont réalisées au moyen de bras télémanipulateurs. Le confinement est assuré par l'enceinte de la cellule, en béton, et un verre au plomb.

### Une installation primée

Le laboratoire ATALANTE a reçu en 2014 la distinction prestigieuse de «nuclear historic landmark», décernée par l'American Nuclear Society (ANS). Ce prix récompense des sites ou des installations ayant accompli des avancées scientifiques exceptionnelles, ou ayant contribué de manière importante au développement des technologies nucléaires civiles.



Cette reconnaissance salue l'excellence scientifique, la pertinence et l'ampleur des recherches menées depuis une vingtaine d'année par les équipes du CEA à Marcoule.

L'American Nuclear Society est un organisme non gouvernemental, sans but lucratif, à vocation scientifique et pédagogique. L'ANS est un réseau d'environ 11 000 membres dont le principal objectif est de promouvoir la connaissance et la compréhension des applications des sciences et des technologies dans le domaine nucléaire.

### Les programmes de recherche menés à Atalante

### Programme de recherche pour l'industrie nucléaire

Avec ATALANTE, le CEA apporte son expertise et son soutien à l'industriel AREVA pour l'usine de traitement-recyclage de La Hague, afin d'optimiser les procédés qui y sont mis en œuvre. La séparation et le recyclage des matières énergétiques (uranium, plutonium) provenant des combustibles nucléaires usés, la réduction des rejets de l'usine, la prise en charge de nouveaux combustibles à traiter ... sont les axes sur lesquels les équipes travaillent. Par ailleurs, certains programmes de R&D menés à ATALANTE le sont en soutien des procédés de l'usine MELOX.



Les études menées dans les laboratoires concernent également l'amont du cycle, pour en optimiser certains procédés.

Au-delà des besoins pour les usines existantes du groupe AREVA, les programmes menés dans ATALANTE apportent le soutien de R&D nécessaire aux ambitions du groupe industriel français à l'international.

### Programme de recherche dans le cadre des lois « déchets » de 1991 et 2006

Dans le cadre des lois votées en 1991 et 2006 sur la gestion durable des matières et des déchets radioactifs, les équipes d'ATALANTE réalisent des recherches sur le « tri sélectif » des constituants du combustible nucléaire usé. Ils étudient des procédés de séparation poussée des éléments les plus radiotoxiques sur le long-terme : les « actinides mineurs » (americium, neptunium, curium). Cette étape de séparation fait appel au design de molécules extractantes (plusieurs années peuvent être nécessaires à ce travail) et à des procédés de radiochimie innovants. L'objectif est in fine la réduction du volume et de la radiotoxicité des déchets ultimes.

Pour les déchets de haute activité et à vie longue (déchets dits « HA-VL ») des matrices durables de conditionnement (« verres » nucléaires et céramiques spécifiques) sont étudiées et testées afin d'en garantir le bon comportement sur le long terme, dans des conditions de stockage géologique profond.



### **ANNEXES**

- 1. Le cycle du combustible
- 2. Programme détaillé d'Atalante 2016
- 3. Le CEA Marcoule



### Le cycle du combustible

### A - Introduction

Il y a plus de trente ans, la France a fait le choix pour son industrie nucléaire d'un cycle fermé, qui consiste à traiter les combustibles usés pour séparer les matières valorisables des déchets. Optimiser le cycle des matières, tel qu'il est déjà mis en œuvre de façon industrielle, préparer les options de gestion des matières pour les parcs des réacteurs futurs sont ainsi deux des axes forts des travaux du CEA. Ils sont menés dans une optique de développement d'un nucléaire durable, sûr et économiquement compétitif.

La gestion des matières, avant et après leur irradiation dans les réacteurs nucléaires, constitue un aspect essentiel des filières du secteur. En amont, de la mine au réacteur, il s'agit, au travers de très nombreuses transformations successives, d'extraire, de purifier et d'enrichir l'uranium, puis d'élaborer les assemblages combustibles. En aval, il faut gérer les combustibles usés en tenant compte tant de leur capacité énergétique, qui demeure très importante, que de leur dangerosité potentielle, car ils comprennent des éléments radioactifs, dont certains de très longue période. Les options retenues pour le cycle du combustible, en particulier pour l'aval du cycle, sont déterminantes pour la conception de systèmes nucléaires durables. Le recyclage des matières

déterminantes pour la conception de systèmes nucléaires durables. Le recyclage des matières valorisables, fissiles et fertiles, au sein de réacteurs aptes à en tirer le meilleur parti, constitue la ligne de force des recherches menées dans ce domaine.

Le cycle des matières, tel qu'il est pratiqué aujourd'hui en France, est un point de départ solide pour le développement de futurs systèmes nucléaires. En effet, les technologies employées conduisent non seulement à des performances remarquables, mais laissent aussi entrevoir des perspectives d'évolution très intéressantes, dans une logique de développement permettant de toujours mieux satisfaire aux impératifs d'une utilisation rationnelle et économe des ressources et à la nécessité d'une gestion sûre des déchets ultimes, présentant les meilleures garanties en matière de résistance à la prolifération et une efficacité économique encore renforcée.

### B - Le cycle des matières nucléaires dans le parc actuel des réacteurs de puissance

### 1 - Description du cycle actuel

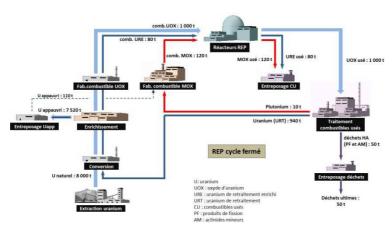
La gestion des matières mise en œuvre dans le parc nucléaire français relève d'un cycle « fermé ». Le chargement annuel des 58 REP de l'ordre de 1 000 tonnes d'oxyde d'uranium enrichi (UOX) requiert environ 8 000 tonnes d'uranium naturel (ce qui conduit à entreposer plus de 7 000 tonnes d'uranium appauvri). Les valeurs indiquées ci-après, exprimées en tonnes de métal lourd, doivent être considérées comme des ordres de grandeur, les conditions réelles d'exploitation pouvant varier d'une année à l'autre.

Les matières contenues dans les 1 000 tonnes d'UOX déchargées sont pour l'essentiel réutilisées.

 le plutonium, qui est récupéré des opérations de traitement, de l'ordre d'une dizaine de tonnes, est recyclé sous la forme de combustible MOX (environ 120 tonnes par an) dans certains réacteurs du parc EDF;



- l'uranium récupéré ou uranium de retraitement (URT) 940 tonnes peut être ré-enrichi.
   On obtient aujourd'hui à partir de 600 tonnes d'URT environ 80 tonnes de combustible d'uranium ré-enrichi (URE), qui sont ensuite rechargées dans certains réacteurs du parc et de l'ordre de 500 tonnes d'URT appauvri, qui sont entreposées;
- les matières restantes, produits de fission et actinides mineurs (50 tonnes), constituent les déchets radioactifs ultimes. Ceux-ci sont vitrifiés et entreposés pour décroissance radioactive, en attente de leur stockage en formation géologique profonde.



Le cycle actuel des matières nucléaires dans un parc REP ©CEA

À ce jour, les combustibles MOX usés et URE usés ne sont pas recyclés. Ils sont entreposés sous eau, en vue d'un traitement différé et du recyclage des matières qu'ils contiennent dans les réacteurs de 4<sup>e</sup> génération à venir.

### 2 - Les opérations industrielles de traitement/recyclage

Les opérations de traitement et de recyclage des combustibles usés ont aujourd'hui atteint une pleine maturité industrielle, résultat de décennies de R&D qui ont profondément transformé la mise en œuvre du procédé hydrométallurgique de séparation de l'uranium et du plutonium, appelé PUREX1. Elles permettent d'atteindre des taux de recyclage très élevés (supérieurs à 99 %) tout en ne générant que très peu de déchets secondaires. Environ 25 000 tonnes de combustibles usés ont ainsi été traitées dans les usines de La Hague, et près de 2 000 tonnes de MOX ont été fabriquées.

### 3 - Les atouts de la stratégie française du cycle

La stratégie du cycle du combustible développée actuellement pour le parc français présente quatre grands atouts :

- une économie des ressources en uranium naturel, pouvant avoisiner 20- 25 % si la totalité de l'uranium et du plutonium est recyclée ;
- le conditionnement des déchets ultimes sans plutonium, de façon sûre. Le conditionnement des produits de fission dans le verre est un standard international, dont les mécanismes d'altération à long terme sont bien cernés, avec une vitesse de corrosion estimée, en

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Plutonium Uranium Refining by Extraction.



\_

- condition de stockage, comme étant extrêmement faible (de l'ordre de quelques microns en plusieurs siècles);
- une maîtrise de l'inventaire en plutonium. Tout le plutonium récupéré dans le traitement du combustible UOX usé est recyclé sous forme de combustible MOX;
- la constitution d'une réserve de plutonium qui servira de ressource aux générations futures de réacteurs nucléaires. Le plutonium contenu dans les combustibles MOX usés est ainsi entreposé sous une forme concentrée et sûre, aisément mobilisable pour une utilisation ultérieure.

Cette stratégie de gestion des matières pourra se poursuivre au renouvellement du parc actuel, avec le déploiement de réacteurs de 3<sup>e</sup> génération (EPR<sup>TM</sup>). De plus, elle ouvre la voie à des systèmes nucléaires pleinement durables, avec l'avènement de nouvelles technologies de réacteurs.

### C - Le cycle des matières du futur

Les options relatives au cycle du combustible constituent un point-clé pour répondre aux enjeux de préservation des ressources naturelles, de minimisation de l'impact environnemental ou de résistance aux risques de prolifération. Le recyclage des matières valorisables est difficilement contournable pour une utilisation pérenne de l'uranium et du plutonium, aujourd'hui entreposés dans les combustibles usés « de deuxième tour » (MOX usés, URE usés). Il permet ainsi de valoriser au mieux les matières fissiles (<sup>235</sup>U et <sup>239</sup>Pu) et les matières fertiles (<sup>238</sup>U, avec notamment la valorisation des très importants stocks d'uranium appauvri, environ 300 000 tonnes en 2012 en France).

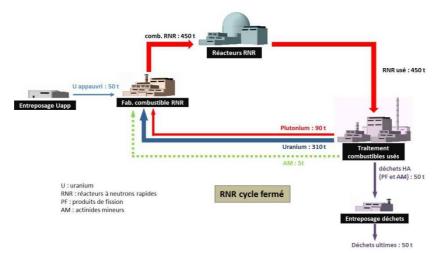
### 1 - Le multirecyclage de l'uranium et du plutonium

Pour y parvenir, il convient non seulement de disposer de procédés de recyclage performants, mais aussi de recycler les matières valorisables au sein de réacteurs aptes à en tirer le meilleur parti. A cet égard, les REL (réacteurs à eau légère) actuellement en fonctionnement dans le parc nucléaire mondial ne paraissent pas pouvoir répondre à eux seuls à cet enjeu d'un développement durable à très long terme.

L'introduction de RNR dans le parc sera nécessaire pour tirer tout leur potentiel des options de recyclage des matières. Un parc de même puissance que le parc actuel, mais constitué de RNR isogénérateurs, pourrait multirecycler l'uranium et le plutonium, et par là, tirer parti de l'intégralité du potentiel énergétique de ces matières. Seulement 50 tonnes par an d'uranium appauvri seraient nécessaires pour l'alimentation d'un tel parc dans lequel les étapes « amont » (extraction minière, conversion et enrichissement de l'uranium) seraient supprimées. On peut en outre envisager le recyclage de certains éléments à vie longue (américium notamment) pour réduire la radiotoxicité à long terme et la puissance thermique des déchets ultimes.

Le recyclage des matières nucléaires dans des RNR apparaît donc comme la ligne de force pour les systèmes nucléaires du futur. C'est l'esprit du développement des systèmes de 4<sup>e</sup> génération, dans lequel de nombreux Etats s'engagent aujourd'hui, notamment ceux qui affichent des perspectives de déploiement importantes comme la Chine et l'Inde et auquel répond en France le projet de démonstrateur technologique Astrid.





Le cycle des matières nucléaires dans un parc RNR iso-générateur ©CEA

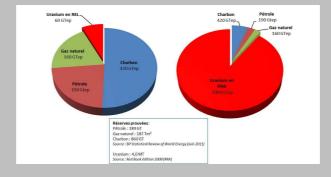
### Zoom:

### Le potentiel énergétique des ressources fossiles dans un parc futur

Les ressources fossiles conventionnelles prouvées étaient, en 2011, respectivement estimées à 189 milliards de tonnes pour le pétrole, 187 000 milliards de m³ pour le gaz naturel et 860 milliards de tonnes pour le charbon.

Les ressources conventionnelles prouvées pour l'uranium étaient estimées à 4 millions de tonnes. La figure ci-dessous représente le potentiel énergétique de ces ressources (exprimé en milliards de tonnes équivalent pétrole, Gtep) :

- dans le diagramme de gauche, dans le cas d'une valorisation de l'uranium telle que pratiquée aujourd'hui dans les réacteurs à eau, il représente environ 7 % de l'ensemble des ressources énergétiques fossiles.
- dans le diagramme de droite, dans l'hypothèse d'une valorisation en RNR, l'uranium devient alors la première ressource énergétique, son potentiel étant près de 10 fois supérieur à celui des autres ressources fossiles.



Valorisation de l'uranium en réacteur à eau (à gauche) et en RNR (à droite)

### 2 - A plus long terme, la transmutation des actinides mineurs

Les RNR peuvent même permettre d'aller plus loin et de proposer des options de recyclage encore plus poussées. Leur capacité à mieux induire la fission des actinides mineurs (neptunium, américium



et curium) laisse envisager le recyclage de ces éléments, en complément de celui de l'uranium et du plutonium.

Quel est l'enjeu d'une telle aptitude ? Il s'agit essentiellement de chercher à améliorer la gestion des déchets ultimes. Il serait possible de diminuer leur radiotoxicité à long terme en retirant les actinides mineurs, qui en sont les contributeurs principaux et par ailleurs de réduire la chaleur résiduelle des déchets et d'accroître ainsi la compacité du stockage (et ainsi, à long terme, préserver la « ressource rare » que pourrait être un site de stockage).

### Zoom:

### Les apports de la transmutation à la gestion des déchets

Les études menées par le CEA, en coopération avec l'Andra, ont permis de préciser les principaux apports d'une stratégie de transmutation à la gestion des déchets finaux.

- Il s'agit, en premier lieu, de la diminution de la charge thermique séculaire des déchets de haute activité à vie longue (HA-VL), pour laquelle le contributeur essentiel est un isotope de l'américium. La transmutation de l'américium pourrait permettre, pour un concept de stockage analogue à celui qu'étudie aujourd'hui l'Andra dans l'argile, de diminuer jusqu'à un facteur proche de 10 l'emprise du stockage de ces déchets ; cela en prenant l'hypothèse d'un entreposage préalable des colis vitrifiés de 120 ans (afin de laisser décroître les produits de fission, principaux contributeurs à l'émission de chaleur dans les premières décennies);
- En second lieu, on peut obtenir, en transmutant à la fois américium et curium, une réduction de la radiotoxicité à long terme (nocivité radiologique en cas d'ingestion) des déchets HA-VL, qui peut être d'un facteur 100 au-delà de quelques siècles. Ainsi, en moins de 500 ans, l'inventaire de radiotoxicité des déchets retrouve un niveau équivalent à celui de tout l'uranium extrait pour fabriquer les combustibles

### D - Quelles orientations pour la recherche?

Les performances des technologies déployées aujourd'hui sont remarquables, tant du point de vue de la qualité des produits générés que de celui des conditions dans lesquelles ils sont obtenus. La R&D dans ce domaine s'articule autour de quatre grands axes : adapter les technologies, les améliorer, les compléter et enfin, explorer de nouveaux concepts.

### 1 - L'adaptation des technologies

Adapter les technologies à de possibles ou probables évolutions des combustibles, du contexte ou des stratégies de gestion constitue un premier enjeu. En particulier, le déploiement de RNR va évidemment de pair avec le recyclage systématique de leur combustible. Et, même si la forme oxyde persiste, ces combustibles présentent de nombreuses particularités par rapport aux combustibles des réacteurs à eau. Il a certes été montré par le passé que les procédés hydrométallurgiques, tels que ceux utilisés aujourd'hui, pouvaient s'appliquer au traitement des combustibles de RNR – plus de 20 tonnes de combustible déchargées du réacteur Phénix ont été recyclées. Cependant, dans la perspective d'un déploiement important, il convient d'optimiser leur mise en œuvre.



### 2 - L'amélioration des technologies

Il ne s'agit pas tant de chercher à élever le niveau des performances actuelles des procédés de fabrication et de traitement – tout à fait suffisantes, voire même excellentes, et ne constituant donc pas un véritable enjeu de recherche – mais plutôt d'œuvrer à en diminuer encore le coût, les déchets ou les rejets associés et à offrir les meilleures garanties de protection vis-à-vis des risques de prolifération.

Ceci s'inscrit dans une démarche de progrès continu, qui a déjà donné de remarquables résultats. La démarche peut et doit être poursuivie, car d'importantes marges de progrès subsistent, tant à l'amont qu'à l'aval du cycle : simplification des procédés, progression dans la sûreté des opérations, accroissement de la compacité des installations, réduction de la consommation de réactifs et des rejets dans l'environnement et déploiement d'outils de contrôle encore plus performants pour un pilotage plus fin des procédés.

### 3 - Compléter les procédés existants

Dans le cadre de la loi du 30 décembre 1991 relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs, la recherche d'étapes complémentaires pour le recyclage des actinides mineurs, a été une voie particulièrement foisonnante au cours des quinze dernières années. De nouvelles architectures moléculaires, présentant une affinité sélective pour ces éléments, ont ainsi été, dans un très large cadre coopératif, synthétisées, expérimentées puis intégrées dans des étapes complémentaires au procédé PUREX.

Les chercheurs du CEA ont également démontré à l'échelle du laboratoire, sur des échantillons de combustibles usés et avec des technologies similaires à celles utilisables au niveau industriel, que ces nouveaux concepts étaient adaptés aux diverses voies envisageables pour le recyclage des actinides mineurs.

Le CEA a pu tester, sur échantillons réels de combustible usé (plusieurs kg), dans l'installation Atalante du CEA à l'échelle du laboratoire, les procédés de récupération des actinides mineurs qu'il a développés, mettant en œuvre de nouveaux agents extractants, sélectifs et résistants. Plusieurs options ont été envisagées, correspondant aux diverses voies de recyclage envisageables (séparation groupée de tous les actinides pour un recyclage homogène, séparation séquentielle pour un recyclage sur couvertures, séparation du seul américium...).

Les performances relevées sont très satisfaisantes (taux de récupération supérieurs à 99 %) et des essais complémentaires ont par ailleurs été menés afin d'approcher les conditions de mise en œuvre à l'échelle industrielle de tels procédés : les résultats sont très encourageants (notamment quant à l'endurance des molécules mises en jeu) et permettent d'augurer très favorablement de l'éventuelle transposition industrielle des concepts étudiés.

Les études se poursuivent aujourd'hui dans l'objectif de mieux définir encore les conditions de cette mise en œuvre industrielle (essais des technologies unitaires à l'échelle pilote, essais d'intégration, définition précise des modes de pilotage des procédés, etc.), mais également en vue de poursuivre l'optimisation des concepts.



### 4 - Explorer de nouveaux concepts

Le développement de nouveaux concepts, en rupture avec les technologies actuellement employées, constitue une voie de recherche activement explorée. Elle est aujourd'hui affichée aux Etats-Unis par les équipes du DOE, lequel a lancé un vaste programme sans sélectionner à ce stade d'options particulières, avec l'horizon 2050 pour la mise en œuvre industrielle. De nombreux pays s'intéressent aux procédés de traitement pyrochimiques, qui consistent en une extraction des éléments à haute température dans un milieu de sels fondus. On leur prête en effet d'intéressantes potentialités de principe : compacité, aptitude à traiter des combustibles métalliques, réfractaires, peu refroidis, etc.

Toutefois ces procédés sont encore, pour l'essentiel, très éloignés de l'application industrielle, la question des déchets technologiques, liée à l'utilisation de hautes températures et de milieux particulièrement agressifs, restant une des interrogations les plus aiguës.

Quoi qu'il en soit, l'expérience de décennies de R&D qui a été nécessaire pour amener le procédé PUREX au niveau actuel, à partir d'un concept très simple, à savoir l'extraction sélective à température ambiante, nous enseigne que le chemin est très long d'un concept de laboratoire à une technologie industrielle. Il n'en demeure pas moins qu'il importe de ne pas négliger l'émergence de ces nouveaux concepts. C'est d'ailleurs l'un des grands objectifs de l'Institut de chimie séparative de Marcoule (ICSM), où le CNRS, l'université Montpellier2, l'Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Montpellier (ENSCM) et le CEA œuvrent ensemble dans ce qui doit constituer un « laboratoire de nouvelles idées » pour les procédés de cycle du futur.

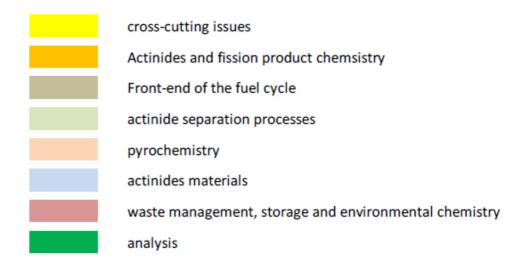
### E - Un futur inscrit dans la durabilité

Les technologies aujourd'hui employées pour le cycle du combustible donnent au parc nucléaire français une assise et une cohérence remarquables. Elles préparent en outre la possibilité de déployer à l'avenir des options encore plus abouties, pour l'avènement de systèmes pleinement durables sur le très long terme. La préparation de ces prochaines étapes est un enjeu majeur et il paraît primordial, forts des progrès accomplis jusqu'ici, de maintenir un effort de recherche élevé dans le domaine. Deux points semblent mériter une attention particulière : le besoin de développer des technologies flexibles, pouvant être mises en œuvre dans un parc en évolution, et l'importance des infrastructures de recherche. L'installation Atalante permet de mener des recherches sur plusieurs domaines du cycle des matières et à diverses échelles, des aspects fondamentaux jusqu'aux expériences démonstratives, sur plusieurs kg de matières. La pertinence de sa conception en a fait, depuis quelques années, un outil et un atout essentiels aux mains des équipes du CEA. Car, dans ce domaine également, l'anticipation est un enjeu capital.



## Le programme de la conférence Atalante 2016

Sunday 5 June		Monday 6 June		Tuesday 7 June	Wednesday 8 June	Thursday 9 June	Friday 10 June
	08:30	Opening					
	08:50						
	9:10		9:00				
	9:30		3.30				
	9:50	PANORAMA	9:50				
	10:10	- " - '	10:10				
	10:30	Coffee Break	10:30		Coffee Break	Coffee Break	
	11:00	INTERNATIONAL	11:00				
	11:20 11:40	PANORAMA	11:20 11:40				Visite of CEA
	12:00	PANORAINA	12:00				Marcoule
	12.00	Lunch	12.00	Lunch	Lunch	Lunch	Research Center
	14:00	Carren	14:00		Editori	Editori	nescaren center
	14:30		14:30				
	14:50		14:50			Round Table	
	15:10		15:10				
	15:30	Coffee Break	15:30		Coffee Break	Coffee Break	
	16:00		16:00			Concluding	
16h-18h	16:20		16:30			Lecture	
REGISTRATION	16:40		16:50			Jean-Marc	
REGISTRATION	17:00		17:10			Conclusion	
	17:20		17:30				
18h -WELCOME COCKTAIL	18:00		18:00	POSTER SESSION	CONFERENCE DINNER		





### Le CEA Marcoule

Fort de plus de cinquante ans d'une implantation en terre gardoise et drômoise au service de la Défense puis de l'industrie nucléaire nationale, le centre de la Direction de l'énergie nucléaire du CEA réunit à Marcoule quelque 1 550 collaborateurs qui s'investissent quotidiennement dans le soutien à l'industrie nucléaire actuelle, mènent une Recherche et Développement ambitieuse pour le cycle du combustible nucléaire, et assurent le pilotage de grands chantiers d'assainissement-démantèlement. Par ses liens avec le tissu économique local, Marcoule s'intègre résolument au cœur de son territoire.

- 1 550 salariés, dont 700 chercheurs
- Budget annuel : 500 M€ dont 100 M€ pour la Recherche et le Développement
- 30 laboratoires et installations de recherche, dont « Atalante », laboratoire unique au monde
- 285 brevets en portefeuille
- 300 publications scientifiques par an, dont une cinquantaine à « comité de lecture »
- Un pôle de formation (120 chercheurs, 100 thésards et post-doctorants)

Depuis 2008, le CEA Marcoule est détenteur de la triple certification ISO 9001, ISO 14001 et OHSAS 18001 (qualité des activités de R&D, maîtrise de l'impact environnemental, sécurité/sûreté/santé).

Le CEA a fait de Marcoule son site de référence pour les recherches sur le cycle du combustible nucléaire (traitement et recyclage des combustibles usés et gestion des déchets radioactifs). Les activités de l'établissement ont également pour ambition le développement du cycle du combustible des systèmes nucléaires du futur, la recherche en soutien des industriels et la maîtrise d'ouvrage d'un vaste programme de démantèlement des anciennes installations du site.

