

**DU COMBUSTIBLE NUCLÉAIRE AUX DÉCHETS :  
RECHERCHES ACTUELLES**  
*FROM NUCLEAR FUELS TO WASTE: CURRENT RESEARCH*

**Bilan et perspectives du séminaire du 6, 7, 8 décembre 2001**

**1. L'impression générale**

Tous les chercheurs et ingénieurs invités ont exposé dans leur champ respectif d'activité des travaux en développement intense, approfondi, discutés et recoupés autant que faire se peut avec quelquefois des possibilités de choix entre plusieurs solutions.

La partie expérimentale a tenu dans ce séminaire une proportion importante des présentations qui a frappé les auditeurs.

On a vu côte à côte des technologies avec de forts soutiens scientifiques ayant déjà atteint une maturité considérable, et des travaux de pionnier dans des domaines divers où on était bien loin de la faisabilité scientifique.

Les travaux relatifs au stockage (partie artificielle) lui-même, aux perturbations créées sur toutes les zones naturelles, immédiates, proches, lointaines, sur les migrations et leurs conséquences demandent encore beaucoup de travaux, pour être en mesure de répondre à certaines questions, simples, malgré l'immense corpus de travaux scientifiques déjà effectués.

On est frappé par la diversité des établissements d'où sont issus les chercheurs et l'enthousiasme que ce projet d'aval du cycle soulève.

Ce projet nécessite une réunion de grands esprits. Nous les remercions de s'être déplacés souvent de loin et d'avoir préparé des exposés si intéressants.

**2. Quelques éléments**

**2.1. Combustible nucléaire [1]**

Le combustible nucléaire continue d'être facteur de progrès (C. Lemaignan [2]). Le *plutonium* et les problèmes qu'il soulève ont donné lieu à des exposés (Jae-II-Kim, H. Mouney [3], J.B. Thomas [4]) et des débats ouverts sur les avenir possibles.

**2.2. Séparations chimiques (C. Madic, B. Boullis et al. [5], et [6])**

Dans les domaines classiques, on peut considérer comme acquis, réalisé au cours de 40 ans d'activités, le retraitement du combustible nucléaire irradié (tant sous forme métallique que sous forme d'oxyde) : le premier lingot de plutonium métallique est sorti de UP1 en 1959. Aujourd'hui, on extrait industriellement, en routine dans le sens positif du terme, l'uranium des combustibles irradiés avec un taux de récupération de 99,93% et le plutonium avec un taux de récupération de 99,88% : cela a évidemment un coût en toutes sortes de conséquences. Sur les 850 tonnes annuellement retraitées pour EDF, ce qui reste de ces deux actinides est de 900 à 1000 tonnes d'uranium par an et de l'ordre de 8 tonnes de plutonium par an (cas de UOX1 avec un taux de combustion de  $33 \text{ GWj}\cdot\text{t}^{-1}$ ). Ce plutonium se retrouve hors des déchets vitrifiés. Les divers types de déchets sont traités en ligne.

Il a été expérimenté le *retraitement* du MOX : tous les aspects rencontrés à ce jour en sont résolus ou solubles.

L'iode 129 est piégé sous forme d'ions à 97% et rejeté à la mer. La dilution isotopique le disperse suffisamment vite pour que les études n'aient pas montré d'effets sur les organismes marins, à notre connaissance (compte tenu de sa longue demi-vie, 15,7 millions d'années, la radioactivité ainsi rejetée en mer, est relativement faible, de l'ordre de quelques millièmes de celle extraites chaque année à l'usine de retraitement. Il est techniquement possible de récupérer 99% de cet iode et d'en faire un autre usage. De toutes façons, cela aboutira plus loin à une dilution. Serait-elle moins favorable ? Rappelons que l'iode 129 naturel a été recherché en fond marin pour caractériser les dépôts d'hydrate de méthane accumulés sous des sédiments marins.

Durant les deux décennies qui viennent, on peut penser que le procédé de retraitement décrit ci-dessus, dit PUREX, inventé (« serendipity ») par l'équipe de Glen Seaborg, ne verra pas de transformations importantes. Durant cette période, on doit s'attendre à de nouveaux conditionnements des déchets B. On peut aussi penser que les verres nucléaires à haute température seront opérationnels.

Au-delà, une séparation chimique plus fine, disons plutôt un tri suivant le destin réservé à certains corps à individualiser pourrait être mise au point. Deux voies s'ouvrent : l'une en hydrochimie (disons la voie aqueuse) est branchée sur le procédé PUREX ; l'autre, pyrochimie, dont les potentialités, l'expérience internationale, mais aussi les difficultés sont grandes :

- Hydrochimie : la faisabilité scientifique, avec les expériences en milieu radioactif, dans les laboratoires chauds, avec la définition des procédés prouvée expérimentalement, est acquise. La mise au point des appareils au niveau de la production est en cours et sera démontrée en milieu actif pour 2006. Une « unité pilote » pourrait fonctionner durant les deux prochaines décennies. Enfin, on ne voit pas aujourd'hui d'obstacles à intégrer le tout dans une usine de retraitement.
- Pyrochimie : si des études fécondes sont menées dans ce domaine, il faut toutefois prendre soin du couplage des études de pyrochimie et de leurs objectifs précis dans l'ensemble de l'aval du cycle, d'une manière exhaustive (par exemple, transmutation par irradiation de cibles contenant des corps qu'on voudrait pouvoir « transmuter » ?). Cela pourrait être visé dans les deux décennies à venir pour la faisabilité scientifique et la faisabilité technique. Le passage éventuel à des unités pilotes serait plus lointain.

### 3. Conditionnements de mélanges de corps constituant des déchets

C'est un des succès de la technique française que la mise au point de formulations de verres pouvant accueillir des mélanges de corps, déchets nucléaires, comme par exemples les raffinats issus du procédé PUREX. Ainsi, PIVER a démarré en 1969, et ensuite l'Atelier de Vitrification de Marcoule-AVM. Il y avait ainsi un type de verre par catégorie de combustible : l'exemple le plus connu est le verre R7T7 (du nom des ateliers de l'usine de la Hague concernés) pour les éléments combustibles d'oxyde d'uranium UOX1. Ce verre a été très étudié, notamment sa tenue aux rayonnements que les corps contenus émettent, ainsi que sa lixiviation dans certaines conditions chimiques et sa tenue à très long terme par des expériences d'accélération des processus. Des concepts d'évolution dans la longue durée d'intégrité ont pu être mis au point et testés dans les conditions accélérées les plus variées.

Durant les deux décennies à venir, on pourrait disposer de verres à haute température, plus riche en silice et dont la tenue à long terme soit encore améliorée (aujourd'hui, une durée de l'ordre de 10 000 ans paraît établie). On vise à démontrer à l'échelle 1, expérimentalement (par accélération en laboratoire des processus d'évolution) des ordres de grandeur supérieurs (communication orale de E. Vernaz [7]) grâce à une meilleure maîtrise de la modélisation. Au delà, dans le cadre du retraitement encore plus sélectif (c'est évidemment pour ne pas tomber dans les espoirs jamais prouvé que j'évite tous les mots trop généraux tels que « retraitement poussé », etc., dont le passé a montré les ambiguïtés : comme, par exemple, « clean, cheap and plentiful »), les potentialités des verres et la maîtrise qu'on a démontrées peuvent faire espérer, pour les mélanges de corps, un verre qui soit un élément substantiel du confinement des déchets.

#### 4. Conditionnement des corps chimiques (mais pas isotopiques !) séparés

Des recherches intéressantes sont en cours, par exemple les composites apatitiques, l'influence des rayonnements alpha sur la guérison des dégâts d'irradiation, les guérisons thermiques des traces de fission dans les apatites, les possibilités de calcul, les dégâts d'irradiation dans les britholites par certains actinides par création de défauts. Donnons quelques chiffres (M. Fromont, C. Guy [8], J.P. Coutures, J. Carmona, G. Martin, etc.) : une particule alpha de 6 MeV crée 100 déplacements ; un noyau de recul de 0,1 MeV crée 2000 déplacements alors qu'un bêta supérieur à 0,5 MeV crée moins de 0,1 déplacement et un gamma de 2 MeV crée beaucoup moins encore de déplacements.

Arrêtons-là avec ces apatites après avoir dit leurs potentialités pour les actinides tri et tétravalents, les iodes, le césium, et la richesse des études entreprises. Mais, bien sur, d'autres conditionnements sont étudiés avec des potentialités fécondes, elles aussi.

#### 5. Analogues naturels

Les études de Cigar Lake démontrent, dans les conditions géologiques et tectoniques (absentes devrions-nous dire ?) du site le confinement de l'oxyde UO<sub>2</sub> dans ce minerai à teneur de 80% !!!

Les études de Oklo (F. Gautier-Lafaye [9]) continuent de dévoiler des phénomènes intéressants grâce aux chercheurs qui ont su continuer d'y travailler malgré les difficultés rencontrées. Toutefois, le comportement chimique des radio éléments créés à cette époque (1,95 milliards d'années, soit peu après la montée importante de l'oxygène dans l'atmosphère environ 2,5 à 2,2 milliards d'années b.p., ce qui a rendu ce dépôt d'uranite à 3,95% d'U<sup>235</sup> possible). La transposition aux conditions du laboratoire souterrain français est loin d'être directe ; disons modestement que l'étude d'Oklo renforce la confiance que l'on peut avoir sur les modélisations qui seraient comparables.

#### 6. Colis de déchets B et entreposage (M. Tallec [10], W. Fournier [11])

Les conditionnements des colis existant n'ont pas été faits pour « tenir » les déchets dans des stockages géologiques, dont d'ailleurs les conditions chimiques, hydrauliques, thermiques, mécaniques (des roches), géologiques, tectoniques, etc. étaient totalement ignorées à l'époque. Toutefois les matrices utilisées peuvent avoir des propriétés utiles pour le but maintenant plus focalisé, poursuivi. Leur tenue à long terme doit continuer d'être étudiée expérimentalement, évaluée pour les durées concernées par la radioactivité à un niveau significatif. De même, pour les colis nouveaux de coques et embouts (CSD C), l'étude, l'évaluation et la preuve de la tenue à long terme est en cours.

Pour ce qui est des déchets en vrac, il faudra les reprendre. En fin, tout cela exige des conteneurs ayant les qualités nécessaires pour la période dite d'entreposage, en attente du stockage définitif. Ces conteneurs seront la principale protection des travailleurs et du public concernés pendant cet entreposage, les manipulations et les transports ainsi que pendant le délai où le stockage restera ouvert (période de réversibilité).

#### 7. Tenue des verres et des éléments combustibles usés (W. Brewitz [12], P. Toulhoat [13], et [1])

Pour ceux-ci, le retour d'expérience en piscine est bon. Le passage éventuel à tel délai en entreposage à sec devra être testé et validé. Pour les verres, le retour d'expérience sur les décennies écoulées est excellent.

#### 8. Radionucléides dans le champ proche et le champ lointain d'un éventuel stockage géologique (M. Thury [14], G. de Marsily [15], J. Lancelot)

Parmi les éléments acquis ou en cours d'exploration ou encore en acquisition, notons :

- La compréhension du comportement simulé en laboratoire sur des « systèmes préparés ».
- La chimie des actinides à l'échelle macroscopique.

- La chimie en solution et aux interfaces solides et phases liquides avec leurs contenus a progressé depuis une dizaine d'années ; *beaucoup* reste à faire ; il suffit de lire les articles spécialisés des grandes revues internationales pour se rendre compte de la phase d'exploration expérimentale que les outils scientifiques nouveaux permettent pour explorer des phénomènes complexes, au lieu de se contenter comme dans trop de cas de simulations avec des facteurs scalaires globaux « ajustés » (comment ?). Aux faibles concentrations, les incertitudes sont liées à une chimie (redox par exemple) imposées par d'autres éléments.
- Les phénomènes liés aux colloïdes (« ultradivided matter ») posent de nombreux problèmes et compliquent encore une situation déjà très complexe.
- L'exploration des influences sur les phénomènes des matières organiques (très étudiées par les pétroliers) et d'organismes *vivants* unicellulaires en est, pour notre domaine, à ses débuts. Quant aux organismes supérieurs, les mesures du type *bilan* constituent souvent la phase principale des études en cours malgré tous les efforts des scientifiques concernés, qui voient bien les problèmes, mais n'ont pas les ressources nécessaires.
- Enfin, notons en résumant qu'on peut avec les perspectives scientifiques d'aujourd'hui, espérer modéliser les comportements et les phénomènes en champ lointain, avec toutefois, des inconnues, dont on ne voit pas le moyen de les encadrer, mais peut être négligeables. On pourrait ainsi espérer arriver à une simulation numérique convenable. Quant à la modélisation du champ proche, elle paraît aujourd'hui très (et même trop) compliquée et la simulation numérique souhaitée s'en ressent.
- Une perspective sur les deux décennies à venir se doit de mentionner tous les corps inertes cités ci-dessus en présence des processus biochimiques.

### 8.1. Structure du bassin de Paris

La structure du bassin de Paris a été présentée dans son vaste cadre par le professeur J. Dercourt dans un exposé qui a dominé ce colloque et où chacun sentait qu'il avait le privilège d'assister à ce qu'est une leçon inaugurale au Collège de France d'un niveau exceptionnel. Après une phase de fossé tectonique permo-carbonifère, le bassin de Paris a reçu une sédimentation très régulière à partir du trias. L'océan Thétys s'est ouvert progressivement dès 250 millions d'années mais surtout à partir de 160 millions d'années. Des épisodes d'incursions marines sur le continent se sont produits à plusieurs reprises ; c'est ainsi qu'une période de hautes eaux a permis l'accumulation de sédiments fins (argilite) pendant le callovo-oxfordien pendant environ 10 millions d'années.

L'activité sismique de ce bassin est faible, y compris dans le bassin permo-carbonifère de Sarre et de Lorraine. Les aquifères sont alimentés à partir des côtes et des dépressions sur la bordure Est du bassin.

Les travaux menés au laboratoire souterrain du Mont-Terri dans l'argile à Opalinus (Alénien) [14] apportent de précieuses informations sur l'hydrogéologie, la géochimie et la géomécanique de cette formation dont les caractéristiques sont assez proches de celles du laboratoire souterrain en cours de construction à Bure. Les conclusions de l'étude montrent que la *roche* du Mont-Terri pourrait confiner un stockage souterrain, étant bien clair que le site ne le permet pas.

### 8.2. Perméabilité des argiles

La perméabilité des argiles est très basse et aucune arrivée d'eau significative, n'a été observée, même dans une faille tectonique : l'eau contenue dans les pores de l'argiles est pratiquement immobile. Les radio nucléides éventuellement relâchés par lessivage ne peuvent migrer que par « diffusion » (j'emploie ce mot dans le seul sens de transfert dû à un gradient de concentration, n'ayant évidemment rien à voir avec la diffusion en milieu à loi de Fick). De plus, l'adsorption est telle que la couche épaisse de 40 mètres retiendrait la plus grande partie des radio nucléides. Un éventuel endommagement causé par le creusement des galeries pourrait amené un écoulement d'eaux souterraines. Toutefois, les possibilités de gonflement de l'argile sont telles que ceci devrait sceller ces fractures.

### 8.3. Eau

L'étude isotopique menée dans les carbonates et dans l'eau interstitielle des argiles du bassin de Paris conduit à penser que les eaux de formation ont évolué en système clos dans les argiles. Les mesures effectuées sur les isotopes du chlore et les gaz rares indiquent que les échanges entre les unités lithologiques sont faibles. Dans les calcaires de l'oxfordien qui surmontent la couche cible, on a seulement rencontré deux minces couches poreuses produisant de l'eau. Elle daterait de la première glaciation.

### 8.4. Perméabilité

La très faible perméabilité générale des carbonates situés au-dessus et au dessous des argiles s'explique par un processus de cimentation par des carbonates.

### 8.5. Migration

L'étude de la migration des solutions au travers de l'argile<sup>1</sup> et des aquifères (G. de Marsily et al. [15]) du bassin de Paris a été menée en utilisant des gaz rares comme traceurs. Les migrations vers les exutoires actuellement désignés sont en cours d'étude, par ailleurs.

### 8.6. Géologie

D'une manière générale, les sites de stockage sont choisis sur la base d'une *géologie calme*. Toutefois, les travaux d'excavation modifient l'état des contraintes existantes initialement et même, éventuellement quelques traits des écoulements des eaux souterraines.

Dans le cas de déchets dégageant une puissance résiduelle substantielle, l'influence de ce facteur et les transferts de chaleur, etc., qui en résultent peuvent apporter une autre perturbation substantielle au système naturel et au remplissage (barrière ouvragée).

### 8.7. Roche, sels, argiles, granites, tufs

Le professeur Fairhurst qui a bien voulu faire ce déplacement considérable depuis les États-Unis dans une période difficile, a discuté les mérites respectifs de chaque type de roche, sels, argiles, granites, tufs volcaniques tant pendant la période de construction et d'exploitation réversible que pendant une éventuelle période de fermeture définitive [16].

Les vertus du sel dans les environnements géologiques et tectoniques rencontrés en Allemagne ont été approfondis par le Professeur Brewitz qui en a montré les qualités, [12]. Celles des granites finno-scandiens, dans leur environnement géologique et tectonique, ont été précisées par C. Thegelström, [17].

## 9. Migration des radio nucléides

Quels sont les radio nucléides dont la migration (E. Simoni [18]) serait négligeable ? La durabilité visée et possible de la matrice (compte tenu de ce qui a été dit par le conférencier : 1 million d'années ???) et celle du conteneur (mêmes durés dit le conférencier concerné ???) « élimineraient » la plupart des radio nucléides : plus de 5 décades pour les PF et le même ordre de grandeur pour les actinides. C'est dire que ce qui resterait, Pu242, Np237 (attention !) I129, Cs135, Tc99, U238, ne ferait plus, en tout que de l'ordre de 40 000 à 100 000 Ci, c'est-à-dire de l'ordre de ce qui est dans l'ensemble des hôpitaux français aujourd'hui. Cependant, après la rupture de cette première barrière, certains éléments pourraient précipiter ou s'adsorber au voisinage des colis. Dans des conditions banales, l'environnement réducteur et modérément alcalin favoriserait l'immobilisation des cations trivalents et tétravalents, leur solubilité étant évaluée entre  $10^{-8}$  et  $10^{-10}$  moles. En particulier, les éléments les plus radio toxiques auront tendance à être piégés dès qu'ils seront relâchés par la matrice.

Dans des conditions oxydantes, au contraire (avant fermeture du stockage, ou en cas d'intrusion), certains de ces éléments comme l'uranium, le plutonium, le neptunium, etc. peuvent devenir plus mobiles.

Rappelons leurs possibilités de migrer sous forme colloïdale, bien que cela soit sans doute réservé à des zones plus perméables.

Quelques éléments (alcalins, halogènes) sont considérés comme plus mobiles dans la plupart des environnements. Cependant, certains éléments comme le césium peuvent coprécipiter avec des silicates de sodium ou de potassium ou s'adsorber sur les minéraux argileux. L'iode serait surtout sous forme d'iodure qui est retenu par la matière organique des sédiments. Ainsi, la plupart des radio nucléides ne migreront guère dans les circonstances banales, même après rupture de leur matrice et de leur conteneur, puisque leurs propriétés chimiques et les conditions d'environnement favorisent leur précipitation ou leur adsorption. C'est seulement dans des circonstances nouvelles que certains d'entre eux pourraient devenir plus mobiles.

## 10. Tritium, radium et les graphites irradiés

Les déchets contenant du tritium ou du radium, les graphites irradiés, ainsi que les déchets des mines d'uranium, etc., posent des problèmes spécifiques pour lesquels nous renvoyons aux exposés spécialisés (R.M. Atabek),...

Des solutions raisonnables sont en cours de développement.

Remarque : après tous ces travaux de sciences de la Terre dans les séances présidées par B. Tissot – C. Thegelström [17], J.M. Gras [19], Y. Brechet [20] – n'ayons garde de souligner que pour tous les points ci-dessus, quasiment partout, les problèmes de matériaux [1] dans des conditions notamment chimiques [6] sous rayonnement, diverses, constituaient la limitation des possibilités.

N'oublions pas également le rôle central de la *physique des réacteurs* et notamment de la neutronique, discipline où la France est au premier rang international grâce à des scientifiques comme M. Salvatores [21] qui a captivé son auditoire. Citons les travaux et les exposés de J.B. Thomas [4] et F. Carré.

## 11. Radiobiologie et d'épidémiologie (cf. [22,23])

Nous avons eu le privilège d'avoir le professeur Tubiana comme mentor pour voir l'état des problèmes de radiobiologie et d'épidémiologie (K. Trott, B. Dutrillaux, H. Métivier [24], R. Masse [25]). On ne dira jamais assez comme ces domaines sont les clés du futur du nucléaire, ni combien les ressources qu'on leur consacre sont dérisoires par rapport à celles octroyées aux travaux techniques.

## 12. Sûreté

La sûreté a été présentée à son meilleur niveau scientifique international. Remercions le professeur Birkhofer [26] de tout ce qu'il nous a dit au niveau scientifique éminent qui est le sien et de sa participation décisive à la préparation de ce colloque. C. Devillers [27] nous a mis au cœur de la sûreté des stockages et B. Pellaud [28] a su, dans le problème de prolifération où les polémiques sont trop souvent la règle, poser les questions pertinentes en termes scientifiques expérimentaux.

## 13. Conclusions

### 13.1. Le bilan du colloque

Nous pouvons assurer à nos concitoyens que les déchets enfouis en grande profondeur dans une couche géologique convenable, avec des matrices adaptées, des conteneurs efficaces, des barrières ouvragées spéciales et une dilution adaptée aux puissances résiduelles n'entraîneraient aucune conséquence pour leur santé et leurs descendants, en conditions normales, pour tous les avenir naturels prévisibles aujourd'hui.

Mais pourrait-on tout enterrer tel quel en en grande profondeur ? N'y a-t-il pas des phénomènes adverses ? Certains aspects en ont été mentionnés. Tout cela ne peut être explorés, validés, que progressivement. Les obstacles à franchir restent considérables et demanderaient des efforts bien focalisés.

Bien entendu, ces exposés n'ont traité que des aspects scientifiques, mais il y en a bien d'autres qui ne sont pas du ressort de ce colloque. Quant aux orientations d'ensemble du nucléaire, elle n'était pas du domaine de ce colloque scientifique, voué à la connaissance expérimentale actuelle, et dans cette conclusion du seul colloque, l'auteur qui n'est chargé que de la récapitulation du présent colloque, ne peut donc pas en parler.

### 13.2. Le cadre énergétique (cf. [29])

Je terminerai en disant :

- La photosynthèse (par la lumière issue des réactions thermonucléaires au centre du soleil, née rayons X dans la gamme d'énergie du keV, et après un random walk de diffusions, absorptions et ré-émission qui diminue son énergie jusqu'à la gamme de l'eV) a formé en quelques centaines de millions d'années par des processus naturels bien décrits dans le livre « Petroleum formation and occurrence » de B. Tissot, le pétrole, le gaz, sans compter le charbon, etc. La nature, par ses différents phénomènes en a érodé, détruit et en a fait disparaître une bonne partie. En peu de siècles une des espèces des primates, l'homo sapiens sapiens a détruit de l'ordre de la moitié de ce qui était récupérable pour elle (pour prendre le cas du pétrole ; disons un tiers pour le gaz). Sauf fait nouveau, nos petits enfants vivront sa raréfaction, excepté pour le charbon.

Les homo sapiens sapiens ont à leur disposition les quatre interactions :

- *L'interaction électromagnétique* (de l'ordre de 1 eV produit par atome à un facteur 10 près, suivant les cas) pour ce qui est de la chimie du vivant (la force des hommes et des animaux de charge et de trait qui existait encore dans ma jeunesse dans la quasi totalité de l'agriculture, des mines, etc.), des combustibles fossiles (on en a fait le point à l'académie des sciences le 23 avril 2001). Il reste le charbon. L'avenir apportera t-il des solutions ? De toutes façons, le prix en effet de serre accru ne tardera pas à être lourd et irréversible à l'échelle des durées humaines. Le photovoltaïque et toutes les utilisations possibles de l'énergie solaire. Bien sûr, il faut faire l'effort maximum pour arriver à effectuer ce que la nature fait dans les feuilles par exemple, et toutes les autres sources d'énergie électromagnétique.
- *L'interaction de gravité*. Elle est si relativement faible ( $10^{-36}$  fois l'interaction électromagnétique suivant les références prises) qu'il faut d'énormes barrages dont les conséquences pour les sites nouveaux pourront paraître dirimantes pour certains environnements.
- *C'est l'interaction faible* (qui apporte tous les durées de temps gênantes à l'échelles humaines des PF, des produits d'activation et de quelques actinides – Pu241 par exemple – le détriment biologique étant souvent le fait d'une autre interaction) qui fabrique le combustible thermonucléaire du soleil, par la réaction  $p + p = d + e + \text{neutrino}$  ; sa constante de temps, de l'ordre de la dizaine de milliards d'années commande la durée de vie du soleil dans sa phase actuelle et permet la réaction d'interaction forte du type simplifié et globalisé :  $D + D = \text{He}$ .
- *L'interaction forte* (dite nucléaire dans le passé) fournit de l'ordre du million d'électrons-volts par atome : *C'est ce facteur un million qui est toute sa supériorité vis-à-vis de l'interaction électromagnétique, donc la chimie, donc la combustion, donc toutes les formes d'énergie solaires, etc., nous a occupé durant tout ce colloque*. Une partie substantielle des problèmes qu'elle soulève a été domestiqué en 60 ans, par le biais de la *fission*,<sup>2</sup> sous la réserve très importante de la résolution des problèmes de l'aval du cycle, et de problèmes importants liés à la sûreté et à la radioprotection. Peut-on espérer que nos enfants, ou plutôt nos petits-enfants, en verront les solutions ?

<sup>1</sup> On montre ainsi que la « diffusion » est le mécanisme principal de migration de ces gaz dans les couches d'argile et que des mouvements de convection peuvent être importants dans des zones de failles.

<sup>2</sup> Cette conférence n'a pas traité la fusion thermonucléaire car elle a été traitée par une journée débat à l'académie le 3 avril 2000.

### Références bibliographiques

- [1] A. Zaoui, Rapport de l'académie des sciences n° 5.
- [2] C. Lemaignan, C. R. Physique 3 (2002) 763.
- [3] H. Mouney, C. R. Physique 3 (2002) 773.
- [4] J.-B. Thomas, C. R. Physique 3 (2002) 783.
- [5] C. Madic, M. Lecomte, P. Baron, B. Boullis, C. R. Physique 3 (2002) 797.
- [6] R. Guillaumont, Rapport de l'académie des sciences n° 4.
- [7] É.Y. Vernaz, C. R. Physique 3 (2002) 813.
- [8] C. Guy, F. Audubert, J.-E. Lartigue, C. Latrille, T. Advocat, C. Fillet, C. R. Physique 3 (2002) 827.
- [9] F. Gauthier-Lafaye, C. R. Physique 3 (2002) 839.
- [10] M. Tallec, J.-M. Capdevila, C. R. Physique 3 (2002) 851.
- [11] J.P. Martin, W.J. Fournier, C. R. Physique 3 (2002) 867.
- [12] W. Brewitz, U. Noseck, C. R. Physique 3 (2002) 879.
- [13] P. Toulhoat, C. R. Physique 3 (2002) 975.
- [14] M. Thury, C. R. Physique 3 (2002) 923.
- [15] G. de Marsily, J. Gonçalvez, S. Violette, M.-C. Castro, C. R. Physique 3 (2002) 945.
- [16] C. Fairhurst, C. R. Physique 3 (2002) 961.
- [17] T. Hedman, A. Nyström, C. Thegerström, C. R. Physique 3 (2002) 903.
- [18] E. Simoni, C. R. Physique 3 (2002) 987.
- [19] J.-M. Gras, C. R. Physique 3 (2002) 891.
- [20] Y. Bréchet, C. R. Physique 3 (2002) 915.
- [21] M. Salvatores, C. R. Physique 3 (2002) 999.
- [22] Rapport de l'académie des sciences n° 37.
- [23] Rapport de l'académie des sciences n° 38.
- [24] H. Métivier, C. R. Physique 3 (2002) 1035.
- [25] R. Masse, C. R. Physique 3 (2002) 1049.
- [26] A. Birkhofer, C. R. Physique 3 (2002) 1059.
- [27] C. Devillers, C. R. Physique 3 (2002) 935.
- [28] B. Pellaud, C. R. Physique 3 (2002) 1067.
- [29] Rapport de l'académie des sciences n° 8.

Robert Dautray  
Académie des sciences, 23, quai de Conti,  
75006 Paris, France  
*Adresse e-mail* : rfd@magic.fr  
(R. Dautray)