

N° 3491

N° 300

ASSEMBLÉE NATIONALE

SÉNAT

CONSTITUTION DU 4 OCTOBRE 1958

DIXIÈME LÉGISLATURE

SESSION ORDINAIRE DE 1996-1997

Enregistré à la Présidence de l'Assemblée nationale
le 2 avril 1997

Rattaché pour ordre à la séance du 27 mars 1997
Enregistré à la Présidence du Sénat le 2 avril 1997

OFFICE PARLEMENTAIRE D'ÉVALUATION
DES CHOIX SCIENTIFIQUES ET TECHNOLOGIQUES

RAPPORT

sur

LE CONTROLE DE LA SURETE ET DE LA SECURITE
DES INSTALLATIONS NUCLEAIRES

par

M. Claude BIRRAUX,
Député

Tome II :
Annexes, compte rendu de l'audition publique

Déposé sur le Bureau de l'Assemblée nationale
par M. Robert GALLEY,
Président de l'Office.

Déposé sur le Bureau du Sénat
par M. Henri REVOL,
Vice-Président de l'Office.

TABLE DES ANNEXES

Annexe 1

Une vision de la maintenance des réacteurs électronucléaires dans quelques pays étrangers.....	3
1. Exploitants et centrales : une présentation rapide.....	4
1.1 Vattenfall et la centrale de Ringhals (Suède).....	4
1.2 IVO et la centrale de Loviisa (Finlande).....	5
1.3 Commonwealth Edison et la centrale de Zion (États-Unis, Illinois).....	8
1.4 Entergy Operations et la centrale de Waterford-3 (États-Unis, Louisiane).....	8
2. L'encadrement réglementaire.....	9
2.1 Dans les pays nordiques, une réglementation essentiellement fondée sur la notion de qualité.....	9
2.1.1 Le système suédois semble assez proche du système français.....	9
2.1.2 Le système finlandais consacre des développements plus spécifiques à la maintenance.....	11
2.2 Aux États-Unis, une réglementation essentiellement fondée sur le risque.....	13
3. La politique de maintenance chez les exploitants nucléaires visités.....	16
3.1 Une même volonté d'optimiser le contenu des opérations de maintenance.....	16
3.1.1 Une attention soutenue pour la maintenance chez les exploitants nordiques.....	16
3.1.2 La « culture de maintenance », une perle rare dans le nucléaire américain ?.....	16
3.2 Un recours constant aux prestataires, avec plus ou moins d'intensité.....	20
3.2.1 La forte présence des services internes chez Vattenfall.....	20
3.2.2 Un recours important à la sous-traitance chez IVO.....	21
3.2.3 Une gestion peu ordonnée des prestataires à la centrale de Zion.....	22
3.2.4 Une politique « prestataires » apparemment maîtrisée chez Entergy.....	23
3.3 La maîtrise des arrêts de tranche : un combat universel.....	26
3.3.1 L'objectif de réduction de la durée des arrêts est un dénominateur commun.....	26
3.3.2 Les exploitants mettent l'accent sur la préparation-planification et l'efficacité des organisations par projet.....	27
3.3.3 Les exploitants américains recourent de façon croissante à la maintenance en fonctionnement (maintenance <i>on line</i>).....	31
3.4 La protection radiologique des travailleurs : rigueur et efficacité.....	32
3.4.1 Le principe ALARA est très largement diffusé.....	32
3.4.2 La surveillance et le suivi dosimétrique des travailleurs sont diversement efficaces.....	36
4. L'opinion du Français.....	39
Annexe 2	
L'évaluation globale de sûreté d'un CNPE : le cas de Saint Alban (novembre 1996).....	41
1. Les principes généraux de l'évaluation.....	41
1.1 L'évaluation de sûreté effectuée par l'Inspection nucléaire s'intègre à un dispositif d'ensemble du parc nucléaire.....	41

1.2 L'évaluation de sûreté répond à de nombreux objectifs	42
1.3 L'équilibre de l'évaluation repose sur des responsabilités partagées	43
1.3.1 L'équipe de l'Inspection nucléaire est garante de la qualité de l'évaluation	43
1.3.2 Le site oeuvre à la réussite de l'évaluation par une collaboration ouverte	44
2. La méthode et le déroulement de l'évaluation de sûreté.....	45
2.1 L'évaluation repose sur une méthode d'où l'on s'efforce de bannir le subjectif.....	45
2.1.1 Le champ de l'évaluation est établi de façon exhaustive.....	45
2.1.2 Des référentiels encadrent l'évaluation pour chaque domaine étudié.....	46
2.1.3 Les guides d'évaluation proposent une grille d'investigation sur le terrain	47
2.2 L'évaluation se déroule selon un ordonnancement très précis.....	48
2.2.1 La phase de préparation vise à bien orienter les investigations.....	48
2.2.2 La réalisation sur site privilégie le recueil des faits au plus près du terrain	49
2.2.3 L'analyse se solde par l'élaboration de multiples rapports	51
3. L'Inspection nucléaire à la croisée des chemins	53
Annexe 3	
Planning des arrêts du parc EDF pour 1997 et 1998.....	55
Annexe 4	
Gestion de la saisonnalité des arrêts de tranche chez Framatome	57
Annexe 5	
« Pourquoi faut-il désigner le sous-traitant dans l'offre ? » (manifeste adressé aux parlementaires par le Syndicat national du Second Oeuvre, à l'occasion de la réforme du Code des marchés publics).....	63
Compte rendu de l'audition ouverte à la presse	
« Le projet de réacteur-accelérateur du Pr. Carlo RUBBIA »	67

UNE VISION DE LA MAINTENANCE DES REACTEURS ELECTRONUCLEAIRES DANS QUELQUES PAYS ETRANGERS

Fidèle à une habitude désormais bien établie, j'ai entrepris de compléter les investigations approfondies concernant la maintenance des réacteurs électronucléaires d'EDF par quelques aperçus sur les pratiques de certains exploitants étrangers. J'avais conscience dès le début que les missions correspondantes ne me permettraient pas de « saisir » aussi finement qu'en France les problèmes subtils et complexes des politiques de maintenance. Il est impossible de décrypter le formel et l'informel en quelques jours seulement.

Je me suis néanmoins lancé dans l'entreprise, en me limitant à des réacteurs à eau sous pression et en effectuant parmi ceux-ci une sélection arbitraire mais réfléchie :

- chez deux exploitants scandinaves (Vattenfall et IVO), je cherchais à voir si la réputation générale de sérieux et d'efficacité qui leur est attachée se trouvait aussi dans le domaine de la maintenance ; la brièveté des arrêts de tranche ne laissait pas non plus de m'intéresser ;
- chez deux exploitants américains, je cherchais à voir dans quelle mesure pouvait jouer un « effet parc » sur : 1/ un ensemble de réacteurs assez important et relativement homogène (*Commonwealth Edison* : 6 REB et 6 REP) ; 2/ un parc réduit et disparate (*Entergy Operations* : 1 REP Babcock & Wilcox, 2 REP Combustion Engineering, 2 REB General Electric) ; ce même choix permettait également — d'après la lecture sur quelques années de *Nucleonics Week* — de visiter un exploitant « à problèmes » et un autre jugé performant.

Ces principes posés, c'est cependant sans *a priori* que je me suis rendu sur les quatre sites sélectionnés avec l'aide des services scientifiques ou nucléaires de nos ambassades concernées. J'ai bien entendu élargi mes investigations hors des seuls exploitants, en visitant systématiquement les autorités de sûreté — y compris les échelons régionaux et locaux lorsqu'ils existent — et certains industriels.

1. EXPLOITANTS ET CENTRALES : UNE PRESENTATION RAPIDE

1.1 Vattenfall et la centrale de Ringhals (Suède)

Fondé en 1909 pour coordonner le développement des ressources hydroélectriques nationales puis leur interconnexion *via* un réseau très haute tension, l'établissement public dénommé *Swedish State Power Board* a été transformé en société anonyme en janvier 1992 et a changé de nom au début de 1993. Vattenfall est aujourd'hui une société publique qui produit près de 50% de l'électricité nationale (soit environ 80 TWh), ce qui en fait bon an mal an le cinquième électricien d'Europe occidentale. En 1995 la production s'est répartie à hauteur de 46 TWh pour le nucléaire ⁽¹⁾ et 33 TWh pour l'hydroélectricité.

Confronté à la déréglementation totale du marché de l'électricité au 1^{er} janvier 1996, l'électricien a poursuivi une politique de réduction de coûts (et de personnel) entamée il y a quelques années. Il a également engagé une diversification géographique depuis 1994 (implantations et contrats en Finlande, Norvège, Danemark, Pologne, Extrême-Orient, Allemagne) bien que l'essentiel de son marché reste en Suède. Vattenfall a pareillement profité de l'ouverture du marché pour acheter plusieurs compagnies de distribution en Suède comme dans d'autres pays nordiques.

La centrale de Ringhals, située sur la côté ouest du pays, près de Göteborg, accueille 4 réacteurs exploités par 1200 personnes. Ringhals-1 est un réacteur à eau bouillante de 800 MW construit par ABB et mis en service industriel en janvier 1976 ; les trois autres sont des REP Westinghouse d'environ 900 MW, mis en service industriel en mai 1975, septembre 1981 et novembre 1983. Le démarrage de Ringhals-3, possible dès 1978, a été retardé à cause de l'accident de Three Mile Island puis du référendum qui a eu lieu en 1980.

Les quatre unités de production ont été totalement décentralisées depuis le 1^{er} avril 1996. Elles sont responsables de la production, de la sûreté, de la gestion du combustible, de la planification des activités à long terme, de la planification des arrêts de tranche, de la gestion générale ; elles gèrent également leur propre personnel (services de conduite, de maintenance, de chimie, de radioprotection, etc.). Plusieurs services opérationnels restent communs à tout le site : service médical, ingénierie de conception et de modification, soutien à la production. Six services fonctionnels achèvent de structurer la centrale : soutien au management (service RC), technologies de l'information (RD), finances (RE), ressources humaines (RH), information et relations publiques (RI), sûreté-qualité-environnement (RQ).

Le service Sûreté-Qualité-Environnement a pour mission de préparer les politiques du site, la décision appartenant au comité de direction. Il est divisé en 4 départements : assurance qualité (RQA), environnement nucléaire, non nucléaire et sécurité industrielle

¹ Ce chiffre inclut la production complète de Forsmark alors que Vattenfall n'en détient qu'environ 75%. Pour avoir la production revenant réellement à Vattenfall il faut retrancher 6,6 TWh appartenant aux actionnaires minoritaires de Forsmark.

(RQM), gestion du risque (RQR), sûreté nucléaire (RQS). Ce dernier est le plus important au plan numérique.

La centrale de Ringhals est jumelée avec Cruas 3-4, ce qui donne lieu à quelques rencontres et échanges annuels. Ringhals entretient également des liens avec le *Westinghouse Owners Group*, l'INPO, la NRC, les exploitants finlandais, les autres REB suédois, etc.

Ces dernières années la vie de la centrale a été marquée par le remplacement des générateurs de vapeur de Ringhals-2 en 1989 puis sur Ringhals-3 en 1995. Le couvercle de cuve de Ringhals-2 a également été changé en 1996. Ringhals-4 a échappé jusqu'ici à ces opérations coûteuses et lourdes : le choix des matériaux a été excellent et la chimie a été modifiée (sur tous les réacteurs) quelques mois seulement après la mise en fonctionnement du réacteur, m'ont indiqué mes interlocuteurs.

1.2 IVO et la centrale de Loviisa (Finlande)

Constituée autour de 2 réacteurs à eau sous pression, la centrale de Loviisa a des caractéristiques particulières qui en font une centrale à part dans le monde occidental. Son exploitant, IVO (*Imatran Voima Oy*), s'intègre quant à lui parfaitement dans le paysage électrique des pays baltiques. Le marché électrique finlandais est ouvert à la concurrence depuis novembre 1995. Il est partagé entre TVO et la grande industrie, qui assurent au total 40% de la production nationale (24,2 TWh), IVO et ses participations qui comptent pour 37% (22,4 TWh) et les autres producteurs pour 23%.

En 1995 l'approvisionnement électrique d'IVO reposait sur sa production propre (15,8 TWh : nucléaire, hydroélectricité, etc.), sa quote-part dans les centrales en participation (5,9 TWh), les importations (7,8 TWh) et un solde résiduel de 0,9 TWh.

Le « groupe IVO » exerce des activités diversifiées : production d'électricité et de chaleur (*Power & Heat Generation Division*, qui regroupe IVO proprement dite et des filiales étrangères) ; ingénierie (IVO International et filiales étrangères) ; services industriels (*IVO Generation Services* : exploitation et maintenance de centrales finlandaises ou étrangères) ; gestion de réseau électrique (IVO Transmission Services) ; distribution électrique ; activités diverses.

La centrale de Loviisa est placée sous la responsabilité totale de la *Power & Heat Generation Division* : elle échappe à la tutelle de *IVO Generation Services*. Le directeur du site rapporte directement à un membre du conseil d'administration d'IVO Group. La division de maintenance rassemble près de 220 personnes, la division des services techniques en compte 55, tandis que la division d'ingénierie est une toute petite structure. La majorité des compétences d'IVO en ingénierie ont en effet été rassemblées dans la société IVO International car le marché finlandais était jugé trop étroit pour permettre de garantir l'acquisition, le maintien et la valorisation des compétences d'ingénierie nécessaires aux centrales d'IVO, et en particulier celle de Loviisa. Par ailleurs, pour des questions ponctuelles, IVO n'hésite pas à faire appel à des ingénieristes étrangers.

Un comité de sûreté-qualité rapporte directement au conseil d'administration. Ses membres sont nommés *intuitu personae* et ne représentent pas les organisations auxquelles ils appartiennent ; ils doivent être choisis pour moitié au moins hors de la centrale de Loviisa. Par ailleurs un directeur de la qualité (sans services placés sous ses ordres) rapporte auprès du vice-président responsable de la *Power & Heat Generation Division*.

La principale particularité de Loviisa réside dans deux faits : 1/ la centrale est construite autour d'un modèle de réacteur VVER-440 conçu par l'industrie soviétique ; 2/ le projet a été piloté par les Finlandais dans le cadre d'une vaste coopération internationale qui a associé « l'Est et l'Ouest ». C'est ainsi que :

- en matière d'administration du projet, IVO a assuré la coordination générale, le planning, l'assurance qualité, l'élaboration des rapports de sûreté ; les sociétés suisses Elektrowatt et Brandenberger & Ruosch ont été consultants généraux pour la conception et la réalisation de la centrale ;
- pour les travaux, IVO a assuré l'architecture générale du site, le dessin des plans, la conception des blocs-structures ; des prestataires finlandais ont construit les bâtiments ; Atomenergoexport (AEE), société russe d'ingénierie et construction nucléaire, a construit la charpente métallique de la salle des machines ;
- AEE a assuré la conception générale des systèmes, process et équipements ; IVO a coordonné l'ensemble des travaux de conception et effectué l'analyse technique des solutions retenues ainsi que l'évaluation de l'impact sur l'environnement ; Westinghouse a conçu le condenseur à glace (système de mitigation des accidents graves) ; le VTT (Centre de Recherches scientifiques et techniques de Finlande) a effectué diverses études techniques ainsi que les tests des matériaux ;
- en matière de composants mécaniques, AEE a fourni les équipements principaux (cuve, générateurs de vapeur, turboalternateurs, systèmes de traitement des déchets, tuyauteries majeures) et en a assuré l'installation en liaison avec des prestataires locaux ; l'industrie finlandaise a fourni et installé les pompes primaires, la machine de rechargement du combustible, le condenseur à glace, le conditionnement d'air, etc. ; le contrôle de qualité était assuré par IVO, une société russe (TPP) et les prestataires finlandais ;
- en matière d'équipements électriques et d'instrumentation, IVO a assuré le travail de conception, AEE a fourni le système de protection du réacteur, Siemens et KWU ont fourni l'essentiel des équipements de surveillance et de contrôle, ainsi que de nombreux automatismes ; les fournisseurs finlandais ont construit tout ce qui relevait de la partie « électricité sous haute tension » ; divers équipements ont été importés : ordinateurs (Royaume-Uni), diesels (France), instrumentation du coeur (Canada), diverses vannes (Allemagne, États-Unis) ;

— enfin AEE a assuré la formation initiale des opérateurs et les essais de démarrage.

En définitive, IVO a composé d'une heureuse façon avec le contexte politique à l'époque de la construction : acceptant un modèle de réacteur rustique et très tolérant aux événements perturbateurs, l'électricien a adjoint à ses qualités intrinsèques de nombreux apports « occidentaux » : redondance poussée (trains $4 \times 100\%$ et trains $2 \times 100\%$), séparation physique des systèmes redondants, systèmes additionnels de sauvegarde (aspersion d'enceinte, eau alimentaire des générateurs de vapeur, condenseur à glace, etc.). Enfin une ligne électrique a été tirée vers une centrale hydroélectrique proche de façon à pallier la défaillance des diesels.

Entrés en service en 1977 et 1981, les deux réacteurs de 445 MWe nets ont connu une carrière sans histoire. Dès 1980 pour Loviisa-1 et 1981 pour Loviisa-2 les assemblages périphériques ont été remplacés par des assemblages factices en acier afin de réduire la fragilisation neutronique de la cuve ; de 1977 à 1979 la puissance de fonctionnement de Loviisa-1 a été réduite de 30% car l'autorité de sûreté n'était pas convaincue de la qualité du combustible fourni par AEE. Suite à la découverte de défauts dans quelques tubes de générateurs de vapeur une inspection exhaustive a été conduite en 1980 qui a débouché sur quelques réparations ; 2 tubes seulement ont été bouchés sur les deux réacteurs ⁽²⁾. En août 1996 un recuit de cuve a été conduit avec succès sur Loviisa-1 afin de redonner à l'acier de la cuve toutes les caractéristiques voulues en termes de ductilité.

Les évaluations probabilistes de sûreté indiquent que la sûreté, mesurée par le risque de fusion du coeur, s'est constamment améliorée de 1989 à 1993 ; elle a légèrement décliné en 1993-94 à cause de la prise en compte d'un nouveau risque (dilution du bore).

Une augmentation de la puissance nominale de plusieurs pour-cent a été accordée en 1996 et la centrale effectue au premier trimestre 1997 une série de tests de validation. Elle se prépare également pour un renouvellement d'autorisation lors de l'année 1998. La gestion du combustible a fait l'objet de modifications substantielles ces toutes dernières années. Assurée au plan administratif par la *Power & Heat Generation Division*, elle est complétée au niveau de la centrale par des contrôles techniques de qualité et de conformité. Loviisa a souhaité se dégager de l'emprise d'AEE sur le cycle du combustible. La centrale a lancé en 1995, avec la collaboration de BNFL et d'IVO International un projet de diversification du combustible. Ce projet a une double vocation :

- développer la concurrence sur la fourniture des assemblages ;
- modifier les caractéristiques techniques du combustible, qui sont restées quasiment identiques depuis le lancement des VVER-440.

² Chaque réacteur abrite 6 générateurs de vapeur, qui comportent chacun environ 500 tubes. Rappelons que chaque générateur de vapeur du palier 900 MW comporte environ 3300 tubes, 5300 tubes pour ceux du palier 1300 MW et 5600 tubes pour les GV du palier N4 (1450 MW).

Quatre assemblages tests ont été chargés en 1996. Plus important, les deux électriciens finlandais exploitant des centrales nucléaires sont désormais obligés de rechercher sur le sol national un site de stockage pour les combustibles irradiés sortis des réacteurs. Ceux-ci étaient auparavant pris en charge par l'usine de retraitement de Mayak (Russie) après un séjour d'environ 5 ans dans les piscines de Loviisa. Le premier rapatriement de combustibles irradiés a eu lieu pendant l'été 1981, et les voyages successifs se sont déroulés au rythme de un par an. La loi actuelle interdit aujourd'hui l'exportation du combustible ; la construction d'une usine de retraitement étant irréaliste en Finlande, IVO et TVO ont lancé en 1996 un projet commun pour chercher un site de stockage définitif. Le site envisagé serait situé sur la presqu'île de Loviisa ; les exploitants espèrent pouvoir le proposer formellement au gouvernement aux environs de l'an 2000.

1.3 *Commonwealth Edison* et la centrale de Zion (États-Unis, Illinois)

Commonwealth Edison (ou ComEd) est un exploitant nucléaire « de poids ». Avec un chiffre d'affaires annuel de 6 Md\$ environ, il alimente près de 3,3 millions de clients représentant 8 millions de personnes, dont la ville de Chicago, et emploie 17 000 personnes. Le nucléaire représente 50% de sa capacité de production (43% pour le charbon et 7% de moyens de pointe) mais 70 à 80% de la production effective.

Douze réacteurs sont en fonctionnement, pour une capacité totale de 11 MW, soit 10,5% de la capacité nucléaire américaine ; comme je l'ai indiqué plus haut, le parc de ComEd se répartit à parts égales entre 6 REB (General Electric) et 6 REP (Westinghouse). Le plus ancien (Dresden-2) a divergé en janvier 1970 alors que le plus récent (Byron-2) a divergé en janvier 1987. Dresden-1, réacteur bouillant de 200 MWe couplé au réseau en 1960, était le premier réacteur nucléaire au monde entièrement « commercial », financé par des intérêts privés ; il a été arrêté définitivement en 1984 après que ComEd a constaté l'impossibilité de répondre, à un coût acceptable pour l'exploitant, aux exigences de sûreté de la NRC renforcées après l'accident de TMI. Les douze réacteurs emploient près de 6000 personnes, ce qui est peu au regard de la moyenne américaine et se compare favorablement aux chiffres concernant EDF.

Située au bord du lac Michigan — qui lui sert de source froide — à environ 80 km au nord de Chicago, la centrale de Zion accueille deux réacteurs Westinghouse de 1040 MWe nets (4 boucles de refroidissement), construits en un peu plus de 5 ans pour un coût inférieur à 450 M\$, c'est-à-dire particulièrement intéressant en comparaison avec les « standards » américains. Commandés en 1968 dans un contexte local fortement marqué par les préoccupations concernant la pollution atmosphérique dans la zone urbaine de Chicago, les réacteurs ont divergé en juin et décembre 1973. Leur performance globale reste modeste, avec un facteur de charge moyen de 57% et 59% respectivement sur leur durée de vie ; ainsi les réacteurs de Zion ne font pas mieux que leurs homologues exploités par d'autres compagnies.

1.4 *Entergy Operations* et la centrale de Waterford-3 (États-Unis, Louisiane)

Au début des années 80, plusieurs exploitants nucléaires du Sud américain se proposent de réunir leurs moyens de production afin de faire des économies d'échelle.

Arkansas Power & Light Company, Louisiana Power & Light Company, Mississippi Power & Light Company et *New Orleans Public Service Inc.* signent un accord prévoyant le partage de leurs capacités de production et de leurs autres ressources électriques ; cet accord devient effectif le 1^{er} janvier 1983. Peu après les actionnaires de ces compagnies fusionnent leurs actifs dans une nouvelle société appelée *Middle South Utilities* puis *Entergy Corporation* ; les *utilities* originelles deviennent des filiales de ce *holding*.

Jusqu'ici ces mouvements sont essentiellement des recompositions capitalistiques, sans véritable exploitation commune des moyens de production. En mai 1988, le *holding* propose que les réacteurs nucléaires des *utilities* soient exploités par le biais d'une seule compagnie spécialisée. La création d'*Entergy Operations* doit passer sous les fourches caudines des multiples autorités réglementant le secteur de l'électricité (FBRC, *Public Utilities Commission* dans chaque État concerné, NRC, SEC) ; elle aboutit à la mi-1990. Enfin *Entergy Corporation* fusionne en 1993 avec *Gulf States Utilities Company*, qui amène dans l'escarcelle de la nouvelle société le réacteur de Grand Gulf-1. D'après les informations en provenance de la NRC, les autorisations délivrées au titre de l'exploitant nucléaire ont été transférées au nom d'*Entergy Operations* ⁽³⁾.

La centrale de Waterford-3 est située sur le Mississippi, à une quarantaine de kilomètres en amont de la Nouvelle Orléans. Elle est flanquée de deux unités de production utilisant des combustibles fossiles, ce qui explique le numéro 3 porté par le réacteur nucléaire. Le réacteur de 1100 MWe nets (2 boucles de refroidissement) a été fourni par *Combustion Engineering* et a divergé en 1985. Le site emploie directement un peu plus de 600 personnes et héberge environ 140 personnes relevant de la société mère *Entergy Corporation*.

2. L'ENCADREMENT REGLEMENTAIRE

Les informations fournies dans les paragraphes suivants proviennent des entretiens conduits lors des missions, des divers documents ramenés à cette occasion ainsi que d'un document de synthèse établi en 1991 par le Comité de Sécurité des Installations nucléaires de l'AEN-OCDE, qui m'a été obligeamment transmis par J. ROYEN, de la division « Sécurité nucléaire » ⁽⁴⁾.

2.1 Dans les pays nordiques, une réglementation essentiellement fondée sur la notion de qualité

2.1.1 Le système suédois semble assez proche du système français

En Suède, la loi exige que la sûreté dans les activités nucléaires soit assurée en prenant les mesures requises pour prévenir les défaillances ou les erreurs dans les équipements, les manipulations incorrectes ou quoi que ce soit qui pourrait résulter en un

³ Elles concernent donc désormais les réacteurs suivants : Arkansas Nuclear One 1 et 2, Grand Gulf-1, River Bend-1, Waterford-3.

⁴ Comité de Sécurité des Installations nucléaires, *International Practices for Analyzing, Regulating and Improving Human Performance of Maintenance Activities at Nuclear Power Plants*, AEN-OCDE, rapport NEA/JCSN/R(91)6, octobre 1991.

accident radiologique ⁽⁵⁾. Le gouvernement ou l'autorité ayant reçu délégation du pouvoir gouvernemental peut édicter des dispositions plus détaillées sur les mesures en question. En particulier, l'article 8 de la loi nucléaire dispose que *"lorsqu'une autorisation est accordée [à un exploitant nucléaire], ou pendant la durée de validité d'une autorisation, des conditions visant la sûreté peuvent être imposées à l'exploitant"*.

C'est sur cette base législative que le SKI, autorité de sûreté, a adopté en 1984 une réglementation *"pour l'assurance de la qualité dans les installations nucléaires"* qui s'apparente à l'arrêté Qualité français de 1984. On y trouve les mêmes exigences générales sur les activités concernées (dites *"activités qui affectent le niveau de qualité"*), la documentation et la traçabilité des actions, le respect des obligations légales et réglementaires générales, les implications en termes de responsabilité, etc.

Les principales dispositions relatives à la maintenance sont inscrites dans les paragraphes 10 et 11 : le système de qualité doit garantir que la nécessaire qualité des équipements et des activités est réalisée et qu'elle est vérifiée selon des procédures établies et documentées. De même le système de qualité doit garantir que tous les équipements sont inspectés et entretenus continûment et de façon appropriée selon des procédures établies et documentées.

Par ailleurs une réglementation spécifique aux appareils à pression, édictée elle aussi par le SKI, reprend les exigences de tests réguliers, de surveillance continue et d'entretien suffisant pour garantir la sûreté de ces appareils. D'autres exigences réglementaires concernent la qualification et l'habilitation des personnels de maintenance, la formation, etc. ; elles sont toujours formulées de façon très générale et imposent seulement à l'exploitant de prendre des dispositions appropriées dans ces domaines, de façon à garantir la sûreté et la qualité

Enfin le SKI a défini des « politiques » vis-à-vis des exploitants, par exemple en matière de maintenance corrective : après tout arrêt, planifié ou non, l'étendue de tous les défauts découverts, qui seraient considérés comme importants au regard de la sûreté, doit avoir été déterminée avec une précision acceptable ; les mécanismes ayant provoqué ces défauts doivent avoir été compris, au moins dans la mesure où on doit pouvoir prévoir l'évolution de ces défauts ; etc.

On voit que, au premier abord, la réglementation suédoise est assez proche de la réglementation française, dans ses principes et son ordonnancement. Cependant le SKI n'a pas le pouvoir pour approuver ou refuser le programme d'arrêt qui lui est obligatoirement présenté par l'exploitant avant l'arrêt. L'autorité peut seulement poser des questions à l'exploitant et lui demander des justifications complémentaires. D'ailleurs de nombreuses réunions techniques ont lieu avant l'arrêt pour discuter en amont des questions importantes. En revanche cette relative impuissance *a priori* est contrebalancée par la faculté laissée au SKI de formuler des conditions particulières au redémarrage de la tranche, ainsi que la latitude d'action naturelle en cas d'événement fortuit pendant l'arrêt, ce qui n'est pas rare.

⁵ Nuclear Activities Act, 1984.

Je dois signaler également que le SKI a engagé il y a quelques années un processus visant à mieux formaliser les critères d'évaluation des politiques et programmes de maintenance. Il a fait appel au *Battelle Institute* de Seattle, qui devait répondre à 3 questions : quels sont les fondements d'une organisation pro-active et orientée vers la sûreté ? quelles sont les caractéristiques d'un programme de maintenance réussi ? quelles sont les activités-clefs ou les éléments essentiels dans un programme de maintenance sûr et efficace ? Ce processus a débouché sur la rédaction d'un guide d'évaluation de la maintenance et d'un livre de référence de maintenance, qui sont désormais utilisés par les inspecteurs dans leur travail quotidien.

Cette démarche rejoint la préoccupation plus globale du SKI tendant à mieux apprécier les déterminants de la sûreté relevant du facteur humain. En particulier l'autorité cherche, comme le fait l'IPSN avec les travaux de C. AUFORT et ses collègues du DES, à comparer la façon dont la qualité est écrite (le « système formel ») et la façon dont elle est vécue sur le terrain : *"il apparaît parfois que le vécu est plus astucieux et plus efficace que le système formel"* m'indiquait I. BLOM, du département Facteurs humains.

Au total, le SKI voit plusieurs avantages à la formalisation de son système d'évaluation. Il lui donne une base pour déterminer où le programme de maintenance de l'exploitant doit s'améliorer et où il est en cours d'amélioration ; il donne une indication au SKI et à l'exploitant sur les points où il est nécessaire de concentrer des ressources (humaines et financières) ; il leur permet une compréhension commune des éléments et actions qui constituent un programme de maintenance efficace.

2.1.2 Le système finlandais consacre des développements plus spécifiques à la maintenance

Comme je l'indiquais dans mon rapport 1990, la loi ⁽⁶⁾ a partagé entre deux acteurs principaux le pouvoir d'autorité en matière nucléaire :

- le Ministère de l'Industrie assume — en particulier au regard de leur éventuelle traduction législative — les compétences en matière de développement de l'énergie nucléaire, de gestion des déchets, de traduction interne des engagements internationaux de la Finlande, etc. ;
- placé sous l'autorité du Ministère des Affaires sociales et de la Santé, le STUK contrôle l'utilisation de l'énergie nucléaire et des sources de rayonnements.

La Finlande a donc fait le choix de regrouper en un seul organisme les autorités de sûreté et de radioprotection. Pour autant, une partie de la réglementation générale applicable aux installations nucléaires est prise directement par le gouvernement (« Conseil d'État »), sur rapport du Ministre de l'Industrie. C'est ainsi que le Conseil d'État a adopté en 1991 quatre « décisions » portant réglementation générale sur la sûreté des centrales nucléaires, la sûreté d'une installation de stockage des déchets issus des

⁶ Je devrais dire plus exactement les lois : *Nuclear Energy Act* (1988), *Radiation Act* (1991), *Pressure Vessels Act* (1973), *Third Party Liability Act* (1972), *Act on the Finnish Center for Radiation and Nuclear Safety* (1983), avec chacune leur décret d'application associé.

réacteurs nucléaires, la protection physique des centrales nucléaires, la préparation aux situations d'urgence dans les centrales nucléaires.

La première de ces décisions comporte un paragraphe spécialement consacré à *"l'exploitation et la maintenance"* dans les centrales nucléaires. Il est dit dans son deuxième alinéa que *"l'exploitation fiable des composants et systèmes doit être garantie par une maintenance adéquate ainsi que par des inspections en service et des essais périodiques effectués sur une base régulière."* A côté de cette prescription générale, on trouve mention d'exigences de maintenance dans d'autres paragraphes de la décision gouvernementale : il est dit par exemple que *"des procédures appropriées doivent exister pour l'exploitation, la maintenance, les inspections en service et les essais périodiques"* ; la décision exige également que *"les systèmes qui assurent les fonctions de sûreté les plus importantes doivent être capables d'accomplir ces fonctions même si un composant individuel dans l'un quelconque de ces systèmes se trouve défaillant et que, simultanément, un composant affectant la fonction de sûreté se trouve hors d'usage du fait de réparations ou d'une opération de maintenance"*. Enfin, bien évidemment le contenu du paragraphe 4, qui traite de l'assurance de la qualité, trouve à s'appliquer au domaine plus particulier de la maintenance.

Comme cela est confirmé par la lecture de son texte entier, la « décision », prise au niveau du Conseil des Ministres, ne se contente donc pas d'établir une règle générale de procédure entre l'autorité et l'exploitant. Elle fixe des exigences au contenu technique déjà très conséquent.

Cette approche « technique » est renforcée au niveau du STUK par l'adoption des Guides YVL, qui me semblent s'apparenter après un examen sommaire à nos Règles fondamentales de Sûreté. Ces guides sont des règles détaillées auxquelles l'exploitant doit se conformer, sauf à ce qu'il présente et fasse approuver par le STUK une procédure ou des dispositions spéciales qui permettraient d'atteindre le même niveau de sûreté que celui inscrit dans les Guides YVL. Ceux-ci sont aujourd'hui au nombre de 65, répartis en huit séries : guides généraux, systèmes fonctionnels, appareils à pression, génie civil, équipements et composants, matières nucléaires, protection radiologique, gestion des déchets. D'autres sont en préparation : retour d'expérience opérationnelle, contrôle de la fabrication du circuit primaire, contrôle des générateurs diesels de secours, etc.

Les guides ont une triple fonction : 1/ ils déterminent les modes de coopération entre l'autorité et l'exploitant, dans le domaine considéré (documents à présenter, formalités, etc.) ; 2/ ils définissent les obligations imposées à l'exploitant ; 3/ ils spécifient certains critères techniques, mais renvoient le plus souvent pour cela à des normes et critères étrangers ou internationaux. Le Guide YVL 1.8 se consacre au thème « réparations, modifications et maintenance préventive dans les installations nucléaires ». Il contient donc l'essentiel de la vulgate officielle relative à la maintenance, mais comme me l'ont signalé mes interlocuteurs du STUK, le thème de la maintenance irrigue largement les autres guides.

On voit que, même si la réglementation relative à la maintenance s'est quelque peu dégagée de toute référence unique et formelle à la notion de qualité, c'est bien celle-ci qui sous-tend les objectifs fixés par l'autorité de sûreté.

C'est une approche toute différente qu'a choisie l'autorité américaine.

2.2 Aux États-Unis, une réglementation essentiellement fondée sur le risque

Lorsque j'ai accompli la mission prévue aux États-Unis, au mois de septembre 1996, tout le milieu nucléaire — exploitants comme autorité de sûreté — était un peu « fébrile » lorsque j'évoquais le thème de la maintenance. Il faut dire qu'une nouvelle règle de maintenance venait d'entrer en application au mois de juillet précédent, après avoir été promulguée en 1991 et suivie par une période d'adaptation de 5 ans.

Dans son principe, la règle de maintenance impose une obligation de surveillance des matériels et systèmes ainsi que la mise en oeuvre d'actions correctrices pour prévenir ou corriger leur défaillance. Le dispositif s'articule autour de 3 situations :

- 1/ l'exploitant doit, pour toutes les structures, tous les systèmes et tous leurs composants individuels, établir des objectifs de performance et surveiller la condition matérielle ou les performances de ces systèmes de façon à donner une "assurance raisonnable" qu'ils sont capables d'accomplir leurs fonctions ; les objectifs doivent être établis en liaison avec l'importance pour la sûreté des systèmes concernés, et si possible en liaison avec les standards traditionnels de l'industrie ; s'ils ne sont pas respectés l'exploitant doit prendre des mesures correctrices ;
- 2/ l'obligation de surveillance prévue au 1/ est levée s'il a été démontré qu'un programme de maintenance préventive approprié est suffisant pour garantir le bon fonctionnement des systèmes concernés ;
- 3/ les objectifs de performance, les actions de surveillance et les programmes de maintenance préventive doivent être réévalués au moins à chaque cycle de fonctionnement (généralement 18 mois aux États-Unis) et avec une périodicité n'excédant pas 24 mois.

Cette réglementation trouve ses origines dans un incident survenu en 1985 sur la centrale de David Besse (Ohio). Le président de la NRC à l'époque, ancien amiral de l'*US Navy*, était particulièrement sensibilisé aux questions de maintenance. Les inspections conduites par la NRC sur David Besse et chez d'autres exploitants avaient alors montré que la maintenance était généralement bien conduite, qu'il y avait cependant des carences dans la prise en compte des risques attachés aux opérations de maintenance, qu'il y avait également des carences notables dans la définition et la réalisation des actions correctrices.

La NRC a alors décidé de mettre en chantier une nouvelle réglementation des activités de maintenance, en y associant de près l'industrie. Celle-ci estimait en effet qu'une nouvelle règle n'était pas nécessaire et a donc insisté pour qu'elle soit fondée sur les performances réelles des exploitants. Et il est vrai que, au vu du dispositif retenu, le principal résultat de la règle de maintenance est d'inciter les « mauvais élèves » à améliorer le niveau de leur maintenance sans que les « bons élèves » soient pénalisés : il

s'avère qu'ils appliquaient en fait les principes de la règle avant qu'elle n'entre en application. Par ailleurs la NRC trouve aussi son avantage au dispositif nouveau :

- la règle actuelle couvre certains équipements « non importants pour la sûreté » vis-à-vis des autres pans de la réglementation, ce qui n'était pas le cas de la règle précédente ; en particulier la NRC peut désormais s'intéresser à la partie non nucléaire de l'installation, qui provoque 80% à 90% des sollicitations des systèmes de sauvegarde ;
- les impératifs réglementaires de maintenance seront désormais mieux adaptés à l'état réel de chaque réacteur et aux capacités de l'exploitant ;
- c'est aux exploitants de faire le travail principal, à savoir recenser les équipements et systèmes relatifs à la sûreté, établir les objectifs de performance, les programmes de surveillance et les programmes de maintenance ; la NRC n'a plus pour rôle de dire ce que doit être la maintenance mais doit contrôler la façon dont l'exploitant applique la règle.

Quelques difficultés sont cependant ressenties par les acteurs, des deux côtés de la barrière : la NRC semble ne pas encore très bien savoir comment faire appliquer un règle fondée sur les performances, principe assez nouveau pour l'agence ; les exploitants préféreraient parfois se contenter de suivre à la lettre les instructions de la NRC, en cochant les cases de la *check list* correspondante, m'a dit D. WALTERS, chargé de mission « maintenance » au *Nuclear Energy Institute*. Il s'agit bien d'un *"défi culturel pour les exploitants et l'autorité de sûreté : celle-ci peut questionner l'exploitant sur ses programmes et lui demander d'en justifier le contenu et la façon dont il l'applique"*. C. CORREA (NRC) estimait pour sa part que *"la règle semble très simple mais ne l'est pas du tout ! On passe du « comment fait-on la maintenance ? » à « comment gère-t-on la maintenance ? » ; c'est un changement essentiel"*.

Par ailleurs la NRC est sensible à la nécessité de ne pas négliger l'approche de la défense en profondeur, ce qui pourra peut-être lui causer quelques tourments à voir la façon dont les exploitants usent à tout bout de champ des évaluations probabilistes de sûreté pour fonder leurs décisions.

Le mouvement amorcé avec la nouvelle règle de maintenance s'inscrit dans un processus plus large, qui consisterait à réorienter la réglementation vers la définition de ce qui doit être important et ce qui ne l'est pas, au regard de la sûreté, tout en laissant plus d'autonomie aux exploitants pour atteindre les objectifs de sûreté fixés ou acceptés par l'autorité. Divers domaines liés à l'inspection en service seraient actuellement réévalués dans cette optique par le *staff* de la NRC.

En tout état de cause, la NRC a déjà entrepris d'adapter son mode de fonctionnement aux nouvelles exigences posées par la règle de maintenance. Deux à trois ans ont été nécessaires pour rédiger, en collaboration étroite avec le représentant officiel de l'industrie nucléaire à Washington, le *Nuclear Energy Institute*, des guides réglementaires expliquant aux industriels comment appliquer la règle. Par ailleurs, la NRC entamait de son côté un programme de formation destiné à ses agents, ainsi que la

rédaction de guides d'inspection. Il semble aussi nécessaire de clarifier certains concepts sous-jacents à la règle (sans que j'ai eu beaucoup de précisions sur lesdits concepts) et de tenir compte des commentaires du « public ». Cependant l'architecture générale de la règle ne devrait pas s'en trouver fondamentalement affectée.

De septembre 1994 à mars 1995 la NRC a effectué une série de 9 inspections chez des exploitants volontaires ; ceux-ci souhaitent obtenir un « avis » de l'autorité sur leur politique de maintenance avant que la règle n'entre formellement en vigueur ; la NRC souhaitait tester sur le terrain la nouvelle procédure d'inspection qui avait été rédigée à l'occasion. La version définitive de cette procédure a été adoptée en fin août 1995. Ensuite, à partir de juillet 1996, une série d'inspections « réelles » a démarré à Palo Verde (Arizona) puis Peach Bottom (Pennsylvanie) et Cooper (Nebraska). Mes interlocuteurs de la NRC m'ont dit avoir été très favorablement surpris par la qualité du programme de maintenance mis au point à Palo Verde : il était axé sur les fonctions et non sur les systèmes. Par ailleurs, ils ont noté que les exploitants de Cooper sont allés voir à Peach Bottom comment s'était déroulée l'inspection pour mieux préparer la leur...

A la date de ma visite, seules ces trois inspections avaient été réalisées. Elles se poursuivront deux années durant et concerneront tous les exploitants américains.

Il faut remarquer enfin que l'approche nouvelle développée avec la règle de maintenance entrée en vigueur en 1996 s'apparente par certains côtés à l'approche générale française en réglementation nucléaire : l'exploitant américain n'est plus confronté à un système prescriptif, où l'autorité de sûreté lui dit ce qu'il doit faire, mais doit proposer lui-même ses solutions, dans le cadre général des objectifs tracés au préalable par l'autorité. Celle-ci doit alors approuver les solutions de l'exploitant et vérifier leur bonne mise en oeuvre sur le terrain.

D'après mes interlocuteurs deux spécificités marquent encore le système américain de contrôle réglementaire de la maintenance :

- l'« approbation » de l'autorité de sûreté n'est pas donnée formellement avant la mise en oeuvre des programmes de l'exploitant ; en revanche tant les gens de la NRC que ceux des deux exploitants rencontrés, comme D. WALTERS du *Nuclear Energy Institute*, m'ont indiqué que la NRC peut à tout moment demander à l'exploitant de justifier les options retenues ;
- l'approche américaine place le risque au coeur de la démarche de maintenance, en suggérant fortement le recours à des méthodes probabilistes d'évaluation du risque et de la sûreté ; il ne me semble pas que les textes français empruntent ces voies.

3. LA POLITIQUE DE MAINTENANCE CHEZ LES EXPLOITANTS NUCLEAIRES VISITES

3.1 Une même volonté d'optimiser le contenu des opérations de maintenance

3.1.1 Une attention soutenue pour la maintenance chez les exploitants nordiques

Comme tout bon exploitant nucléaire, Vattenfall a mis au point des programmes de maintenance préventive qui permettent de conserver en bon état les systèmes fonctionnels de ses centrales. En matière de maintenance prédictive, Vattenfall souhaite développer les programmes de maintenance conditionnelle. Ceci suppose le perfectionnement des outils et méthodes de mesure *ad hoc* (vibrations, détection d'éléments sous forme de trace). Pour ce qui concerne la maintenance fondée sur la fiabilité, l'exploitant s'appuie sur les recommandations des constructeurs de matériels et sa propre expérience d'exploitation. Il y voit une source d'économie en temps, en argent et en risque pour les installations et souhaite développer cette approche.

C'est le même genre d'effort que conduit IVO pour la centrale de Loviisa. Sur la base des indications initiales des constructeurs, l'exploitant a constitué un fond de programmes de maintenance préventive qui repose sur de la documentation papier et des banques de données informatiques. IVO recherche une amélioration constante de ces programmes grâce à ses recherches en ingénierie (conduites avec le soutien d'IVO International) et grâce à l'expérience d'exploitation. *"IVO fait désormais plus que les constructeurs pour faire vivre la maintenance préventive"* m'a déclaré A. TAMMINEN.

Au demeurant les efforts en matière de maintenance préventive n'empêchent pas de devoir effectuer aussi de la maintenance corrective, sur défaillance de certains équipements. On constate par exemple que Ringhals-4 a été arrêté pendant un peu plus de 5 jours en août 1996 pour des activités de maintenance uniquement. Au troisième trimestre 1995, Loviisa-2 a été arrêtée pendant près de quatre semaines pour une inspection imprévue des structures internes des pompes primaires ; cet arrêt a été suivi d'un arrêt d'une semaine en décembre 1995 pour remplacer des joints sur ces mêmes pompes primaires. La perfection n'est décidément pas de ce monde...

3.1.2 La « culture de maintenance », une perle rare dans le nucléaire américain ?

Ma visite à l'*Institute of Nuclear Power Operations* (Atlanta) a été l'occasion d'avoir un panorama général sur la politique de maintenance des exploitants américains. L'INPO est la réponse de ceux-ci à l'accident de Three Mile Island (mars 1979). Constitué pour répondre au besoin évident d'améliorer la qualité de l'exploitation des centrales nucléaires, l'INPO a structuré son action autour de 4 objectifs :

- l'évaluation des centrales, similaire à celles conduites par l'Inspection nucléaire d'EDF ;
- l'accréditation des programmes et structures de formation mis en oeuvre par les exploitants ;
- l'analyse des événements et l'échange d'informations ;

- l'assistance aux membres : visites ponctuelles d'assistance, développement de guides et recueils de bonnes pratiques, études sur l'organisation du travail, ateliers, etc.

Pour l'INPO la maintenance est un impératif d'exploitation qui reste très difficile à intégrer dans les pratiques quotidiennes et les choix stratégiques. La philosophie du « matériel jetable » était encore très largement répandue il y a quelques années. Certains exploitants n'ont pas eu de stratégie minimale d'investissement en maintenance et l'état des installations s'en ressent, ainsi que leur capacité à opérer sans défaillance pendant un cycle complet de fonctionnement. Il y a eu pendant trop longtemps un *"manque flagrant d'anticipation"* pour la maintenance. La tendance se renverse aujourd'hui mais il faut remonter une pente raide (vu l'état des installations, en général), et faire évoluer les mentalités, ce qui n'est pas simple.

Par ailleurs de mauvaises organisations renforcent ces difficultés culturelles : chez beaucoup d'exploitants il n'y a pas de structures définissant la politique de maintenance au niveau central ; si cette structure existe, les chefs des services de maintenance des sites ne rapportent généralement pas devant elle. D'ailleurs le fort mouvement de décentralisation des exploitants nucléaires ces dernières années a fréquemment amené à un relâchement des liens entre les sites et le niveau central, qui pose parfois quelques problèmes aujourd'hui.

En fait, au démarrage des tranches, les ressources des exploitants étaient principalement consacrées à la construction puis se sont déplacées vers la production ; la maintenance a été négligée alors que beaucoup d'exploitants la considéraient toujours comme un sous-ensemble de la construction et des travaux d'équipement. La plupart ont cependant pris conscience aujourd'hui que la maintenance ne doit pas être subordonnée aux objectifs de production. D'ailleurs avec l'ouverture et la déréglementation du marché électrique, il n'est plus possible de subir des arrêts fréquents causés par la défaillance d'un matériel mal entretenu. L'essor de la concurrence est un incitatif puissant à l'amélioration de la maintenance en général et des arrêts de tranche en particulier.

La centrale de Zion est une illustration éclatante de cet état de fait. Son exploitant, *Commonwealth Edison*, est particulièrement représentatif de la difficulté pour les managers américains de comprendre l'importance d'une bonne maintenance des installations. La politique traditionnelle consistait à attendre la défaillance d'un matériel pour le changer. *"Il est probable que la richesse du pays ait contribué à cette négligence"* estimait J.P. MERCIER, ancien chef de la Mission technique à l'Exploitation du Parc nucléaire. J.P. MERCIER a justement quitté EDF en 1994 pour prendre les fonctions de vice-président chargé de la maintenance, auprès de la direction générale de ComEd. Sans qu'il ne dispose de services opérationnels, sa mission consiste à insuffler un « esprit de maintenance » dans la hiérarchie de ComEd. La tâche semble être plutôt difficile, puisque J.P. MERCIER m'a dit que *"la haute hiérarchie a encore besoin d'être convaincue que la maintenance vaut son prix. Duke Power et Entergy l'ont compris : ils font aujourd'hui partie des meilleurs."* Le principal obstacle vient de ce que personne ne s'est approprié la fonction de maintenance dans cette haute hiérarchie opérationnelle. Il faut donc continuer à « pousser les feux » car le mouvement n'est pas encore naturel, bien qu'un certain nombre de mesures proposées par J.P. MERCIER aient été adoptées.

La centrale de Zion a cette particularité qu'elle accueille une mission permanente d'EDF, composée d'une douzaine de personnes. En fait les liens sont déjà anciens entre EDF et *Commonwealth Edison* ; certaines centrales des deux exploitants sont jumelées et avaient commencé à développer des échanges, et les liens personnels entre le directeur Production-Transport d'EDF et le directeur des activités nucléaires de ComEd étaient très cordiaux. Il n'en fallait pas plus pour que se mette en place un mécanisme formel de coopération. A la demande de ComEd les deux compagnies ont décidé de faire quelque chose en commun susceptible d'avoir des incidences concrètes. Après étude, le sujet choisi a été l'amélioration des arrêts de tranche de Zion. Sur les trois années précédant la conclusion de cet accord, la durée des arrêts avait en effet atteint 160 jours sur Zion-1 et 120 jours sur Zion-2.

Un contrat commercial a été conclu en 1995 entre *Commonwealth Edison* et IUAC, société de droit américain dont l'existence vise à protéger EDF contre toute tentative d'exploitation d'un éventuel problème survenu à Zion dans le cadre de la mission. Aux termes de ce contrat, une équipe d'ingénieurs d'EDF était détachée à Zion ; elle devait prendre une année pour effectuer un diagnostic de la centrale, mettre au point une série de propositions d'amélioration, faire accepter ces propositions. Une seconde année devait être consacrée à leur mise en oeuvre.

Les propositions, bâties sur l'expérience de l'arrêt 1995 de Zion-1 (le meilleur depuis 1988 avec 99 jours « seulement » !) ont été présentées à ComEd en février 1996 ; elles ont été acceptées en avril et ont été mises en oeuvre sur l'arrêt 1996 de Zion-2 qui avait lieu en septembre, au moment même de ma visite. Elles ont vocation à se poursuivre lors du prochain arrêt de Zion-1, au printemps 1997.

Lors de ma visite, l'équipe EDF, dirigée par P. DUPUIS, m'a avoué que la tâche était en fait beaucoup plus difficile que ce qui avait été envisagé au départ. L'équipe s'est laissée « piéger » par la durée exceptionnellement longue des arrêts et croyait qu'il serait facile de la réduire. En fait elle s'est trouvée confrontée à plusieurs obstacles :

- la quasi-absence de maintenance préventive fait que le matériel de la centrale est "*dans un état déplorable*" ;
- les gens n'ont pas confiance dans le matériel, ce qui rend difficile le pilotage des actions de correction ;
- les procédures de conduite et de maintenance sont vieilles : elles n'ont jamais été ni révisées ni refondues ;
- les autres centrales de ComEd sont plus récentes, ce qui a pu masquer la difficulté de la situation spécifique à Zion.

Par ailleurs le contexte local est assez troublé. La centrale, amortie dans les comptes de ComEd, a été menacée de fermeture définitive à courte échéance si ses performances ne s'améliorent pas. La direction du site a été profondément remaniée dans les derniers mois, avec en particulier l'arrivée d'un nouveau directeur, vice-président de la compagnie. Enfin, l'équipe EDF a eu le sentiment que ses propositions étaient parfois

mal accueillies car "les gens vivaient bien dans leurs performances modestes ou médiocres."

Les perspectives sont plus dégagées aujourd'hui : de l'avis de tous les interlocuteurs (personnels du site, équipe EDF, inspecteur résident de la NRC), le nouveau vice-président donne de bonnes impulsions. Des discussions sont également en cours pour le maintien d'une équipe EDF au-delà du terme prévu pour le contrat actuel ; d'après ce qui m'a été dit, les deux partenaires s'accordent à éloigner toute préoccupation strictement commerciale dans ce contrat ; c'est une heureuse perspective, qui permet de concentrer les énergies sur le fond du problème, l'amélioration de la qualité de la maintenance et des arrêts de tranche à Zion.

Cependant des succès réels ne pourront être enregistrés en la matière que si ComEd consent un effort d'investissement vigoureux pour rattraper le temps perdu. M. WESTBERG, inspecteur résident principal de la NRC à Zion, m'a indiqué par exemple que l'obsolescence et les défaillances du système de mesure de la position de barres de commande était telles qu'il fallait 6 heures de travail pour avoir une information correcte sur la position de ces barres ! On se demande vraiment où était passé l'impératif de sûreté en exploitation pour en arriver à ce genre d'extrémité...

Il apparaît que la politique de maintenance de ComEd à Zion reste très orientée vers le court terme. La centrale est déjà amortie dans les comptes de la société ; on aurait pu penser que cela lui donnerait plus de latitude financière pour éventuellement engager des travaux importants qui s'avèreraient nécessaires pour donner un bain de jouvence aux systèmes et équipements les plus obsolètes. Au contraire, la « gratuité » en capital que représente désormais Zion suspend en fait la survie de la centrale à ses performances immédiates et aux proches perspectives d'évolution du marché de l'électricité, dans un contexte très mouvant ; si la compétitivité de Zion n'est pas « perceptible » précisément pour l'avenir, ComEd n'aura aucun scrupule à la fermer immédiatement, et n'en tirera aucune conséquence néfaste au plan financier puisque aucune charge exceptionnelle en capital n'aura à être comptabilisée dans ses livres.

Zion est un exemple frappant du « complexe » nucléaire américain : l'actionnaire n'a pas vraiment confiance dans la capacité de son outil de production à fournir de l'électricité de façon compétitive ; toute stratégie d'investissement à long terme est donc interdite pour l'instant. Adviene une clarification des conditions du marché et la preuve que l'exploitant peut être performant, la politique d'investissement de l'actionnaire pourra peut-être changer (7).

La centrale de Waterford reste pour l'instant épargnée par ces difficultés. Son jeune âge en est pour partie responsable, mais aussi une conscience plus aiguë des nécessités techniques de la maintenance en exploitation. D'ailleurs D. HINZ, président d'Entergy

⁷ L'exemple opposé est celui de ces exploitants qui se savent condamnés par des performances irrémédiablement médiocres mais dont les coûts en capital n'ont pas encore été amortis (*stranded costs*). L'optique est alors légèrement différente : il s'agit surtout de poursuivre l'exploitation — au meilleur prix — le plus longtemps possible pour récupérer le maximum d'investissement non amorti pendant que le marché local de l'électricité reste réglementé. Cependant il est clair qu'une telle situation n'est pas non plus favorable au développement d'une stratégie de maintenance à long terme.

Operations, me faisait part d'une conviction largement partagée: "une centrale compétitive est une centrale qui a un facteur de charge élevé ; elle doit donc être au top niveau en matière de condition matérielle et d'entretien".

Depuis plusieurs années Waterford est « notée » par la NRC au-dessus de la moyenne des exploitants américains. L'évaluation chiffrée des SALP (*Systematic Assessment of Licensee Performance*) montrait un des meilleurs scores de la région administrative NRC ; cette notation s'est cependant fortement dégradée dans le dernier résultat publié au début de l'année 1997 ; la maintenance n'a plus qu'une note « 2 » (bonne performance) au lieu de « 1 » précédemment (excellente performance) ; les trois autres domaines évalués (exploitation, ingénierie, soutien technique) se sont maintenus ou ont aussi été déclassés. Selon la NRC cette évolution défavorable tient à deux facteurs :

- l'absence de réelle difficulté jusqu'ici, conjuguée à un relatif isolement de Waterford ; les bonnes performances antérieures ont amené les exploitants de la centrale à "se reposer sur leurs lauriers" selon l'expression de M. KELLER ;
- l'affectation privilégiée des ressources au renforcement de la production ; "la sûreté est un peu passée au second plan".

Cependant M. KELLER reconnaît que l'exploitant a bien réagi à l'appréciation négative portée par la NRC sur l'évolution de ses performances dans les derniers mois. "Il est satisfaisant de voir que l'exploitant reconnaît qu'il y a un problème" estime M. KELLER. D'ailleurs l'inspecteur résident de la NRC remarque que les changements récents dans la hiérarchie à la tête du site semble promettre une réorientation significative de la culture locale : beaucoup de dirigeants sont arrivés il y a moins de 6 mois.

3.2 Un recours constant aux prestataires, avec plus ou moins d'intensité

3.2.1 La forte présence des services internes chez Vattenfall

En Suède, la centrale de Ringhals emploie près de 1200 personnes auxquelles s'ajoutent environ 250 employés de prestataires permanents (sécurité, nettoyage, etc.). Pour les activités de maintenance, Vattenfall s'est d'abord reposé exclusivement sur Westinghouse, constructeur de l'îlot nucléaire des 3 REP. L'exploitant a ensuite cherché à développer la concurrence en faisant appel à ABB, Framatome, KWU, etc. pour les travaux importants sur l'îlot nucléaire.

Par ailleurs B. ANDERSSON m'a indiqué que beaucoup de maintenance est faite par le personnel de la centrale. Les prestataires extérieurs seraient au nombre de 300 à 400 pendant les arrêts de tranche, et au maximum 500 lors d'opérations un peu spéciales ; ce dernier chiffre a par exemple été atteint lors du remplacement des générateurs de vapeur de Ringhals-3 en 1995. Cette ligne politique générale m'a été confirmée par mes entretiens chez ABB Atom ; mes interlocuteurs m'ont en effet affirmé que les exploitants effectuent tous les travaux courants avec leur personnel, pour ne laisser aux prestataires que les tâches spécialisées. Toute la question consiste donc à savoir par où passe la ligne de démarcation entre tâche courante et tâche spécialisée.

En effet, la division des Services nucléaires d'ABB Atom (180 personnes, ce qui semble assez modeste) assure des services pour le combustible, pour les structures des réacteurs sur des composants mécaniques divers (robinetterie, vannes, pompes). Par ailleurs la société ABB Tekniska (120 personnes) est spécialisée dans les contrôles non destructifs. ABB note cependant que, depuis quelques années, les projets confiés par les exploitants à leurs « grands » prestataires ont tendance à être d'ampleur croissante et deviennent pratiquement de véritables programmes « clefs en main ».

Hormis ces prestations intégrées, le recours aux prestataires classiques suppose que le personnel de Vattenfall se convertisse pour un temps au contrôle des intervenants extérieurs. Cependant, m'a indiqué B. ANDERSSON, un prestataire expérimenté peut devenir contrôleur pour le compte de Vattenfall. Le temps m'a manqué pour me faire préciser comment est évité le risque de conflit d'intérêts et comment Vattenfall assure la vérification de second niveau sur la qualité de la prestation.

Par ailleurs le SKI exige que l'exploitant puisse démontrer à tout instant la qualité de ses prestataires. Ceux-ci doivent par ailleurs faire l'objet d'une qualification (mais je ne sais pas quelle instance décerne cette qualification).

Le site a la capacité (et la volonté) de demander de façon nominale que telle ou telle personne chez un prestataire déterminé soit appelée à intervenir sur les réacteurs. Il ne semble pas que cette possibilité soit ouverte en France, où elle serait assimilée à une régie directe exercée par le maître d'ouvrage sur le prestataire. Quoi qu'il en soit, la solution retenue en Suède semble faire l'affaire de tous : l'exploitant et le prestataire n'ont pas besoin de reprendre des cycles lourds de formation, les employeurs s'efforcent de conserver chez eux les personnes ayant déjà travaillé en centrale, le *turn over* est très bas (certains employés des prestataires auraient fait le premier arrêt de Ringhals-2 en 1977 !)

C'est au même souci de stabilité que s'emploie IVO en Finlande.

3.2.2 Un recours important à la sous-traitance chez IVO

Avec environ 200 personnes affectées aux services relevant de la maintenance, IVO poursuit l'objectif d'assurer lui-même l'ensemble de la maintenance susceptible d'être effectuée tranche en marche. L'enjeu tel qu'il m'a été décrit par mes interlocuteurs réside dans la capacité pour l'exploitant de conserver une bonne maîtrise technique de son installation et de pouvoir assurer le contrôle de ses prestataires pendant leurs interventions.

Suivant l'ampleur des travaux à réaliser pendant les arrêts, 500 à 1000 personnes extérieures peuvent intervenir sur le site (500-600 est le chiffre le plus souvent observé en temps normal). Près d'une centaine d'entreprises extérieures sont requises pour les arrêts annuels : ABB, Technatom, sociétés de contrôle qualité ou de contrôles non destructifs, inspections techniques diverses, etc. Le domaine le plus « consommateur » de prestations externes est la mécanique. Lors des arrêts de 1995 sur Loviisa-1 et 2, plus de 800 intervenants extérieurs ont été accueillis, employés par plus de 70 sociétés dont une soixantaine étaient des « habituées » de Loviisa et 9 seulement des nouvelles recrues.

Pendant les arrêts de tranche, les personnels de Loviisa exercent les fonctions de chef de travaux. Il semble qu'il s'agisse là du système mis en oeuvre en France avant la loi de 1990 évoquée dans le corps du rapport, où des équipes mixtes EDF-prestataires étaient soumises à la direction des contremaîtres d'EDF.

Il n'y a pas de contrat de maintenance « clefs en main » passé avec une grande société d'ingénierie. Il existe cependant une politique de contrats à long terme pour les travaux les plus importants, si le prestataire fait la preuve de sa qualité et de la bonne formation de ses personnels. Cependant la plupart des contrats restent ponctuels. La Finlande étant un pays peu peuplé et les prestataires potentiels étant en nombre relativement limité, les contremaîtres connaissant en fait individuellement les intervenants susceptibles de travailler sur les chantiers de la centrale. Celle-ci a donc la possibilité, et en use largement d'après ce qui m'a été dit, de faire appel nominativement à tel ou tel intervenant s'il a donné satisfaction lors d'une précédente intervention.

La stabilisation du personnel intervenant passe aussi par une collaboration qualifiée d' "étroite" avec l'autre exploitant nucléaire TVO, et par une « politique industrielle » définie par IVO, dont certaines lignes ont été esquissées à l'instant. D'ailleurs, remarquaient mes interlocuteurs, une concurrence féroce entre les deux ou trois prestataires capables d'effectuer l'intervention désirée n'exclut pas la stabilité globale de l'offre prestataire sur le moyen terme.

3.2.3 Une gestion peu ordonnée des prestataires à la centrale de Zion

Comme de tradition, la ligne de partage des tâches entre personnel interne et prestataires se déplace selon que l'on est en ou hors arrêt. Pendant le cycle de fonctionnement 80% de la maintenance est effectué par les personnes du site. Cette proportion tombe à 20% en arrêt de tranche ; en fait la proportion varie selon que le site considéré est ancien (cas de Zion) ou récent ; dans ce dernier cas, les personnels internes font désormais 60% de la maintenance pendant l'arrêt, ce qui est un pourcentage singulièrement élevé au vu de mon expérience acquise par ailleurs.

En fait, l'adoption de cycles de fonctionnement de 24 mois fait que chaque site (à deux tranches) effectue un arrêt de tranche seulement chaque année. Ses ressources internes sont donc peu sollicitées et *Commonwealth Edison* s'efforce de développer les échanges inter-sites (au moins au niveau de la maîtrise). Première manifestation d'un « effet parc ».

Trois catégories d'entreprises interviennent sur les chantiers : les constructeurs (Westinghouse, BWNT, ABB, Framatome Technologies, etc.) ; des prestataires spécialisés (contrôles non destructifs...) ; POPE, une société de services en régie. Pour l'équipe EDF, la gestion de ces divers intervenants est très peu optimisée et Zion subit une dépendance très importante vis-à-vis de POPE. La centrale souffre aussi de ce que les ingénieurs qui ont assuré sa conception et sa construction (sociétés d'ingénierie Bechtel et Sargent & Lundy) ont quitté le site sans assurer de transition.

Les contrats les plus importants sont pluriannuels. Ils concernent souvent des prestations intégrées (contrôle et entretien des générateurs de vapeur, de la turbine, des

ponts tournants, des diesels, etc.). Cependant le partenariat est inexistant : le prestataire apporte ses solutions sur le site et doit les qualifier pendant l'arrêt ; il n'y a pas de développement d'outillages ou de procédés en commun ; ce système est tout à fait différent de celui qui prévaut en France avec le CETIC à Châlon sur Saône.

Les responsabilités — par exemple en matière de radioprotection — sont souvent « diluées » lorsque les prestations fournies sont « clefs en main ». Les contrats sont la plupart du temps rédigés selon des obligations de moyens et non des obligations de résultats ; cette tendance semble cependant être amenée à s'inverser, avec l'intégration croissante d'objectifs de performance (dosimétrie, coûts, délais, sécurité du travail) dans les nouveaux contrats ; par ailleurs un mouvement général des exploitants américains tend à associer le prestataire aux performances d'exploitation du réacteur pendant son cycle de fonctionnement.

Il semble que la surveillance de l'exploitant sur ses prestataires n'ait pas été extrêmement poussée jusque dans les années récentes. La situation serait en train d'évoluer vers un peu plus de rigueur. C'est ainsi que dans certains domaines les prestataires doivent désormais leur compétence et leur capacité professionnelle avant de pouvoir intervenir sur le site ; certaines entreprises seraient associées à la préparation de l'arrêt et au retour d'expérience ; les prestataires seraient soumis à une "supervision" plus précise, soit au plan de la sûreté (interventions sur les diesels), soit au plan de la radioprotection.

Enfin la politique de compétences individuelles chez les personnels des prestataires est handicapée par de nombreux paramètres. L'influence des syndicats sur les conditions de recrutement des travailleurs est très importante — ce qui semble être un trait essentiel du paysage social aux États-Unis — mais mal formalisée ; le taux de rotation des personnels est très grand, ce qui nuit à l'investissement en formation et à leur disparité (critères différents selon que les formations sont dispensées sous l'égide des syndicats, des exploitants ou des prestataires, etc.) ; la mauvaise réputation de Zion a conduit à de sérieuses difficultés pour recruter des ouvriers locaux à l'occasion des derniers arrêts de tranche, et l'exploitant a dû engager près de 500 travailleurs « lointains » plus ou moins itinérants (*'travelers'*) — sur 700 ouvriers intervenant au total — avec tous les inconvénients que cela suppose en termes de qualification et de formation. De façon générale celle-ci est très axée sur les compétences techniques et l'apprentissage des procédures, mais pas assez sur les exigences de sûreté et de qualité. Ces défauts se retrouvent d'ailleurs, aux dires d'EDF, chez les personnels de l'exploitant lui-même.

3.2.4 Une politique « prestataires » apparemment maîtrisée chez Entergy

Avec seulement 3 REP et 2 REB, Entergy ne peut pas conserver en son sein toutes les compétences nécessaires à l'accomplissement des tâches de maintenance sur son parc nucléaire. La société a cependant l'ambition de préserver un volant important de compétences internes car elle pense qu'il est possible de faire certaines tâches mieux et moins cher qu'en ayant recours à des intervenants extérieurs.

Ceci ne se traduit pas véritablement dans les chiffres. D. HINZ, président d'*Entergy Operations*, m'indiquait que plus de 1000 personnels prestataires sont intervenus lors du

dernier arrêt de tranche. Ils sont complétés par les services de maintenance de Waterford et par 86 employés d'Entergy provenant des autres sites :

- les ressources humaines partagées entre les différents sites d'Entergy sont la manifestation d'un « effet parc » au niveau de ce « petit » exploitant nucléaire ; cette politique a été adoptée en juin 1995 et appliquée pour la première fois aux arrêts d'Arkansas Nuclear One et de Waterford à l'automne 1995, puis à River Bend en janvier 1996 ; la centrale d'Arkansas accueillant deux tranches était susceptible de fournir des personnels « en surnombre » aux deux autres sites ; 86 personnes ont été accueillies au total à Waterford, près de 340 à River Bend ; le programme se poursuit sur une base régulière depuis et Entergy essaie de favoriser la constitution d'équipes attachées à un site mais spécialisées dans le soutien aux autres sites ; chez Entergy « l'effet parc » ne joue pas sur la standardisation technique des réacteurs (comme en France) mais sur la compétence nucléaire des acteurs ; on retrouve là l'intérêt d'une compagnie (*Entergy Operations*) entièrement dédiée à l'exploitation des réacteurs appartenant aux 4 *utilities* fondatrices ;
- les services de maintenance propres de Waterford sont tout à fait conséquents : sont placées sous l'autorité du directeur Maintenance plus de 60 personnes en mécanique, près de 40 en électricité et plus de 50 en contrôle-commande (automatismes).

Les prestataires courants ont pour responsabilité : la préparation des travaux de modification et leur réalisation éventuelle si elle est possible pendant le fonctionnement ; diverses activités de soutien à l'exploitant (échafaudage, calorifugeage, peinture...) ; les travaux hors outil de production (entretien des bâtiments, etc.) ; la gestion des « excédents de travaux » non gérables par la division Maintenance (travaux en retard, gestion des permis de travaux pour les prestataires).

Lors du dernier arrêt de tranche (automne 1995 à la date de ma visite) deux projets « clefs en main » avaient été passés par Waterford : le contrôle par courants de Foucault des tubes GV et l'inspection-maintenance de l'alternateur. Les autres projets étaient supervisés par Entergy : inspection de la turbine, décontamination de l'enceinte de confinement, démontage/remontage des structures du réacteur, échafaudage, inspections et réparations de vannes, inspection du combustible, tests de vannes motorisées, inspection et réparation d'équipements électriques, calibration d'instruments et systèmes de mesure, etc.

Parmi ces travaux, on peut estimer que la moitié environ revient à un contractant de premier plan, Stone & Webster. Groupe mondial d'ingénierie rassemblant près de 5500 personnes et opérant dans de multiples domaines industriels (production d'électricité, procédés industriels, affaires gouvernementales), Stone & Webster a conçu et construit plusieurs centrales nucléaires aux États-Unis. La société assure désormais des services de maintenance-modifications, en particulier pour les centrales d'Entergy.

Waterford a été conçue et construite par Ebasco, autre grande société d'ingénierie. Selon Stone & Webster, des relations privilégiées mais pas exclusives s'établissent entre

le concepteur-constructeur de la centrale et l'exploitant : l'ingénieur obtient généralement un contrat de prestations sur 3 ou 4 cycles de fonctionnement après le démarrage de la centrale. Cependant ces contrats sont ensuite systématiquement remis en cause tous les 3-4 ans. L'ingénieur de conception-construction a un avantage technique réel sur ses concurrents lors du renouvellement mais ne part pas nécessairement favori ; au demeurant F. PASTOR, vice-président, directeur de *Stone & Webster Construction Corp.*, estimait que la configuration la plus favorable est celle où le concepteur est aussi le constructeur, ce qui n'est pas toujours le cas : cela donne à l'ingénieur une connaissance approfondie des installations. Mais cette situation peut être délicate : en cas de difficultés sérieuses, l'exploitant peut négocier des réparations gratuites avec l'ingénieur prestataire qui aurait construit l'installation !

De toutes façons, pour P. RICHTER, directeur des activités de maintenance Stone & Webster pour les sites d'Entergy, l'exploitant doit avoir un noyau dur de compétences, autour d'ingénieurs capables de comprendre toute la complexité d'une centrale nucléaire : *"la plupart des projets totalement sous-traités n'ont jamais été de francs succès pour les exploitants qui s'y sont essayés"*. Notons que, pour mes interlocuteurs, cette appréciation s'attache seulement aux prestations de maintenance générale et non à certaines prestations spécialisées qui nécessitent une forte compétence technique et peuvent être passées « clefs en main ».

C'est donc à cet équilibre délicat que s'attache la centrale de Waterford : la plupart des projets sont pilotés par le personnel d'Entergy et des employés Entergy sont présents dans les équipes de travaux. Pour sa part Stone & Webster réalise « en propre » les travaux qui lui sont confiés, grâce à une force de travail d'une soixantaine de personnes pendant le cycle de fonctionnement, qui monte à 400-500 personnes pendant l'arrêt de tranche. *"Stone & Webster exécute en propre tous les travaux et n'a pas recours à la sous-traitance"* m'a indiqué D. OWENS, directeur S&W pour le site de Waterford. Cela est possible grâce à l'extraordinaire flexibilité organisée du marché de l'emploi aux États-Unis :

- la flexibilité est claire : sur l'ensemble des ressources humaines disponibles à la division Énergie de la société mère (*Stone & Webster Engineering Corp.*) soit 2260 personnes environ, près de 1000 relèvent de l'ingénierie proprement dite, alors que la réalisation des travaux n'en occupe qu'un peu plus de 500 ; c'est donc auprès de la main d'œuvre locale et sur une base d'activité essentiellement temporaire que se fournit l'ingénieur prestataire de premier rang pour exécuter les travaux sur le site ;
- l'organisation de la flexibilité n'est pas moins claire : pour les activités de *"maintenance, réparations et rénovation"*, Stone & Webster est partie prenante d'un Accord sur la Maintenance signé au début des années 70 entre l'organisation syndicale représentant les grands prestataires de maintenance (*Associated Maintenance Contractors*) et divers syndicats de travailleurs relevant de l'AFL-CIO ; extrêmement détaillé, cet accord donne un cadre contraignant et protecteur aux contrats de travail que l'ingénieur est amené à conclure pour pouvoir répondre à son contrat de prestations auprès de l'exploitant ; par ailleurs l'ingénieur a l'obligation de faire appel à des

salariés membres de ces syndicats professionnels, qui disposent ainsi d'un monopole d'embauche, sauf dans les États où la liberté du travail a force légale.

La liste des syndicats de travailleurs signataires de l'Accord sur la Maintenance fait apparaître les métiers les plus variés. Je ne peux m'empêcher de penser à nos anciennes corporations, si soucieuses en leur temps de protéger les intérêts de leurs membres éminents. Elles ont été balayées en France par la loi Le Chapelier en 1791 mais elles subsistent encore aujourd'hui au pays phare du libéralisme. Singulier paradoxe...

Syndicats ou pas, c'est dans le face à face entre l'exploitant et l'ingénieur que se joue une part de l'efficacité de la maintenance. D'où, comme à Zion, le développement des contrats indexés sur les performances et la réduction lente mais inévitable du nombre des « grands » prestataires sur les sites. Car la performance de la maintenance apparaît bien enfin aujourd'hui comme un déterminant de la performance d'exploitation.

C'est pourquoi des efforts importants sont placés, comme chez EDF, sur la maîtrise des arrêts de tranche.

3.3 La maîtrise des arrêts de tranche : un combat universel

3.3.1 L'objectif de réduction de la durée des arrêts est un dénominateur commun

Avec des durées d'arrêt programmé de 3 à 4 semaines, l'exploitant de Ringhals n'a pas à rougir face aux meilleurs performeurs mondiaux. A la date de ma visite, le dernier arrêt programmé avait immobilisé le réacteur concerné pendant 23 jours ; par ailleurs le nombre d'arrêts automatiques ou d'arrêts fortuits est extrêmement réduit, signe d'une bonne qualité générale d'exploitation. Ce n'est pas le cas cependant de tous les réacteurs suédois, dont certains défraient régulièrement la chronique — comme par exemple Barsebaeck — ou ont dû subir de longues cures de jouvence — comme Oskarshamn.

Pour expliquer ces performances flatteuses, Vattenfall met modestement l'accent sur l'apprentissage au fil des ans et le besoin en énergie ces toutes dernières années, dû à la faiblesse du potentiel hydroélectrique handicapé par des « sécheresses » ressenties comme inhabituelles sous le climat traditionnel de la Suède. Vattenfall ramène d'ailleurs à de justes proportions ses succès en remarquant que les meilleurs REB ou REP peuvent faire des arrêts de durée inférieure à 20 jours. Ringhals-4 lui-même a accompli un simple rechargement (avec activités de maintenance réduites au strict minimum) en 16 jours en 1993. Le record du monde appartient pour l'instant au REB finlandais de TVO situé à Olkiluoto, avec seulement 10 jours pour son rechargement 1995 !

Avec sa rusticité et sa solidité toutes soviétiques, la centrale de Loviisa n'est pas de reste : elle effectue des arrêts programmés durant environ 3 semaines sur une base régulière. La dimension technique y fait beaucoup (par exemple le faible nombre de tubes GV dans chaque générateur de vapeur, qui réduit les besoins d'inspection en service), mais la qualité globale d'exploitation n'y est pas étrangère, me disait C. FRANTZEN (EDF) en juillet dernier.

S'y ajoute également une politique volontariste en matière d'alternance entre arrêts courts et arrêts longs. Les arrêts courts sont destinés à effectuer simplement le rechargement en combustible neuf, les travaux techniquement indispensables et les inspections imposées réglementairement par l'autorité de sûreté. Les arrêts longs sont mis à profit pour effectuer les opérations importantes de maintenance. Peu de temps après son démarrage, Loviisa avait décidé d'effectuer (pour chaque tranche) un arrêt long pour 3 arrêts courts. Le début des années 90 a révélé une dérive régulière dans la durée des arrêts courts, qui montrait que le « cycle de maintenance » organisé sur 4 ans n'était pas tenable à moyen terme. IVO a décidé en 1995 de passer désormais à un cycle de 2 ans, alternant ainsi un arrêt court et un arrêt long.

Aux États-Unis l'INPO me faisait remarquer que la forte régulation du système électrique n'était pas un incitatif très puissant à l'amélioration de la durée des arrêts de tranche. Les choses ont profondément changé aujourd'hui et l'exigence de compétitivité dans un marché voué prochainement à une déréglementation intégrale pousse les exploitants à jouer sur tous les tableaux pour améliorer la compétitivité de leur outil de production.

La durée médiane des arrêts était de 75 jours en 1991 ; elle est tombée à 52 jours en 1995. La plupart des sites tournent autour de 40 jours et les meilleurs parviennent à faire de façon régulière des arrêts en 22-25 jours.

On a vu qu'à Zion l'exploitant se situe plutôt dans la catégorie « problématique » en matière de performances. La reprise en main par la nouvelle direction du site, avec l'aide des conseils dispensés par l'équipe EDF, commence à porter quelques fruits. Mais il est clair que le combat porte ici sur toutes les composantes de l'exploitation de la centrale : l'objectif de réduction de la durée des arrêts n'est qu'une pièce parmi d'autres pour la reconquête de la viabilité économique.

Entergy n'a pas fixé d'objectif numérique précis pour la durée de ses arrêts de tranche. La meilleure performance enregistrée jusqu'ici sur l'un de ses sites est une durée de 39 jours mais je ne sais pas s'il s'agit d'un REP ou d'un REB. Cette valeur est déjà inférieure à la médiane des arrêts américains. Les objectifs officiels d'Entergy sont au nombre de trois : atteindre en 1998 un score SALP moyen de 1,25 pour les 4 domaines notés ; avoir un facteur de charge moyen de 87% (sur 3 ans compte tenu de la durée normale des cycles de fonctionnement) ; maintenir les coûts de production à 18,3 mills.kWh⁻¹. Le raccourcissement des arrêts tend évidemment à satisfaire directement les deux derniers objectifs ; l'art de l'exploitant consistera à le garder compatible avec le premier...

3.3.2 Les exploitants mettent l'accent sur la préparation-planification et l'efficacité des organisations par projet

1. Tous les exploitants rencontrés m'ont démontré leur intime conviction qu'un arrêt réussi est d'abord un arrêt qui est bien préparé et qui est « pensé » plusieurs mois à l'avance. Si l'objectif est commun, les réalisations, pour autant que je puisse en juger, sont encore largement divergentes.

Chez Vattenfall un projet "avancé" de calendrier de l'arrêt à J_0-9 mois commence à recenser les besoins prévus de maintenance ; la préparation du calendrier débute réellement environ 7 à 8 mois avant le début de l'arrêt ; un calendrier préliminaire est prêt pour J_0-6 mois ; le planning est « gelé » à J_0-3 mois et tous les documents d'intervention sont émis à ce moment. G. ANDERSSON, chef d'arrêt sur Ringhals-3, estimait que les principales difficultés en matière de planification résident dans l'intégration des modifications : le site ne connaîtrait que très tardivement ses besoins réels et aurait besoin de pratiquer des "arrangements spéciaux" après la date fatidique de J_0-3 mois.

Par ailleurs mes interlocuteurs m'ont indiqué que Vattenfall a mis au point une documentation spéciale pour les arrêts, qui vise — entre autres — à aider au respect du planning. 350 à 400 "procédures standardisées de maintenance" ont été définies vers le milieu des années 80, qui reviennent chaque année ; le système a été jugé très efficace mais pas adapté à tous les besoins de l'arrêt. Vattenfall s'est alors orienté aux alentours de 1991-92 vers la constitution d'une documentation spéciale, découpée en 11 parties suivant le mode opératoire du réacteur. L'exploitant s'est déclaré très satisfait de cette initiative : pour lui, cet ensemble de documentation aide à maîtriser les arrêts et à savoir où les difficultés sont apparues. Je n'arrive pas à me faire une représentation exacte de ce que peut être cette documentation : autant à l'évocation des premières « procédures standardisées » je pensais plutôt à l'équivalent des Programmes de Base de Maintenance préventive développés par EDF, autant à l'évocation des procédures calquées sur les modes opératoires du réacteur je pense plutôt à des gammes de maintenance ou des modes opératoires intégrant la dimension temporelle. Il serait intéressant d'en savoir plus sur ces procédures.

J'ai peu d'informations sur la préparation-planification à Loviisa, qui ne paraît pas devoir s'éloigner des voies tracées par ailleurs par les autres grands exploitants.

Aux États-Unis, de façon générale, les exploitants ont encore beaucoup de mal à comprendre que le succès des arrêts de tranche commence bien avant le début de l'arrêt. Chez *Commonwealth Edison* il semble que la planification ait longtemps été à l'image du reste de la maintenance... Un début d'amélioration a été engagé : le programme général des travaux est désormais figé 6 mois avant l'arrêt, mais le gel définitif du planning n'intervient que 10 jours avant. Est-ce suffisant pour répondre aux besoins ? Entergy dirait clairement non.

A Waterford en effet l'organisation des travaux commence 6 mois avant l'arrêt pour être (théoriquement) figée 1 mois avant. Les objectifs techniques de l'arrêt sont définis à J_0-6 mois ainsi que les « fenêtres » de disponibilité-indisponibilité pour les systèmes essentiels de la centrale ; de même les modifications sont fixées à cette date. Un projet préliminaire de calendrier est sorti 4 mois avant l'arrêt ; sur cette base le planning détaillé est examiné et approuvé par les chefs de projets (chargés d'affaires) 3 mois avant l'arrêt. Les documents préliminaires d'intervention semblent être édités au même moment tandis que le « manuel » d'arrêt sort à $J_0-1,5$ mois. L'évaluation probabiliste du risque du planning, étape importante dans la pratique d'Entergy, est achevée également à $J_0-1,5$ mois. L'équipe d'arrêt prend ses fonctions et assume la

responsabilité des opérations à partir de J₀-1 mois, au moment où le planning détaillé est publié ainsi que les documents d'intervention.

2. Au coeur des stratégies développées par les exploitants on trouve souvent aujourd'hui une organisation par projets. Les déclinaisons en sont assez multiples. A Loviisa, les projets d'ampleur limitée sont traités dans le cadre de l'organisation normale des services de maintenance ; en revanche les projets importants suscitent la mise sur pied d'une équipe spécifique conduite par un chef de projet détaché des grandes divisions de la centrale.

Zion fait l'apprentissage difficile de la gestion de projets. Les compétences en matière de maintenance sont très éclatées et les interfaces entre les différents services compétents sont parfois délicates à gérer : chacun cherche à défendre son pré carré. La définition des travaux est du ressort de la division Maintenance et de la division Systèmes : en revanche l'organisation des opérations est du ressort du *Work Control Superintendent* et des cadres et techniciens subordonnés ; enfin la réalisation des travaux revient à la division Maintenance. ComEd reconnaît que cet éclatement entraîne des difficultés de coordination, mais retient en revanche que la compétence technique intrinsèque y est plus valorisée. L'équipe EDF a remarqué d'autres « lieux » d'éclatement : la division Maintenance est partagée entre ateliers de travaux, département Travaux de site, ingénierie, *work control*, etc. ; la fonction d'ingénierie de maintenance est éclatée entre le département d'ingénierie de la division Maintenance (généralistes), le département d'ingénierie de la division Systèmes (spécialistes), le département d'ingénierie de la division Conception (pour les modifications) ; enfin il y a sur le site une logique de planification très forte mais confiée à la structure de *work control*, ce qui crée une nouvelle interface entre conduite, *work control* et maintenance.

Zion n'a pas encore de politique réellement arrêtée en matière de chargés d'affaires et chefs de projets. Une des étapes préliminaires, pour la société, consiste d'abord à renforcer la présence de la hiérarchie sur le terrain : les liens ont été renforcés entre le chef d'exploitation et le chef d'arrêt ; un dirigeant de haut niveau est toujours disponible, intégré à l'équipe d'arrêt, et cette mesure est jugée très efficace par l'exploitant (peut-être parce que cela donne une capacité de décision en temps réel) ; enfin le chef d'arrêt exerce désormais un contrôle renforcé sur la planification. Les chefs de projet suivent une formation commune mais il semble que les opérations de maintenance soient conduites par un mélange des équipes permanentes de la centrale et de personnes nommées de façon *ad hoc* pour un arrêt. En fait l'organisation des arrêts était placée traditionnellement sous la responsabilité du *work control*, mais l'équipe EDF a découvert à son arrivée que cette organisation n'était pas véritablement structurée et qu'elle changeait même au cours des arrêts !

L'une des propositions des Français consiste à intégrer tous les services concernés au projet d'arrêt dès sa préparation et à appliquer pleinement le concept de management par projet. C'est, pour EDF, le moyen le plus efficace pour clarifier les responsabilités et faciliter les opérations transverses. Ces principes ont commencé à entrer en application lors de l'arrêt de Zion-2 qui se déroulait en septembre 1996, lors de ma visite sur le site. Des représentants de tous les services impliqués ont été placés en tant qu'adjoints ou délégués auprès du chef d'arrêt, afin de piloter les opérations relevant de leur domaine

d'activité et d'assurer l'interface avec les structures « normales » compétentes de la centrale.

C'est ainsi que se sont agrégés à l'équipe d'arrêt des assistants pour l'ingénierie, pour la maintenance, pour les travaux, pour la radioprotection. Ceux-ci pilotent des chefs de projet pour les générateurs de vapeur (Ingénierie), pour les diesels, les servo-moteurs, le couvercle de cuve, les pompes primaires, le système de protection du réacteur, etc. (Maintenance), la turbine, le condenseur, les circuits intermédiaires, etc. (Travaux).

A Waterford on m'a également fait part de l'orientation « projet » des opérations de maintenance en arrêt de tranche. L'examen de l'organigramme de l'équipe d'arrêt fait effectivement apparaître de nombreux « projets » : pompes primaires, diesels, turbine, systèmes secondaires, rechargement, intégrité du confinement, échafaudages, érosion-corrosion, batteries, chaufferettes du pressuriseur, etc.. Il semble qu'il y ait également une équipe de plus de 10 personnes spécialement dévolue à la coordination des interventions dans le bâtiment réacteur.

De façon générale, il faudrait connaître dans le détail quelles sont les dispositions d'organisation retenues pour le travail des chefs de projets. A Waterford comme à Zion le temps m'a évidemment manqué pour savoir si ceux-ci sont détachés suffisamment tôt pour prendre connaissance de leur projet⁽⁸⁾ ; pour savoir quel est le degré d'autorité hiérarchique qui leur est accordé sur les exécutants du projet ; pour savoir comment s'articulent leurs fonctions avec celles des services structurés de la centrale, etc.

La circulation de l'information est également considérée comme un élément essentiel à la réussite de l'arrêt. Tous les moyens sont largement utilisés : réunions quotidiennes, supports papier, outils informatiques. Le papier et l'informatique nécessitent et suscitent la rigueur, les réunions animent la vie de l'arrêt et renforcent la cohésion des équipes. Leur importance est très vivement ressentie, surtout aux États-Unis — ce qui n'est pas étonnant puisque cela correspond bien à un trait culturel anglo-saxon. L'une des toutes premières mesures décidées par la nouvelle direction de Zion était d'ailleurs de raccourcir et recentrer les diverses réunions quotidiennes afin de leur redonner de l'efficacité.

Pour l'INPO, la reprise en main du « contrôle des interventions » (*work control* ou *work process*) est également un élément clef dans la reconquête des arrêts. L'INPO a organisé des évaluations croisées (*peer reviews*) sur ce sujet et a conduit de nombreuses missions d'assistance aux exploitants depuis 4 ans. La remise à plat du processus de travaux a pour objectifs une simplification et une réduction de la charge de travail « papier » ; ces objectifs sont surtout sensibles pour les tâches les plus simples, car on ne peut s'abstraire du papier — qui est un support de l'assurance qualité — pour les opérations complexes. Ce champ d'action suscite beaucoup de demandes de la part des exploitants car il est relativement aisé à mettre en oeuvre et le rapport coût-bénéfice est excellent, d'après l'INPO. Dans ce cadre, certains exploitants ont constitué des équipes '*fix it now*' qui accompagnent les équipes de quart et ont pour missions d'effectuer les

⁸ Notons à ce propos que, chez Entergy, les chefs de projet conservent pendant l'arrêt leurs fonctions normales : la direction du projet s'ajoute donc à leur travail habituel et il n'y a pas à proprement parler de détachement.

« premiers secours » auprès des matériels défaillants ou de les remettre en ordre avant une défaillance prévisible à court terme ; la "paperasserie" aurait été réduite de 60% pour ce genre d'action. En revanche l'INPO estime que certaines centrales ne maîtrisent toujours pas leur fonction de planification ; c'est très problématique dans un pays où la culture locale voulait que la maintenance ne soit que la continuation des activités d'exploitation, concentrées lors d'un arrêt donc gouvernées quasi uniquement par une planification renforcée.

Un autre moyen « évident » pour maîtriser la durée des arrêts consiste... à ne pas arrêter la tranche pour effectuer certaines opérations de maintenance, ou plutôt à choisir de les effectuer pendant le cycle d'exploitation.

3.3.3 Les exploitants américains recourent de façon croissante à la maintenance en fonctionnement (maintenance on line)

Il est difficile, si l'on n'a pas le loisir de se plonger au fond des programmes de maintenance effectivement appliqués, de savoir si l'on ne commet pas d'« erreur de parallaxe » lorsqu'on parle de maintenance *on line*. Prise dans son sens véritable, la maintenance *on line* est cette partie de maintenance préventive effectuée lorsque le réacteur est en fonctionnement plutôt que lorsqu'il est à l'arrêt. L'obligation de respecter les exigences générales de sûreté ainsi que les Règles d'exploitation montre que cette opération est plus difficile sur les réacteurs à deux trains que sur les réacteurs à quatre trains ; en fait, dans la vision d'EDF on ne peut faire de maintenance *on line* sur les réacteurs à 2 trains que sur les systèmes auxiliaires et non sur les systèmes de sauvegarde.

Aux États-Unis, au contraire, la notion recouvre souvent toutes les actions correctives (on répare une défaillance sans arrêter la tranche) et toutes les actions associées à la maintenance prédictive, c'est-à-dire en l'occurrence l'obtention d'un diagnostic sur un matériel. Il y a justement une confusion fréquente entre la maintenance *on line* et les actions de surveillance impliquées par la maintenance prédictive.

C'est cette ambiguïté qui est bien apparue lors des entretiens que j'ai eus avec les responsables exploitants de Zion. Ceux-ci me déclaraient en effet que faire de la maintenance *on line* permet de ne pas attendre le prochain arrêt de la tranche et que la plupart des travaux sur les systèmes de sûreté sont effectués en 3x8 pour rétablir leur disponibilité aussi rapidement que possible.

Les étapes probabilistes de sûreté sont largement mises à profit pour établir les procédures de maintenance *on line*. Le canevas utilisé à Zion consiste, une fois l'étendue du travail précisément déterminée, à évaluer la valeur numérique du risque (probabilité de fusion du coeur), à examiner si le résultat est compatible avec les spécifications techniques d'exploitation, puis à juger si le risque est « excessif ». Les STE restent la barrière obligée entre sûreté et développement de la maintenance *on line*. Les actions de maintenance ne nécessitent pas d'approbation *a priori* de l'inspecteur résident de la NRC mais celui-ci peut vérifier à tout moment que les STE sont bien respectées. L'exploitant évalue chaque jour le niveau global du risque grâce à un programme informatique développé sous les auspices de l'INPO.

Pour leur part les exploitants de Waterford semblent être moins avancés que ceux de Zion ; ils m'ont en effet indiqué qu'une réflexion vient d'être lancée sur l'opportunité de développer la maintenance *on line*. Le principe retenu serait de n'y retenir que les actions indispensables qu'il est possible de décaler hors de l'arrêt. Il semble qu'*Energy Operations* souhaite faire porter — au moins dans un futur proche — l'essentiel de ses efforts sur la qualité des arrêts de tranche. L'exploitant n'a pas encore digéré le choc d'une inspection de la NRC, il y a quelques mois, qui avait pour objet des difficultés d'exploitation rencontrées pendant les opérations de mise à l'arrêt du réacteur ; cette inspection s'était soldée par une prolongation d'arrêt de 20 jours... M. FISICARO, directeur de la division Sécurité nucléaire, me disait à ce propos qu'il n'est pas possible de « s'offrir » des problèmes de sûreté pendant l'arrêt de tranche. Cette relative réserve de l'exploitant n'empêche pas l'utilisation intensive des méthodes d'évaluation probabilistes d'évaluation du risque (ou de la sûreté), pendant et hors de l'arrêt de tranche.

Je ne peux manquer de m'interroger sur le lien éventuel qui existerait entre essor de la maintenance *on line* et (im)précision dans la rédaction des spécifications techniques d'exploitation. Il semble que les exploitants américains soient moins contraints que certains de leurs collègues européens (en particulier EDF) au niveau des STE. Ils pourraient donc avoir plus de latitude pour développer des stratégies « agressives » d'intervention tranche en marche, sous réserve de vérifier par le biais de méthodes probabilistes que l'accroissement du risque reste acceptable.

On peut au demeurant s'interroger sur la pertinence de ces évaluations probabilistes « au coin de la table », qui dépend grandement de la qualité des données de fiabilité introduites comme paramètres des calculs. A-t-on tous les éléments pour franchir le pas aujourd'hui en France ?

3.4 La protection radiologique des travailleurs : rigueur et efficacité

3.4.1 Le principe ALARA est très largement diffusé

Depuis quelques années le principe ALARA (*As Low as Reasonably Achievable*) irrigue toute la culture de radioprotection chez les exploitants nucléaires et chez certaines autorités sanitaires. Le succès du concept est tel qu'il serait aujourd'hui inconvenant d'avouer qu'on ne fait pas de l'ALARA dans son installation nucléaire ou dans sa réglementation selon que l'on est exploitant ou autorité...

Le principe ALARA a été introduit de façon formelle dans la réglementation suédoise en 1995, en même temps que la CIPR 60 était intégrée au droit national. Le SSI, institut de radioprotection, est chargé de son application. Le SSI ne se considère pas comme une « police » de radioprotection mais plutôt comme une « conscience de radioprotection » du nucléaire suédois. En ce sens il estime qu'il est plus productif d'instaurer un climat de confiance avec les exploitants et de jouer un rôle d'incitateur ou d'aiguillon plutôt que de Cerbère. Plusieurs méthodes sont employées :

- la promotion d'une véritable culture de radioprotection sur les sites, par une incitation au renforcement de la coopération entre les différents services internes des exploitants, "qui sont souvent un peu « ennemis »" ;

- le conseil aux exploitants pour mettre en oeuvre des politiques ALARA bien charpentées : le SSI se focalise depuis quelque temps sur la réduction des doses au cours de petits travaux d'une part, la réduction des débits de dose en liaison avec l'accroissement des inspections en service d'autre part ; ce dernier thème nous fait retrouver une nouvelle fois cette interface capricieuse entre les exigences de sûreté et les exigences de radioprotection, qui sont souvent l'occasion d'un poker menteur entre l'exploitant et ses autorités de tutelle, en sûreté et/ou en radioprotection ;
- par ailleurs le SSI a demandé à ABB Atom de mettre au point un programme de réduction de doses à long terme, spécifique à chaque réacteur ; il est notable que l'autorité se soit en l'occurrence adressée au concepteur-constructeur plutôt qu'à l'exploitant ; c'est bien le signe que la radioprotection concerne l'ensemble des acteurs et que le concepteur-constructeur ne saurait s'exonérer de toute responsabilité en la matière ;
- l'obligation de mettre au point des programmes ALARA dès que la dose collective prévue pour une opération donnée dépasse $100 \text{ homme} \times \text{mSv}$; depuis 1995 l'exploitant a également l'obligation de fournir au SSI un rapport de retour d'expérience sur toutes les opérations ayant une dimension importante au regard de la radioprotection ;
- la possibilité toujours présente de déclencher des enquêtes approfondies, voire des actions en justice, si des déviations inacceptables sont détectées.

Le revers de la médaille est que, selon les propres termes de M. BÄVERSTAM, directeur du département des recherches nucléaires du SSI, *"la frontière entre autorité et exploitant a pu être jugée obscure et un panel international d'évaluation a récemment estimé que la distinction devrait être plus lisible. Cependant il n'y a jamais eu de difficulté avec le public sur cette question délicate."*

Du côté de la Finlande, le STUK ne semble pas avoir été confronté à cette difficulté de positionnement. Il est vrai que son double statut d'autorité de sûreté et d'autorité de radioprotection l'incite naturellement à s'éloigner quelque peu de l'exploitant.

Le STUK a pour mission d'appliquer et de faire appliquer la loi. Le *Radiation Act* (1991) dispose dans son article 2 que *"pour être considérée comme acceptable, l'utilisation des rayonnements et les pratiques impliquant une exposition aux rayonnements doivent remplir les conditions suivantes : 1) les bénéfices retirés d'une pratique doivent être supérieurs au détriment qu'elle cause (principe de justification) ; 2) la pratique doit être organisée de façon telle que l'exposition résultante aux rayonnements dangereux pour la santé est maintenue aussi bas que raisonnablement possible (principe d'optimisation) ; 3) aucune exposition individuelle aux rayonnements ne doit dépasser les limites fixées par décret (principe de limitation)." ALARA a donc force de loi. Il est probable que les obligations correspondantes sont déclinées dans les guides YVL dont j'ai parlé précédemment, qui sont au nombre de 13 dans le domaine de la radioprotection.*

Les performances dosimétriques de Loviisa sont plutôt bonnes. Lors des arrêts 1995, seules 5 personnes ont reçu des doses excédant 10 mSv et aucune supérieure à 20 mSv. La dose moyenne des personnes exposées était 1,3 mSv, tandis que la dose collective s'est élevée à 0,37 H.Sv pour Loviisa-1, à 0,34 H.Sv pour Loviisa-2 ; ces bons résultats doivent être tempérés par le fait que les arrêts 1995 étaient des « arrêts courts » pour lesquels le volume de travaux, en particulier de certaines tâches impliquant de plus fortes expositions, était réduit par rapport aux arrêts longs.

*Doses reçues à Loviisa-1 et 2 pour diverses tâches en 1995
(personnel de la centrale et prestataires confondus)*

PROFESSION	Personnes exposées	Dose collective (H.mSv)	Dose moyenne (mSv)	Dose maximale (mSv)
Radioprotection, habillement et blanchisserie	28	47,2	1,7	3,9
Groupe d'exploitation	28	11,7	0,4	1,2
Maintenance mécanique	131	200,9	1,5	6,9
Maintenance électrique	31	2,4	0,7	2,5
Maintenance Automatismes	26	23,8	0,9	5,9
Maintenance bâtiments	15	9,4	0,6	2,1
Calorifugeage	20	124,5	6,2	17,0
Inspection en service	71	98,1	1,4	4,3
Housekeeping	34	115,1	3,4	6,7
Échafaudages et travaux d'assistance	26	15,4	0,6	1,7
Décontamination et traitement des déchets	11	14,5	1,3	3,2
Combustible	8	8,0	0,8	1,1
Autres	50	22,2	0,4	2,3

Source : Loviisa Power Plant. Refuelling Outage 1995. IVO, 1995

Au titre de la prévention des expositions, la surveillance radiologique des sources de rayonnements montrait depuis plusieurs années un accroissement régulier des débits de dose sur Loviisa-2. En 1994, l'exploitant a décidé de procéder à une décontamination intégrale du circuit primaire, qui a permis cette année-là et les années suivantes de retrouver des débits de dose comparables à ceux de Loviisa-1.

Le panorama radiologique aux États-Unis est assez contrasté : ce pays n'a adopté que tout récemment les recommandations de la CIPR 26 (qui date de 1977), ce qui se traduit par l'introduction de la limite de 50 mSv par an alors que la limite précédemment appliquée était 120 mSv ! D'autre part l'exploitant a l'obligation de mettre en oeuvre un programme ALARA pour toute tâche dont la dose collective est susceptible de dépasser 10 H.mSv.

A Zion les performances en matière d'exposition sont médiocres : la centrale se situe dans le quartile inférieur pour le parc américain. En 1993 la centrale était 39^{ème} sur 44 sites accueillant des REP ; il faut dire que, avec près de 3 H.Sv par tranche — et même plus de 4 H.Sv en 1990 ! — il n'y a pas vraiment de quoi pavoiser. Pourtant, si les termes sources dans la tranche 1 sont deux fois plus élevés que dans la moyenne des REP à 4 boucles de refroidissement, ceux de la tranche 2 sont tout à fait « dans la norme ⁽⁹⁾. Il y a donc manifestement une difficulté importante au niveau de l'organisation et de la pratique de la radioprotection.

⁹ Par ailleurs, 10% du bâtiment réacteur de Zion-1 sont contaminés suite à un incident récent. Cette contamination nécessite un travail important et long visant à reprendre les revêtements et peintures.

Un plan ambitieux a été lancé, sur la période 1995-1999, pour faire entrer Zion dans le quartile supérieur, c'est-à-dire les 25 % des centrales les plus performantes. Les objectifs ont été fixés, qui concernent la dose collective par tranche (moyennée sur 3 ans), la dose collective annuelle totale, les doses collectives mensuelles et annuelles par département dans la centrale, les doses collectives en arrêt et pendant le cycle de fonctionnement. La politique de réduction s'appuie sur trois piliers :

- l'amélioration des procédés et des pratiques de travail : l'accent est mis sur la formation des travailleurs, la responsabilisation des départements (qui doivent mettre au point et respecter leur propre plan de réduction des doses), la nomination de coordinateurs ALARA dans chaque département (car l'implication du seul département de radioprotection est insuffisamment efficace et déresponsabilisante), un renforcement du rôle de pilotage et de soutien confié au département de radioprotection (qui doit entre autres animer un comité d'évaluation ALARA), une « planification ALARA » dont l'examen révèle une nature très composite, le développement de robots et d'outils téléométriques, la comparaison permanente avec les centrales les plus performantes ; les « économies » de doses espérées s'élèvent à 1,1 H.Sv ;
- la réduction des termes sources ; celle-ci emprunte des voies multiples : maîtrise de la chimie des circuits de refroidissement, réduction de la teneur en cobalt des matériaux, lutte contre l'apparition des « points chauds », réduction du maillage des filtres, décontamination chimique, etc. ; les « économies » de doses espérées s'élèvent à 3,8 H.Sv ;
- la maîtrise de la durée des arrêts (programmés et fortuits) et du volume des travaux : Zion estime pouvoir « économiser » 3,5 H.Sv entre 1995 et 1999 en réduisant la durée des arrêts programmés de 100 jours à 47 jours (objectif officiel de la centrale).

Chez Entergy l'effort à fournir est beaucoup moins important : la centrale de Waterford est déjà dans le quartile supérieur des centrales. Les objectifs ALARA sont fixés au niveau de chaque département opérationnel pour une année, et au niveau de chaque groupe de travail pour les tâches à effectuer pendant l'arrêt. D'après les dirigeants rencontrés, la culture ALARA du personnel est très bonne ; celui-ci est très réceptif aux efforts de réduction des doses — ce qui est somme toute assez normal — mais aussi à la rigueur nécessaire pour éviter même les faibles niveaux d'exposition. ce dernier point est peut-être plus notable, car il serait le signe d'une véritable attention portée aux petits ruisseaux qui finissent toujours par faire de grandes rivières...

Par ailleurs la réduction des doses passe par des mesures classiques de protection biologique renforcée pendant les interventions, ainsi que par la réduction de la durée des arrêts. Entergy estime en effet que, certains modes de protection n'étant pas disponibles pendant l'arrêt, le passage de 40 jours environ à 30 jours visés est susceptible de procurer un gain non négligeable en matière d'exposition. Enfin la réduction de l'intensité des termes sources est considérée comme un programme essentiel : comme à Zion, il comprend la mise en place de filtres plus performants destinés à limiter la diffusion des particules radioactives dans les systèmes connectés au réacteur, la maîtrise

de la chimie pendant les opérations de mise à l'arrêt et pendant l'arrêt lui-même, la lutte contre les points chauds, etc.

La protection radiologique, qui repose en grande partie sur la prévention, nécessite aussi une surveillance et un suivi efficaces des travailleurs exposés. La situation est ici quelque peu différente entre les deux pays nordiques visités et les États-Unis.

3.4.2 La surveillance et le suivi dosimétrique des travailleurs sont diversement efficaces

Bien que la réglementation suédoise reprenne strictement les recommandations de la CIPR 60 en termes de limites de dose, Vattenfall a décidé de se passer de la souplesse conservée par le système CIPR pour se fixer une limite propre de 20 mSv par an ⁽¹⁰⁾ ; 5 personnes l'avaient dépassée en 1995 et l'année 1996 s'annonçait encore meilleure à la date de ma visite.

K. EGNER m'indiquait que l'une des principales difficultés à Ringhals réside dans la « gestion » des personnels américains (Westinghouse, ABB-Combustion Engineering) qui peuvent arriver sur le site avec des doses cumulées proches de 50 mSv. Que faire avec ces travailleurs ? En fait la centrale s'est donnée le pouvoir de refuser l'entrée du site à toute personne qui serait « en délicatesse » de dosimétrie ; il s'agit d'une condition qui est intégrée dans les contrats passés avec les prestataires, qui ne sont donc pas pris au dépourvu.

Le film dosimétrique a été abandonné en Suède après 1976 au profit des dosimètres thermoluminescents (TLD). Des recherches approfondies sur les TLD avaient montré qu'il s'agissait d'un moyen efficace et simple à utiliser. Le SSI reconnaît cependant que le film présente l'avantage de pouvoir détecter des contaminations (traces spéciales sur le badge photographique) et offre une meilleure capacité à distinguer les énergies présentes dans les rayonnements. En fait cette dernière propriété est d'un intérêt limité puisque dans la majeure partie des cas on connaît bien les caractéristiques physiques des rayonnements. Le film subsiste au SSI mais les exploitants ont une nette préférence pour les TLD : ils donnent plus rapidement l'information dosimétrique, ils sont moins chers, ils ont une meilleure sensibilité. Les TLD sont développés et interprétés sur les sites et le SSI effectue un contrôle de qualité deux fois par an. Bien entendu la dosimétrie électronique est utilisée pour le suivi en temps quasi réel des interventions.

Un registre dosimétrique centralisé, ouvert avec l'approbation de la « CNIL » suédoise, conserve l'information dosimétrique réglementaire 50 ans après la première mention de chaque individu exposé. Il est la propriété des exploitants mais fonctionne selon les règles commerciales normales : les exploitants payent pour utiliser ses services. Le SSI a un accès illimité au contenu de ce registre ; il doit approuver les règles d'accessibilité pour les autres personnes désireuses de consulter le contenu du registre. L'information dosimétrique est couverte par ce qui m'a été présenté comme un secret médical ; selon le SSI, cela implique un accès restreint aux données du registre.

¹⁰ La CIPR 60 préconise 100 mSv sur 5 ans, ce qui revient au même *en moyenne* mais autorise à dépasser 20 mSv ponctuellement (pour autant que la valeur de 50 mSv ne soit jamais dépassée).

Cependant il semble que justement l'exploitant puisse l'utiliser pour des besoins non médicaux, à savoir l'entrée du personnel sur le site... Une question à creuser.

Compte tenu des échanges importants de travailleurs entre la Suède et la Finlande, les registres dosimétriques centralisés des deux pays sont "intégrés" selon les termes employés par mes interlocuteurs suédois et finlandais. Pour les travailleurs européens, un carnet dosimétrique est exigé. Pour les travailleurs américains, l'employeur doit établir un certificat spécial selon lequel la personne est apte à effectuer le travail requis, au regard du respect des limites de dose et pas de l'aptitude médicale au sens où l'entend la médecine du travail en France.

Le panorama est similaire en Finlande. L'exploitant est légalement responsable de la surveillance et du suivi dosimétrique des travailleurs exposés aux rayonnements. Il utilise pour cela des dosimètres TLD et la dosimétrie électronique pour le temps réel et la redondance. Les résultats sont versées dans une banque gérée en commun par les deux exploitants, TVO et IVO, tandis que le STUK gère la banque de données recueillant l'information dosimétrique réglementaire pour les usagers médicaux et industriels ; cette dernière recueille aussi les résultats fournis par les deux exploitants nucléaires, de façon à être complète.

Le champ couvert par la banque de données du STUK concerne tous les travailleurs opérant en Finlande et tous les Finlandais intervenant en Suède. Un travailleur finlandais appelé en mission à l'étranger part muni d'un « passeport dosimétrique » (sauf pour les interventions en Suède puisque les systèmes informatiques sont intégrés) ; de même tout travailleur étranger intervenant en Finlande doit présenter son passeport dosimétrique à l'exploitant. Mes interlocuteurs à Loviisa m'ont précisé que la véracité des informations contenues sur le passeport est de la responsabilité des intervenants.

La CIPR 60 a été intégrée à la législation nationale dès 1992, ce qui n'a causé de problèmes pour personne. Selon le STUK, les exploitants n'ont eu ni réticence ni nécessité de mettre au point des politiques particulières. En 1995 la dose individuelle maximale enregistrée sur les réacteurs finlandais était 15 mSv...

Aux États-Unis l'exploitant est également le responsable légal de la surveillance et du suivi des travailleurs. Les doses ne sont pas considérées comme secret médical. Au demeurant, m'avait expliqué M. ANDERSEN au *Nuclear Energy Institute* en 1995, les difficultés qui avaient pu être rencontrées avec les travailleurs, liées au désir de confidentialité sur les résultats dosimétriques, ont été levées lorsqu'il a été montré que le système « non confidentiel » contribuait à une meilleure protection. D'ailleurs la réglementation impose plusieurs obligations à l'exploitant :

- il doit tenir à jour un fichier des expositions individuelles pour tous les travailleurs ayant opéré sur le site, dès lors qu'ils occupaient des postes susceptibles d'être soumis à l'obligation de surveillance individuelle ;
- pour toute personne susceptible d'entrer en zone surveillée ou contrôlée et de recevoir, en une année, des doses nécessitant une surveillance individuelle, l'exploitant doit déterminer la dose reçue par exposition professionnelle

pendant l'année en cours et tenter (*'attempt'*) d'obtenir les extraits de registres permettant de déterminer l'exposition professionnelle cumulée.

La réglementation offre diverses possibilités à l'exploitant pour satisfaire à ces deux obligations. Il peut tout d'abord accepter, pour la première, une déclaration écrite de la personne concernée ou de son employeur le plus récent (pour les travaux sous rayonnements) qui indique la nature des travaux effectués pendant l'année et le total des doses reçues ⁽¹¹⁾. Il peut, au regard de la seconde obligation, accepter le formulaire NRC n° 4 signé par l'individu concerné et contresigné par une personne dûment habilitée relevant du dernier employeur « sous rayonnements » ou de son employeur actuel (si le travailleur n'est pas employé par l'exploitant).

Par ailleurs — pour boucler la chaîne et amorcer l'éventuel maillon suivant — l'exploitant doit inscrire l'historique dosimétrique du travailleur sur un formulaire NRC n° 4 tel que cité précédemment :

- il doit préciser les périodes pour lesquelles il lui a été impossible de récupérer l'information dosimétrique ;
- il doit réduire la limite admissible de 12,5 mSv pour chaque trimestre de l'année en cours pour lequel l'information dosimétrique n'est pas connue.

Il s'agit donc d'un système totalement décentralisé au niveau de chaque exploitant. La NRC, le *Nuclear Energy Institute*, l'INPO et les principaux exploitants considèrent aujourd'hui que l'organisation actuelle a montré ses limites et qu'il conviendrait de développer un système plus centralisé. Il faut noter que la NRC recueille chaque année les performances dosimétriques de tous les exploitants ; cette collecte s'effectue sur une base individuelle mais je ne sais pas si cela implique que les données soient nominatives ; de toute façon, la périodicité annuelle ne répond pas aux besoins du suivi dosimétrique.

D'après les informations que j'avais recueillies en 1995, le *Nuclear Energy Institute* devait être la cheville ouvrière d'un registre centralisé. Mes entretiens cette année à l'INPO me permettent de préciser que le système centralisé de collecte et conservation est en cours de finalisation (*Plant Access Data System*) et devrait être validé en 1997, sous l'égide du *Nuclear Energy Institute* ; la NRC devrait pouvoir obtenir des informations "globales". Si j'en crois l'intitulé du dispositif, il s'agit bien d'un système informatique capable d'informer les exploitants en temps réel sur le respect des limites de doses et la possibilité pour les individus concernés d'entrer ou non sur les sites.

¹¹ Remarquons au passage que cette disposition suppose que les doses individuelles sont échangées entre l'exploitant et l'employeur, de façon courante et régulière.

4. L'OPINION DU FRANCAIS...

Au terme de ce panorama nécessairement incomplet et imprécis, plusieurs lignes de force, ou impressions générales, ressortent des missions que j'ai accomplies à l'étranger.

1. La diversité d'approche des exploitants américains en matière de maintenance révèle justement le caractère essentiel de la maintenance dans les performances des centrales (en matière de sûreté comme en matière de production). Il me paraît à cet égard tout à fait significatif de voir que, à l'approche de la déréglementation du marché électrique américain, les exploitants entreprennent des efforts significatifs pour améliorer l'état matériel de leur outil de production et l'opérabilité des centrales. On aurait pu croire que le mouvement serait inverse, en vertu du discours si fréquent selon lequel l'ouverture à la concurrence tue la vision à long terme. Il est vrai que, en l'occurrence, le parc nucléaire américain avait en moyenne une pente assez importante à remonter...

Il ne m'apparaît donc pas qu'il y ait une corrélation directe et évidente entre déréglementation et réduction des efforts de maintenance. Il y a en revanche une incitation claire à l'introduction dans les politiques de maintenance d'une perspective d'optimisation des choix technico-économiques. Cette mutation du « systématique » à l'« optimisé » nécessite de façon certaine une attention soutenue de l'autorité de sûreté, puisque les critères d'optimum ne seront pas nécessairement les mêmes pour tous les acteurs...

L'expérience des pays nordiques, où le marché a été déréglementé, comme celle des États-Unis où la déréglementation fait son chemin, me paraît devoir être mise à profit par l'exploitant EDF comme par l'autorité de sûreté française, afin que chacun ajuste ses objectifs, ses méthodes et son positionnement.

2. L'importance des relations entre exploitant et prestataires a été soulignée partout, explicitement ou implicitement. Dans tous les pays les partenaires industriels doivent conjuguer deux couples parfois orageux : mise en concurrence et gestion de la durée, surveillance et coopération. Personne n'a de clef universelle car les traditions culturelles en matière de relations contractuelles et de relations du travail sont très spécifiques.

3. Aux États-Unis l'implication de la hiérarchie est considérée comme essentielle pour la qualité d'exploitation. Pour les Américains, les impulsions, positives ou négatives, viennent d'abord d'en haut ; il y a une présomption de responsabilité qui pèse sur les dirigeants.

Je suis toujours frappé de voir combien cette notion de responsabilité vis-à-vis des autres (les supérieurs hiérarchiques bien sûr, mais pas seulement eux) est développée dans le monde anglo-saxon : demandez à un Français de décrire sa place dans une organisation, il vous détaillera ses fonctions et le nombre de personnes placées sous ses ordres ; demandez la même chose à un Britannique ou, surtout, un Américain, il vous décrira aussi ses fonctions mais vous dira qu'il doit « rapporter » devant untel. La fonction d'autorité découle ensuite de cette « sujétion de responsabilité », mais elle n'est pas première.

4. Le secret médical en matière de résultats dosimétriques individuels me paraît être une notion tout à fait relative, et carrément niée aux États-Unis. Je suis le premier à reconnaître que le « modèle social » américain ne cadre pas véritablement avec nos propres valeurs et que sa transposition est difficilement envisageable. Je remarque tout de même que ni la Suède ni la Finlande n'ont la réputation d'être des pays réactionnaires en matière de droits des salariés et de protection de la vie privée.

Je m'interroge alors sur les états d'âme perpétuels qui agitent le monde médical et celui de la radioprotection dans notre beau pays de France...

5. Je constate que les exploitants américains supportent sans trop de dommages qu'une réduction de la limite annuelle maximale soit imposée lorsqu'on n'est pas capable de reconstituer complètement l'historique dosimétrique d'un travailleur sur l'année en cours ⁽¹²⁾. Cela devrait faire réfléchir tous ceux qui prétendent qu'il est impossible, ou tout au moins nuisible, d'instaurer des limites de dose au prorata de la durée de contrats pour les travailleurs précaires intervenant en zone contrôlée.

Je sais bien que les deux dispositifs ne visent pas à couvrir les mêmes situations et ne sont pas strictement équivalents. Ils sont cependant similaires dans leur esprit, puisqu'il s'agit de protéger le travailleur en tenant compte des expositions qu'il est susceptible d'avoir reçues hors du circuit connu du suivi dosimétrique.

J'estime assez piquant de trouver à l'étranger, dans un pays qui n'est peut-être pas réputé pour la rigueur de la protection radiologique de ses travailleurs, un soutien à la 8^{ème} recommandation que je formule dans le présent rapport.

C'est une nouvelle fois la preuve que l'on ne peut pas se contenter de se battre à coups de grands principes — qui restent bien sûr nécessaires pour guider l'action — mais qu'il faut aller sur le terrain et ouvrir un peu ses horizons.

C'est ce que je m'efforce de faire dans mon travail quotidien au sein de l'Office parlementaire.

¹² Certes la limite normale est 50 mSv, ce qui « laisse plus de latitude » pour exposer les travailleurs que la limite de 20 mSv en moyenne ; mais la réduction trimestrielle de la limite est elle-même proportionnée à cette valeur.

L'EVALUATION GLOBALE DE SURETE D'UN CNPE : LE CAS DE SAINT ALBAN (NOVEMBRE 1996)

Ayant choisi d'orienter une partie de mes investigations de 1996 sur l'état d'avènement de la réforme de la maintenance, j'ai souhaité appuyer mon étude sur une expérience concrète. B. DUPRAZ, directeur de l'Exploitation du Parc nucléaire, a répondu favorablement à ma demande de participer à une évaluation de sûreté conduite par l'Inspection nucléaire sur un CNPE ; je l'en remercie à nouveau vivement.

Les contraintes mutuelles de calendrier ont conduit à choisir l'évaluation effectuée en novembre 1996 sur le site de Saint Alban (Isère). Cette évaluation était un peu particulière en ce qu'elle se produisait pendant le déroulement de l'arrêt annuel de Saint Alban-2. Cette heureuse coïncidence (pour moi !) m'a ainsi permis à la fois d'observer le processus d'évaluation et de vivre un peu de la vie d'une centrale pendant le temps fort de la maintenance : l'arrêt de tranche.

Avant de présenter le déroulement de l'évaluation, dans toutes ses composantes (méthodologiques, humaines, matérielles, temporelles, etc.), il me paraît nécessaire de brosser rapidement le cadre général qui préside au processus.

1. LES PRINCIPES GENERAUX DE L'EVALUATION

1.1 L'évaluation de sûreté effectuée par l'Inspection nucléaire s'intègre à un dispositif d'ensemble du parc nucléaire

Le principe de décentralisation appliqué à la gestion de son parc nucléaire par EDF conduit à dire que les sites agissent dans un cadre prescriptif tout en disposant d'une marge de manoeuvre :

- le cadre prescriptif, fixé par la direction du parc, s'ordonne autour d'un noyau dur : les règles de sûreté soumises à l'approbation de l'autorité de sûreté ; il s'agit évidemment de dispositions qui s'appliquent avec rigueur et dont le respect est d'ailleurs vérifié par l'autorité lors des inspections qu'elle pratique sur le terrain ; dans ce noyau dur on peut ranger les STE (spécifications

techniques d'exploitation), les REP (règles d'essais périodiques), les RCIA (règles de conduite incidentelle et accidentelle) ;

- la marge de manoeuvre découle du mode de management du parc : le pilotage repose souvent sur des directives ou instructions, qui fixent des principes généraux dont la déclinaison et l'application locales sont laissées à la charge des sites ; la marge de manoeuvre se concrétise dans le Plan stratégique d'unité, qui détermine pour 3 ou 4 ans les objectifs que se fixe le CNPE (ou les autres unités du parc) et le mode de pilotage de l'unité ; par ailleurs le site met en oeuvre des moyens de contrôle interne pour vérifier à la fois le respect des objectifs qu'il s'est fixés en propre et celui des objectifs fixés au niveau national.

Pour assurer la cohérence du système, la direction du parc dispose de 3 outils, que je présenterai sous forme « fonctionnelle » :

- l'élaboration des règles applicables au parc (parmi lesquelles on peut d'ailleurs ranger les « démarches » comme la démarche Sécurité-Maintenance ou la démarche Sécurité-Conduite) ; cette fonction est assurée par les MCP (Moyens centraux du parc) ;
- le contrôle hiérarchique, qui s'exerce à travers la chaîne directeur du parc-chefs de zone (deux « zones » rassemblent chacune les sites à 2 et 4 tranches)-chef de site ;
- l'évaluation *a posteriori*, conduite par l'Inspection nucléaire ; l'IN est un instrument de contrôle externe aux sites et aux unités centrales (UTO, GDL, etc.) ; dans ce que j'appellerais le contrôle de 1^{er} niveau, elle évalue la conformité des pratiques locales aux orientations et prescriptions nationales, ainsi que l'adéquation des moyens ; dans un contrôle de 2^{ème} niveau l'IN évalue l'efficacité des pratiques ; dans un contrôle de 3^{ème} niveau l'Inspection réfléchit sur l'applicabilité des règles.

Dans le domaine plus particulier de la sûreté on compte donc deux dispositifs, pour deux responsabilités : les évaluations globales de sûreté, réalisées par l'Inspection nucléaire pour le compte de la direction du Parc ; l'autoévaluation, réalisée par l'unité pour son propre compte. Pour ces deux dispositifs le référentiel d'évaluation est largement commun mais les méthodes diffèrent évidemment.

1.2 L'évaluation de sûreté répond à de nombreux objectifs

L'évaluation vise avant tout à donner une appréciation claire et objective des résultats des CNPE en matière de sûreté, en ce qu'ils peuvent être spécifiques à chaque site. Cette appréciation est destinée à la fois à la direction du parc, qui doit répondre de certains engagements devant l'échelon national de l'autorité de sûreté, et à celle du site, qui doit connaître ses forces et faiblesses afin d'engager les actions correctrices nécessaires.

L'évaluation vise aussi à favoriser l'intercomparaison des sites nucléaires, moyennant une segmentation judicieuse des domaines donnant lieu à évaluation. Il s'agit d'une part de contribuer à remobiliser les sites qui n'ont pas atteint les résultats escomptés ; d'autre part d'alléger éventuellement le rythme des contrôles systématiques pour les sites qui obtiennent de bons résultats. L'intercomparaison a ainsi une dimension géographique — chaque site pouvant se situer par rapport à ses homologues — et temporelle — chaque site pouvant juger de ses progrès par rapport aux évaluations précédentes.

Ce dernier aspect n'est pas encore pleinement opérationnel. La pratique des évaluations globales de sûreté ne date que de 1994 et le programme de travail de l'Inspection nucléaire prévoit que les sites sont évalués en moyenne tous les deux ans. Saint Alban avait étrenné la formule en 1994 et l'évaluation de 1996 était justement le premier « retour » de l'Inspection nucléaire sur le terrain.

Par ailleurs les évaluations peuvent également répondre à des attentes particulières qui seraient formulées par les sites, les MCP ou les unités opérationnelles du parc. Pour l'évaluation de 1996, Saint Alban avait souhaité que l'Inspection effectue un examen approfondi des conditions du passage en APE (documentation, formation, dossiers de modifications) ; le site souhaitait également que soient déterminées, dans la mesure du possible, les conséquences sur la sûreté des difficultés sociales vécues au début de l'année. Cette dernière tâche était à l'évidence assez délicate.

Par nature l'évaluation fournit au site des éléments complémentaires de ceux délivrés par son contrôle interne. Elle donne donc l'occasion de positionner le fonctionnement du contrôle interne par rapport au contrôle externe, et en fait de rechercher *in fine* une meilleure complémentarité. Enfin l'évaluation est également un vecteur d'échange grâce à la présence d'évaluateurs « pairs » c'est-à-dire issus d'autres sites nucléaires et participant à une inspection déterminée.

1.3 L'équilibre de l'évaluation repose sur des responsabilités partagées

1.3.1 L'équipe de l'Inspection nucléaire est garante de la qualité de l'évaluation

L'Inspection nucléaire est responsable de l'ensemble de l'évaluation, en particulier de sa qualité. Celle-ci est garantie : par l'utilisation d'une méthode d'évaluation homogène, reproductible et la plus simple possible ; par la légitimité des acteurs composant les équipes d'évaluation — et la présence des pairs donne une part de cette légitimité ; par le positionnement de l'Inspection au sein du parc.

La présence des pairs est une caractéristique importante des évaluations pratiquées par l'Inspection nucléaire. Affectés chacun à un domaine précis de l'évaluation, ils apportent à l'équipe leur connaissance opérationnelle « fine » du domaine étudié. Ils peuvent également confronter leur propre expérience avec celle du site évalué et servir, dans un sens comme dans l'autre, à l'échange direct de bonnes pratiques entre les sites. J'ai pu constater à Saint Alban la réalité de ces trois avantages. Par ailleurs les pairs acquièrent une expérience du contrôle qui peut leur être utile dans leur activité normale.

Pour l'évaluation de Saint Alban, les pairs étaient F. KIEKENS, ingénieur conduite à la centrale de Doel (Belgique), N. KRIEGER, chef du service Électricité du CNPE du Bugey, J.P. ROUDIER, Ingénierie de maintenance au CNPE de Penly et M. TURPIN, service de radioprotection du CNPE de Cruas.

Il est à noter que l'INPO, peuplée jusqu'ici d'évaluateurs professionnels, a décidé récemment de s'orienter vers la constitution d'équipes mixtes accueillant des pairs, sur le modèle de ce qui est fait à EDF. Il est vrai que, d'après ce que m'ont dit diverses personnes, les motivations purement budgétaires ne sont pas absentes de cette évolution.

De façon classique, l'équipe d'évaluation est organisée autour d'un chef d'équipe et de son assistant, des pilotes désignés pour chaque domaine évalué, des inspecteurs IN et des inspecteurs « pairs ». Elle s'appuie pour partie sur les MCP, qui aident à la préparation et au dépouillement des évaluations et prennent en compte le traitement des points génériques sur le parc.

1.3.2 Le site oeuvre à la réussite de l'évaluation par une collaboration ouverte

Le site doit faciliter la réussite de l'exercice par une attitude constructive, valider les constats effectués par les inspecteurs et définir les suites à donner.

Il désigne, pour chaque thème couvert par l'évaluation, des « interlocuteurs de site » qui sont les correspondants privilégiés des pilotes de domaine. En particulier ils sont chargés de valider avec eux les constats et observations effectués sur le terrain.

Un « hôte », qui est généralement le chef de la Mission Sécurité-Qualité, constitue une interface privilégiée entre le site et l'équipe d'évaluation. Il participe à la mise en place de l'évaluation (en particulier des déplacements sur le site) ; il suit de près les travaux de l'équipe et participe à chaque étape dans la mesure où il le juge nécessaire ; il doit permettre au site de s'approprier les conclusions de l'évaluation à l'issue de celle-ci.

L'hôte doit respecter une « déontologie » pendant le déroulement de l'évaluation puisqu'il a connaissance de l'opinion des auditeurs alors même qu'elle est en train de se constituer, par la confrontation des expériences de chacun. A cette occasion, l'hôte peut reprendre sa « casquette » de site pour faire valoir tel ou tel argument pendant les discussions internes à l'équipe d'évaluation. La déontologie implique cependant que le contenu de ces discussions ne soit pas porté à la connaissance d'autres personnes du site.

Enfin consigne est donnée au personnel du site de faciliter autant que possible le déroulement de l'évaluation, en étant disponible pour des entretiens et en donnant accès à toute la documentation demandée. Je dois constater de ce point de vue que l'évaluation de Saint Alban s'est déroulée — pour la partie que j'ai pu suivre — dans un esprit d'ouverture et de franchise totales. Il n'est pourtant pas évident de voir ses pratiques de travail et ses modes d'organisation passés au crible de l'audit et disséqués sans complaisance. C'est justement l'un des enjeux de l'évaluation que de dépasser le caractère inéluctablement personnel de la collecte de l'information pour s'attacher au fond des pratiques.

A cet égard, j'ai été frappé par la façon dont certains inspecteurs passaient, insensiblement, du vouvoiement au tutoiement de leur interlocuteur au cours d'un entretien. Délibéré ou non, ce mouvement aboutissait la plupart du temps à abolir la frontière qui sépare usuellement l'inspecteur de l'inspecté ; il n'y avait plus alors que des experts réfléchissant ensemble à une question déterminée.

2. LA METHODE ET LE DEROULEMENT DE L'EVALUATION DE SURETE

2.1 L'évaluation repose sur une méthode d'où l'on s'efforce de bannir le subjectif

2.1.1 Le champ de l'évaluation est établi de façon exhaustive

L'évaluation de sûreté est « globale » donc a vocation à couvrir les grands domaines d'activité d'une centrale nucléaire : conduite, maintenance, ingénierie, radioprotection, protection incendie, « équipe commune », etc. S'y ajoute un domaine spécial qui concerne la contribution des structures Sûreté-Qualité du site. Enfin l'évaluation est l'occasion pour un oeil extérieur de regarder l'état général des installations ; une organisation spécifique est définie pour ce domaine qui est largement transverse à tous les autres.

D'une manière générale, chaque pilote de domaine est chargé d'effectuer le suivi des recommandations émises suite aux inspections précédentes.

Par ailleurs l'évaluation de certains sujets à caractère très transverse se fait selon une approche « par activités ». Pour Saint Alban les activités retenues étaient les requalifications (thème confié à l'équipe chargée de l'évaluation Maintenance, avec un travail commun avec l'équipe de conduite) et le lien entre pilotage du coeur et essais périodiques (thème confié à l'équipe chargée de l'évaluation Conduite).

Certains sujets nécessitent aussi une attention particulière en terme de coordination entre les domaines : la gestion des DMP, les COMSAT (chaque domaine recueille et exploite ses données mais la synthèse globale est faite par l'équipe Maintenance), le REX (l'équipe Ingénierie définit les « prestations » qu'elle attend des autres équipes et doit faire la synthèse et établir l'avis global de l'Inspection nucléaire), les PLMP (l'élaboration des PLMP est regardée par l'équipe Ingénierie, leur mise en application par l'équipe Maintenance). De façon générale, tout ce qui touche à l'ingénierie doit faire l'objet d'une grande attention en termes de communication entre les différentes équipes d'évaluation.

Enfin l'évaluation porte aussi sur certains sujets précis dont l'Inspection nucléaire est saisie par la direction du Parc. A Saint Alban, l'Inspection devait ainsi effectuer des vérifications sur l'application de la règle de fonctionnement à fuite faible et les fiches d'actions incendie (équipe Conduite), la corrosion sous calorifuge, la qualification des matériels aux conditions accidentelles et l'interchangeabilité (équipe Maintenance), la capacité du bâtiment combustible (équipe Ingénierie), etc.

2.1.2 Des référentiels encadrent l'évaluation pour chaque domaine étudié

Le référentiel d'évaluation rassemble, par grands thèmes, les objectifs de sûreté à atteindre pour chacun des domaines dans lesquels il est établi. Le référentiel est commun à tous les sites ; il est la traduction de la doctrine de sûreté adoptée au niveau du parc et, à ce titre, est validé par la direction du parc.

Le référentiel d'évaluation vise à définir les objectifs de sûreté qui doivent être remplis par le CNPE ou l'unité opérationnelle, auxquels sont associés des performances de sûreté qui déclinent dans le détail les objectifs. Pour effectuer ce travail, le domaine étudié est découpé en « thèmes » qui correspondent chacun à un processus de travail. Ainsi le domaine Maintenance est découpé en 6 thèmes :

- A/ Organisation-Management :** il s'agit de voir comment l'impératif de sûreté est intégré au pilotage du CNPE, comment les règles de l'arrêté Qualité de 1984 sont respectées, comment les différentes équipes du site articulent leurs actions, comment fonctionne le système d'information ;
- B/ Formation-Métiers :** deux préoccupations sont sous-jacentes : le niveau de compétence et le professionnalisme, ainsi que le processus d'habilitation qui vise à garantir au sens de l'assurance qualité que l'exécution des tâches est effectuée par du personnel compétent ;
- C/ Programme-REX-Historique :** ce thème couvre tout ce qui concerne la mise en oeuvre des programmes de maintenance (rédaction des gammes d'intervention standard en fonction du contenu des programmes, etc.) et les moyens de prendre en compte le retour d'expérience et de maîtriser l'historique des procédures et matériels ;
- D/ Préparation des interventions :** il s'agit ici de voir comment sont définies les prestations achetées à l'extérieur, comment sont constitués les dossiers d'intervention, comment sont effectuées les analyses de risques et comment sont définies et mises en oeuvre les exigences de qualification des outillages utilisés sur les chantiers ;
- E/ Coordination des activités :** ce thème concerne les requalifications (pour voir comment sont coordonnées les actions et préparés les changements d'état), la remise en service des installations (respect des règles générales d'exploitation avant le franchissement de chaque étape importante dans le redémarrage du réacteur) et la planification ;
- F/ Déroulement des interventions :** thème à visage multiple, il traite de la conduite et de la surveillance des chantiers, de la gestion des DMP, de la détection et du traitement des écarts, etc.

Il faut ensuite identifier les exigences de sûreté et de qualité qui sont attachées à chaque thème ; une courte synthèse de ces exigences produit un « fil rouge » qui, dans la phase suivante, guide les rédacteurs des objectifs et performances.

Les objectifs de sûreté sont définis à l'intérieur de chacun des thèmes. Ils traduisent de manière synthétique la situation théorique que l'auditeur devrait rencontrer pour conclure au bon fonctionnement de la partie de processus couverte par cet objectif. Par exemple, dans le thème « Déroulement des interventions », un objectif concernant la surveillance des chantiers a été identifié ; il apparaît dans le référentiel sous la forme de deux phrases : *"Les intervenants respectent les exigences de qualité et de sûreté définies par le site. Sur la base des constats effectués par le contrôle, une appréciation du niveau de qualité des prestations est réalisée et des plans d'actions de progrès sont engagés"*.

Les performances de sûreté déclinent ensuite plus en détail cet objectif. Elles visent à en donner une traduction plus concrète et plus proche de l'observable. Le niveau atteint dans chaque performance aidera l'évaluateur, lors du dépouillement et de l'analyse des observations de terrain, à caractériser le niveau atteint pour l'objectif. Les performances « apparaissent » à l'issue d'une sélection (par le biais d'une analyse de risques) des effets découlant du processus considéré et des causes possibles de non-performance :

"a- chaque intervention fait l'objet d'un contrôle qui est adapté selon les dysfonctionnements possibles pouvant être induits lors de la mise en oeuvre des modes opératoires ;"

"b- les règles d'assurance qualité sont parfaitement maîtrisées par les agents chargés de la surveillance ;"

"c- le donneur d'ordre et le prestataire s'assurent que les exigences notifiées sont complètes et bien comprises ;"

"d- le contrôle exercé sur les chantiers garantit que les parades prévues lors de l'analyse préalable des risques sont effectivement mises en oeuvre ;"

"e- le niveau de qualité des prestataires est apprécié sur la base de constats précis et sans équivoques ; ces constats permettent au prestataire d'élaborer un plan d'action de progrès."

2.1.3 Les guides d'évaluation proposent une grille d'investigation sur le terrain

Malgré le degré de détail atteint au niveau des performances de sûreté, les référentiels restent assez généraux dans leur formulation. Ils sont complétés, pour leur bonne application sur le terrain, par des guides d'évaluation qui sont des documents directement opératoires.

Une analyse de risques s'efforce de rechercher les défauts potentiels qui mettraient en cause l'atteinte d'une performance de sûreté. Les risques les plus critiques au regard de la sûreté et de la qualité sont retenus, afin de limiter l'ampleur des investigations à réaliser chez les futurs audités, donc l'ampleur du dépouillement des résultats. Les « critères observables » sont alors identifiés, qui permettront sur le terrain de détecter l'existence éventuelle du risque.

Ainsi les critères observables définissent les preuves tangibles qui permettront de juger si une performance est atteinte ou non. Les modalités pratiques d'évaluation

déterminent, pour chaque critère observable, la nature et le type de vérifications à effectuer sur le terrain ; ces modalités doivent servir de guide à l'auditeur, pour lui éviter de déborder du sujet mais aussi pour avoir la garantie que tous les points nécessaires sont abordés ; les modalités pratiques sont donc avant tout une liste d'actions concrètes : observer les opérateurs en salle de commande sur tel et tel point, interviewer les opérateurs sur telle et telle question, etc. Suivant le domaine, le thème et l'objectif de sûreté étudiés, ces modalités sont décrites explicitement avec plus ou moins de précision.

Pour l'objectif de sûreté relatif à la surveillance des chantiers, dont j'ai décrit plus haut les « performances de sûreté » associées, les critères observables sont, par exemple pour la performance a) : pertinence de la mission de chargé de contrôle ; interfaces avec le chargé d'affaires, la préparation, le contrôle technique et le chef de chantier ; conditions de détachement pour l'appropriation des dossiers ; prise en compte des exigences et des risques. Les modalités pratiques suggérées sont l'interview et l'examen des dossiers sur le tas (PdQ, fiches de détection et traitement des écarts, etc.).

2.2 L'évaluation se déroule selon un ordonnancement très précis

2.2.1 La phase de préparation vise à bien orienter les investigations

La préparation commence par une réunion préliminaire sur le site. L'Inspection nucléaire présente l'évaluation, ses objectifs, sa méthode et le déroulement prévisionnel. Elle recueille également les souhaits du site (que j'ai présentés précédemment, s'agissant de Saint Alban) et prend rapidement connaissance du contexte local. La réunion préliminaire a aussi pour but de commencer à définir les modalités concrètes de travail (dans quels bureaux seront logés les inspecteurs ? quels seront les matériels mis à leur disposition, etc.) et à préciser les besoins de l'équipe d'inspection pour bien préparer l'évaluation. Enfin le calendrier des opérations est défini à ce stade.

Sur le fond la nécessité d'orienter les investigations découle de ce qu'une évaluation (contrôle externe discontinu) ne permet pas de passer au peigne fin toutes les activités. La préparation est donc une étape essentielle, qui doit permettre de déceler les points les plus importants, les plus « prometteurs » en termes d'enseignements à tirer. La préparation repose sur plusieurs « piliers » :

- le recueil et l'analyse d'informations concernant le site, placés sous la responsabilité des pilotes de domaine ; ceci commence par l'examen d'une documentation « de base » émise par le site (comme les notes d'organisation qui décrivent les responsabilités et fonctions respectives des différents acteurs sur le site) ; les pilotes de domaine exploitent également les résultats de visites préalables sur le site qui permettent d'explorer par avance certains points du référentiel, d'alléger la charge de travail pendant l'évaluation principale, et de se forger des premières idées sur la situation ;
- le soutien des MCP, sur des questions générales qui touchent cependant le site ;
- la prise en compte des demandes complémentaires, émanant du Parc ou du site.

La préparation débouche sur un premier diagnostic, évidemment provisoire, sur les forces et faiblesses apparentes du site. Ce diagnostic permet d'orienter la suite des travaux en mettant en évidence des axes où les investigations doivent être plus poussées. La préparation se solde par un document de synthèse, rédigé par l'IN, qui vise à donner une vue générale du site au travers de ses indicateurs de sûreté, de ses incidents et événements, de son contrôle interne et des actions de contrôle externe déjà effectuées (précédente évaluation de l'IN, visites de l'autorité de sûreté, etc.).

La préparation s'achève par un travail en équipe constituée, où les pairs s'approprient la préparation effectuée par les évaluateurs professionnels de l'Inspection nucléaire, et s'informent des méthodes d'évaluation qu'il faudra appliquer sur le site. Le mode de fonctionnement de l'équipe sur site est défini à cette occasion, tandis que les guides spécifiques d'évaluation sont mis au point. Pour l'évaluation de Saint Alban, cette réunion s'est tenue du 22 au 24 octobre 1996.

2.2.2 La réalisation sur site privilégie le recueil des faits au plus près du terrain

L'évaluation sur site est réalisée en deux semaines non consécutives qui ont pour but de recueillir toutes les données de terrain nécessaires, de préciser et réorienter les investigations pendant les 15 jours de « repli » à Paris qui séparent la première semaine de la seconde, d'effectuer une première analyse « à chaud » en fin de seconde semaine d'évaluation.

Les pilotes de domaine se réunissent chaque jour pour faire le point sur les travaux écoulés ; l'équipe complète se réunit une fois la 1^{ère} semaine, 2 fois la seconde. Il s'agit de coordonner les actions — pour les sujets qui nécessitent une forte interaction entre plusieurs domaines — et accessoirement de s'informer du déroulement de l'ensemble de l'évaluation en confrontant les idées de tous. Par ailleurs le chef d'équipe rencontre régulièrement la direction du site, pour la tenir informée des éventuels sujets de préoccupation de l'équipe et confirmer les axes d'investigation. Enfin chaque pilote de domaine rencontre régulièrement son correspondant pour signaler et faire corriger les anomalies nécessitant des actions correctives urgentes, commenter et valider certains constats et observations, recueillir des informations complémentaires, préparer la restitution à chaud en fin de seconde semaine.

La présence sur le site commence par l'évaluation de l'état des installations. Pour Saint Alban, un tableau de visites a été établi, qui visait à respecter les principes suivants : les équipes étaient le plus possible « trans-domaines » ; elles étaient accompagnées le plus souvent possible par un agent du CNPE ; les évaluateurs du domaine radioprotection étaient affectés à l'atelier chaud et au bâtiment de traitement des effluents. Les inspecteurs utilisent une fiche spéciale pour noter les constats effectués au cours de la visite des installations. Les fiches sont collectées et analysées le soir même par le chef d'équipe et son assistant ; le compte-rendu est établi et une courte réunion d'échange « à chaud » est alors organisée. D'après l'Inspection nucléaire, l'expérience a montré que cette réunion est très riche pour la suite de l'évaluation.

La deuxième journée sur site est consacrée à la visite de chantiers. Les inspecteurs peuvent utiliser un Guide d'inspection sur les chantiers qui, comme son nom l'indique et

comme j'ai pu le constater sur place, ne constitue pas une *check list* qu'il faut suivre rigoureusement mais plutôt un support aux observations de terrain. Alors que l'évaluation de l'état des installations, effectuée le premier jour, est une partie spéciale et autonome de l'évaluation générale, les visites de chantiers n'en sont qu'une modalité de travail particulière, par laquelle sont recueillies les informations nécessaires.

Elles s'agrègent donc aux travaux des journées suivantes, qui reposent essentiellement sur des entretiens et l'examen de dossiers, mais peuvent aussi comprendre de nouvelles visites (magasin à huiles, outillages, etc.). En se conformant au planning établi en phase de préparation, c'est la majeure partie des activités conduites sur le site qui sont ainsi étudiées pendant les jours suivants.

Tout au long de ces visites et entretiens, les faits observés sont traduits en constats, classés par ordre d'importance pour la sûreté. Positifs ou négatifs, ils conduisent à détecter les points forts ou les points faibles. Afin de fonder le jugement de l'Inspection sur les bases les plus solides et les plus incontestables, tous les constats établis par les inspecteurs donnent lieu à la rédaction d'une FIDO, Fiche d'Observations.

Les FIDO sont une pièce essentielle pour la qualité de l'évaluation. De la qualité de leur rédaction dépend la fiabilité de l'information utilisable. Il faut en particulier que les FIDO portent les « preuves tangibles » qui permettent de mesurer concrètement la performance concernée ; le rédacteur de la FIDO a donc l'obligation de rester très concret et d'éviter à ce stade toute appréciation approximative faisant appel à des jugements de valeur. Il ne s'agit pas de dire si une chose semble bien ou mal faite ; il s'agit d'abord de dire ce qui a été vu. Les FIDO sont rédigées en fin de journée ; elles donnent lieu à des discussions très utiles : pour moi, bien sûr, puisque le profane a parfois des difficultés à comprendre le jeu serré des questions-réponses qui fait la substance du jour ; pour les inspecteurs aussi, puisque la confrontation des idées contribue à une meilleure compréhension de la situation examinée — même si la FIDO doit se concentrer sur le concret.

Il est justement assez remarquable de voir que, pendant toute l'évaluation, les inspecteurs savent faire abstraction de leurs réflexes personnels et de leur propre expérience (surtout les pairs) dans la façon dont ils observent et jugent les actes des personnes auditées. Une seule fois j'ai vu un binôme d'inspecteurs, entraînés dans le feu de l'action, se laisser aller à expliquer à la personne auditée ce que devait être selon eux la bonne façon de faire ; les inspecteurs sont retournés voir la personne concernée le lendemain, en s'excusant de ce manquement aux principes de l'évaluation. L'une des conditions nécessaires pour assurer la qualité de l'évaluation réside justement dans la capacité de l'équipe à comprendre la logique de fonctionnement du site. Les constats de terrain doivent être appréciés à cette aune, et il n'est pas rare que des appréciations (souvent critiques) formulées en début d'évaluation soient ensuite revues voire éliminées après quelques jours passés sur place.

A cet égard le principe d'un double séjour sur le terrain, entrecoupé d'une période de repli dans les locaux parisiens de l'Inspection nucléaire paraît être une bonne chose. Non seulement parce que ce repli donne le temps matériel d'analyser les informations recueillies pendant la première semaine et d'ajuster éventuellement le programme des

visites et entretiens de la seconde, mais aussi parce qu'il permet aux inspecteurs de réfléchir et s'imprégner mieux encore des modes de fonctionnement et de la logique interne du site.

J'ai été particulièrement impressionné par la capacité des inspecteurs à détecter, au cours des entretiens, le « petit détail » qui révèle un problème sous-jacent, à ensuite circonscrire la question puis dévider le fil des difficultés et faire apparaître en pleine lumière un point vraiment sensible. Le caractère non exhaustif des vérifications par sondage montre ici qu'il n'est pas extrêmement gênant car des écarts dans l'organisation ou le fonctionnement des acteurs se traduisent quasi nécessairement dans les pratiques constatées sur les chantiers ou les documents examinés par les équipes d'inspecteurs. Il est vrai cependant que l'une des difficultés de l'inspection consiste à savoir rapidement si un écart donné ne constitue qu'une déviation isolée ou s'il est révélateur de défauts plus profonds. L'expérience de l'inspecteur comme l'ouverture et la franchise de l'inspecté concourent toutes à ce dernier objectif.

Je souhaite signaler enfin que la présence de l'Inspection nucléaire sur les sites est aussi un vecteur du retour d'expérience, même si cette dernière fonction peut paraître surprenante, voire « dangereuse » de la part d'une institution qui a vocation à évaluer et non à exercer des tâches opérationnelles. La visite du chantier « connecteurs K1 » sur les vannes RRA 32 VP a par exemple permis de constater que le REX déclenché suite à l'incident de Penly (février 1995) n'avait pas touché les services compétents à Saint Alban. Ce sont les inspecteurs visitant sur le chantier qui ont informé les exécutants et le chargé de contrôle de la modification nécessaire d'une procédure sur ces vannes.

2.2.3 L'analyse se solde par l'élaboration de multiples rapports

Les constats répertoriés par l'équipe d'évaluation et validés avec le site sont analysés, triés, recoupés et rangés selon les objectifs de sûreté inscrits dans le référentiel. Ils peuvent être éliminés lorsqu'il s'avère *a posteriori* qu'ils n'ont pas d'importance. Les écarts et les points positifs sont formulés pour chaque objectif de sûreté. Ces démarches sont synthétisées dans des notes techniques établies pour chaque objectif, dans chaque domaine.

L'analyse de sûreté proprement dite commence avec la recherche des causes des problèmes rencontrés ; cette recherche prend en compte — parmi d'autres — une grille « facteurs humains ». Les conséquences directes ou potentielles sur la sûreté ou la qualité déterminent l'importance des problèmes détectés et des causes sous-jacentes. Le résultat de ce processus se concrétise dans des Fiches d'Analyse de Sûreté, établies pour chaque objectif.

Enfin l'Inspection nucléaire formule ses appréciations quant à l'atteinte des objectifs de sûreté énoncés dans le référentiel. Elle fait un panorama des forces, des problèmes et des bonnes performances du site évalué. Elle détaille les suggestions et recommandations qu'elle estime devoir mettre en avant pour traiter les causes profondes des problèmes détectés. Ceci donne lieu à la rédaction d'un Rapport d'évaluation, qui rassemble à sa suite les Fiches d'Analyse de Sûreté évoquées au paragraphe précédent.

Pour Saint Alban, cinq rapports d'évaluation ont été élaborés, couvrant les domaines conduite, maintenance, ingénierie, radioprotection, contribution des structures sûreté-qualité ; un rapport spécifique consacré à l'équipe commune a également été rédigé, ainsi qu'un rapport couvrant l'ensemble des appréciations sur l'état des installations et le suivi des recommandations précédentes sur la protection contre l'incendie. Enfin un projet de rapport de synthèse rassemble, par domaine, les niveaux de performance, un avis global, les recommandations et les suggestions de l'Inspection.

L'évaluation donne lieu en effet à une « notation » du niveau de sûreté atteint pour chacun des thèmes composant chaque grand domaine. Les définitions sont celles de l'INPO, qui a autorisé EDF à les utiliser. Cependant, contrairement à la pratique de l'INPO, ce n'est pas le domaine qui est noté mais chacun des thèmes le composant. Les notes vont de 1 à 5, selon les définitions rapportées dans le tableau suivant.

Définition des 5 niveaux de sûreté et caractérisation associée

Niveau	Libellé	Caractérisation
1	Excellent	La performance d'ensemble est excellente. L'excellence requise pour l'industrie nucléaire est atteinte dans presque tous les objectifs de sûreté du thème. Aucune faiblesse significative n'a été notée
2	Bon	La performance d'ensemble peut servir d'exemple. L'excellence requise pour l'industrie nucléaire est atteinte dans beaucoup d'objectifs de sûreté du thème. Aucune faiblesse significative n'a été notée
3	Standard	La performance d'ensemble est en général conforme aux standards requis dans l'industrie nucléaire. Cependant des améliorations sont nécessaires dans nombre d'objectifs de sûreté. Quelques faiblesses significatives peuvent exister.
4	Acceptable	La performance d'ensemble est acceptable, mais des améliorations sont nécessaires dans bon nombre d'objectifs de sûreté du thème. Des faiblesses significatives ont été notées dans plusieurs objectifs de sûreté du thème
5	Inacceptable	La performance d'ensemble n'est pas acceptable pour l'industrie nucléaire. La marge de sûreté nucléaire est réduite de façon perceptible. Une action forte de management est nécessaire pour corriger les déficiences. Une attention particulière et un suivi sont nécessaires. Le niveau 5, s'il est obtenu dans plusieurs thèmes touchant la sûreté, nécessitera une prise de décision rapide sur la poursuite du fonctionnement de la centrale évaluée

Les rapports, sous forme de projets, sont envoyés au site pour validation (hors rapport de synthèse). Une réunion de premier niveau est programmée sur le site dans les trois semaines qui suivent l'envoi des textes. Elle a pour but : 1/ de valider définitivement les écarts relevés par l'Inspection ; 2/ d'expliquer les analyses, les recommandations et les suggestions formulées ; 3/ de recueillir les observations finales du site. Les rapports définitifs et le projet de rapport de synthèse sont adressés au site dans les 15 jours qui suivent la réunion de premier niveau.

Celle-ci est complétée par une réunion de deuxième niveau, qui se tient à Paris dans les 5 semaines qui suivent la réunion précédente. Avec la participation du chef de zone concerné et éventuellement des MCP, elle a pour but : 1/ de présenter les rapports définitifs et les niveaux de performance à l'intérieur de chacun des domaines (rapport de synthèse) ; 2/ d'examiner la façon dont le site réagit aux conclusions et aux

recommandations formulées par l'Inspection, en particulier la façon dont il entend mettre en oeuvre des actions correctrices ; 3/ d'examiner les problèmes éventuels liés aux référentiels d'évaluation utilisés. Le compte rendu de la réunion, le rapport définitif de synthèse et le recueil des observations sont ensuite adressés au site. Les rapports sont la propriété du chef de site : ils circulent en diffusion restreinte avec des exemplaires numérotés.

Le site a deux mois pour faire savoir les suites qu'il compte donner aux recommandations de l'Inspection. Celle-ci doit donner son avis sur la pertinence des orientations définies par le site. L'Inspection aura également pour mission d'évaluer sur place ces orientations, puisque le programme d'évaluation prévoit aujourd'hui un exercice tous les deux ans.

3. L'INSPECTION NUCLEAIRE A LA CROISEE DES CHEMINS

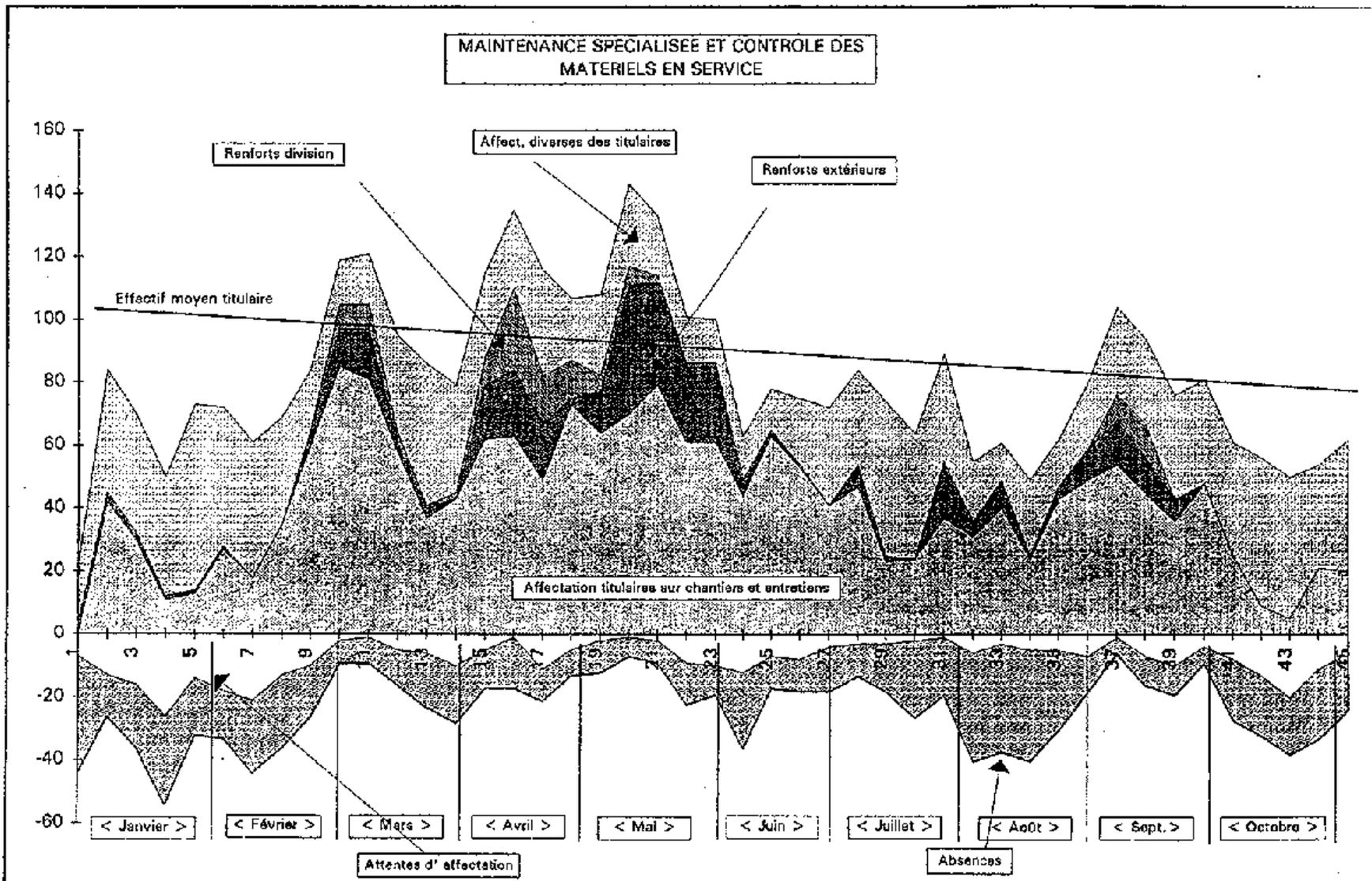
Créée en 1984 pour examiner au coup par coup des incidents ponctuels, l'Inspection nucléaire a vu progressivement son action prendre de l'ampleur. Une première inflexion a été justement le suivi de la mise en place du rapport NOC et de la réforme de la maintenance. Les méthodes ont été restructurées en 1994 avec la généralisation d'évaluations globales cherchant à s'inscrire dans la durée, l'appel systématique aux référentiels de sûreté, et plus largement le passage d'une évaluation quantitative, gouvernée par les *check lists* et autres grilles de référence, à une évaluation « qualitative » gouvernée par la définition d'objectifs de performance et la caractérisation des écarts éventuels et des bonnes pratiques.

Cette mutation des méthodes de l'Inspection ne semble pas être également perçue partout. J'ai souvenir de quelques discussions au restaurant de Saint Alban, où certaines personnes du site regrettaient que l'Inspection nucléaire reste focalisée sur les « inspections de conformité » alors que l'INPO pratique habituellement des « inspections de performance ». Il est vrai que dans les premiers temps — et en particulier pour le suivi de la mise en place de la réforme de la maintenance — la démarche suivie par l'Inspection était très quantitative. Mais, comme me le disait le 20 novembre dernier G. SERVIERE, chef de la Mission Sûreté nucléaire de l'EPN *"plus on est loin de l'objectif plus on peut être « rustique »"*. Les progrès réalisés dans l'exploitation du parc justifient l'évolution récente des méthodes d'évaluation.

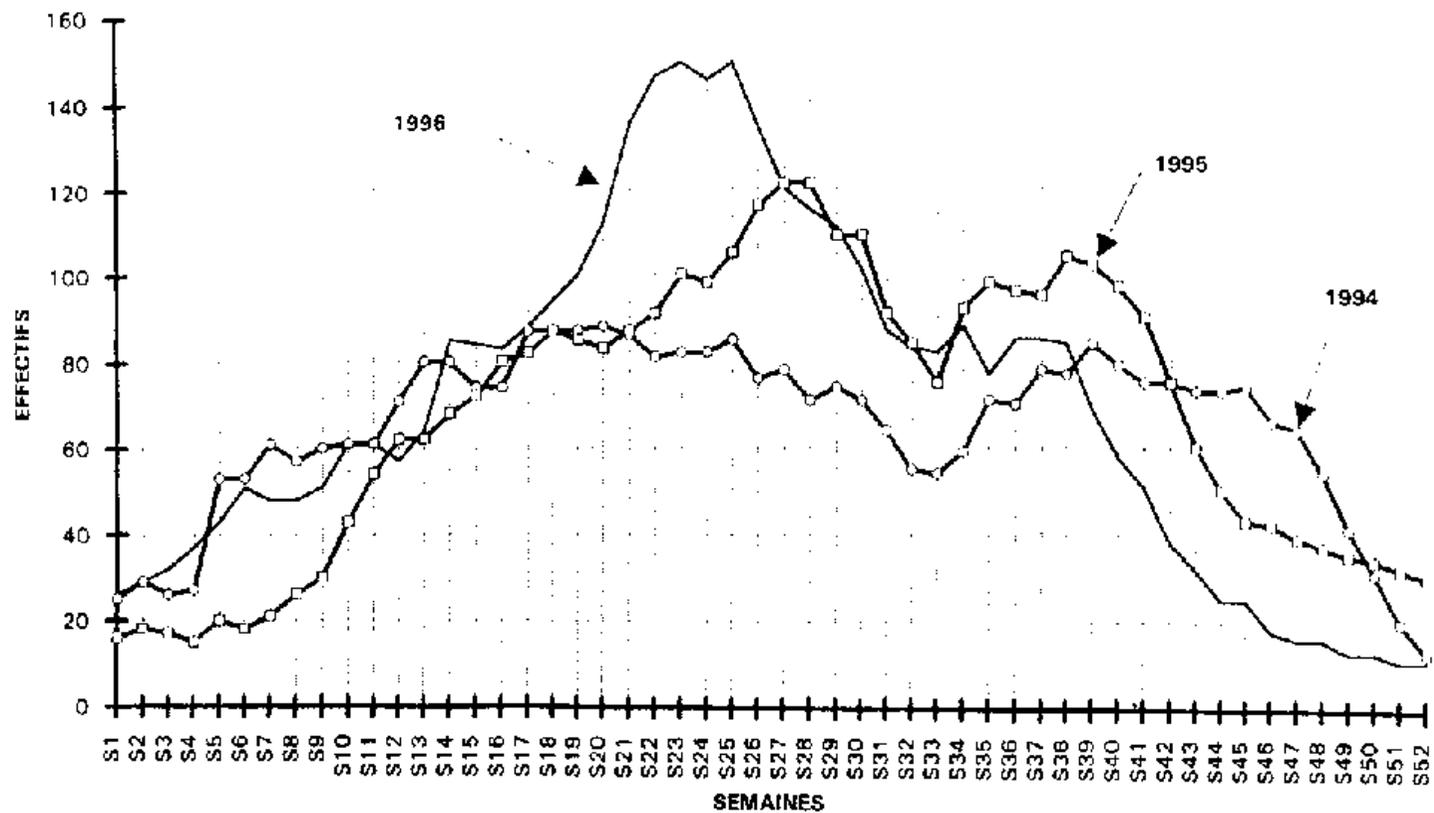
Cela implique en retour un fréquent travail d'analyse et de « retour sur soi », car définir un faisceau de performance adapté au temps présent, tout en restant suffisamment général pour être pertinent et permettre des évaluations comparées, n'est pas une mince affaire.

Ce n'est pas le moindre intérêt de cette expérience vécue à Saint Alban, que de m'avoir fait prendre conscience de ces aspects de la maîtrise de la sûreté nucléaire dans un parc comprenant plus de 50 unités.

Gestion de la saisonnalisation des arrêts de tranche chez Framatome
planche 1



EVOLUTION DES EFFECTIFS SITE CONTROLE COMMANDE



CHARGE ICE 1996

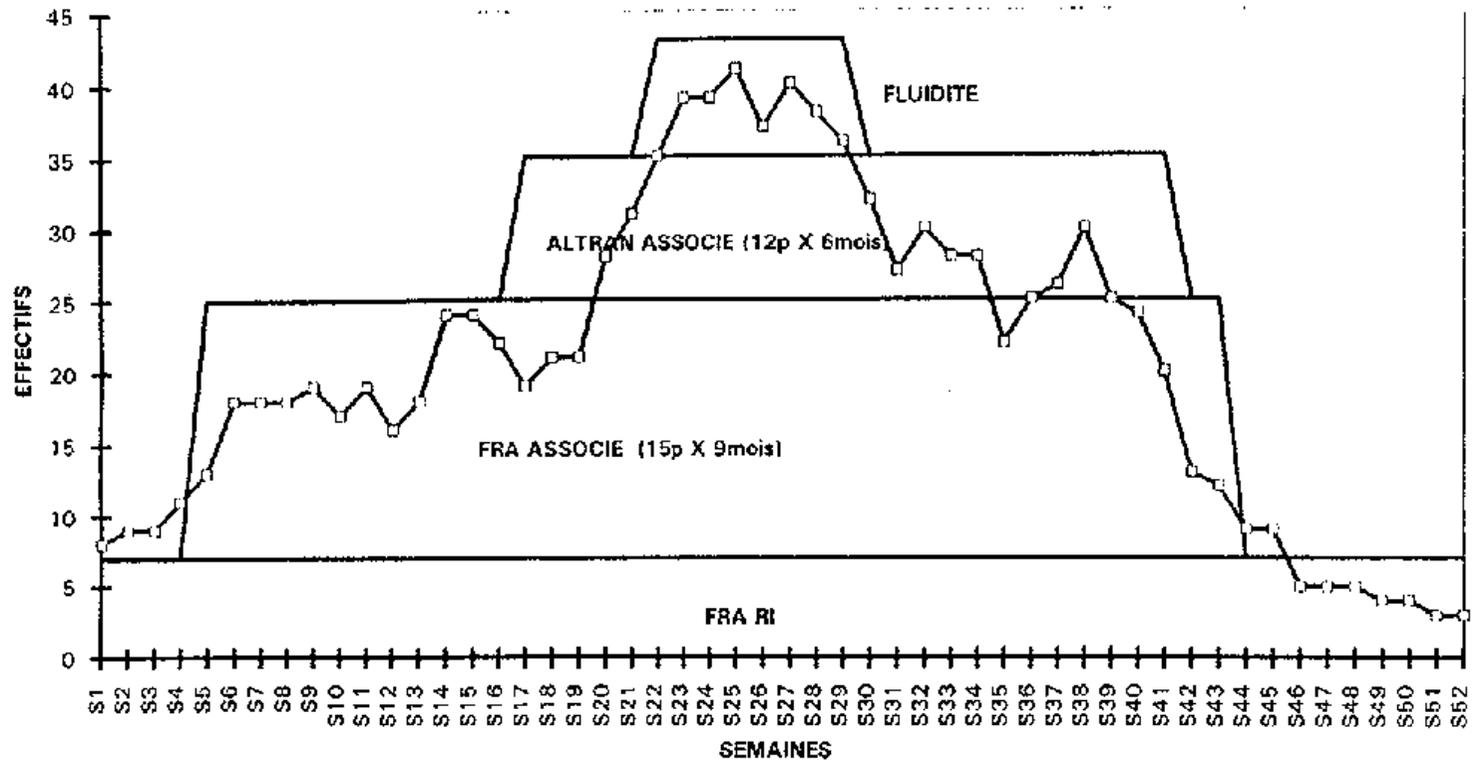


planche 3



CHARGE CCE 1996

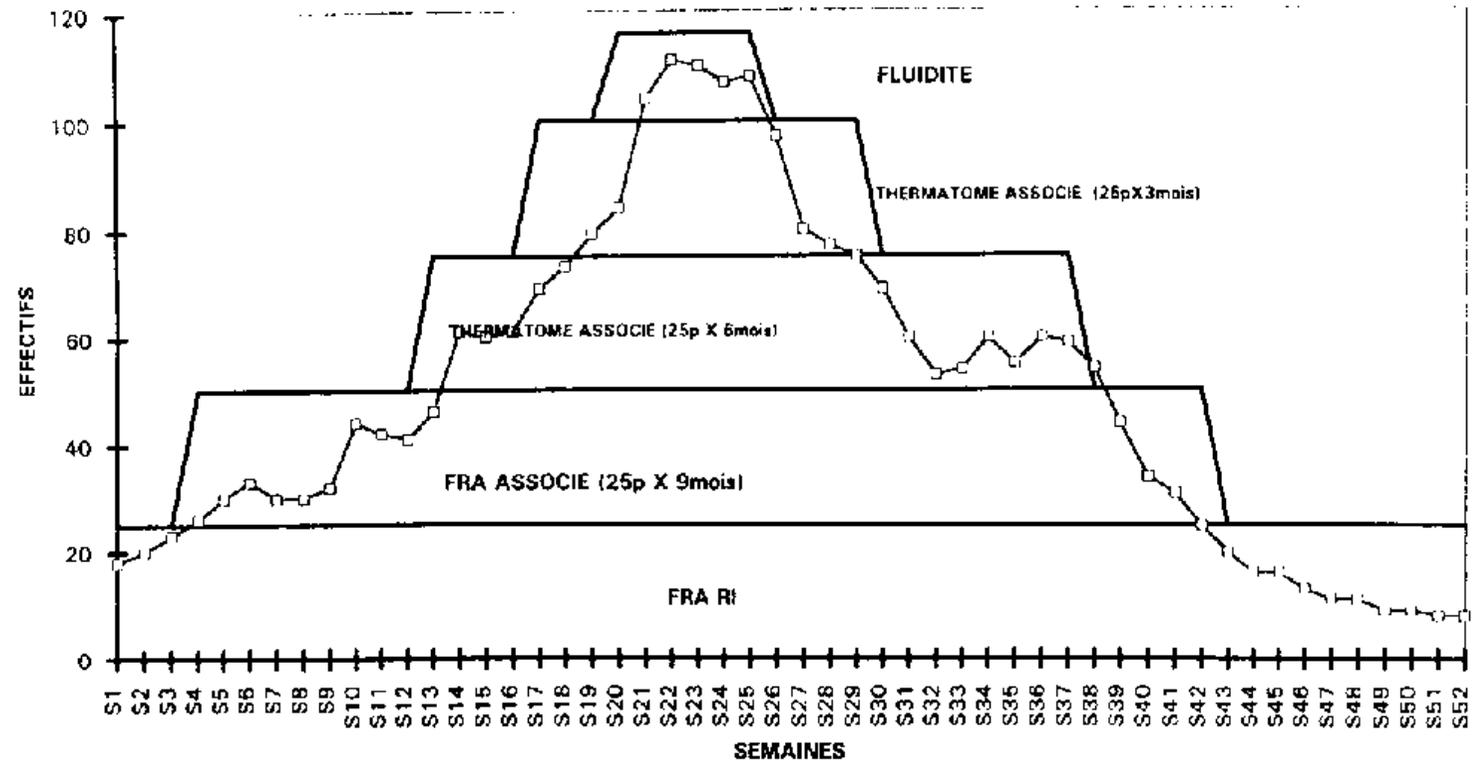


planche 4



selon programme
 uto 24/07/96

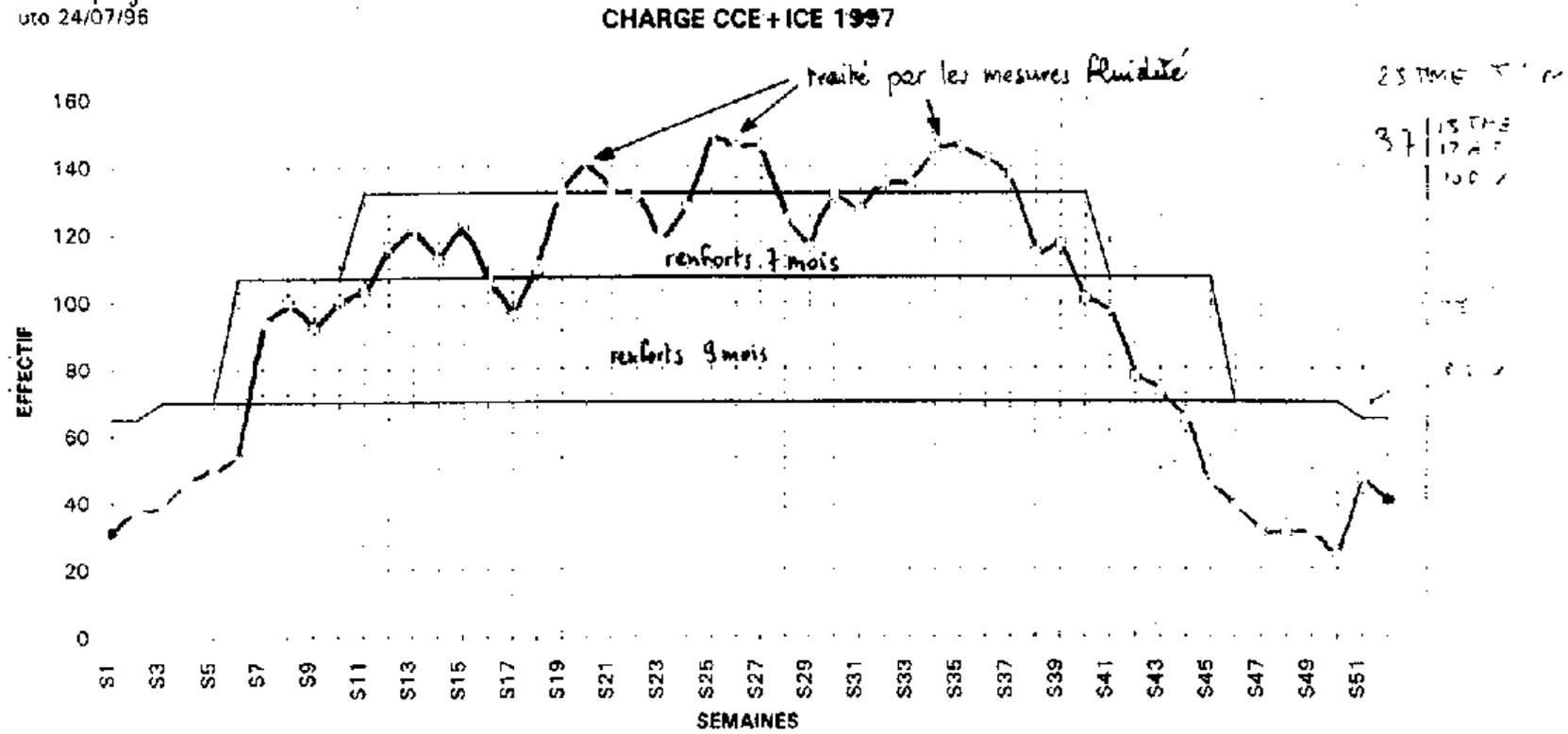


planche 5

REFORME DU CODE DES MARCHES PUBLICS

**Pourquoi faut-il désigner le
sous-traitant dans l'offre?**

**Parce que
la transparence est vertueuse**

**SNSO - SYNDICAT NATIONAL DU SECOND OEUVRE
8 Rue Catulle Mendès 75017 PARIS
Tél : 01 46 22 18 65 - Télécopie : 01 47 63 09 70**

Tout est dans le moment

Malgré le statut que lui confère la loi du 31 décembre 1975, la sous-traitance dans le BTP ne s'est pas encore parfaitement conciliée avec la normalité. Les conséquences en sont connues : manque de transparence, chaîne excessive d'intervenants, conditions parfois négligées, antichambre du travail clandestin... Ces vices sont attisés par le déséquilibre dans le pouvoir de négociation des parties. Ils émergent pourtant d'une même cause première : le moment auquel est désigné le sous-traitant.

Aucune entreprise générale n'est à même de réaliser par ses propres moyens l'ensemble des prestations pour lesquelles elle se porte candidate. Son offre résulte donc des devis obtenus des sous-traitants qu'elle a elle-même consultés. Mais, devenue titulaire du marché et forte de l'être, l'entreprise générale remet le plus souvent en concurrence, par une sorte d'adjudication clandestine, les sous-traitants initialement retenus avec d'autres, plus faméliques, en provoquant des rabais, poste par poste. Il en résulte, à son seul profit, une amélioration de la marge entre le prix de vente et le prix d'achat des prestations concernées, dans des proportions inconvenantes. S'il échappe au maître de l'ouvrage, ce prélèvement parasitaire lui en retourne les conséquences en non-qualité, a fortiori lorsque l'exécutant réel a travaillé en deça de son prix de revient, voire au noir.

Le déplorable niveau actuel des prix dans le BTP induit une déclinaison dramatique de cette technique. L'entreprise générale prend volontairement un marché à perte et «retombe sur ses pattes» en le sous-traitant encore davantage à perte pour l'exécutant véritable (sauf si à son tour, il se dégage par du travail clandestin). C'est ainsi que les pratiques occultes poussent au crime.

La loi de 1975 subordonne la faculté de sous-traiter à l'obligation pour l'entrepreneur principal de faire accepter chaque sous-traitant et agréer ses conditions de paiement par le maître de l'ouvrage. Ces formalités peuvent être accomplies à tout moment, qu'il s'agisse de l'intervention d'un sous-traitant en cours de chantier ou de la régularisation d'un autre antérieurement non déclaré. Les débats parlementaires de 1975 traduisent pourtant une volonté plus grande de transparence dès l'origine du marché. L'article 5 de la loi en est le témoin atrophie. Il prévoit que l'entrepreneur principal doit indiquer au maître de l'ouvrage public, lors de la soumission, la nature et le montant des prestations qu'il envisage de sous-traiter. Formulée en simple déclaration d'intention sans conséquences, la disposition s'est avérée inopérante. Par insuffisance de pouvoir, une circulaire du 7 mars 1978 ne l'a pas été davantage, bien qu'elle recommande également, au moins pour certains lots, la désignation du sous-traitant dans l'offre.

Cette précaution reste ainsi une simple faculté du maître de l'ouvrage, d'autant moins pratiquée qu'il s'adresse souvent à une entreprise générale «pour ne s'occuper de rien». Aujourd'hui le problème reste donc entier.

La transparence est vertueuse

Beaucoup d'arguments plaident en faveur de la désignation du sous-traitant dans l'offre.

- **L'objectivité du choix**

Pour apprécier véritablement une candidature, la visibilité du maître de l'ouvrage doit nécessairement aller au-delà du paravent que constitue l'offre principale, fut-elle bardée de ses plus beaux atours. Le client est en droit de savoir qui fera réellement quoi et pour combien. La prise en compte des garanties professionnelles des réalisateurs ne peut éluder d'aussi importants termes du choix.

- **La sécurité du chantier**

La nouvelle réglementation en matière de sécurité oblige le maître de l'ouvrage à nommer un coordonnateur dès lors que deux entreprises interviennent, sous-traitants inclus. Quand il confie ses travaux à un seul contractant, encore doit-il s'assurer s'il constitue une entreprise unique ou multiple. De plus, lorsqu'un plan général de coordination est nécessaire, comment l'élaborer en ignorant l'exacte identification des intervenants et la nature de leurs prestations ?

- **La qualité de l'ouvrage**

Un raisonnement symétrique s'impose au regard des démarches d'assurance qualité. Il ne peut y avoir procédure digne de ce nom si l'ensemble des intervenants n'est pas connu.

- **La simplification administrative**

Lorsque le sous-traitant est désigné préalablement, l'acceptation de l'offre principale emporte celle du sous-traitant et l'agrément de ses conditions de paiement. D'où la dispense d'une procédure administrative supplémentaire, telle "l'acte spécial" actuel.

- **La fin d'études inutiles.**

Les déperditions économiques liées à des études inutiles sont elles-mêmes réduites. Le plus souvent, une entreprise générale consulte d'abord, par son service commercial, avant la remise de l'offre, pour établir le prix de vente de la sous-traitance. Quand elle a obtenu le marché, elle consulte à nouveau, par son service travaux, pour acheter la sous-traitance au meilleur prix. Cette double procédure est néfaste à tous égards.

- **La loyauté commerciale**

Les comportements déloyaux s'affichent rarement au vu et au su du maître de l'ouvrage. Il en est notamment ainsi pour la pratique redoutée du «second tour» évoquée ci-contre. La désignation du sous-traitant dans l'offre est ainsi la condition d'une éthique de la sous-traitance.

- **La lutte contre le travail clandestin**

Le travail clandestin prospère de façon exubérante à l'abri des écrans de sous-traitance. Or le maître de l'ouvrage, même averti, a grand peine à contrôler quoi que ce soit si, quoi qu'il fasse, l'organigramme de la sous-traitance s'évanouit dans le brouillard.

● **La probité dans les marchés publics**

La plupart des «affaires» ont révélé des situations de sous-traitance. C'est, en effet, dans les grandes masses apacifiées des marchés trop globaux que s'épanouissent les comportements répréhensibles. Il ne pourrait en aller de même avec des contrats parfaitement transparents.

● **La promotion d'un esprit d'équipe**

Les relations de sous-traitance restent largement empreintes d'une évidente méfiance, ce qui nuit à la nécessaire franche coopération entre intervenants. Est généralement sous-traitant celui qui ne peut faire autrement. Les entreprises générales se privent souvent ainsi des services d'autres entreprises, les plus compétentes dans leur métier. En revanche, si les dés cessent d'être pipés, le sous-traitant se sentira en confiance et un véritable partenariat pourra s'établir avec l'entreprise principale, sur le fondement d'un échange mutuel d'intelligence.

● **La sécurité juridique du maître de l'ouvrage**

La loi, dans les marchés privés (art 14.1) et le CCAG-Travaux dans les marchés publics confèrent au maître de l'ouvrage professionnel un devoir de vigilance. Il doit en substance s'assurer que les sous-traitants dont il a connaissance soient pourvus d'une garantie de paiement. Son manquement est sanctionné par le versement de dommages-intérêts proportionnels au préjudice subi par le sous-traitant (de 30% à 50% devant les tribunaux administratifs, la totalité devant les tribunaux judiciaires). Les éléments par lesquels aura été prouvée la connaissance (PV de chantier, courriers...) n'auront pas nécessairement été appréciés en temps utile à leur juste portée par le maître de l'ouvrage, a fortiori si des sous-traitants sortent à tout moment et pour tout motif de derrière les fagots.



Traiter convenablement chaque question précitée revient à se prononcer pour la désignation obligatoire du sous-traitant dans l'offre.

On objectera que certaines circonstances peuvent motiver une dérogation : défaillance d'un sous-traitant initialement retenu, modification en cours de chantier de la nature de certaines prestations, télescopages imprévisibles de deux calendriers d'exécution... Il convient d'en tenir compte, pour autant que la tolérance n'oultre-passe pas le cas de force majeure, qu'elle soit dûment motivée et qu'elle ait l'assentiment du maître de l'ouvrage.

Le mécanisme autoresponsabilisateur que nous préconisons a le mérite de moraliser, de simplifier le Code, de ne rien coûter et de consacrer une parité effective des relations à laquelle chacun trouvera avantage.



**OFFICE PARLEMENTAIRE
D'ÉVALUATION DES CHOIX SCIENTIFIQUES
ET TECHNOLOGIQUES**

AUDITION OUVERTE A LA PRESSE

« Le projet de réacteur-accélérateur du Pr. Carlo RUBBIA »

Judi 21 novembre 1996

LISTE DES PERSONNES INSCRITES A L'AUDITION

- M. Samuel ANDRIAMONIE, CNRS
Mlle Maryse ARDITI, Forum Plutonium
M. Jean AUDOUZE, CNRS
M. Pierre BACHER, SFEN
Mme BAMIÈRE, SGDN
M. Bertrand BARRE, directeur (CEA-DRN)
M. Yannick BARTHE, CSI (École des Mines)
M. Roger BELBÉOCH, GSIEN
M. Robert BENOÎT, CFE-CGC (SICTAM)
M. Gérard BÉRAUD, Ministère de la recherche
M. Étienne BLANC, conseiller régional Rhône Alpes
M. Claude BONNET, CGT - Fédération Énergie
M. BOULOT, directeur adjoint, EDF-DER
M. Raimond CASTAING, Académie des Sciences
M. Georges CHARPAK, CERN
M. Jean-Pierre CHAUSSADE, EDF (Direction générale)
M. Michel COUDRAY, Framatome
M. Hubert CURIEN, ancien ministre
M. Ghislain DE MARSILY, Commission nationale d'Évaluation
M. Pierre DELIZY, Framatome
M. Étienne DENIS, SBEIBEX/CGE (Direction générale)
M. Roland DESBORDES, CRII-RAD
M. Claude DÉTRAZ, directeur (IN₂P₃)
M. Giu DO DANG, CNRS
M. DUPLESSY, Commission nationale d'Évaluation
M. Dominique FINON, Institut d'Économie et de Politique de l'Énergie (CNRS)
M. Claude FRANTZEN, EDF-IGSN
M. Claude GELÈS, CERN
M. Louis GONZALEZ-MESTRES, CNRS-Collège de France
M. Gilbert GROS, IPSN (Département d'Évaluation de Sécurité)
M. André GSPONER, Independent Scientific Research Institute (Suisse)
M. Jean-Yves GUEZENEC, Mouvement national de Lutte pour l'Environnement
M. Robert GUILLAUMONT, Institut de Physique nucléaire
M. Jean GUYOT, directeur adjoint, CEA-DCC
M. Samuel HARAR, CEA-HC
M. JACQ, DGRT (Ministère de la recherche)
M. Philippe KAHN, DGEMP (Ministère de l'Industrie)
M. Paul KESSLER, CNRS
M. Robert KLAPISCH, CERN
M. André-Claude LACOSTE, directeur (DSIN, Ministère de l'Industrie)
Mme Hélène LANGEVIN-JOLIOT, Institut de Physique nucléaire
M. Yves LE BAUT, IHEDN
M. Juan LEFEVRE, conseiller scientifique (CEA)
M. Jean-Marie LOISEAUX, Institut des Sciences nucléaires
M. Jacques MAILLARD, CNRS-Collège de France
M. Daniel MAIRE, CFTC-SNEN
M. Pierre MANDRILLON, directeur, Laboratoire du cyclotron
M. Roland MASSE, président (OPRI)

M. Gérard MENJON, directeur (EDF-DER)
M. Maurice MONNET, IHEDN
M. Jean-Claude MOUGNIOT, Ministère de la recherche
M. MOUNBY, EDF (DE)
M. Jean-Christophe NIEL, IPSN
M. Jean-Louis NIGON, directeur-adjoint (COGEMA-Combustibles)
M. Jack OLIVAIN, CISN
M. OUZOUNIAN, ANDRA (Direction générale)
M. Jean-Marie PARANT, président délégué, CFTC - Fédération EDF-GDF
M. Joseph PARISI, CNRS-Collège de France
M. Jean-Luc PASQUIER, directeur scientifique (OPRI)
Mlle Régine PEYRIÈRE, PNC
M. Jean PIECHOWSKI, DGS (Ministère de la Santé)
M. Jean PRONOST, Expert près la Cour d'appel de Paris
M. Daniel QUAGLIA, CFE-CGC
M. Yves QUÉRE, Académie des Sciences
M. Antoine REILLE, France Nature Environnement
M. Jean-Pierre REVOL, CERN
M. RIPPON, SGDN
M. Christian ROCHE, CERN
M. Raymond ROCHEROLLES, directeur général (SCRIP)
M. Michel ROUSSON, CFTC - Fédération EDF
M. Jacques ROYEN, Agence de l'OCDE pour l'Énergie nucléaire
M. Carlo RUBBIA, CERN
M. Arsène SAAS
M. Massimo SALVATORES, CEA-DRN
M. Jean-Paul SCHAPIRA, IN₂P₃
M. Jean-Pierre SCHWARTZ, CEA-HC
Mme Monique SENÉ, GSIEN
M. Raymond SENÉ, GSIEN
M. Robert TEISSEIRE, directeur adjoint, EDF-SEPTEN
M. Jean-Luc THIERRY, Greenpeace
M. Bernard TINTURIER, EDF (Contrôle général)
M. Bernard TISSOT, président (Commission nationale d'Évaluation)
Mme Annie VALLÉE, DRET (Ministère de la Défense)
M. VERGNES, EDF-DER
M. Gérard VINCENT, directeur délégué (SOPRA)
M. Jacky WEILL, président (Forum atomique français)
Mme WOLFF-BACHA

La séance est ouverte à 9h15, sous la présidence de M. Claude BIRRAUX, député de Haute-Savoie, rapporteur pour l'Office parlementaire sur « le contrôle de la sûreté et de la sécurité des installations nucléaires ».

M. BIRRAUX — Je vous remercie d'être nombreux à cette audition de l'Office parlementaire. Un certain nombre d'entre vous sont des fidèles des auditions de l'Office parlementaire. Je souhaite la bienvenue aux nouveaux participants.

Désormais, les auditions publiques ouvertes à la presse sont quasiment devenues une institution, et c'est notre Office parlementaire qui a introduit et généralisé cette méthode nouvelle dans le travail parlementaire. Le compte rendu intégral figurera en annexe au rapport qui sera publié au début de l'année prochaine.

J'aimerais saluer dans l'assistance de nombreuses et éminentes personnalités : Monsieur le Ministre Hubert CURIEN, ami de longue date de l'Office parlementaire ; le Professeur CHARPAK, Prix Nobel de physique ; les nombreux professeurs et chercheurs éminents qui nous ont fait l'honneur d'être présents également ce matin.

Je remercie aussi le Professeur Carlo RUBBIA qui a bien voulu accepter de participer et d'animer cette audition publique.

Dans votre *curriculum vitae*, Pr. RUBBIA, je retiendrai que vous êtes physicien au CERN depuis 1961 et que vous en avez été le directeur général de 1989 à 1993. Vous avez fait vos études supérieures à l'Université de Pise puis vous avez fréquenté la *Columbia University*. Vous avez également passé un certain temps à l'Université de Harvard en tant qu'enseignant et vous avez eu le Prix Nobel de physique en 1984 avec Simon VAN DER MEER.

Lorsque je regarde les différents diplômes, mérites et reconnaissances, vous êtes docteur *honoris causa* d'une vingtaine d'universités, vous êtes membre des différentes académies — j'en ai compté 26 dont l'Académie pontificale des Sciences. Vous avez eu une trentaine de prix scientifiques qui ont jalonné votre carrière.

Lorsque j'ai parcouru ce *curriculum vitae*, je me suis demandé ce que les Français avaient fait vis-à-vis du Pr. RUBBIA. Heureusement, le Président François MITTERRAND, en 1989, vous a remis les Palmes d'Officier de la Légion d'Honneur ; sinon, la seule contribution française eut été l'audition de cet office parlementaire !

C'est peut-être pour vous une première. Je rappelle que l'année dernière, lors de l'audition publique avec la Commission internationale de protection radiologique, et l'Académie des Sciences française, le Pr. CLARKE m'avait signalé qu'il était le premier scientifique britannique à venir s'exprimer devant une autorité politique française depuis que FARADAY s'était exprimé devant Napoléon III. Nous collectionnons aussi les premières avec les plus éminentes personnalités.

Je vous remercie, Professeur RUBBIA, et je vous donne la parole pour l'exposé introductif.

Pr. RUBBIA — Monsieur le Président, Monsieur le Ministre, Mesdames et Messieurs, chers collègues,

Un des devoirs d'un scientifique consiste à informer ceux qui ont la responsabilité du pouvoir de ce qui se passe au niveau scientifique. C'est dans cet esprit que je suis là aujourd'hui. Je tâcherai d'éviter dans ma présentation initiale trop de complications de caractère scientifique. Je m'excuse

après des experts, que je vois prêts à se lancer dans la discussion, d'avoir éliminé un certain nombre de détails techniques dans mon exposé.

Je suis un physicien qui a passé beaucoup de temps à faire de la physique fondamentale, de la physique dans laquelle la curiosité et le plaisir sont les seuls éléments qui me conduisent.

C'est une aventure passionnante, unique. Je me considère fortuné d'avoir pu le faire mais il est évident qu'à un certain moment, à un certain âge, quand on est à 2/3 ans de la retraite, le physicien se pose des questions plus vastes, et surtout la question de savoir à quoi sert la science et si l'on peut faire quelque chose d'utile.

J'ai cherché à mettre au service de ce problème pratique, fondamental, qui regarde l'ensemble de la société, mes connaissances, mon expérience et ce qui est le résultat de ma vie scientifique.

Evidemment, notre but est celui d'informer et de donner les faits. Il est certain que le physicien ne peut pas remplacer les pouvoirs publics, le pouvoir politique, la décision du citoyen qui est associée à l'application des idées. Nous donnons des connaissances, mais l'utilisation de ces connaissances est la décision de la société entière.

Je dois rester à ce niveau pendant ma présentation.

Chaque fois qu'on parle de choses sensibles comme l'énergie ou la biologie, il est normal qu'il y ait des sentiments et des points de vue forts qui se développent. C'est une chose inévitable mais cela ne veut pas dire que la science ne doit pas traiter la biologie et le domaine énergétique de la même façon.

J'espère que vous comprendrez cela comme un message de connaissance et que la décision sur la façon de gérer cela dans un cadre plus vaste est en dehors de l'esprit de ma présentation.

Je vais vous présenter un certain nombre de transparents.

« Accélérateurs de particules pour la production d'énergie et l'élimination des déchets nucléaires », tel est le but de ma présentation.

50 ans après ses débuts, et en dépit d'un indéniable succès (6% de la contribution à la production mondiale d'énergie), l'énergie nucléaire a encore besoin de recherche fondamentale et de développements majeurs. Les buts principaux devraient en être :

- améliorer son impact sur l'environnement ; en particulier il faut éliminer, ou tout au moins réduire fortement, les déchets radioactifs de longue vie à l'aval du cycle, y compris ceux qui ont été fabriqués par les REP existants ; la référence que nous empruntons à la fusion est que la radioactivité totale de l'inventaire des déchets soit comparable à celle des cendres de combustion du charbon, après quelques siècles de refroidissement (cela pour une même énergie produite) ;
- consommer entièrement le combustible naturel : à présent, seulement 0,4% de l'uranium extrait est brûlé, le reste est un déchet ; utiliser complètement le combustible, c'est aussi réduire les déchets de longue période ; tout ce qui est brûlé n'existe plus et n'est plus un problème pour ce qui concerne l'élimination des déchets ;
- améliorer la sûreté qui, de probabiliste, doit devenir déterministe ;

- éliminer, ou tout au moins réduire fortement, les risques de prolifération, puisque la demande d'énergie provient surtout des pays en voie de développement où les changements sont par définition rapides au détriment de la stabilité politique ;
- une simplicité technologique maximale allée aux coûts les plus bas, afin d'être compétitif avec les énergies d'origine fossile pour assurer le déploiement dans les pays en voie de développement où se trouvent les plus grands marchés.

Malheureusement, jusqu'ici, la préférence est allée à l'énergie la moins chère. Ceci ne changera vraisemblablement pas dans un avenir prévisible !

En substance, ma présentation vise à montrer comment, après un travail de 3 ans au CERN, incluant plusieurs expériences, une petite équipe internationale est arrivée à la conclusion que ces buts peuvent être raisonnablement atteints en faisant appel à des systèmes hybrides qui combinent un accélérateur de particules avec les technologies des réacteurs rapides.

Ces systèmes peuvent opérer tenant compte des besoins actuels :

- soit en symbiose avec l'ensemble des REP existants, afin d'améliorer la performance de ces systèmes et surtout leur impact sur l'environnement, en extrayant davantage d'énergie des déchets et en éliminant les déchets de longue période ;
- soit comme un système entièrement nouveau avec une production minimale de déchets, basé sur la filière thorium.

Après quelques généralités, je décrirai brièvement le travail accompli et les prochaines étapes de ce programme, en traitant les plus importants parmi les « pourquoi » et les « comment ».

Des faisceaux de particules pour la production d'énergie ? C'est la question qui est le but de cette présentation.

Les faisceaux de particules accélérées sont l'outil classique pour induire des réactions nucléaires. Peut-on les utiliser à des réactions nucléaires pour produire de l'énergie ?

Les faisceaux de basse énergie (inférieure ou égale à 10 MeV) produisent un nombre insuffisant de réactions car les particules sont arrêtées avant d'interagir à cause des pertes par ionisation. Pour éviter les pertes, il faudrait un plasma et cela nous amènerait à la fusion.

Les faisceaux de haute énergie (supérieure à 200 MeV) ont un parcours suffisant pour que les interactions utiles prédominent. Il faut donc un faisceau à énergie élevée.

La réaction doit être induite par neutrons car la barrière de Coulomb empêche la pénétration de particules chargées dans les noyaux de numéro atomique appréciable. Les rayons γ ont un taux d'interaction trop petit.

S'agissant de la réaction pour la production d'énergie, la fission produit 200 MeV/événement.

Un proton de 1 000 MeV produit dans le plomb environ 40 neutrons par spallation. C'est considérable. Afin de produire de l'énergie, les neutrons doivent interagir avec un milieu fissile. Ces neutrons produits par fission prolongent la cascade par un facteur $1/(1 - k)$, k étant le coefficient de multiplication qui doit être inférieur à 1 pour éviter la criticité.

Si nous posons $k = 0,9$, nous produirons 400 neutrons (40×10). Si 40% de ces neutrons produisent des fissions, nous aurons $400 \times 0,4$, soit 160 fissions. Compte tenu que chaque fission

produit 200 MeV, cela donnera 32 000 MeV. On obtient donc un gain énergétique de l'ordre de 32 000 divisé par 1 000, soit 32. Il est considérable, il est plus que suffisant pour alimenter l'accélérateur si l'on tient compte que le rendement énergétique de l'accélérateur est de l'ordre de 50%.

En vérité, $k = 0,9$ est un nombre très pessimiste. Dans ces conditions, avec un facteur 5 plus grand, à la place de 30, nous aurons un gain énergétique de 150. On peut avoir des gains entre 30 et 140, 160, 100, 120.

Sur les 60% de neutrons restant, 20% font des pertes et 40% sont encore disponibles, que l'on peut utiliser pour faire de la surgénération en produisant de nouveaux noyaux fissiles à partir d'un matériau non-fissile (Th_{232} , U_{238}). Nous pouvons utiliser ces 40% pour utiliser du combustible naturel. Le seul combustible naturel qui fissionne naturellement de façon abordable est l'uranium 235.

De cette façon, on a suffisamment de neutrons pour « activer » un combustible non fissile. Le temps de vie du matériau fissile est relativement court, de l'ordre de quelques mois (on le produit et on le brûle tout de suite). On produit à chaque instant exactement la quantité nécessaire.

D'ailleurs, un équilibre se réalise dans ce mécanisme de surgénération, qui s'appelle le *breeding equilibrium* : s'il y a trop de thorium à l'intérieur de notre machine, le thorium capturera davantage de neutrons, et il produira plus d'uranium 233. S'il y a trop d'uranium 233, il va brûler plus vite et c'est la mécanique d'équilibre qui fait que le système s'ajuste naturellement dans un rapport canonique qui s'appelle *breeding equilibrium*.

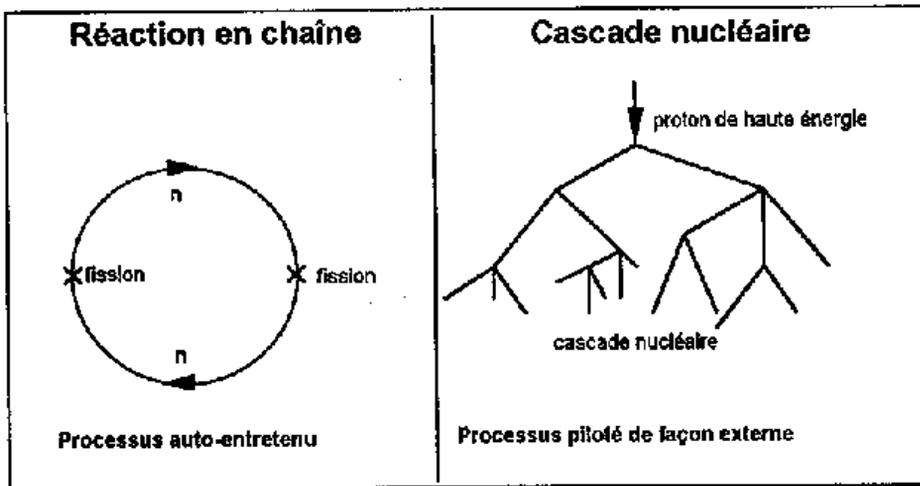
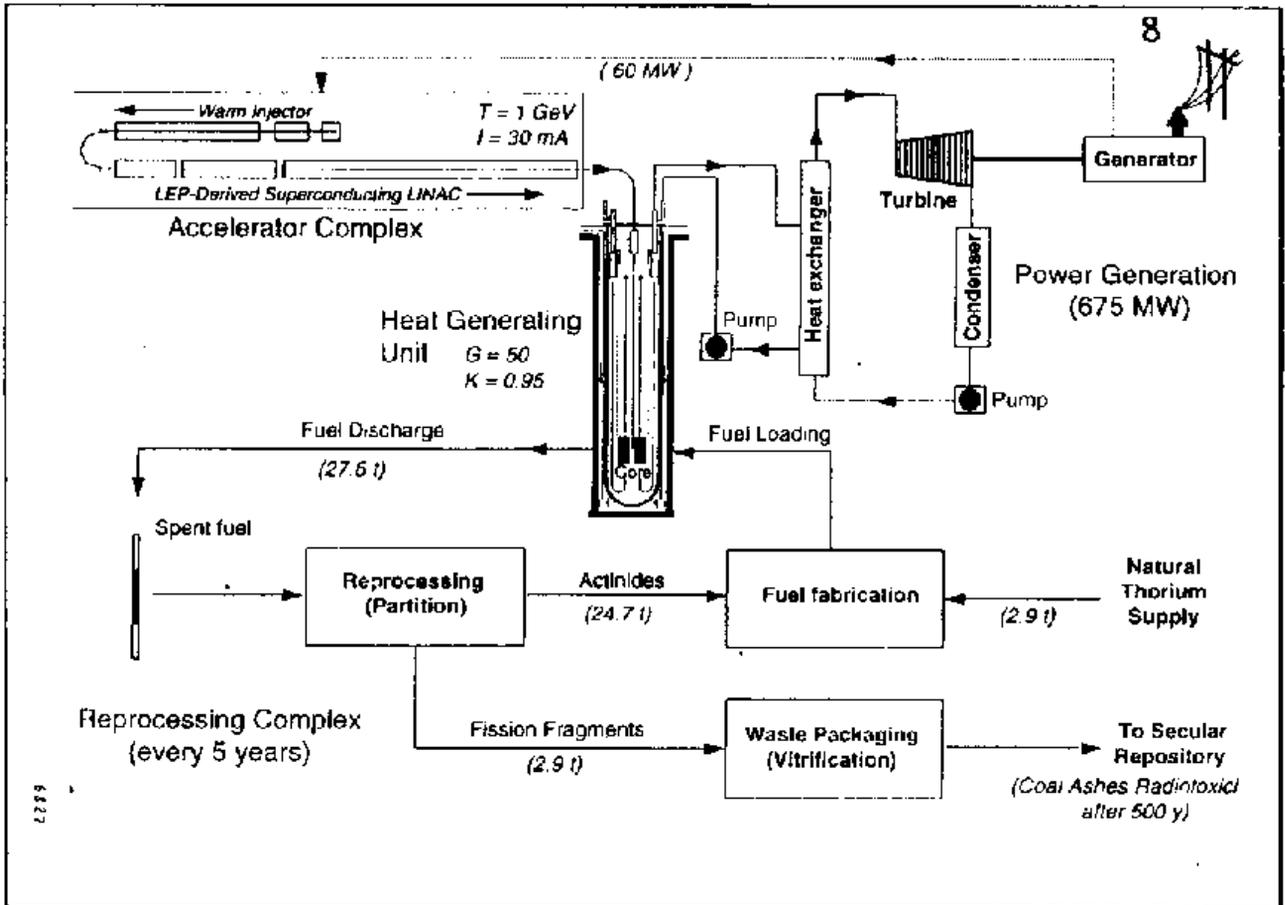


Schéma inspiré du transparent présenté lors de l'audition

Dans la réaction en chaîne, on a un noyau qui provoque une fission. Le neutron est thermalisé, il arrive quelque part ailleurs et produit à nouveau un neutron. La production des neutrons crée un mécanisme auto-entretenu. Ce système est analogue à ce que l'on fait dans un oscillateur électrique quand on veut produire une fréquence donnée.

Au contraire, le système que nous proposons est un système dans lequel il y a un proton de haute énergie qui produit une cascade nucléaire tout à fait similaire aux cascades produites par les rayons cosmiques dans l'atmosphère actuellement. Le terme technique est *over compensated calorimeter* (calorimètre sur-compensé). C'est une mécanique contrôlée par l'extérieur et ce qui compte dans cette opération c'est le gain énergétique, qui est défini comme le rapport entre l'énergie thermique résultant des noyaux cassés par la fission et l'énergie transportée par le faisceau.

Ce gain est une constante, il dépend de la structure du système, de la dimension de l'objet. Par conséquent, l'énergie produite est toujours proportionnelle à l'énergie injectée de l'extérieur, qui est limitée dans sa forme maximale — on parle d'un amplificateur plutôt que d'un oscillateur — et l'on a une limite supérieure à la quantité d'énergie produite.



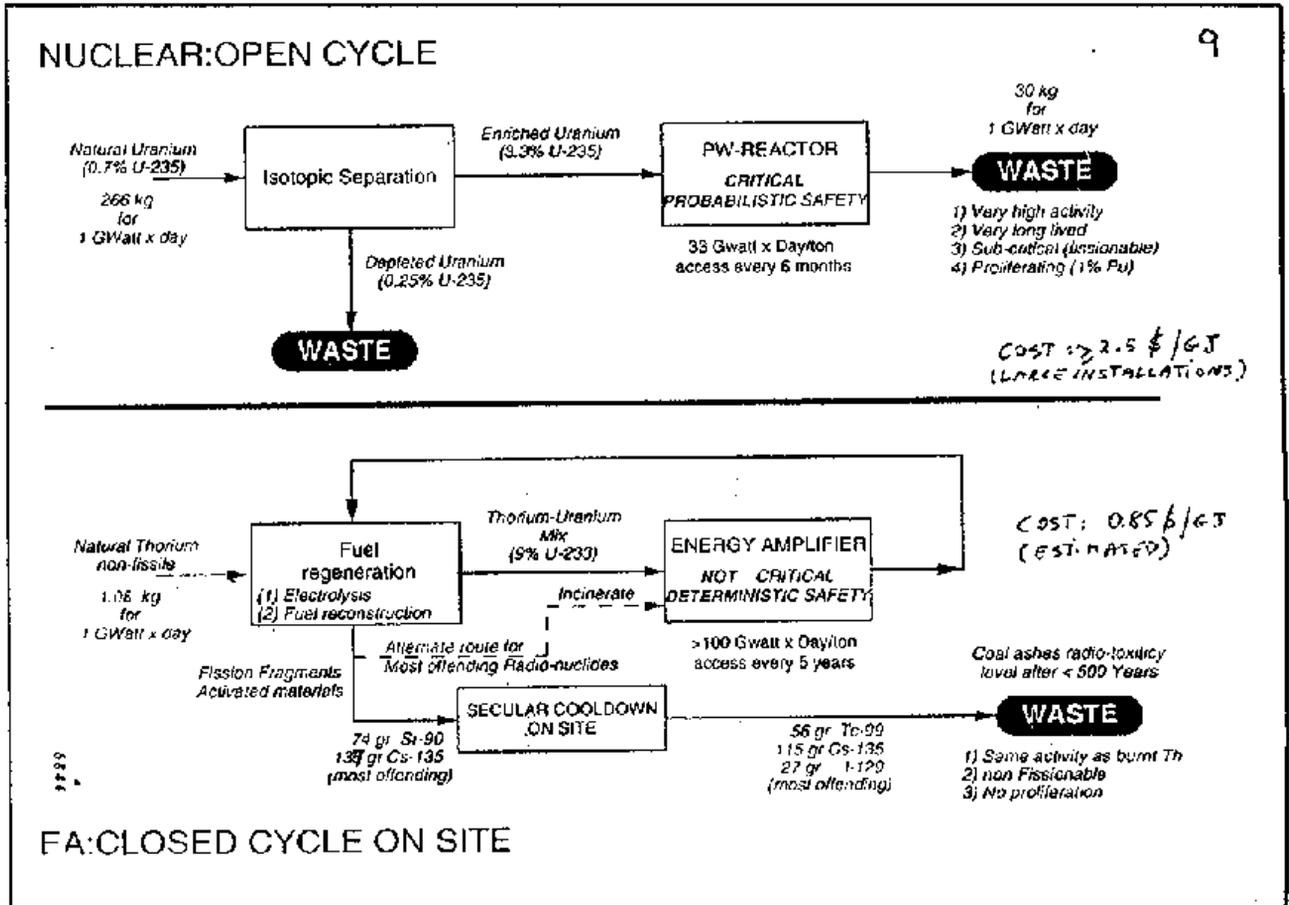
En pratique, le système que nous proposons consiste en un certain nombre d'éléments réminiscent des applications similaires dans le monde. Il y a un accélérateur linéaire, il y a une cuve dans laquelle le faisceau est détruit ; dans ce système, le combustible est à la fois activé et brûlé.

A l'intérieur du système, il y a le combustible qui est initialement du thorium, qui contient ensuite de l'uranium 233 et d'autres éléments.

Après un certain nombre d'années, nous pensons 5 ans, le système est arrivé à une condition telle qu'il faut revoir sa structure de base. On va sortir ce combustible et séparer les actinides, qui seront encore utilisés pour la combustion avec une certaine quantité de thorium, et les produits de fission qui sont les produits finaux du processus qui produit de l'énergie. Ils sont considérés comme des déchets et seront renvoyés dans un dépôt ou seront éliminés d'une façon ou d'une autre.

Pour illustrer ce système, permettez-moi de présenter ce diagramme qui montre ce qui se passe normalement dans un réacteur ordinaire. Nous avons choisi comme énergie de production 1 GW par jour. Pour obtenir cette énergie, nous avons besoin de 266 kg d'uranium 235, (uranium naturel dans lequel il y aura 0,7% d'uranium 235). Il faudra faire une séparation isotopique dans laquelle l'uranium appauvri devient un déchet et dans laquelle l'uranium enrichi (3,3%) est utilisé dans le réacteur lui-même.

Le réacteur commence à fonctionner et tous les 6 mois, par exemple, il brûle pendant un temps qui correspond à un *burn up* de 33 GW.j.t⁻¹. A la fin sont produits des déchets. Dans ce cas particulier, il y a 30 kg de déchets dont les caractéristiques sont : une activité considérable, une durée de vie assez longue, une certaine probabilité de fission des produits qui finiront sous terre, et une capacité proliférante (1% correspond à du plutonium avec lequel vous pouvez faire des bombes).



Le système que nous proposons en alternative est un système dans lequel on part non pas avec 266 kg mais 1 kg de thorium non fissile pour la même énergie. Nous avons un système avec une boucle fermée pour tous les actinides. Après un certain taux de combustion qui est supérieur à 100 GW.j.t⁻¹ (accès au combustible tous les 5 ans), on extrait le combustible et on le met dans un dispositif de régénération qui consiste en un mécanisme d'électrolyse plus un mécanisme de reconstitution de la structure mécanique du combustible. Ce combustible est replacé dans l'Amplificateur d'énergie.

Dans cet exemple, 1 kg de thorium non fissile donne 74 g de Sr₉₀ et 137 g de Cs₁₃₅. Après une période de 500 ans, il y a des changements dans la radioactivité des déchets et les éléments les plus longs sont les Tc₉₉, Cs₁₃₅ et I₁₂₉. Le résultat de cette opération, ce sont des déchets qui représentent une activité plus modeste. La radioactivité est la même que pour le thorium injecté. On a changé la structure mais on n'a rien ajouté. Le déchet final n'est pas fissionnable et il n'est pas possible de faire des bombes.

Il est intéressant de considérer ce type de déchets avec les autres pour la même énergie produite. Le graphique compare sur une période de 1 000 ans la radiotoxicité produite par un

réacteur standard avec la radiotoxicité produite par l'amplificateur d'énergie et dans lequel une fraction 10^{-4} des actinides est perdue.

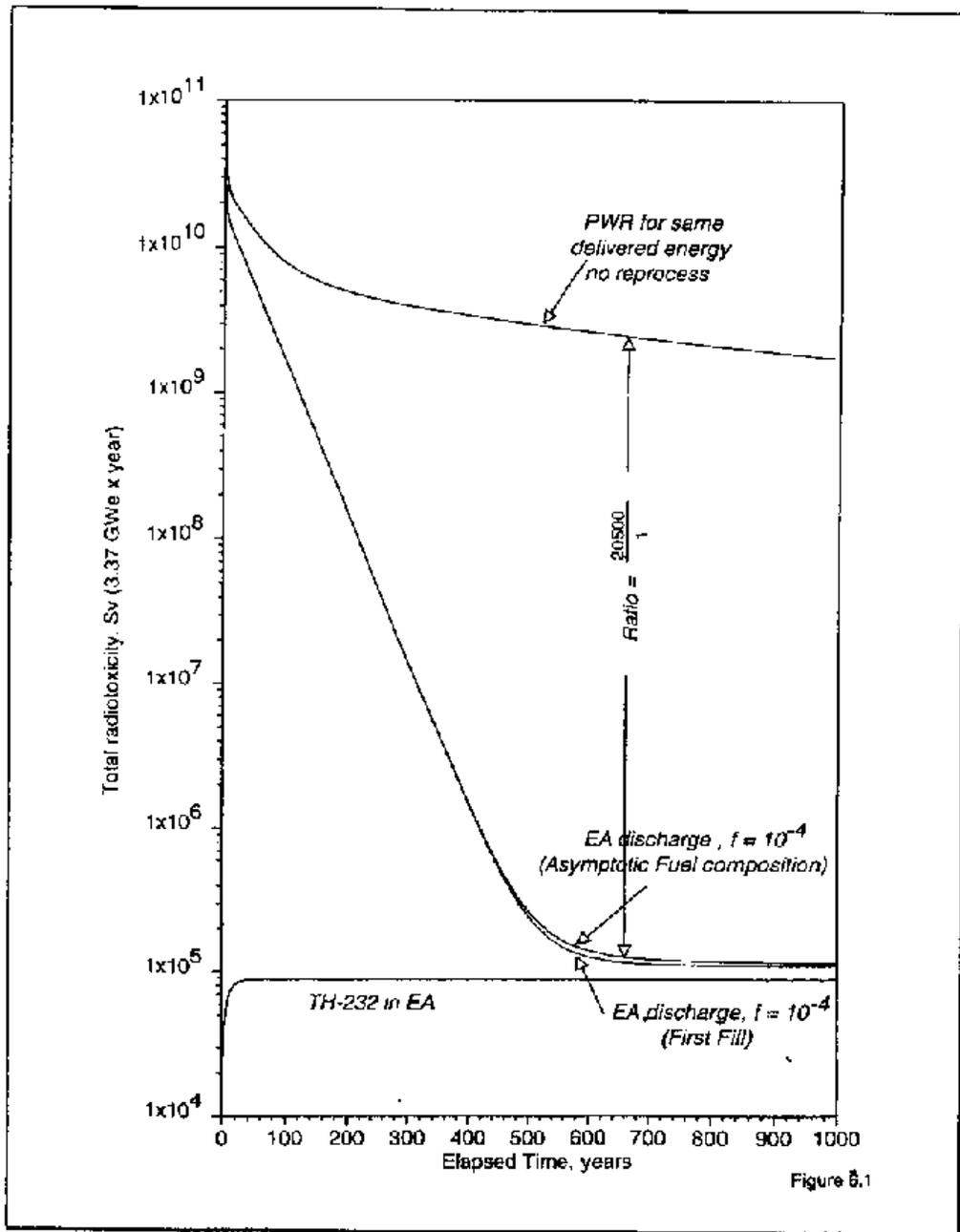


Figure 6.1

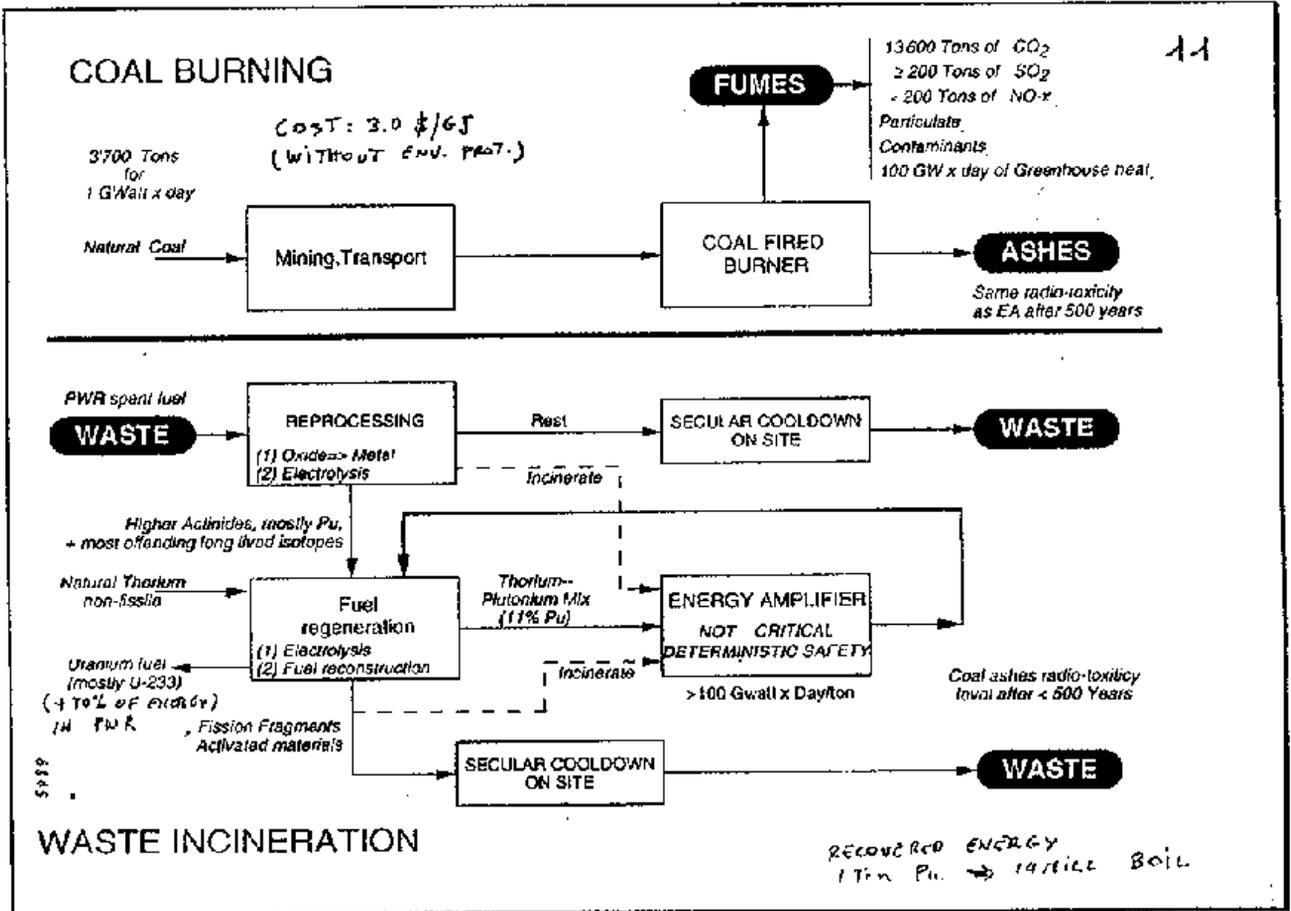
Dans le temps, la radiotoxicité des déchets provenant d'un réacteur ordinaire descend doucement. Après un million d'années, il y a une différence entre les radiotoxicités des déchets issus des deux systèmes : notre système voit une petite remontée due surtout à l'uranium 233 puis se stabilise à une valeur déterminée.

Deux autres aspects sont importants.

Si nous voulons brûler du charbon, nous aurons besoin de 3 700 tonnes pour obtenir la même énergie de 1 GW par jour. On produirait 13 600 tonnes de CO_2 , 200 tonnes de soufre, 200 tonnes de NO_x , des particules contaminantes et 100 fois plus d'énergie sous forme de chaleur.

C'est une valeur importante. Si l'on brûle un morceau de charbon, celui-ci nous donne une certaine énergie mais il réduit la transparence de la couche de l'atmosphère et si l'on intègre la vie moyenne du CO₂ qui est de 200/300 ans, cela représente un apport de chaleur qui entre dans l'atmosphère correspondant à 100 fois la chaleur que nous avons produite. Nous gagnons 1 mais notre planète doit en supporter 100.

Il faut après éliminer les déchets produits par les réacteurs nucléaires ordinaires. Avec un cycle combiné entre les deux machines, ces déchets pourraient être éliminés.



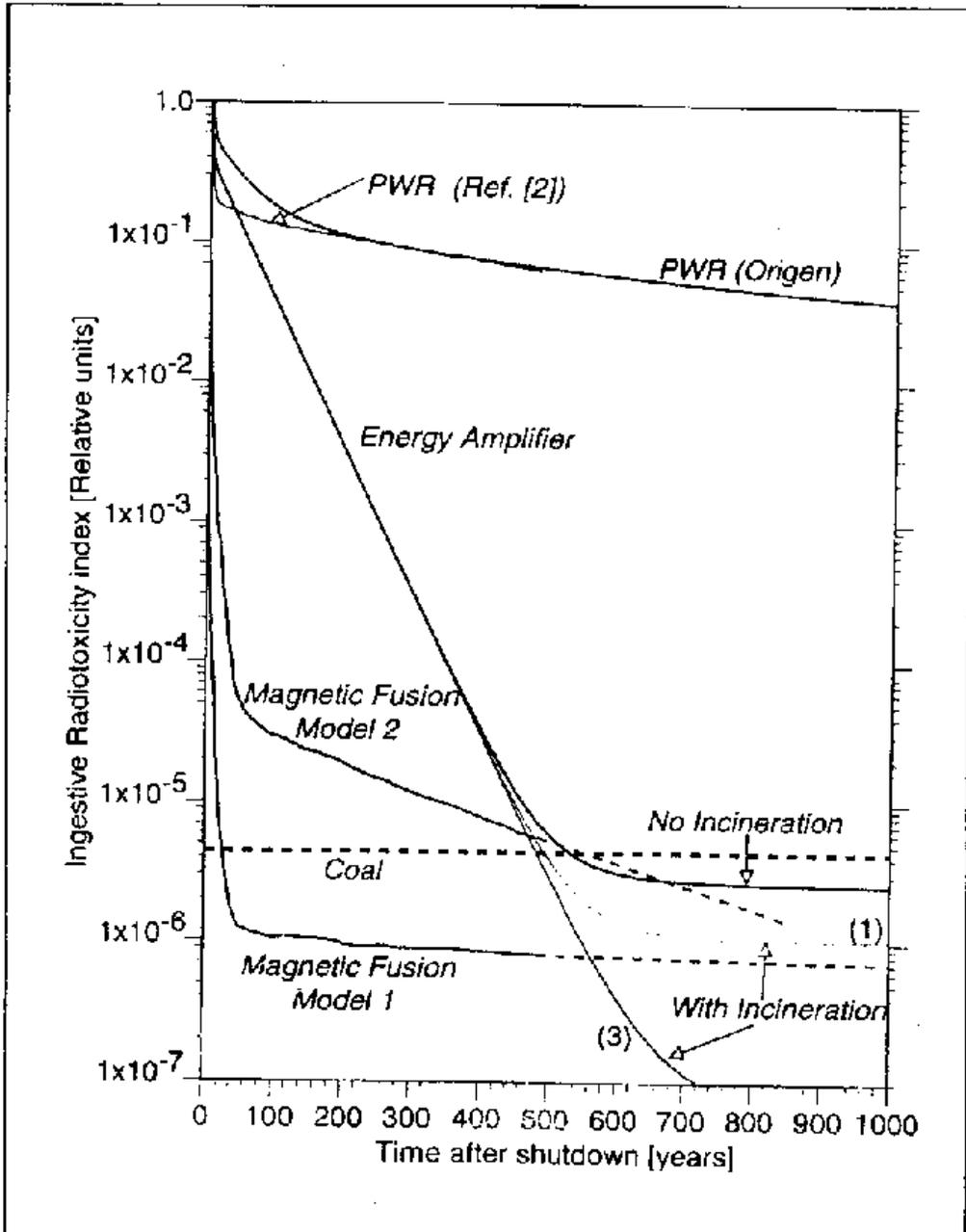
L'amplificateur d'énergie peut marcher en symbiose avec les réacteurs nucléaires ordinaires : le waste vient d'un réacteur nucléaire ; le retraitement (reprocessing) le transforme en quelque chose d'utile pour l'amplificateur d'énergie (surtout du plutonium) et sépare les déchets qui sont surtout des produits de fission ; les actinides mineurs (surtout le plutonium) vont dans l'amplificateur d'énergie qui tourne sur une boucle centrée sur le thorium et le plutonium avec l'incinération possible et la production de déchets à la fin.

Il est très difficile de brûler du plutonium seul, il faut le mélanger avec quelque chose. Il y a production de plutonium nouveau par la mécanique de combustion à l'intérieur du système : on élimine une certaine quantité mais on en produit aussi. C'est la subtile différence entre surgénérateur et sous-générateur.

Cette situation n'est pas nécessaire dans notre cas parce que nous marchons avec un mélange plutonium/thorium. Le thorium produit de l'uranium 233 qui est équivalent à l'uranium 235 et qui

peut être utilisé comme combustible à l'intérieur d'un réacteur ordinaire. Il y a une opération combinée dans laquelle le réacteur ordinaire produit sa propre matière fissile.

La courbe [ci-dessous] met en évidence la même situation de radiotoxicité mais en comparant tous les éléments que je viens de présenter. Il y a à nouveau la ligne caractéristique de l'amplificateur d'énergie avec la possibilité d'incinérer quelques produits particulièrement dangereux du point de vue de la radiotoxicité. L'amplificateur d'énergie arrive après une période de 500 ans au niveau des déchets radioactifs produits par le charbon. C'est un terme extrêmement utile pour la référence.



Si nous comparons notre système avec celui de la fusion, nous constatons que notre système bien que basé sur la fission peut se comparer à la fusion pour ce qui concerne le potentiel énergétique et l'impact sur l'environnement. Par exemple, la fusion part du lithium pour faire du tritium comme combustible, qui après est brûlé comme tel. Les principaux résidus sont des matériaux activés.

L'amplificateur d'énergie a du thorium à la place du lithium, il utilise l'uranium comme combustible, et les principaux résidus sont les fragments de fission.

Les réserves mondiales sont similaires en termes d'énergie s'agissant du lithium et du thorium. S'agissant du combustible tritium ou uranium, la radiotoxicité contenue dans la machine est comparable. La radioactivité de ce système, après 500 ans, est pratiquement la même.

La construction de l'amplificateur d'énergie est beaucoup plus simple ; il n'existe pas d'obstacle technologique majeur parce que l'on utilise les technologies déjà connues, autant dans le domaine des accélérateurs que dans celui des réacteurs.

Le prix de l'énergie produite par notre système est moindre que celui de l'énergie produite par la fusion.

Comparé aux réacteurs ordinaires, l'amplificateur d'énergie utilise un combustible naturel (il n'est pas nécessaire d'enrichir le combustible) comme les réacteurs CANDU mais avec une combustion massique plus grande (jusqu'à 150 GW.j.t^{-1}). Nous pouvons toujours recycler notre combustible, le remettre dans la machine et recommencer l'opération, avec un nombre infini de cycles jusqu'à la combustion complète.

L'amplificateur d'énergie génère son propre matériau fissile à partir de thorium ou d'uranium appauvri. Il recycle ses propres résidus actinides. Les seuls déchets produits sont des fragments de fission. Il peut également brûler entièrement les déchets de plutonium des REP ainsi que le plutonium des surplus militaires. Il peut éliminer certains produits de fission à vie longue.

Il présente des caractéristiques de sûreté déterministe.

Tout ceci résulte de l'utilisation de neutrons très rapides (pratiquement pas modérés dans le plomb et le combustible) et de la nature sous-critique du dispositif.

Le prix de l'énergie produite par notre système est tout à fait compétitif avec celui des autres systèmes. Evidemment, il existe des marges d'incertitude, les choses deviennent toujours plus difficiles quand on les fait en réalité. Néanmoins, ce système peut être économiquement viable.

Autre point important, l'amplificateur d'énergie est un programme dans lequel on utilise les neutrons dans un milieu très diffusif. Ceci n'a rien à voir avec les problèmes de production d'énergie mais avec ceux de l'élimination des déchets radioactifs que nous considérons comme particulièrement dangereux : c'est le cas de l'iode 129 et du Te^{99} . Ceci demande une efficacité de capture neutronique accrue qui est obtenue par :

- l'introduction d'une faible masse du matériau à transmuter dans un milieu transparent et diffusif pour les neutrons ;
- l'exploitation des grandes valeurs de sections efficaces correspondant à des résonances qui seront inévitablement traversées — avec des pas en énergie très fins — lors du ralentissement, dans un milieu de masse atomique moyenne ou élevée, de neutrons dont l'énergie initiale est importante.

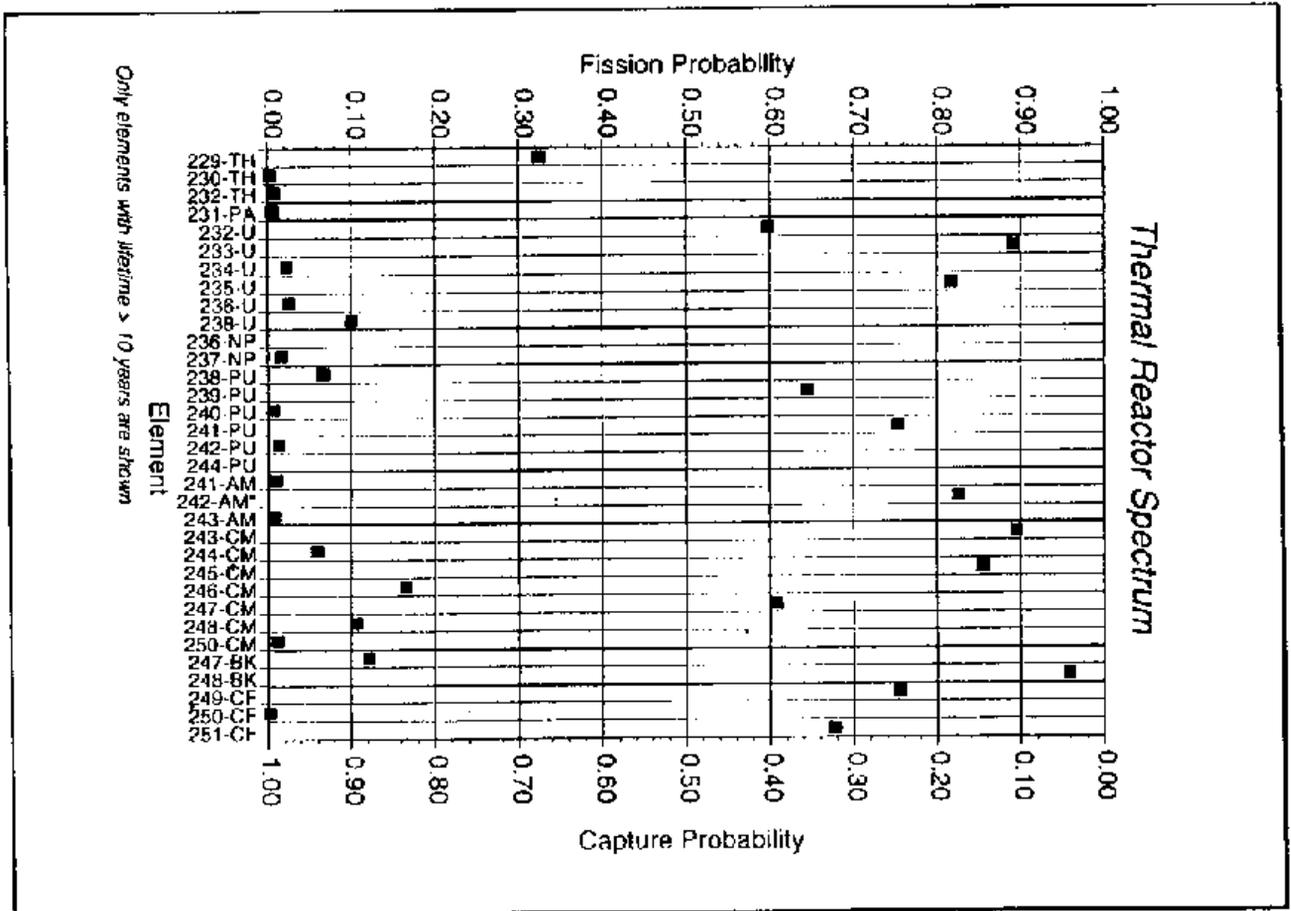
Pour cela, nous avons un matériau principal, le plomb, qui a la caractéristique d'avoir une faible léthargie, donc une faible perte d'énergie et une grande transparence. En le dopant avec une faible quantité du matériau à éliminer, on le rend « opaque » aux neutrons, dont la plupart sont capturés par ces impuretés.

Un seul proton injecté à l'intérieur de notre système produit 147 neutrons qui eux-mêmes subissent 55 035 chocs diffusifs. C'est la technique que nous voulons utiliser pour éliminer de la façon la plus efficace possible les éléments radioactifs gênants.

Parlons maintenant de physique et voyons ce qui se passe à l'intérieur d'une machine dans laquelle un faisceau de particules rentre, dans laquelle il y a interaction. Nous pouvons étudier le changement chimique nucléaire qui arrive dans un petit échantillon exposé à un flux de neutrons produits par la cascade nucléaire.

A cause de ce phénomène, un certain nombre de transformations se produisent et créent une série d'étapes rappelant le problème classique des baignoires et des robinets. A chaque étape, un élément important est représenté par le nombre de particules qui sont éliminées parce que brûlées par la fission. Il se crée donc une chaîne radioactive.

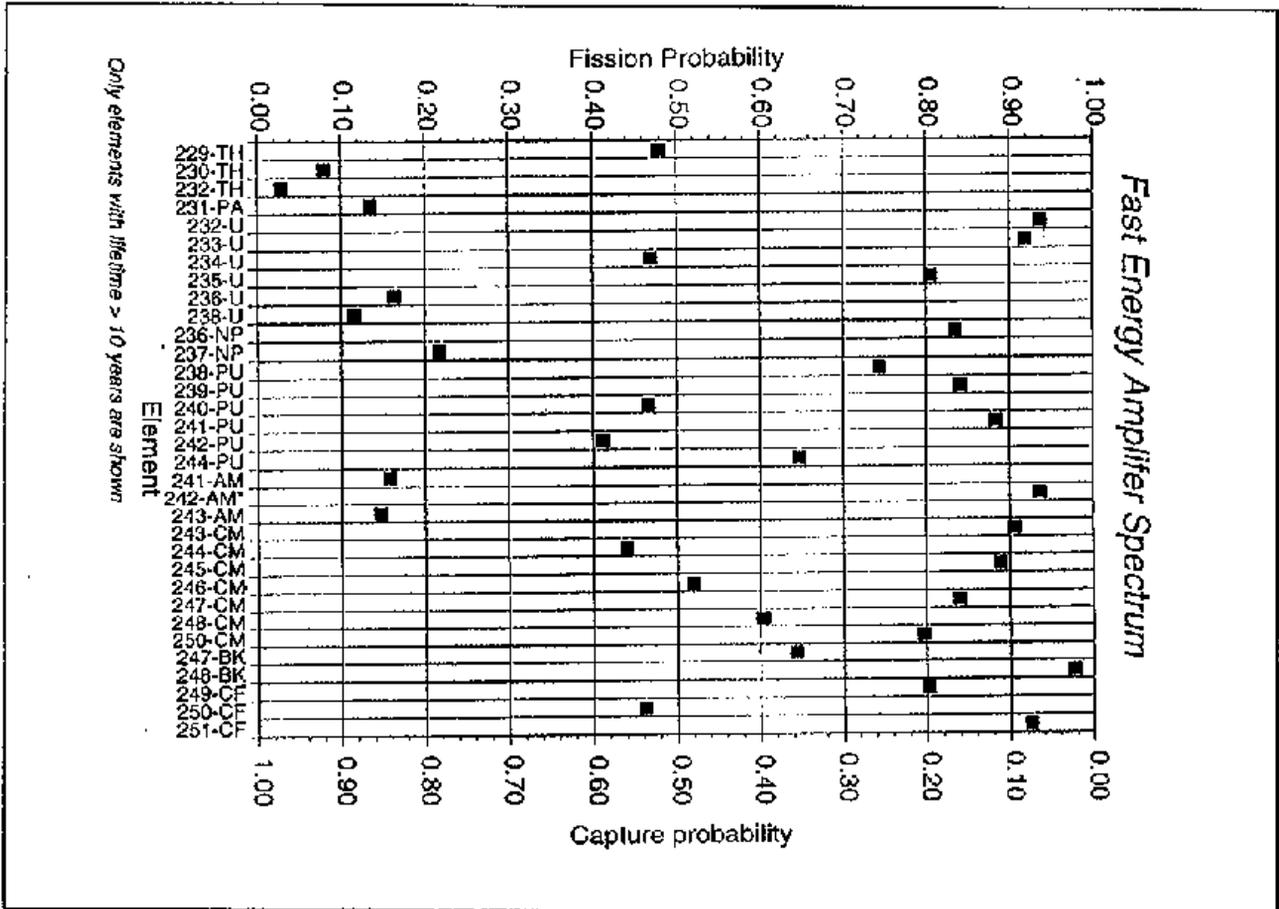
La question importante porte sur le choix du type de particule utilisé. Il faut souligner l'importance des neutrons rapides. On sait que le processus de combustion dans un spectre thermique (REP) ne peut continuer indéfiniment : après l'épuisement du stock initial d'uranium 235, la réactivité du mélange asymptotique à l'équilibre devient insuffisante, les isotopes pairs ayant une probabilité de fission petite ou nulle.



Le plutonium 239 a une probabilité de fission de 60% : 2/3 fissionnent et 1/3 est transmis à la prochaine baignoire. Le Pu₂₄₀ est complètement stérile, il s'accumule et bloque le système. Le Pu₂₄₁ fissionne, le Pu₂₄₂ ne fissionne plus, etc. L'américium 241 et 243 est nul. Tous les points positionnés

sur 0 présentent une situation dans laquelle on est empêché de développer une mécanique correcte de combustion, il y a donc détérioration de la qualité du combustible à l'intérieur du système.

Au contraire, dans un spectre rapide, la plupart des isotopes ont une grande probabilité de fission. La majorité est autour de 90%. A chaque étape, la baignoire suivante est remplie avec moins d'eau que dans la baignoire précédente. Certains éléments ont un bon facteur, et quelques éléments sont de l'ordre de 15-20%, c'est-à-dire avec quand même des possibilités de solution. La capacité d'élimination est meilleure.

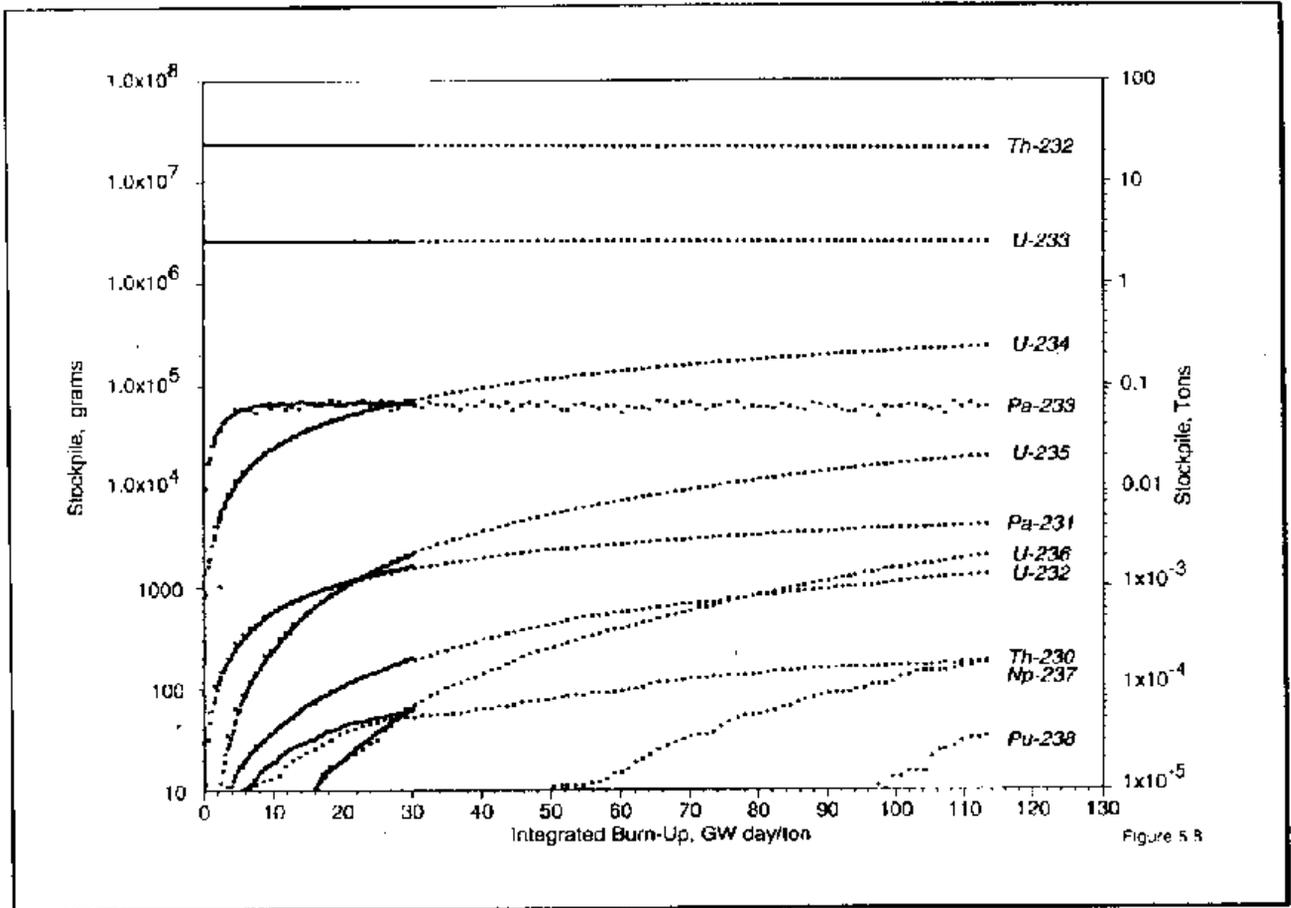


Faisons l'hypothèse que tous les éléments ont une grande probabilité de fission. Dans ces conditions on peut brûler un combustible jusqu'à l'épuisement parce que la réactivité du mélange à l'équilibre est indépendante de l'évolution du mélange : le vieux combustible a essentiellement la même réactivité que du combustible neuf. On peut donc brûler du combustible jusqu'à épuisement. Les concentrations relatives diminuent rapidement avec le rang des éléments car elles sont fortement atténuées par les fissions, c'est-à-dire que le mélange asymptotique n'est pas très différent du mélange initial.

La fraction de fission est suffisante à tout moment pour permettre une surgénération complète à partir d'un combustible naturel non fissile, qui brûlera cependant en totalité. Les actinides résultant de la fin d'un cycle peuvent être utilisés comme amorces du cycle suivant, etc.

Je vous montre ce qui se passe pour les concentrations des radioéléments à l'intérieur d'un amplificateur d'énergie exposé à un faisceau de particules.

L'uranium 233 est alimenté par le protactinium qui est l'élément intermédiaire qui fait que le thorium devient protactinium puis uranium. Doucement, les concentrations montent ; il y a à peu près un facteur 10 entre chaque élément. On arrive à un neptunium 237 ; le plutonium 238 (qui n'est pas le plutonium le plus méchant, contrairement au Pu_{239}) apparaît dans ce système avec une réduction de 10^{-7} .



La boucle est fermée !

Autre chose importante, la distribution de ces éléments en fonction du nombre de cycles passés en réacteur [voir figure en page suivante]. En fonction du temps, le burn up est indiqué ici, les 150 $GW.j.t^{-1}$ signifient que 18% de thorium ont brûlé. Avec 940 $GW.j.t^{-1}$, vous brûlez la totalité de votre matière fertile.

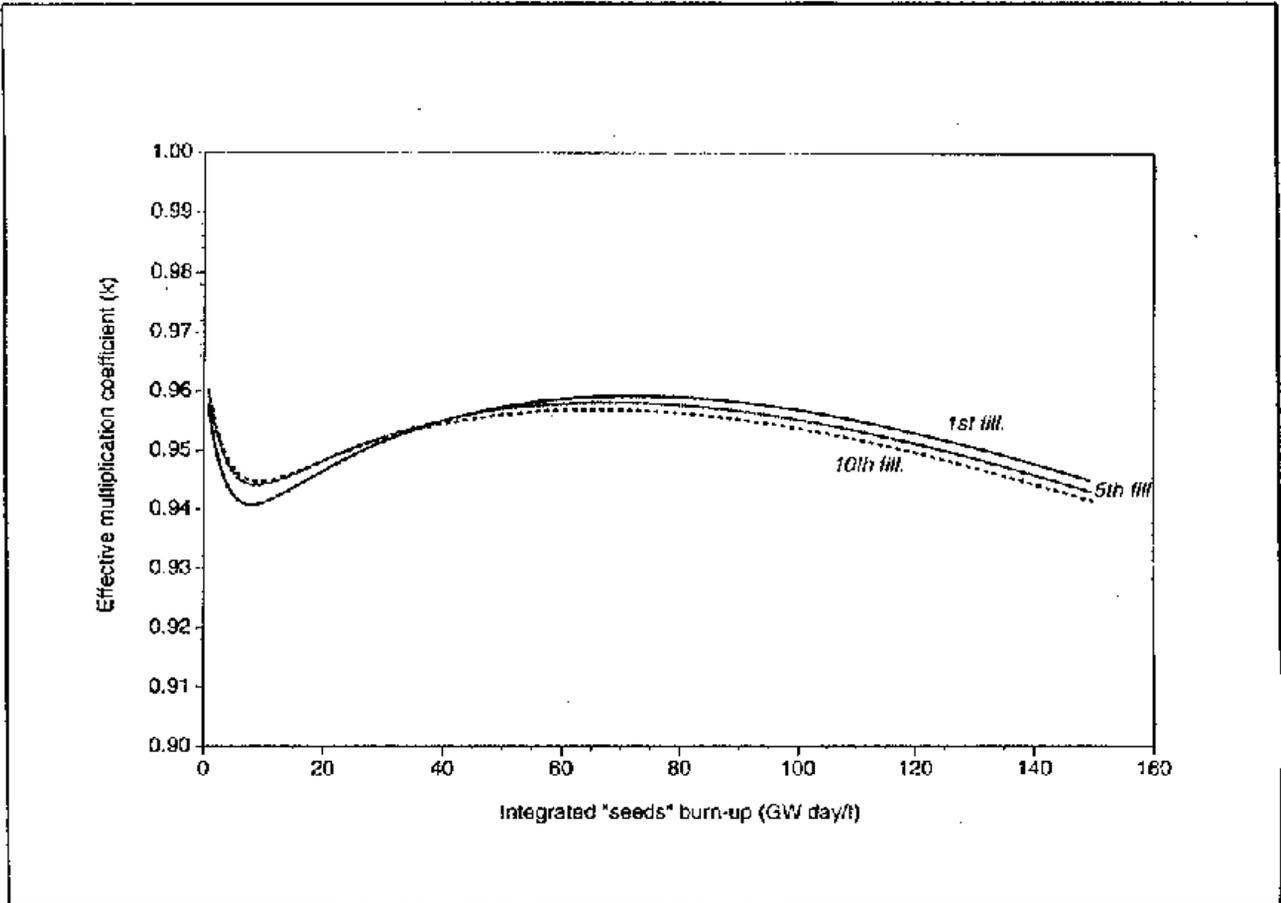
Entre le 1^{er} cycle, le 5^{ème} cycle et le 10^{ème} cycle, il n'y a pas de différence pour le coefficient de multiplication. Cela démontre que le combustible usagé est aussi bon.

Si vous descendez à l'américium et au curium, vous arrivez à des quantités négligeables.

Cela montre comment les choses se passent en fonction du temps. L'évolution est telle que les choses avancent dans une direction assez claire, avec une mécanique de stabilisation.

J'espère qu'avec cela, le principe de base de notre machine sera éclairci.

Je pense qu'il est important d'aborder les conclusions de tout cela. Je vais vous dire ce que nous proposons de faire dans les années qui viennent. Il existe des expériences de validation, faites au CERN, afin de vérifier directement les concepts de base à puissance réduite.



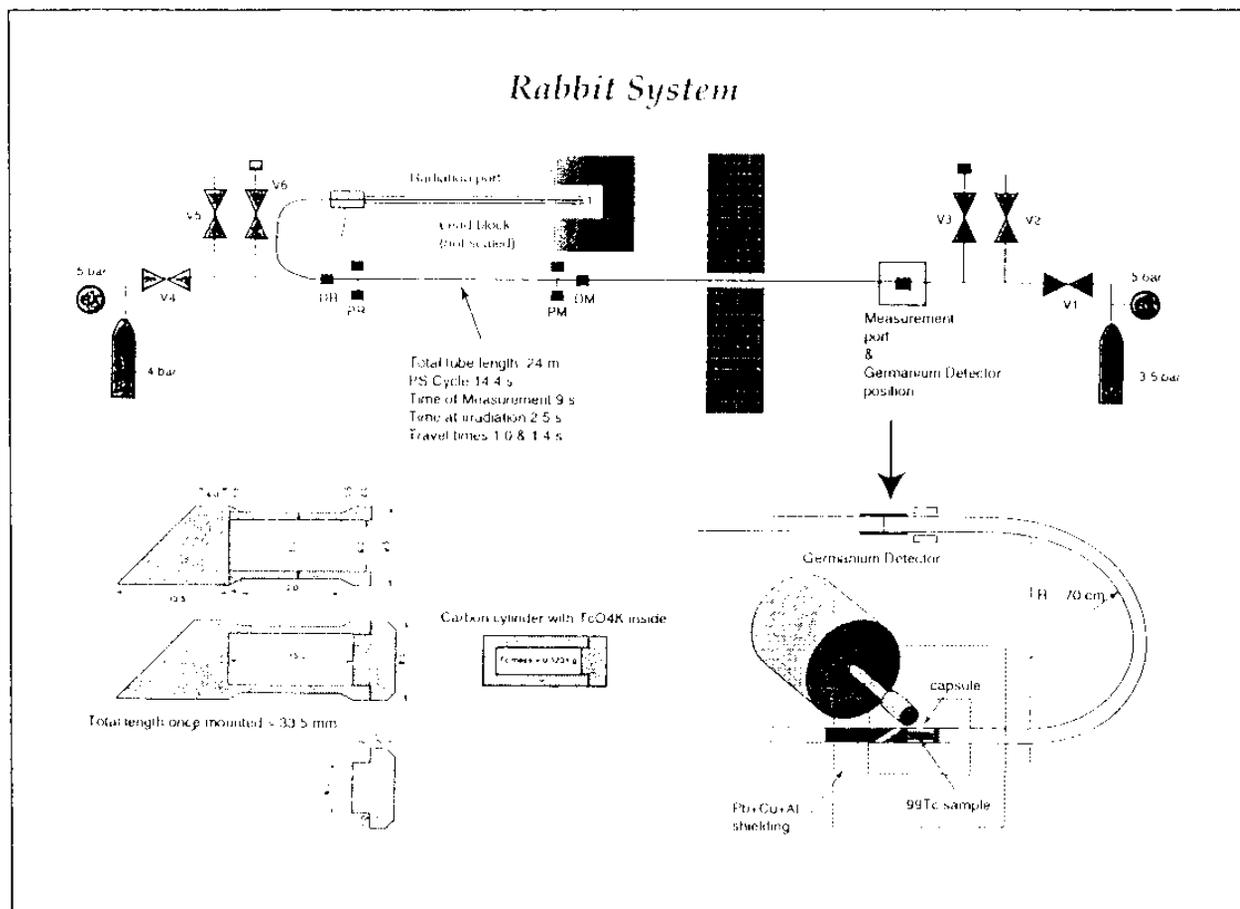
Nous avons fait une première expérience (FEAT) qui a permis de confirmer la possibilité de produire de l'énergie et de vérifier les prédictions de gain. Je me permets de vous présenter la liste des participants à cette expérience, il s'agit d'une collaboration assez large avec beaucoup de Français, d'Italiens, d'Espagnols, de Grecs, de Suisses qui représentent une communauté scientifique non négligeable.

Dans cette expérience, nous avons pris un récipient contenant de l'uranium et nous avons mis un faisceau dedans. Nous avons vraiment essayé de chauffer l'eau ! Nous avons mesuré la température avec des thermomètres et nous avons démontré que quand il y avait le faisceau de protons, la température montait et quand il n'y en avait pas, la température descendait.

Une deuxième expérience (TARC) est en cours, avec toujours la même équipe et quelques personnes en plus. Dans cette expérience, nous avons construit au CERN un bloc de plomb de 3 mètres de hauteur, pesant 360 tonnes dans lequel on introduit le faisceau. Ceci permet de vérifier le rendement absolu de la production de neutrons au cours des processus de spallation et de diffusion subséquente.

Nous validons les calculs sur la propagation des neutrons dans le plomb.

Nous travaillons également sur la possibilité d'élimination efficace des produits de fission et des actinides, en utilisant la méthode du transport dans un milieu très diffus. Pour faire cela, nous avons introduit un *rabbit* qui est une petite boîte poussée par l'air comprimé dans laquelle nous introduisons notre objet à l'intérieur du faisceau. Ensuite, on le sort et on compte le nombre de technétium 100 produits par le processus d'élimination du technétium. Il y a un bon accord entre la théorie et l'expérience qui nous garantit que nous pouvons éliminer le technétium efficacement.

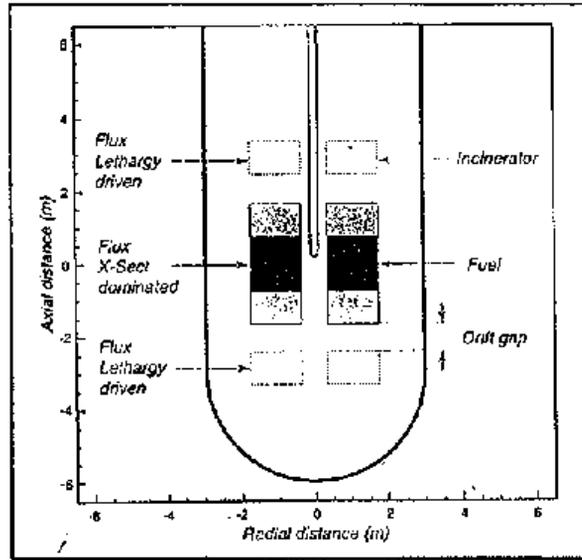


Nous travaillons également sur les iodes.

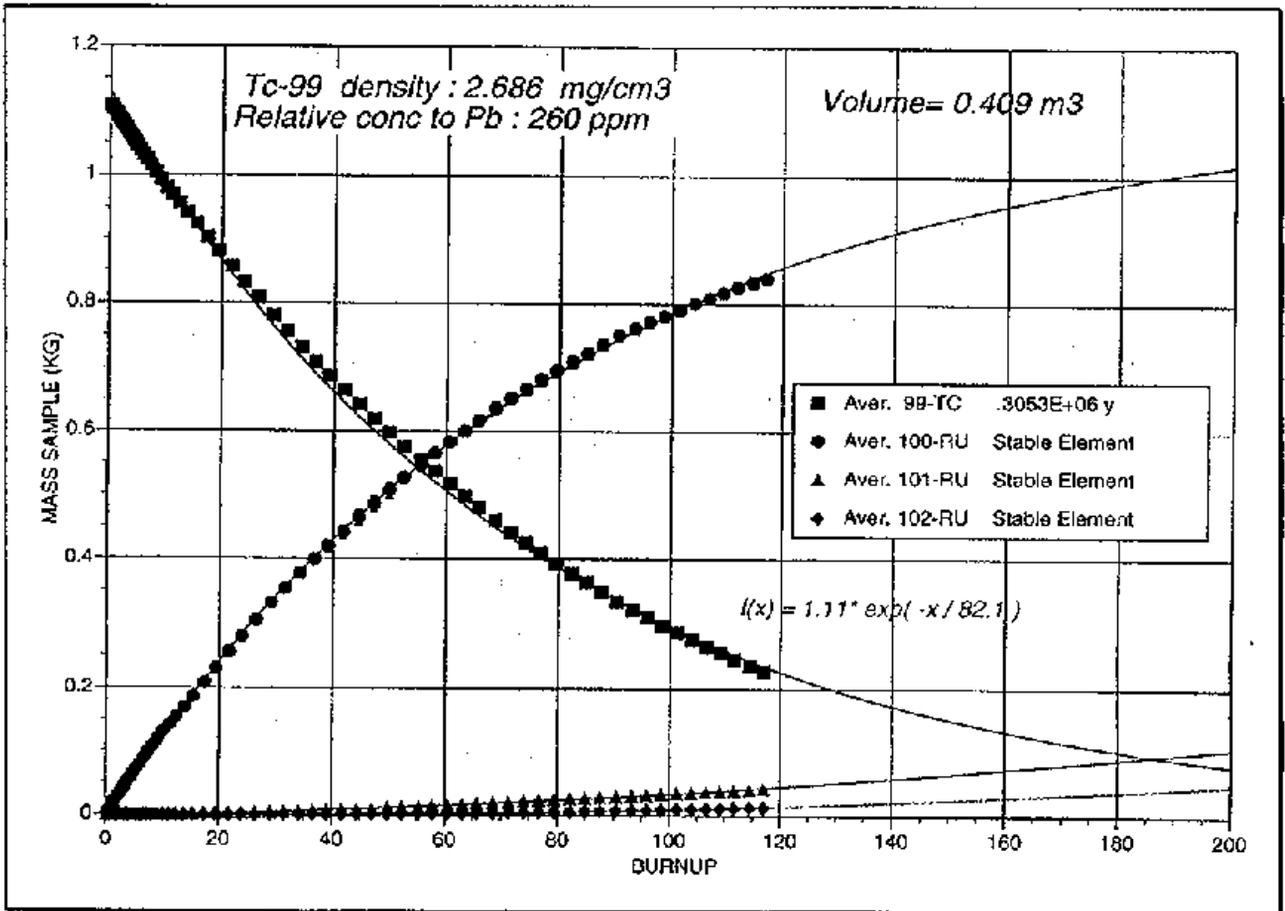
Si vous regardez le « centre de stockage séculaire » d'où vient la radioactivité, la contribution dominante vient du technétium et des iodes. Ce sont ces deux éléments qui sont nos premiers ennemis. Nous sommes aujourd'hui capables d'éliminer les deux. Pour le prouver, il faut faire des mesures. L'élimination de ces radioéléments marche dans l'amplificateur d'énergie.

Vous avez le corps de votre amplificateur d'énergie, avec des régions *lethargy driven* dans lesquelles les neutrons voyagent librement [voir figure en page suivante].

Le spectre du neutrons se trouve à l'intérieur d'une boîte d'incinération introduite à l'intérieur de l'amplificateur d'énergie. Il y a une correspondance de résonance et chute du flux parce que toutes les particules arrivent sur la résonance, celle-ci est très importante et mange tout. Il y a aussi un effet de *over shadow* parce que vous videz les neutrons dans la région où il y a le technétium et les neutrons d'ailleurs commencent à venir.



Le technétium va se détruire. Le technétium 99 qui a une durée de vie de 3.10^8 années disparaît. On observe la montée du ruthénium 100 qui est un élément stable et qui à la fois fait des captures et produit du ruthénium 201 et 202, mais le phénomène est modeste. On ferme pratiquement la boucle. On produit des éléments stables qui ne se déstabilisent pas parce qu'ils sont capturés.

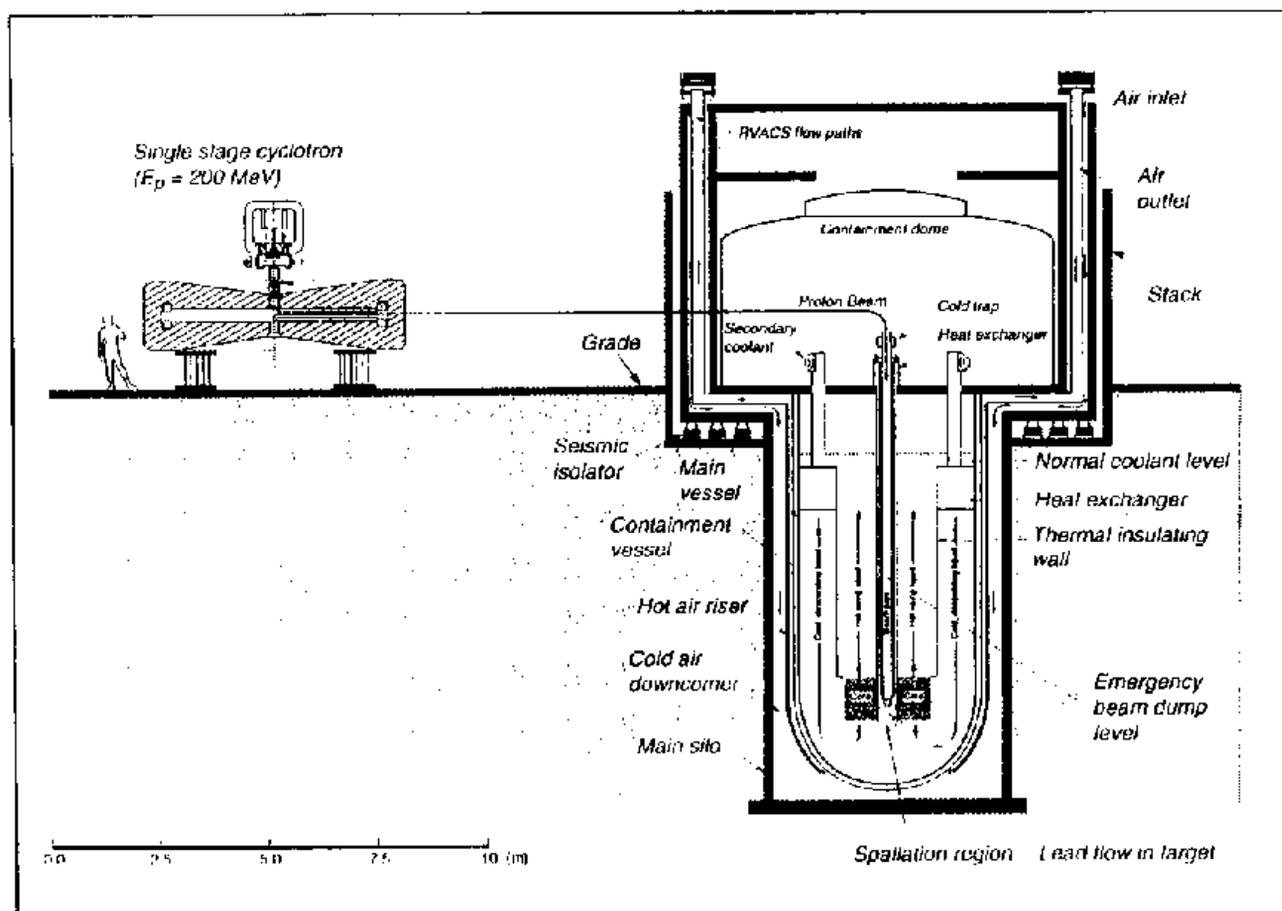


La prochaine étape, compte tenu de ce que la physique est bien comprise, consiste à commencer d'explorer le domaine des puissances plus importantes, pour démontrer que les choses fonctionnent avec des puissances différentes. Nous proposons une machine de la taille d'un réacteur de recherche, capable de démontrer toutes les caractéristiques de l'amplificateur d'énergie :

- puissance de 10 MW ;
- accélérateur de simplicité maximale et de haute efficacité ; les paramètres choisis sont $E = 200 \text{ MeV}$ et $I = 10/20 \text{ mA}$;
- démonstration complète des particularités de l'amplificateur d'énergie, y compris pour la cible et le refroidissement au plomb, le refroidissement par convection naturelle et les propriétés de sûreté passive.

Trois combustibles sont possibles : de l'uranium 238 enrichi à 20% d'uranium 235 mélangé avec du thorium, ou de l'uranium 233 mélangé au thorium, ou des mélanges plutonium/thorium.

Le but de cette installation est de démontrer la possibilité d'exploitation complète d'une unité produisant de l'énergie et d'un incinérateur de plutonium ; la compétitivité économique avec un REP, les propriétés uniques de sûreté et les procédures de retraitement/régénération du combustible.



La machine est très petite, environ 8 mètres de hauteur pour 4 mètres de diamètre. Elle est alimentée par un accélérateur d'une extrême simplicité. Cette machine produit 90 MW environ.

Nous avons ajouté tout les points de sécurité avec l'air pour les RVACS et les dangers de séismes. Cette machine marche avec la convection, largement suffisante pour faire tourner. Les calculs décrivent le mouvement du plomb autour de la cible.

L'accélérateur est fait en deux parties avec un injecteur avec 150 KeV d'énergie, qui injecte dans une boîte vide de 3 mètres de diamètre et dans laquelle il y a des formes particulières et des trous à l'intérieur desquels on mettra les antennes pour accélérer les particules. Il y a des pièces polaires avec des morceaux de cuivre qui produisent le champ électrique de l'accélération.

Cette machine arrive à une puissance de $200 \text{ MeV} \times 10 \text{ mA}$ pour un champ radiofréquence de 88 MHz. Le poids de l'aimant est de 360 tonnes, poids modeste pour produire 200 MW de puissance. D'ailleurs l'efficacité énergétique de l'accélérateur est calculable, vous arrivez à 52% pour 10 mA. 10 mA est une valeur très pessimiste calculée avec beaucoup de prudence. On pourrait avoir trois fois plus de puissance et une efficacité encore plus grande.

La prochaine étape consistera à réfléchir à une machine à l'échelle industrielle. Cette petite machine, une fois portée à sa puissance maximale, peut trouver un marché. Néanmoins, le marché le plus important sera celui d'une machine de beaucoup plus forte puissance, par exemple pour la production électrique ou l'incinération des actinides.

Nous pensons à des machines qui pourraient produire de l'énergie de l'ordre de 1,5 GW. Surtout, nous nous concentrons pour l'instant dans l'accélérateur et nous avons des idées. Par exemple, les Espagnols seraient intéressés par cette machine pour éliminer le plutonium produit dans des réacteurs nucléaires en Espagne. Avec l'amplificateur d'énergie, on pourrait le faire.

L'élément clé, c'est le LEP 200, actuellement en fonctionnement au CERN et qui termine sa carrière à la fin de l'an 2000 et pourra être recyclé. Le LEP accélère des électrons et il faudrait le transformer en accélérateur de protons. Pour ce faire, il faut changer la forme de cavité à l'intérieur de cette boîte. Des activités multiples se font à l'intérieur du système pour développer cette opération.

Je voudrais maintenant arriver à des considérations générales sur l'énergie car le but du débat n'est pas seulement l'amplificateur d'énergie mais également la façon dont on va alimenter en énergie notre planète dans le futur.

Il est certain que l'énergie, au même titre que les matières premières, est une base de notre société technologique. Son utilisation a crû constamment depuis les origines de l'humanité. Sans doute, la consommation d'énergie va fortement augmenter dans les décennies à venir car la population mondiale continue à croître (elle a doublé depuis 1968). Des milliards d'êtres, surtout dans les pays en voie de développement, aspirent à une vie meilleure, et il y a une énorme disparité dans la consommation d'énergie *per capita* qui doit nécessairement être réduite.

L'utilisation de l'électricité va croître fortement. Le Conseil Mondial de l'Énergie prévoit que la consommation mondiale augmentera de 50-75% d'ici à 2020. La Suède consomme 15 000 kWh par habitant chaque année et le Bangladesh seulement 100 kWh par habitant.

L'énergie et l'électricité doivent être produites et utilisées de façon plus efficace. C'est une condition nécessaire mais pas suffisante. Nous pouvons rouler plus loin avec un litre d'essence mais nous aurons davantage d'autos, les ampoules électriques auront un meilleur rendement mais nous aurons davantage d'ampoules, etc.

Il est clair qu'il y aura une meilleure efficacité mais aussi une forte augmentation dans l'utilisation de l'énergie.

Jusqu'à-là, il n'y a pas de désaccord. Ceux-ci surgissent dès que l'on veut savoir d'où viendront cette énergie et cette électricité et quels seront les rôles des énergies fossiles, renouvelables classiques (hydroélectricité), etc. La réalité, c'est que le marché domine les choix, et l'énergie la moins chère est « la meilleure ». Quelle est notre réelle tolérance implicite aux énergies fossiles ?

Les préoccupations sur l'environnement ont commencé à ajouter de nouvelles dimensions aux discussions sur l'énergie. Les plus importantes concernent le CO₂ qui, avec d'autres gaz (fuite de méthane au cours du transport), contribuent à un réchauffement global. La chaleur de l'effet de serre est égale à cent fois la chaleur produite. L'IPCC prévoit un changement dans le climat global avant 100 ans.

La recette dominante (Rio, Berlin, etc) est de réduire les émissions de CO₂ par des économies d'énergie et l'utilisation des énergies renouvelables. Jusqu'en 2010, le gaz augmentera de 55%, le charbon de 66%.

La tendance réelle ne plaide pas en faveur de l'abstinence dont parlent les ministres et les conférences.

Un exemple, la situation de la Chine. Ce graphique vient de l'IIASA qui calcule la quantité de soufre qui va se déposer en Chine dans les prochaines vingt années quand la consommation de la Chine sera de l'ordre de 4 milliards de tonnes de charbon chaque année.

Dans des régions très importantes et très peuplées, les nombres sont entre 10 et 20 grammes de soufre par mètre carré et par année. Pendant 100 ans, avec 10 grammes par an, vous faites un kilo. Le pays sera jaune non pas parce que les Chinois sont jaunes mais parce qu'il y aura du soufre partout. C'est quelque chose qui est inacceptable, mais cela montre la situation dans laquelle nous nous trouvons aujourd'hui.

Cette absence de politique cohérente pose un problème fondamental. Il faut choisir entre nos différentes peurs : avons-nous peur des déchets nucléaires et des accidents nucléaires au point de renoncer à utiliser l'énergie nucléaire pour réduire de façon significative la combustion des fossiles ? Ou avons-nous tellement peur de l'effet de serre que nous sommes prêts à vivre avec l'énergie nucléaire, éventuellement transformée par de nouveaux développements dans le futur, et donc développons ?

Avons-nous peur à la fois de l'énergie nucléaire et des énergies fossiles au point d'être prêts à payer sensiblement plus cher pour notre énergie et à couvrir d'énormes surfaces avec des éoliennes, des cellules solaires et des arbres à croissance rapide, admettant par là même que ces sources d'énergie soient aussi inoffensives pour l'environnement que le prétendent leurs promoteurs ?

Jusqu'à présent, nous patageons. Il n'y a pas de réponse claire. Plusieurs exemples concrets suggèrent toutefois une tolérance résignée aux énergies fossiles.

Il me semble qu'il y a quand même un rôle renouvelé pour l'énergie des noyaux.

La solution de ce dilemme doit venir de nouvelles idées et de nouvelles solutions. Je suis convaincu qu'une énergie à partir des noyaux, à la différence de l'énergie chimique, pourrait être maîtrisée d'une façon plus acceptable pour l'environnement.

La fusion semble avoir déçu un peu tout le monde. Nombreux sont ceux qui ont cru que la fusion pourrait être la solution aux besoins croissants en énergie. Mais, de nos jours, nous sommes de moins en moins convaincus que nous puissions nous acheminer sans coup férir vers un réacteur à fusion.

L'énergie de fusion ne pourra être disponible que dans un futur lointain, bien trop tard pour avoir un impact sur les changements climatiques. Les machines à fusion seront des objets compliqués, coûteux et délicats. Elles seront mal adaptées à la fourniture d'énergie aux pays en voie de développement où les besoins sont les plus grands. La fusion sera trop coûteuse pour présenter une alternative compétitive avec les énergies fossiles, principale raison de la stagnation de l'énergie nucléaire classique.

La fusion froide doit encore passer le cap d'une phase nécessaire. La fission semble être le meilleur cheval sur lequel on puisse parier.

La fission, débarrassée des inconvénients qui ont amené l'industrie de l'énergie nucléaire à sa présente stagnation, est à mon avis notre meilleure chance, à condition de réduire son impact sur l'environnement et de résoudre le problème des déchets de durée de vie importante à l'échelle géologique, objet de craintes et d'une large opposition du public, d'améliorer de façon radicale la sûreté nucléaire, de couper le lien entre production d'énergie et prolifération nucléaire, et surtout en diminuer les coûts pour la rendre compétitive.

Pour accomplir ces objectifs, nous avons besoin d'un programme vigoureux de recherche et développement, exploitant les avantages d'idées nouvelles et la fertilisation entre disciplines.

C'est ce que nous proposons avec l'accélérateur d'énergie, qui nous semble être un excellent candidat pour la fission nucléaire de deuxième génération.

Merci Monsieur le Président. (*Applaudissements*)

M. BIRRAUX— Merci Pr. RUBBIA pour cette présentation. Avant d'aborder les questions, je vous propose un ordre du jour pour notre discussion qui concernera successivement la sûreté et la faisabilité technique du projet, l'intérêt pour la maîtrise des déchets, l'intérêt pour la production d'électricité, l'intérêt pour la prolifération. Nous terminerons par les conditions de mise au point et de développement du projet et les coopérations internationales éventuelles futures.

Avant d'arriver à la discussion sur la sûreté et la faisabilité technique du projet, j'aimerais demander à Monsieur Bertrand BARRÉ, directeur des réacteurs nucléaires au CEA, de nous faire une communication sur les réacteurs hybrides pour savoir quel a été dans le passé l'intérêt manifesté pour ces réacteurs et pourquoi ils n'ont pas été retenus au moment où les choix ont été faits, et pour resituer dans son ensemble le réacteur hybride.

M. BARRÉ — Effectivement, la proposition du Pr. RUBBIA repose à la fois sur un réacteur hybride et sur l'utilisation du cycle thorium. Ce sont deux sujets qui ne sont pas forcément couplés puisque le réacteur hybride marcherait très bien avec un cycle uranium. D'autre part le cycle thorium a déjà été utilisé dans des réacteurs critiques.

Je vous parlerai de l'historique des deux sujets l'un après l'autre.

S'agissant des réacteurs hybrides, la théorie remonte aux années 50, mais il y a eu une première manifestation d'intérêt pratique pour ces systèmes dans les années 76/77 dans le cadre de l'exercice international lancé à l'initiative du Président CARTER pour remettre en cause les systèmes nucléaires classiques et voir si l'on pouvait en trouver d'autres avec de meilleures caractéristiques de non-prolifération.

La première connaissance des hybrides est née dans ce cadre avec des études et des débuts de démonstration aux États-Unis et au Canada. Dans ces mêmes années, les Russes ont réalisé une source de spallation assez puissante et l'intérêt pour la spallation s'est poursuivi, en tant que source de neutrons et indépendamment de source d'alimentation d'un réacteur hybride.

Après cette première manifestation d'intérêt, tout ceci est retourné en « hibernation » et il y a eu un deuxième renouveau beaucoup plus récent, aux environs de 1989, en particulier avec les travaux de l'équipe BOWMAN. La raison de ce deuxième renouveau est double.

Il y a d'abord une raison technologique qui explique pourquoi dans les années 50 cela n'avait aucune chance, et que même dans les années 70 ce n'était pas si facile. La première raison technologique, ce sont des progrès spectaculaires dans la technologie des accélérateurs. Grâce aux efforts des équipes du CERN et des équipes françaises CEA et de l'IN₂P₃, ce qu'a montré le Pr. RUBBIA ne ressemble en rien à la technologie des accélérateurs des années 70.

La deuxième raison est l'émergence d'un besoin nouveau, ou de la perception nouvelle d'un besoin, qui consiste à offrir plusieurs options pour la gestion des déchets à vie très longue.

Dans les années 50 et 70, on ne se posait pas la question de plusieurs options, on pensait qu'il y avait une option unique qui était le retraitement, la vitrification et l'enfouissement. Il est évident qu'à l'heure actuelle on a une position nettement plus ouverte par rapport à ce système et qu'on étudie plusieurs solutions, en particulier l'équipe BOWMAN s'est relancée sur les hybrides avec comme première motivation le traitement des déchets accumulés sur le site de Savannah.

Cela date de 1989. C'était un système hybride un peu différent de celui dont a parlé le Pr. RUBBIA. On peut même dire que par certains côtés il était encore plus futuriste dans la mesure où il s'appuyait sur une technologie du réacteur à combustible liquide.

La suite a été prise presque immédiatement par les Japonais qui ont lancé un projet très important, qui s'appelle OMEGA, un des plus actifs à l'heure actuelle. Au départ, il était également placé sur une solution de sel fondu mais il a à l'heure actuelle des options relativement ouvertes.

Le Pr. RUBBIA a fait connaître ses travaux aux environs de 1993. Dans un premier temps, c'était plutôt des hybrides à milieu multiplicateur thermique, puis il est passé au milieu multiplicateur à neutrons rapides. La validité particulière du spectre de neutrons rapides pour les problèmes de transmutation est très évidente maintenant.

Concernant la France, les études ont redémarré vers 1991-92, et je dirai que la raison en est pour l'essentiel la loi de 1991 qui sanctionnait le fait qu'on ne pouvait plus proposer une seule solution pour la gestion des déchets mais qu'il était nécessaire de proposer à la représentation nationale plusieurs solutions, le choix en étant remis au Parlement pour l'année 2006.

Au CEA, cela a été l'occasion de lancer le programme ISAAC dont mes collègues Samuel HARAR et Massimo SALVATORES pourraient vous parler.

Monsieur SCHAPIRA peut aussi vous parler de l'effort parallèle qui a été mené à l'IN₂P₃, mais l'ensemble de ces efforts a été regroupé en 1995 où le CEA, le CNRS et EDF ont constitué le groupement de recherche GÉDÉON qui indique bien qu'il étudie des options nouvelles pour la gestion des déchets et qu'il étudie les systèmes hybrides réellement dans cette optique.

Je n'en dirai pas plus sur l'historique des hybrides. Quelques mots maintenant sur le cycle du thorium.

Une constatation d'abord : il y a un peu plus de thorium que d'uranium dans la croûte terrestre, au moins deux fois plus, mais si l'on a démarré sur le cycle uranium et pas sur le cycle thorium, c'est parce qu'il n'y avait pas « d'allumette ».

Dans l'uranium, vous avez un peu moins de 1% d'uranium 235 qui est fissile dès le départ. Le thorium n'a pas d'isotope fissile et il se compare à l'uranium 238, c'est-à-dire que quand on lui envoie

des neutrons, il produit par une série de transmutations un isotope qui lui est fissile — l'uranium 233 — exactement de la même façon que l'uranium 238 produit du plutonium 239.

De plus les caractéristiques physiques de l'uranium 233 et du plutonium 239 sont extraordinairement équivalentes : ce sont de très bons matériaux fissiles l'un et l'autre, avec des masses critiques très faibles et tous les deux sont très radiotoxiques.

L'uranium 233 dans le cycle thorium a été essayé il y a longtemps car ses caractéristiques physiques permettaient d'avoir un excellent taux de conversion, c'est-à-dire l'extraction de pas mal d'énergie, tout en restant avec des réacteurs thermiques qui étaient à l'époque les seuls que l'on savait plus ou moins faire.

Le cycle thorium a été la base choisie pour le développement des réacteurs à haute température aux États-Unis, en Allemagne ; la France a été associée à cet effort de 1972 à 1980.

Aux États-Unis aussi, en 1976, dans le cadre de la recherche d'un cycle du combustible moins proliférant, il y a eu une démonstration assez importante dans un réacteur à eau, le prototype de Shippingport, où en utilisant le cycle U_{233} /thorium, on a atteint une quasi surgénération dans un réacteur à eau pressurisé. Mais cela n'a pas eu de suite : c'était une démonstration unique.

Il faut mentionner que les réacteurs rapides ont aussi utilisé le cycle thorium, dans un cas unique qui est actuellement celui d'un petit réacteur indien.

Les arguments qui ont amené en 1976 à remettre le thorium à la surface pour des raisons de non-prolifération sont très discutables. Puis les choses se sont calmées pour les mêmes raisons. Elles sont aussi réapparues à l'extrême fin des années 80, dans l'optique non plus seulement de la destruction des produits de fission à vie longue mais peut-être pour en produire moins, et surtout produire moins d'actinides majeurs.

Plus on part d'un élément de faible nombre de masse, plus on arrive lentement au noyau très lourd. Si on part du thorium 232, il faut beaucoup de captures en série avant d'arriver au 239, tandis que si l'on part du 238, on y est tout de suite.

Il ne faut pas non plus oublier de mentionner qu'on produit quand même d'autres actinides. Ce ne sont pas les mêmes mais il y en a. Ce sont aussi des produits à vie longue, ils ont aussi leur radiotoxicité et la comparaison doit être faite soigneusement.

Je mentionne enfin un intérêt tout récent qui est l'utilisation du cycle thorium non plus en recyclage, c'est-à-dire dans le cycle U_{233} /thorium qui a d'excellentes capacités neutroniques, mais, et peut-être à titre intérimaire, dans un cycle ouvert plutonium/thorium qui pourrait faire des combustibles dans les réacteurs à eau, produisant forcément moins de plutonium, et ayant des bonnes caractéristiques de taux d'épuisement.

Si j'ai mentionné que cela pouvait être une solution intérimaire, c'est que je pense que ce n'est que le multi-recyclage qui permet de tirer l'essentiel de l'énergie contenue dans l'uranium ou dans le thorium.

Là aussi, cela vous indique le contexte historique lié au thorium.

Un dernier point lié au plomb, qui est une caractéristique très originale des projets proposés par le Pr. RUBBIA, pour dire que ce qu'il a dit concernant la diffusion et la transparence est connu depuis longtemps. Ce sont des propriétés très intéressantes.

Ce qui manque au plomb, c'est l'expérience industrielle ; il n'y a aujourd'hui que les Russes qui ont une expérience solide d'utilisation du plomb comme liquide de refroidissement. Il s'agit plus encore d'un combiné plomb/bismuth qui a l'avantage d'avoir un point de fusion plus bas et l'inconvénient de produire des produits d'activation désagréables ; mais les Russes n'ont pas eu l'air d'y avoir été très sensibles...

M. DÉTRAZ — Le point fort, c'est que l'électronucléaire aujourd'hui est à l'évidence un sujet de recherche. Par conséquent, il est assez naturel que le CNRS se soit engagé dans cette affaire au cours de ces dernières années? au côté de ses partenaires.

C'est un phénomène un peu nouveau. Depuis plusieurs dizaines d'années, l'électronucléaire était davantage tourné vers les problèmes industriels où une contribution du CNRS était par nature moins largement sollicitée. Il semble qu'elle doive l'être maintenant fortement. Je veux m'associer à un certain nombre de choses que vient de dire Bertrand BARRÉ pour éclairer le débat par deux ou trois remarques.

Ce qui a beaucoup compté, c'est le fait que la représentation nationale par la loi du 30 décembre 1991 a dit d'une façon éclatante : *"Retrouvez vos manches, il y a un problème de recherche devant nous, abordez-le"*.

Des choses importantes ont été faites, qui permettent de replacer le débat d'aujourd'hui dans un cadre un peu plus large. Il y a aujourd'hui plusieurs départements du CNRS qui travaillent dans ce domaine, dans le cadre de 4 groupements de recherche : l'INSU dans les problèmes de formations profondes qui conditionnent les problèmes de stockage profond ; d'autres dans le domaine des matériaux où la chimie des actinides est quelque chose qui demande beaucoup d'études ; enfin, dans le groupement de recherche commun avec le CEA et EDF qui étudie les « options nouvelles ».

Dans ce cadre, des choses ont déjà été faites. Cela fait plusieurs années que des équipes du CNRS travaillent au sein d'une collaboration internationale pour quelques problèmes au coeur de la proposition présentée par le Pr. RUBBIA : sur la neutronique — et à l'évidence le comportement des neutrons est une question cruciale — ou encore sur le cycle du thorium où des vrais problèmes de recherche se posent et où il faut que le CNRS soit présent ; enfin sur le sujet des accélérateurs.

Bénéficiant de progrès technologiques extraordinaires au cours des quelques années qui viennent de s'écouler, nous pouvons aujourd'hui avoir une vision plus claire comme Carlo RUBBIA l'a montré. Nous avons des accélérateurs qui rendent dans le faisceau la moitié de l'énergie qu'on leur donne en électricité.

L'extraordinaire progrès de la technologie des accélérateurs qui s'est développé au sein de l'IN₂P₁ ou du CEA doit être mis à profit. Je pense qu'en France, en développant ensemble un projet d'accélérateur de haute intensité, capable de contribuer de façon originale à la machine industrielle qui a été esquissée, nous sommes capables d'apporter une contribution décisive dans ce domaine. En tout cas, nous y travaillons.

Une dernière remarque pour conclure sur les travaux de recherche faits en ce moment et dans lesquels le CNRS souhaite être fortement présent en tant qu'institution : cette émergence forte de la recherche qui est conduite par plusieurs organismes et dans de nombreux pays avancés, et qui vient d'une constatation unanime que l'électronucléaire est aujourd'hui et doit être l'objet d'une recherche innovante, originale, rapide, qui sorte des chemins battus, suppose la mise en place de véritables coordinations et une mise en cohérence de tout ce qui est fait.

Rien ne serait plus malsain, alors que nous est posé un problème fort — ne serait-ce que par la loi du 30 décembre 1991 — que chacun travaille de son côté, avec les moyens, les traditions, les cultures qui sont les siennes. Je pense en particulier que la représentation nationale doit veiller à ce

qu'il s'agisse vraiment d'un effort national de recherche et qu'on se donne les moyens d'une grande efficacité dans ce domaine.

M. BIRRAUX — Je remercie M. DÉTRAZ d'avoir souligné que la présentation nationale et le Parlement pouvaient être utiles dans la recherche. Je donne la parole au Pr. RUBBIA.

Pr. RUBBIA — Je voudrais souligner quelques points essentiels.

Le premier est que nous avons en Europe les compétences pour mener à son terme un programme de ce type, qui d'ailleurs est déjà suivi par les Américains et les Japonais, avec des chances d'être vraiment les leaders dans ce domaine.

Par exemple, on a parlé du projet BOWMAN ; le projet BOWMAN est basé sur les neutrons thermiques. Or, nous savons que tout ce qu'on peut faire avec le neutron thermique produit par l'accélérateur, on peut le faire avec un réacteur tout court. Toute chose qu'il est possible de faire avec un faisceau peut être faite par un réacteur.

C'était une voie qui n'était pas très productive mais il y a eu un changement rapide, avec un changement des responsabilités à l'intérieur du groupe de Los Alamos, et, aujourd'hui, le groupe de Los Alamos étudie le neutron rapide, le plomb et le thorium.

Il y a aux États-Unis le même programme : ce n'est rien d'autre que ce que nous voulons faire aujourd'hui.

Cela signifie que tout le monde s'aligne sur le neutron rapide, sur le plomb. Dans ce cadre, nous avons un point particulièrement important qui est l'accélérateur.

L'accélérateur de particules est la clé du problème. C'est par là que les choses passent. Le petit accélérateur que je vous ai montré, qui est une machine de 3 mètres de diamètre (c'est la dimension d'une voiture), avec un poids de 300 tonnes, a la même puissance neutronique que la machine de Los Alamos, une énorme construction qui coûte des milliards de dollars !

Le CERN qui était le moteur d'une coopération entre les physiciens de l'énergie et la communauté de l'énergie dans son ensemble a un rôle très important à jouer. Nous sommes prêts à le jouer, pour cela nous devons coopérer coude à coude avec les experts du nucléaire. Si nous sommes capables d'utiliser ces ressources de façon cohérente, sans trop de « scènes de ménage » à l'intérieur du système, nous aurons la chance de pouvoir écrire ce chapitre.

M. BIRRAUX — Y a-t-il des questions et des interrogations sur la sûreté et la faisabilité technique du projet ?

M. MAILLARD — Je travaille au Collège de France et à l'IN₂P₃. Nous avons lancé un programme depuis 1990.

Le prototype qui a été montré est destiné à être une maquette d'un réacteur futur de l'ordre de 700 MW électriques. Si on lance un prototype, c'est en fait parce qu'on a déjà derrière la tête le prototype final. Il serait intéressant que le Pr. RUBBIA nous montre le prototype final qu'il a en tête pour pouvoir discuter sur la fiabilité de l'ensemble du projet, y compris du point de vue de la sécurité et de la faisabilité industrielle.

M. BIRRAUX — Si j'ai bien retenu, le Pr. RUBBIA souhaiterait avoir un pilote. Pr. RUBBIA, voulez-vous donner quelques éléments complémentaires ?

Pr. RUBBIA — J'ai des transparents qui expliquent comment la machine marche mais il me faudrait une demi-heure.

M. BIRRAUX — C'est peut-être beaucoup.

Pr. RUBBIA — Je peux vous montrer les dessins de la machine et vous dire que si vous avez besoin de détails, il faudra regarder avec plus de détail la question.

Permettez-moi de vous donner quelques lignes directrices.

D'abord, il faut produire de l'énergie compétitive. Il n'y a aucun intérêt à faire une machine de 1 ou 2 MW : il n'y aura pas de marché. Il faut changer la taille de cette machine. Il est certain que cette taille sera comparable à d'autres sources d'énergie. Nous avons choisi une puissance unitaire de l'ordre de 1 à 2 GW thermiques qui représente la moitié ou le quart ou le tiers d'un réacteur nucléaire traditionnel.

Nous pensons que notre machine est capable d'occuper la fenêtre du marché qui est la plus populaire aujourd'hui avec la centrale à gaz ou à charbon, qui a une taille plus petite que les grosses machines utilisées pour la production d'énergie avec un réacteur nucléaire ordinaire.

Il faut donc faire une machine plus légère, modulaire, qui puisse être transportée, et dans ces conditions nous préférons une taille de 1 à 2 GW. Nous avons fait des calculs pour construire une machine qui arrivait à 4 GW thermiques, ce qui est l'équivalent d'un réacteur ordinaire, mais il faut des cuves de 20 mètres de diamètre. Un tel système est difficile.

En tenant compte du marché, nous pouvons imaginer une machine modulaire qui peut être construite à l'usine puis transportée, un principe qui semble meilleur que celui de construire quelque part une machine importante.

Un autre point important, c'est le choix de l'énergie des protons. Notre problème est la dimension et la taille du système. Il faut se demander quel est le gain de ce système. Même les accélérateurs de petite dimension, de 0,5 GeV, peuvent avoir un gain important et, au-dessus d'une certaine valeur, il n'y a pas davantage à augmenter l'énergie de la machine.

Une petite machine peut faire le travail, on n'a pas besoin de se lancer dans une « méga-construction » [voir figure page suivante].

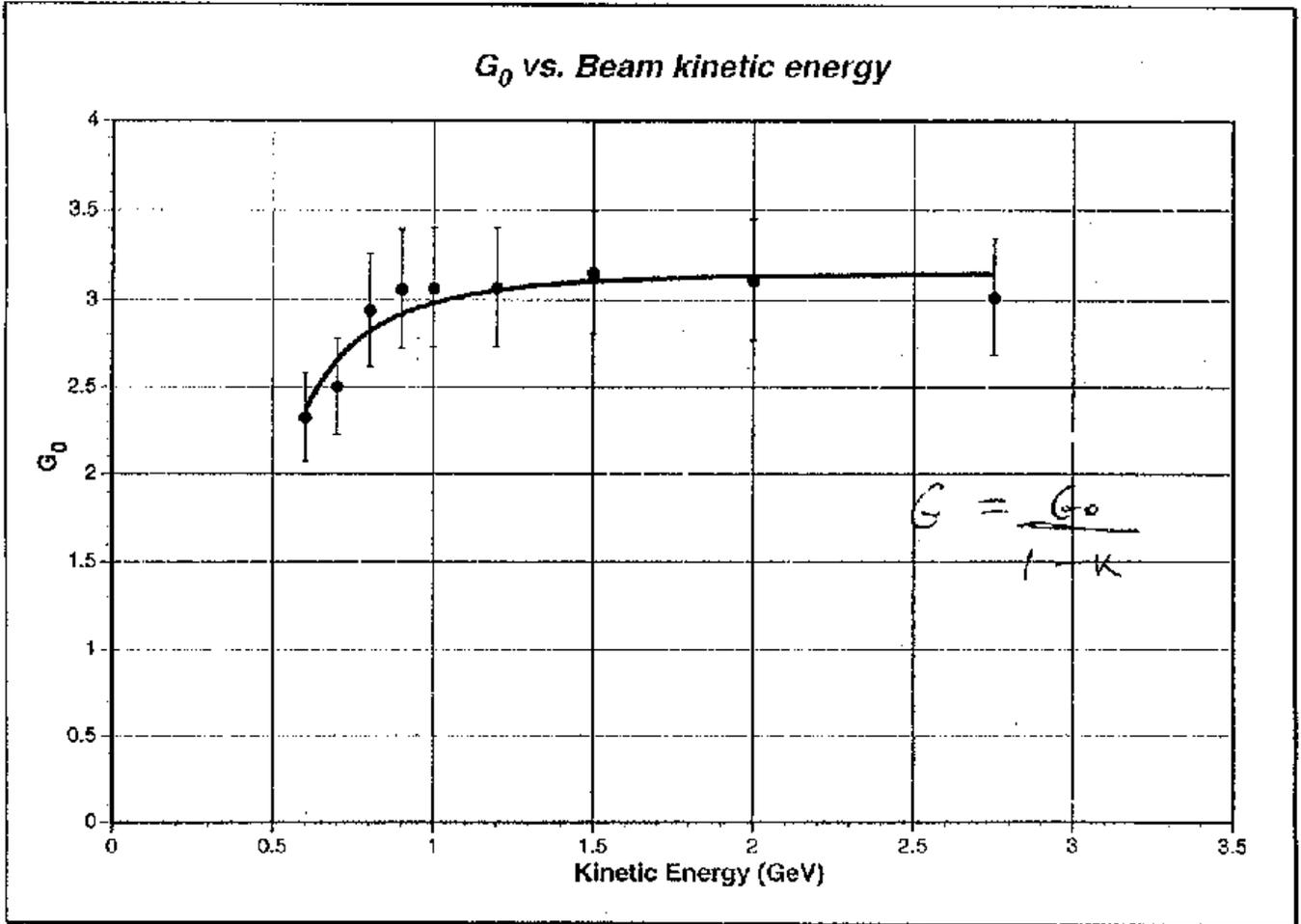
La troisième question, c'est le courant que nous pouvons utiliser. Le courant dans la machine est limité parce que 10 ou 20 mA commence à être la limite de ce que l'on peut faire. Aujourd'hui, la machine de Zürich marche à 1 mA, 2 mA ou 3 mA. Nous pouvons passer à 10 mA qui est un ordre de grandeur supérieur à ce que nous faisons aujourd'hui. Cela vous donne des gains entre 50 et 100 dépendant de l'énergie de la machine.

En outre, il faut exploiter avec cette machine avec un k constant. Il y a une perte de réactivité très importante à cause de la présence de fragments de fission. Quand vous avez transformé 15% de votre combustible en produits de fission, cela représente une consommation « parasite » de neutrons. Les neutrons vont disparaître et il y aura une perte de réactivité.

Normalement, dans un réacteur ordinaire, tout cela est compensé en renouvelant le combustible, etc.

Dans notre cas, nous voulons un système complètement passif, que l'on puisse fermer pendant 5 ans. Dans ces conditions, il est fondamental que notre système reste stable et qu'il y ait une mécanique de compensation pour les captures produites par les fragments de fission.

Tout cela est créé simplement en se plaçant dans la situation où l'on part au-dessus de l'équilibre entre production et élimination du thorium : dès que la machine fonctionne on produit davantage d'uranium 233 et par conséquent cela augmente le coefficient de multiplication.



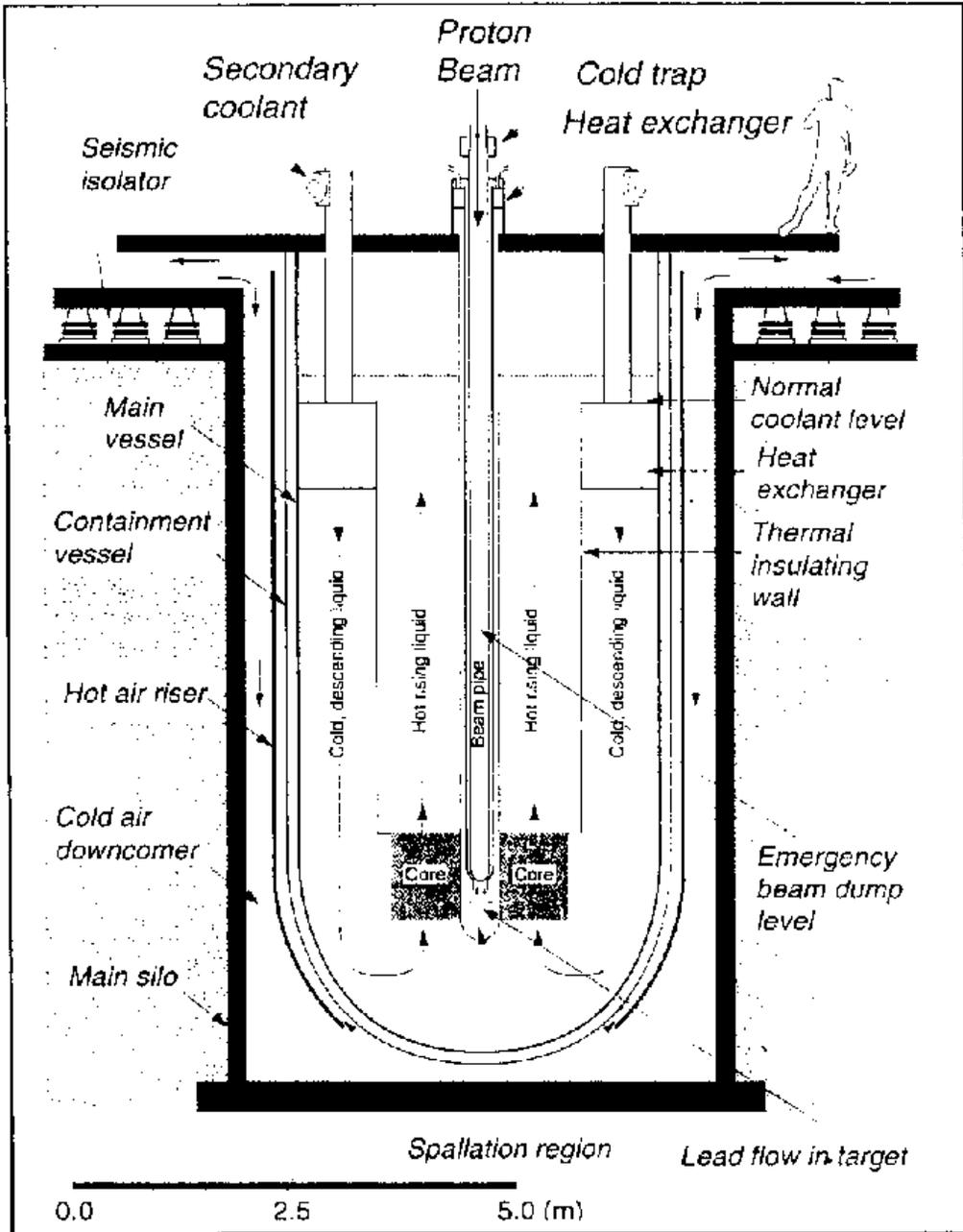
On peut arriver à une situation dans laquelle on peut tourner avec un coefficient de multiplication constant pour une période de plusieurs années. Cela est dû au fait qu'on recrée de l'uranium 233 en partant avec une concentration inférieure à la concentration critique. Nous fonctionnons donc pendant une longue période avec un système fermé.

Vous avez posé des questions sur la sûreté. Evidemment, la sécurité est quelque chose de très important, surtout si l'on veut faire de la qualité. Nous avons choisi le plomb fondu et le refroidissement par convection naturelle.

Ce n'est pas intrinsèquement lié avec le principe de base de l'amplificateur d'énergie. Je peux construire l'amplificateur d'énergie sans le plomb liquide, avec du plomb solide ; je peux aussi choisir une machine pour laquelle il y a refroidissement avec des pompes, mais nous avons choisi ceci pour montrer les points importants de notre programme.

Donc pas de chimie en ligne, un *burn up* maximal de 150 GW.j.t^{-1} sans intervention, le fluide caloporteur avec du plomb, qui a un coefficient de vide positif et un point d'ébullition élevé. Si l'on vidange totalement ou partiellement le caloporteur et lors de déformations sévères du combustible, il n'y a pas de changement de qualité.

Imaginons cette machine, une boîte complètement fermée dans laquelle un faisceau va de haut en bas, le corps est rempli de plomb qui circule à l'intérieur. Cette circulation de plomb est étudiée avec beaucoup d'attention par des programmes informatiques extrêmement sophistiqués. Le plomb monte grâce à la chaleur produite par le combustible et le plomb refroidi redescend.



Nous avons un système RVACS dans lequel il y a une évacuation spontanée de la chaleur. Tout cela est fait en refroidissant la paroi extérieure du réacteur par un courant d'air qui vient naturellement depuis le haut, qui refroidit l'extérieur de la boîte. Le point important est que la chaleur est transférée inévitablement par conduction à la paroi extérieure de l'objet.

Le système de refroidissement avec l'air marche tout le temps, l'air froid descend, fait le tour et revient vers le haut, et fait sortir une certaine chaleur de la machine.

Il y a une double paroi. Dès qu'il y a une surchauffe, la température monte, le rayonnement thermique est plus important. A la place du froid, vous avez du chaud. Le système élimine continuellement le minimum de chaleur nécessaire. Si ce minimum de chaleur n'est pas présent, on arrête la machine.

Si vous coupez la machine, la vitesse du plomb descend très lentement : il faut deux minutes avant que le plomb arrive à vitesse nulle. La température du corps s'écrase mais, fondamentalement, elle s'adapte à une valeur beaucoup plus basse quand la machine est coupée.

Une production de chaleur est éliminée vers l'extérieur. La masse du plomb est suffisamment élevée pour pouvoir stocker cette chaleur sans trop de dégâts. Le processus se fait sans problème et on pourrait imaginer une situation dans laquelle l'arrêt total de puissance est dissipé par méthode passive et déterministe.

Quelques paramètres pour le prototype et la machine finale :

- le prototype fait 75 MW et la machine finale ferait de 1500 MW ;
- le gain énergétique nominal est de 40 pour le prototype et de 120 pour la machine finale ;
- la consommation électrique de l'accélérateur est de 4 MW pour le prototype et de 30 MW pour la machine finale ;
- la masse initiale de combustible est de 5 tonnes pour le prototype et de 30 pour la grande ;
- la puissance spécifique est de 13 W.g⁻¹ pour la petite machine et 52 W.g⁻¹ pour la grande ;
- il y a un cyclotron pour la première machine, un cyclotron et un LINAC si possible pour la deuxième ; l'efficacité de l'accélérateur est d'au moins 50% dans les deux cas ;
- la puissance dissipée dans la fenêtre est la même dans les deux cas ; nous attendons une année de vie dans les deux cas ;
- la vitesse du plomb est de 1,2 m.s⁻¹ ou 2,2 m.s⁻¹ ;
- le poids total du plomb est de 1000 t pour la petite machine et de 9000 t pour la machine finale ;
- la température dans la petite machine est entre 400 et 495°C, on arrive à 600°C dans l'autre ; la raison est que nous savons que la corrosion dans le plomb est relativement bénigne à température modeste, mais que des problèmes se posent à température élevée.

Les expériences que nous devons faire avec la petite machine vont nous guider pour définir la machine finale.

(La séance, suspendue à 11 h 10, est reprise à 11 h 30.)

M. BIRRAUX — Nous reprenons le cours de notre audition et la discussion sur la première partie du débat qui est la faisabilité et la sûreté.

Mme SENÉ — J'ai apprécié l'exposé. Simplement, avant de pouvoir parler d'un « amplificateur », il est nécessaire de bien préciser les recherches qui doivent être faites, et qui ont été menées par M. DÉTRAZ et M. BARRE.

Les problèmes, en particulier de matériaux, demandent une analyse extrêmement complexe parce que pour atteindre les taux de combustion dont on parle, ce n'est pas si simple ! Pour pouvoir faire face à tous les problèmes de corrosion qui ont été cités, il y a de nombreuses études à faire.

S'agissant des problèmes de fission, il y a aussi à étudier à fond le thorium que l'on connaît mal, en particulier tous les problèmes de neutrons retardés, et aussi tous les produits qui viennent lors de la fission. Il y a donc beaucoup de recherches à mener.

Il y a un point également sur la chimie, il y a beaucoup de problèmes à traiter puisqu'on veut traiter les autres déchets mais il faut pouvoir faire du retraitement poussé. Tout cela est probablement valable en éprouvette mais c'est loin de constituer une solution prouvée industriellement.

Enfin, je voudrais parler de la sûreté car c'est le point très important. Il faudra, à partir du moment où l'on voudra mettre en place un petit prototype, qu'on se penche sur les problèmes de fenêtre, de points chauds à l'intérieur et de calculs du réacteur. Ce n'est pas simple d'utiliser du plomb fondu et nous aurons beaucoup de travaux à faire.

Toute cette recherche qui se fait dans le cadre de la physique nucléaire — qui une fois de plus se fait pour utiliser la fission — doit être mise en balance avec d'autres recherches qui permettront en 2006 ou 2010 d'avoir une panoplie de choix et pas seulement le nucléaire.

Le problème des déchets ne sera pas complètement résolu avec un accélérateur de ce type : il ne résoudra qu'une petite partie des actinides, mais nous avons à ouvrir davantage les horizons. Nous ne savons pas si le Bangladesh ou d'autres pays ont besoin d'un amplificateur d'énergie, la discussion doit être beaucoup plus forte que de le dire ainsi.

Pr. RUBBIA — Un certain nombre de choses que vous avez dites me semblent sages et acceptables. Il faut séparer deux problèmes : un qui est la recherche fondamentale et la recherche appliquée et toutes les connaissances que cela implique ; l'autre qui est le problème politique, social, qui consiste à déployer une solution plutôt qu'une autre.

Je n'ai rien contre le développement tous azimuts, mais il ne faut pas se faire d'illusions, on ne peut pas prendre un physicien nucléaire et lui dire de faire de la chimie ! Cela ne marchera pas, chacun doit suivre sa voie.

Il y a un tout. Il est certain que dans les énergies renouvelables il y a aussi beaucoup de travail à faire pour améliorer les problèmes « domestiques ». J'espère que tout le monde se mettra au travail.

Malheureusement, il me semble que les considérations à caractère économique sont toujours dominantes. J'ai l'impression que les pays en voie de développement sont strictement orientés dans la direction où l'énergie la moins chère est la meilleure. Tant pis pour l'environnement !

C'est à nous à développer une forme d'énergie qui puisse être utilisée de façon économique chez ces gens et qui puisse préserver l'environnement. Si les Chinois doivent aller au charbon, ils iront.

M. BARRE — J'aimerais que l'on aborde le problème de la faisabilité technique.

Pour développer un système et surtout un système aussi novateur que celui présenté par le Pr. RUBBIA, il faut pas mal d'étapes. Une des étapes sera incontestablement un pilote, ce qu'il appelle la "petite machine". L'ordre de grandeur qu'il évoque, une petite centaine de MW thermiques est l'ordre de grandeur où une démonstration commence à être probante.

Le terme "*petite machine*" ne doit pas non plus être pris à la légère. Un prototype de réacteur nucléaire de 200 MW, quelle que soit sa technologie, représente entre 1 et 2 MdF. On ne peut pas se lancer dans un investissement, même pour une somme aussi mineure (si j'ose dire), sans être tout à fait sûr d'avoir atteint un certain point de maturité dans les étapes précédentes du développement.

C'est pourquoi il serait intéressant que Monsieur SALVATORES ou Monsieur HARAR vous exposent le programme de recherche à l'heure actuelle, en amont de ce démonstrateur, pour essayer de voir à quelle échéance on pourra se prononcer en termes de faisabilité technique, mon impression étant que c'est actuellement un peu prématuré.

M. BIRRAUX — Je propose d'écouter les intervenants qui souhaitent s'exprimer avant que Monsieur SALVATORES nous fasse cette présentation.

M. MENJON — Je ferai une intervention plus générale que celle de la question de la sûreté. Je voulais souligner que nous avons exprimé un intérêt pour l'idée du Pr. RUBBIA et plus largement pour les systèmes hybrides ; nous situons cet intérêt dans le cadre de la loi de 1991.

EDF est tout à fait convaincu de la qualité de la démarche de cette loi qui consiste à explorer largement toutes les voies possibles sur les questions de devenir des déchets — et même au niveau de la recherche — pour permettre ensuite à la représentation parlementaire et au pays de faire les choix les plus judicieux.

S'agissant de la question de la faisabilité, je rappellerai ce que coûte le développement d'une filière. On a commencé à dire qu'il y avait peut-être deux ou trois idées dans ces systèmes : l'idée du système hybride lui-même, l'idée du cycle thorium et l'idée du refroidissement au plomb.

La Cour des Comptes a récemment vilipendé EDF en chiffrant les dépenses que nous avons faites sur les réacteurs à neutrons rapides et en citant un chiffre de plusieurs dizaines de milliards de francs qui n'est pas très éloigné de la réalité. En amont de ces dépenses, il y a eu beaucoup de recherche fondamentale et de recherche appliquée avant de faire émerger la filière des neutrons rapides.

Il est important que nous ayons en tête aujourd'hui ces ordres de grandeur. Le prototype du Pr. RUBBIA représente un petit nombre de milliards de francs, le développement d'une filière représente plusieurs dizaines de milliards de francs.

La question est de savoir si la nation peut se le permettre dans le financement de sa recherche.

S'agissant de l'électricité nucléaire et de sa compétitivité, par rapport aux chiffres qu'a cités le Pr. RUBBIA, les sources concurrentes d'énergie — qui ont certes des inconvénients au plan de l'environnement global — ont fait des progrès considérables. Elles se situent aujourd'hui beaucoup plus près de 30 centimes que de 50 centimes par kWh.

Par conséquent, l'énergie nucléaire aujourd'hui est confrontée à une question de compétitivité et la question de savoir ce que la recherche nucléaire peut ouvrir comme nouveaux chantiers mérite d'être sérieusement regardée.

M. BIRRAUX — Et mérite aussi d'être soutenue. Je rappelle que l'Agence de l'OCDE pour l'Énergie nucléaire vient de lancer une sorte d'appel à l'aide selon lequel la recherche ne devrait pas être abandonnée mais au contraire poursuivie.

M. LACOSTE — Nous discutons de quelque chose qui est très en amont de ce que sera la réalisation effective d'un prototype, *a priori* encore plus d'une réalisation en vraie grandeur : nous sommes en train de discuter d'un certain nombre de concepts.

Je ne cacherai pas que j'ai été surpris de voir, à travers les transparents concernant la réalisation en vraie grandeur, des nombres avec 5 chiffres significatifs. Cela me paraissait très élaboré pour le stade actuel de conceptualisation du projet.

Par ailleurs, le Pr. RUBBIA a présenté son projet comme destiné à produire de l'énergie. Je me serais attendu à ce que le projet soit présenté comme particulièrement intéressant pour traiter le problème des déchets. Je ne suis pas sûr que l'optimisation des performances de la machine soit la même suivant que l'on vise la production d'électricité ou le traitement des déchets, y compris ceux venant d'autres machines.

En outre, je ne reviendrai pas sur la masse d'études de faisabilité à mettre en oeuvre.

Enfin, sur la sûreté, je rappelle que la doctrine internationale, et en particulier la doctrine française, est celle de la défense en profondeur : il faut mettre en oeuvre un certain nombre de niveaux de protection pour éviter que la matière radioactive sorte des machines.

Il y a trois fonctions essentielles à préserver en toutes circonstances : la maîtrise de la réactivité, le refroidissement du combustible et le confinement des substances radioactives.

Je demanderai à M. GROS, de l'IPSN, qui a mené une première étude pour le compte de la DSIN, de présenter quelques-unes des questions de fond que nous nous posons.

M. BIRRAUX — Nous sommes là pour répondre effectivement aux questions de fond.

M. GROS — Au stade actuel, nous n'avons encore pas de dossier détaillé pour faire des analyses de sûreté. Il s'agit donc de poser des questions à la lumière de l'expérience que l'on peut avoir et des grands principes qui sont définis, comme le principe de la défense en profondeur qui à un premier niveau prévoit une qualité de conception, de réalisation très poussée, et demande à avoir des options très prudentes pour la réalisation d'une installation.

Il y a certaines options dans le projet présenté par M. RUBBIA qui sont assez avancées mais nous sommes encore loin du stade d'une première réalisation.

Mme SENÉ a dit qu'il y aurait beaucoup de travaux à faire pour la sûreté, je vais essayer de citer quelques points en passant en revue les trois grandes fonctions de sûreté rappelées par M. LACOSTE.

S'agissant de la maîtrise de la réactivité, il est certain que le projet de M. RUBBIA et les systèmes hybrides d'une façon générale sont intéressants puisque l'on vise à l'élimination des accidents potentiels de réactivité en utilisant un réacteur sous-critique. Mais cela suppose certainement que les niveaux de sous-criticité retenus soient suffisamment faibles.

Or, le projet de M. RUBBIA a obtenu un niveau de sous-criticité de 0,98, et, à ce niveau, il est certain que la sûreté apparaît difficile à démontrer. Il faudra regarder de près tous les problèmes et toutes les incertitudes, toutes les marges nécessaires.

La deuxième fonction de sûreté est celle du refroidissement du combustible. La question de l'évacuation de la chaleur ne se pose pas différemment pour un système hybride et pour un réacteur classique.

Dans les options choisies dans le projet dont nous parlons, il a été retenu d'utiliser la convection naturelle, y compris pour évacuer l'ensemble de la puissance produite dans le cœur et pas seulement la puissance résiduelle. Il est nécessaire de regarder tous les cas de fonctionnement, y compris les régimes transitoires, en l'absence de possibilité de réglage, et aussi la question de la

garantie du maintien du plomb à l'état liquide en toutes circonstances ; les pompes primaires et secondaires sont souvent utiles pour contribuer au maintien à l'état liquide du liquide de refroidissement.

Enfin, l'utilisation du plomb lui-même, avec une caractéristique choisie, sur une hauteur de 30 mètres en particulier, d'après les travaux effectués en Russie, montre qu'il peut y avoir des questions d'instabilité dans la convection naturelle.

Tout cela demande des examens assez détaillés.

Concernant l'évacuation de la puissance résiduelle, le projet inclut une évacuation par refroidissement d'air à l'extérieur de la cuve. Là se pose la question qui va rejoindre la troisième fonction de sûreté, c'est-à-dire le confinement de la radioactivité. Dans ce cas, dispose-t-on d'un nombre de barrières suffisant entre l'atmosphère, le gaz dans le circuit et l'extérieur ?

Cela dépend évidemment de la conception retenue. Y a-t-il par exemple des communications entre la cuve de sécurité et la cuve principale du réacteur ?

Pour terminer sur le confinement des substances radioactives, je peux citer la tenue de la fenêtre qui est à l'extrémité du tube sous vide et le sépare du cœur du réacteur. Cette fenêtre a une conception délicate et c'est un point qui sera à examiner particulièrement.

Un dernier point relatif à la défense en profondeur. L'expérience a montré, y compris pour les réacteurs rapides, qu'il faut prévoir dès l'origine des possibilités d'inspections en service, en particulier sur les différentes parties, et surtout dans le cas où on utilise du plomb qui pose des problèmes de corrosion.

M. BIRRAUX — Je vais demander au Pr. RUBBIA de répondre car nous sommes au cœur du problème sur la sûreté.

Pr. RUBBIA — Un certain nombre de questions ont été posées.

Une fois que l'on a défini ce qu'on pourrait gagner avec la machine que nous proposons, l'effort nécessaire pour l'obtenir doit être justifié comme utile ; il faudra certainement réétudier un certain nombre de choses.

Nous avons dépassé le niveau de la conception de base pour voir comment résoudre un certain nombre de problèmes, en particulier celui de la fenêtre.

Le système que nous avons dessiné est tel que si la fenêtre se cassait, le plomb liquide pénétrerait dans le système, montrait tout en haut et éliminerait la possibilité pour le faisceau de continuer à bombarder le système, tout en arrêtant la marche du système.

Une fenêtre cassée n'est pas dramatique, c'est un accident considéré comme raisonnable.

Vous avez mentionné le fait que la partie nucléaire s'étendait jusqu'à la fenêtre. Ce n'est pas nécessairement vrai. Nous avons des dessins où il est indiqué qu'une enceinte sépare la machine de la fenêtre.

La machine est une cuve avec un couvercle qui contient le système et, à l'intérieur, il y a le combustible. Vous pouvez imaginer une structure dans laquelle vous faites une deuxième cuve qui pénètre le système. A l'intérieur de cette cuve, vous pouvez introduire du plomb avec la fenêtre et la source de spallation associée à la fenêtre. Dans ces conditions, le faisceau n'a pas besoin de passer par la fenêtre.

Vous pouvez faire un schéma dans lequel vous mettez du liquide, et vous voyez le faisceau directement sur le liquide. Ce faisceau ne va traverser aucune fenêtre parce que le plomb aura un point d'ébullition à 1700°C et notre liquide marchera entre 500 et 600°C. La pression de vapeur est déterminée par la paroi froide vers le haut et est négligeable.

Il existe des possibilités considérables pour la fenêtre. Vous pouvez séparer la fenêtre et introduire un élément de paroi de séparation, et vous pouvez imaginer des schémas dans lesquels il n'y a pas de fenêtre du tout.

Le choix entre ces trois systèmes implique l'étude de la technologie de la fenêtre en soi.

Dans notre programme, nous prévoyons de construire d'abord l'accélérateur avec un courant entre 10 et 15 mA, et autour de cet accélérateur, bien avant qu'on commence à faire du nucléaire, nous pouvons construire la cible avec le faisceau. Nous pensons à un développement dans lequel il y aurait l'accélérateur en soi et un faisceau qui rentrerait dans une cuve, qui serait fondamentalement la cible elle-même avec la fenêtre.

En principe, on peut imaginer introduire ce système à l'intérieur de l'autre le moment venu. Vous avez tous les choix possibles.

J'ajoute que beaucoup travaillent sur la source de spallation. Toutes ces sources de spallation parlent de 5 MW de puissance envoyée par le faisceau sur une cible qui n'a pas de plomb. Les dimensions et les difficultés d'une source de spallation, selon les modèles et les projets discutés dans la communauté internationale, sont certainement plus importantes.

Vous avez demandé combien de barrières de confinement ajouter au système. A mon avis, on peut en mettre autant qu'on veut, il n'y a pas de raison de penser que le passage du faisceau à travers le système puisse être considéré comme une cassure du système de confinement, de la même façon que le tuyau qui amène la vapeur et sort la vapeur du réacteur n'est pas considéré comme une façon de casser le confinement du système. Le diamètre du faisceau peut être plus modeste.

D'ailleurs, si on voulait, on pourrait mettre une deuxième fenêtre pour résoudre ce type de problème.

Il n'y a pas de différence dans le nombre de régions de confinement et je suis d'accord sur le fait qu'il faut en avoir autant que possible.

Une autre question a été soulevée, celle de la convection. Il faut savoir si la convection marche ou pas. Nous avons choisi la convection parce que nous pensions que c'était quelque chose qui valait la peine d'être étudiée.

Il est évident que si vous ne vouliez pas de la convection, je pourrai vous dessiner une autre machine dans laquelle on ferait un bloc de plomb solide, avec une série de trous dans lesquels passeraient des tuyaux, comme ce qui est fait dans le système CANDU. Le combustible est à l'intérieur, de l'eau passe, et on fait un tuyau plus gros (c'est votre cible), le plomb reste solide dans le système et il est refroidit avec le même système.

Vous auriez une machine dans laquelle il n'y aurait plus de plomb liquide, vous auriez une cible physiquement séparée du système avec une distance de 30 à 50 centimètres. Vous auriez une série de tuyaux comme dans la structure CANDU.

Vous pouvez aussi utiliser du gaz, comme l'hélium, de façon similaire à ce qui a été fait dans d'autres réacteurs.

Dans cette démarche, on n'est pas obligé de fonctionner avec notre solution. Ceci est notre solution cependant. Si vous vouliez minimiser le nombre de changements dans le système, vous achèteriez la licence et le système de construction, vous feriez un bloc de plomb dont la pureté est connue, vous feriez un bloc de 6 mètres, vous mettriez une cinquantaine de tuyaux de puissance de 1 ou 2 MW et vous auriez une machine complète dans laquelle beaucoup de problèmes seraient éliminés. C'est une possibilité, tout en utilisant le maximum de ce qui existe.

Je pense que l'intérêt du système avec le liquide fondu est de nous permettre de penser à quelque chose dans lequel le transfert de chaleur est plus « automatique ».

Il est certain qu'un système CANDU serait intéressant pour l'élimination des déchets radioactifs. Il y a un grand nombre de possibilités qui dépendent de l'état du système. Des gens préfèrent être conservateurs, d'autres seront plus futuristes. Dans ma liberté de scientifique, de Docteur FOLAMOUR, j'ai pensé qu'il était plutôt intéressant de se lancer dans le plomb.

M. LACOSTE — Dans mon propos, je n'ai pas imaginé une seconde le Pr. RUBBIA en Docteur FOLAMOUR. Il convient de stimuler le dialogue entre le promoteur d'un projet porteur d'un certain nombre d'idées dont beaucoup sont innovantes et des responsables de sûreté et de demander à ce promoteur de vérifier un certain nombre de choses avant de lancer le projet.

M. BIRRAUX — Il me semble qu'il faudrait peut-être apporter un complément de réponse sur le liquide caloporteur et le moyen de le maintenir liquide en toutes circonstances. Est-ce que l'absence de pompe n'est pas une « fioriture » supplémentaire que vous vous offrez pour montrer que cela marche ? Cela peut-il aussi marcher avec des pompes ?

N'y a-t-il pas un risque, du fait de l'inhomogénéité des réactions de fission dans le coeur, qu'il y ait une sorte d'inhomogénéité dans le plomb liquide et que de-ci de-là on puisse trouver quelques « bouchons » qui seraient gênants ?

Pr. RUBBIA — Je vais vous donner mon point de vue personnel.

A mon avis, mettre du sodium dans ce système serait valable pour une phase transitoire mais pour la phase finale il faut un matériau beaucoup plus lourd. La raison en est que dans un mélange neutrons et noyaux de sodium, vous perdez 20%. La collision entre le neutron et le noyau de plomb est de moins de 2%. Cela veut dire que le nombre total de collisions est différent entre le sodium et le plomb.

Le sodium était soutenu par beaucoup. Pendant mes recherches, j'ai trouvé un article d'Américains qui comparent les deux. (*Lecture en anglais*)

Ces raisons n'ont plus lieu d'être aujourd'hui si on veut faire de l'incinération pure et dure et une combustion aussi complète que possible. Toute évolution chimique à l'intérieur du combustible revient à la même chose. Cette équivalence de tous les matériaux qui se forment au fur et à mesure sans avoir d'effet sur la réactivité est réaliste. Une machine dans laquelle il y a de l'uranium, du plutonium, de l'américium et du plomb va dans la bonne direction intellectuelle.

La même chose s'applique pour la cible. Le plomb apparaît comme un élément important pour faire des neutrons avec des protons. Le nombre de neutrons que vous produisez par un processus de ce genre est très important.

Comme on a besoin de plomb pour la cible, on a besoin de plomb pour le système. Or est-ce que le plomb peut être un système caloporteur raisonnable ?

En principe oui, mais le plomb comparé au sodium comporte certains désavantages. L'un est que chaque fois qu'on arrête une pompe, la viscosité du plomb étant plus grande, il faut élargir la distance entre les parois pour obtenir suffisamment de place afin que le plomb puisse porter à terme sa fonction car les parois des machines optimisées pour le sodium ne sont pas les mêmes que pour le plomb.

Si vous faites cette différence, vous arrivez à la conclusion que le plomb est aussi bon que le sodium.

Quels moyens avons-nous utilisés pour étudier cela ? Pour l'instant, nous utilisons des calculs basés sur des programmes informatiques, qui nous permettent de simuler tous les fonctionnements.

Nous trouvons que la convection marche. Nous avons donc l'impression que la nécessité d'ajouter des pompes, qui représentent des difficultés supplémentaires, doit être remise en question. Mais c'est une décision que nous prendrons le moment venu. *A priori* nous ne sommes pas contre les pompes mais il n'y a pas de raison fondamentale pour que les pompes soient utilisées dans le système.

Je répète, à partir des calculs que nous pouvons faire avec les programmes que nous avons, qui sont les meilleurs programmes que je connaisse à ce niveau, la convection est satisfaisante.

Il y a des phénomènes d'accidents, par exemple le blocage d'un tuyau. Cela fait partie d'une technologie dans laquelle nous étudions tous les scénarios d'accidents possibles. En faisant cet exercice, nous sommes arrivés à la conclusion qu'avoir de la convection plutôt que des pompes était préférable parce que quelque chose qui « n'existe pas » ne peut pas tomber en panne !

La convection marche et aujourd'hui ce bâtiment est chauffé à la convection. J'imagine que vous avez de l'eau dans le système de refroidissement et qu'il marche. Or dans le réacteur le refroidissement est toujours là.

M. GSPONER — Je vais vous montrer une photographie datée de 1952. C'est la construction d'un très grand accélérateur dont l'objectif était d'utiliser le principe de la spallation pour produire du tritium et du plutonium pour les bombes en Amérique avant qu'on ne découvre suffisamment de réserves d'uranium naturel.

L'idée dont nous parlons aujourd'hui a une origine physique. C'est un très ancien concept. Cet accélérateur a 20 mètres de diamètre et 500 mètres de long.

Pour avoir un nouveau système, que ce soit dans le domaine nucléaire ou dans un autre, on doit avoir un principe physique nouveau, qui change l'ordre des choses. Ce processus nouveau est la spallation.

Si l'on part d'un proton de haute énergie, on produit avec un de ces protons 40 neutrons, ce qui nous donne à peu près 25 MeV par neutron produit. Après la fission, on peut produire un neutron utilisable pour 200 MeV de fission, on a à peu près 200 MeV par neutron, donc un facteur 10 avec le processus de spallation.

Si l'on couple un système de spallation avec un réacteur sous-critique, avec un k de 0,95, le résultat final est que dans l'ensemble du système, 90% de l'énergie sera de l'énergie de fission et 10% sera de l'énergie de spallation. Cela signifie que la production d'énergie avec un accélérateur n'est pas un problème d'accélérateur et de spallation, c'est un problème ordinaire d'énergie nucléaire, les problèmes qui dominent sont les problèmes classiques de l'énergie nucléaire : le thorium, le plomb, la convection, la sécurité, etc. Tout cela peut être discuté sans accélérateur, l'accélérateur est accessoire.

Pourquoi un accélérateur est-il intéressant ?

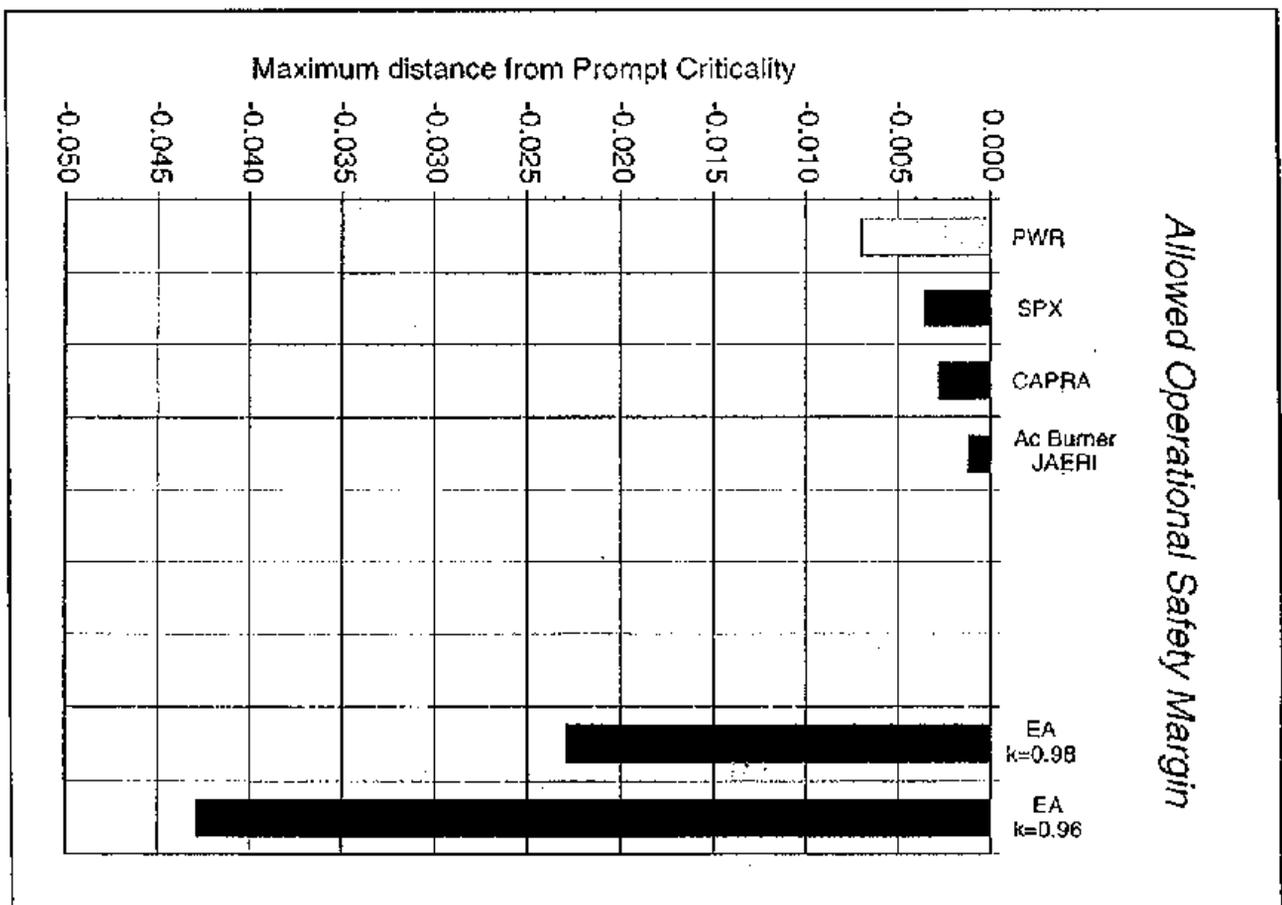
En 1981, j'ai écrit un article basé sur cette constatation. Le concept d'accélérateur couplé à un système sous-critique a été publié en 1952 au Canada.

En fait, si l'on veut utiliser la spallation, il faut utiliser de l'uranium 233, du tritium, du plutonium, etc. C'est exactement la conclusion à laquelle sont arrivés les Américains qui maintenant ont un projet de construire un accélérateur pour faire du tritium parce que depuis 1952 on a fait des progrès sur les accélérateurs. Mais cela ne change rien à ce chiffre : si votre accélérateur est parfait, il ne représente que 10% de l'ensemble.

En France, on est arrivé à la même conclusion. Dans le rapport annuel 1995 du CEA, page 32, on cite le projet d'accélérateur mais on dit qu'avec cette technologie trois choses sont possibles : la transmutation des déchets, la production du tritium et les réacteurs du futur, c'est-à-dire le genre de système dont nous parlons aujourd'hui.

Ma question est la suivante : quel est vraiment l'avantage spécifique d'avoir un accélérateur d'énergie ?

Pr. RUBBIA — Pourquoi faut-il utiliser un accélérateur pour faire ce type de chose ?



La réponse est relative au nombre de neutrons qu'il faut utiliser pour contrôler cette machine. Vous êtes une personne très soucieuse de la sécurité, et vous avez bien raison, c'est quelque chose qu'il faut étudier avec attention.

L'important est que dans un réacteur, ce qui contrôle le système, ce sont les neutrons retardés. L'uranium 233 a 3% de neutrons retardés et le Pu₂₃₉ a de l'ordre de 2%. Dès que vous passez à des éléments plus sophistiqués comme l'américium, ce nombre de neutrons retardés devient de l'ordre de 1%. Cela veut dire que vous avez une possibilité de contrôle représentée par cette fraction de 1% de neutrons. Seul un millième de ces neutrons est utilisable pour contrôler la machine.

La situation d'un réacteur ordinaire est beaucoup plus favorable. Vous arrivez à 7%. Cela veut dire qu'une machine avec des neutrons thermiques est plus facilement contrôlable qu'une machine avec des neutrons rapides. Dès que vous passez du plutonium à l'américium, au curium que vous voulez éliminer, il y a encore ces valeurs.

Ces fameux neutrons qui pour vous sont très peu de choses, ne le sont pas comparés aux possibilités de contrôle parce que vous les avez sous la main, de la même façon que vous avez sous la main la possibilité de changer le nombre de neutrons retardés. Avec un k de 0,98 vous avez certainement 2,5% de contrôle et avec $k = 0,96$ vous descendez encore plus bas.

Le choix des k dépend exclusivement de la quantité de puissance recyclée. En outre, la distance par rapport à la criticité est une question économique. Si nous choisissons un k de 0,98 nous avons 4% de puissance qui doit circuler à travers l'accélérateur dans le système. Si vous voulez 0,96 vous aurez de l'ordre de 9%. Mais si vous voulez 0,94, vous acceptez 14% même 20%. Ce n'est pas désastreux.

Le choix de la distance dépend de votre choix économique. S'il n'y a pas une barrière pure et dure, le nombre de neutrons produits par la spallation est une petite fraction du nombre total. C'est vrai que la fission est le contributeur principal à la production d'énergie, mais il est aussi vrai que la capacité de contrôler la sécurité de l'extérieur est une chose importante.

Dans ces conditions, vous pouvez avoir une situation dans laquelle les conditions de contrôle sont plus sûres.

La réponse est que cela fait une énorme différence dans la façon dont vous allez opérer avec cette machine, et dans la marge de sécurité, et les termes de comparaison ne sont pas de 1 mais d'un nombre de neutrons retardés, c'est-à-dire 10^{-3} .

M. BIRRAUX — J'ai d'autres interventions mais je vous propose de suspendre la séance et de reprendre les questions en début d'après-midi. **M. SALVATORES** fera sa présentation et nous reviendrons ensuite à toute les questions qui étaient inscrites.

(La séance, suspendue à 12h30, est reprise à 14h20)

M. BIRRAUX — Avant de reprendre les questions, je donne la parole à **M. SALVATORES** qui va nous parler du programme ISAAC.

M. SALVATORES — Ce matin a été mentionné le programme ISAAC mené au CEA. C'est un programme de recherche concernant les systèmes hybrides qui se situe dans le cadre de la loi de 1991. C'est un programme mené par la Direction des Réacteurs nucléaires, la Direction des sciences de la Matière, la Direction des Applications militaires.

Cette recherche bénéficie de l'apport des études physiques qui sont menées plus généralement dans le cadre de la loi de 1991.

S'agissant des objectifs, si nous avons à transmuter des quantités d'américium et curium qui sortent du retraitement ou à réutiliser le plutonium dans les réacteurs standards à fission, quel rôle pourrait avoir le système hybride pour se débarrasser de trois tonnes par an ?

Dans cette optique, je reprends deux choses qui ont été dites ce matin. Effectivement, le réacteur qui devrait gérer ce type de combustible aurait des problèmes particuliers liés à des fractions de neutrons retardés très faibles et des réacteurs pour lesquels la sous-criticité est relativement élevée. Une réactivité stable au cours d'une longue irradiation peut représenter un intérêt certain.

Le programme ISAAC est un programme où l'on étudie en parallèle un certain nombre de caractéristiques physiques de base évoquées par Carlo RUBBIA ce matin :

- le premier pôle d'intérêt du programme concerne la physique des systèmes sous-critiques ; même si la sous-criticité amène ce système multiplicateur très près de ce qui serait nécessaire, la neutronique joue un rôle essentiel ; les systèmes hybrides sont des réacteurs où la transmutation se fait par les réactions typiques des réacteurs à fission ; la neutronique est au coeur de ces systèmes ;
- deuxième volet : les études sur la spallation, sur la production de neutrons à partir de particules accélérées ;
- troisième aspect : la cible et les matériaux de structure et de la fenêtre ;
- le quatrième volet concerne les études système.

Je dirai quelques mots sur chacun de ces quatre volets. Volontairement je n'ai pas mentionné les accélérateurs qui sont traités dans le programme ISAAC comme une interface ou un point de rencontre des études et des recherches qui se font en parallèle au CEA.

Concernant la physique des milieux sous-critiques, nous avons réalisé deux expériences sur des milieux sous-critiques de taille tout à fait représentative de la taille à laquelle on s'intéresse dans les différentes études mentionnées ce matin. Ce sont des expériences avec une sous-criticité de l'ordre de ce qui a été évoqué ce matin, qui ont été alimentées par une source externe de neutrons.

La physique nous dit que dans une première phase on peut se passer d'une source de neutrons fabriquée avec un accélérateur, on peut prendre une source externe autre, beaucoup plus simple. On peut séparer l'étude de l'injection des particules chargées et la production de neutrons par spallation et l'étude de la multiplication dans le milieu sous-critique. C'est ce que nous avons fait dans ces deux expériences.

Nous avons un programme de poursuite de ces expériences en 1997 et 1998. Evidemment, des paramètres importants de ces systèmes évoqués par le Pr. RUBBIA, comme la distribution des neutrons à l'intérieur de ce système, sont étudiés à l'aide de ces expériences de physique.

Tout cela aboutit à une validation des codes informatiques et des données nucléaires et à une réduction d'incertitude dans ces systèmes.

Deuxième volet, les études sur la spallation. Nous avons lancé au CEA la refonte d'un code de cascade intranucléaire. Ce programme, que nous avons lancé dans le cadre de ISAAC, comporte un couplage des codes qui traitent du phénomène de spallation avec les codes classiques de neutronique que nous utilisons pour les autres applications dans les réacteurs. Cela nous donne une très grande garantie de fiabilité et de validation de ces simulations informatiques, qui bénéficient d'une énorme validation expérimentale quand elles sont appliquées à des réacteurs à fission de type classique.

La validation expérimentale du code qui concerne la spallation se fait avec un programme d'expériences très important sur l'accélérateur SATURNE à Saclay, programme qui se fait en collaboration entre le CEA et le CNRS.

Le troisième volet concerne la cible et les matériaux de la fenêtre. Nous le traitons actuellement par le biais de collaborations avec les laboratoires internationaux actifs dans le domaine. Nous avons un contrat de collaboration avec un institut suisse, ils sont en train de mettre en fonctionnement une cible qui absorbera 1 MW thermique à l'aide de leur accélérateur. La cible devrait devenir une cible en métal liquide de plomb dans une deuxième phase. Nous comptons suivre ce développement à l'aide de collaborations avec les Suisses.

Le deuxième point de notre activité dans ce domaine concerne le financement, puis la participation et le suivi d'un projet du Centre international pour la science et la technologie de Moscou qui comporte la réalisation à Minsk d'une cible de quelques MW thermiques dans les deux années et demie à partir de maintenant ; cette cible devrait être irradiée ensuite à Los Alamos. Nous avons contribué au financement de ce projet et nous organisons un suivi technique détaillé de cette expérience qui a un intérêt certain.

Concernant les liquides caloporteurs au plomb, nous avons un contrat de collaboration avec l'Institut de Moscou où il y a un programme sous la direction du Pr. ORLOV qui est le spécialiste de ce domaine. Nous voulons essayer, à l'aide de ce contrat, de nous familiariser avec les acquis expérimentaux sur la technologie du plomb en tant que caloporteur pour les réacteurs développés en Russie.

Le dernier point dans ce volet « cible et matériaux de la fenêtre » concerne le programme d'évaluation des dommages causés aux matériaux. Pour le moment, nous mettons en place une proposition d'expérience pour déterminer les dommages dus aux neutrons sur les structures concernant la cible, à faire dans un champ neutronique adapté.

Le quatrième volet de notre activité concerne les études de systèmes. Avec les études de physique menées au CEA dans les années 90-91, il y a eu un certain consensus pour mettre en évidence le rôle de spectre de neutrons rapides dans ce type de système. Nous allons continuer ces études de physique de base pour mettre en relation le rôle du thorium et de l'uranium dans le développement du système, ainsi que la physique relative aux combustibles pouvant conserver une réactivité stable sur de longues périodes d'irradiation.

Mises à part ces études fondamentales de physique, nous avons lancé l'évaluation d'un certain nombre de systèmes, comme les systèmes proposés par les Japonais. La documentation la plus détaillée disponible pour un système de ce type est celle relative au projet du Pr. RUBBIA. Celui-ci a eu le mérite de publier une note sur laquelle on peut rassembler des éléments très détaillés et qui permettent de faire des calculs.

Nous nous sommes lancés dans une opération qui nous a permis de mieux comprendre la proposition du Pr. RUBBIA, de vérifier un grand nombre de paramètres, de nous faire une autre idée sur les incertitudes et d'établir un dialogue fructueux avec l'équipe du Pr. RUBBIA.

D'ailleurs, dans le cadre de ces études, nous avons été moteur pour lancer dans le cadre de l'AIEA un exercice destiné à ce qu'il n'y ait pas de doute quand on annonce certaines performances. Il faut que tout le monde soit d'accord et que ces performances correspondent à une réalité, au moins de calculs, avec les variations obtenues aujourd'hui.

On a parlé ce matin de défense en profondeur. Nous avons aussi lancé une étude de sûreté, qui sera achevée dans quelques semaines.

Je vous ai parlé de notre intérêt pour un système sous-critique alimenté par un accélérateur destiné à brûler de l'ordre de trois tonnes par an d'américium, curium et une bonne partie des actinides qui seraient produits par le parc français (60 GW électriques) avec un retraitement du

plutonium en équilibre. Nous sommes en train d'essayer un certain nombre de systèmes comparables à ceux présentés ce matin.

De la même façon, nous avons quelques idées sur un système hybride de petite taille qui fonctionnerait pour des puissances plus faibles.

Un dernier mot sur les systèmes comportant le thorium. Les études qui se font dans le cadre d'ISAAC concernent essentiellement la physique de base, la neutronique et le domaine nucléaire.

Je dirai que beaucoup de ces activités qui sont faites dans le cadre du programme ISAAC au CEA sont coordonnées avec les activités complémentaires qui se font au CNRS. Cette coordination et ces actions communes font partie du groupement de recherche GÉDÉON.

M. BIRRAUX — Nous avons presque anticipé sur notre dernière partie qui s'attachera à savoir comment les équipes peuvent travailler ensemble à une meilleure synergie. C'était un point important pour l'information du public, pour que l'on ait la vue la plus complète sur ce qui est fait de part et d'autre des frontières sur le sujet.

Je reprends l'ordre des demandes d'intervention.

Mme ARDITI — Mon intervention sera décalée par rapport au sujet en cours mais j'ai regardé attentivement l'ensemble des points à l'ordre du jour et j'ai constaté qu'elle le serait dans tous les points. Pourtant elle me paraît essentielle et elle recoupe une partie de l'intervention de **M. RUBBIA**.

Nous sommes ici avec des scientifiques mais aussi en un lieu où est la représentation parlementaire de la nation. D'ailleurs on a beaucoup parlé de la loi de 1991, et d'une certaine manière, si nous sommes là c'est peut-être aussi à cause de cette loi qui est la première à avoir permis au Parlement de se saisir de quelque chose concernant l'ensemble des choix nucléaires faits depuis fort longtemps.

Dans cette loi, un point est important : le fait que les recherches devaient couvrir un spectre beaucoup plus grand que celui qui était au point de départ. On peut dire qu'au point de départ les choix avaient été faits d'avance sur l'enfouissement. Aujourd'hui, la loi a précisé qu'il devait y avoir trois voies de recherche : l'enfouissement, la transmutation et le stockage de surface.

On a beaucoup entendu parler de cette loi car la transmutation dont nous parlons aujourd'hui est le deuxième point. Je voudrais dire avec beaucoup de force et d'énergie que le troisième point doit se voir octroyer des crédits de recherche afin que la loi soit appliquée dans son intégralité.

Il nous faut, y compris pour la politique énergétique en général, ouvrir des marges de manoeuvre. Si dans quelques années la représentation doit choisir quel type de politique énergétique (plus ou moins de fossile, plus ou moins de nucléaire, plus ou moins d'« autres choses »), il faut que des crédits de recherche aient été mis sur toutes les voies, y compris sur ce que l'on appelle les « autres choses », c'est-à-dire essentiellement sur ce qui pourrait être très porteur en termes de maîtrise de l'énergie et des énergies renouvelables.

Il me paraît normal que l'ensemble des physiciens nucléaires ici présents plaident pour le nucléaire mais peut-être que chacun, prenant un court instant sa casquette de citoyen, pourrait aussi plaider pour que des choix réels soient ouverts. J'espère que si d'autres crédits de recherche doivent être octroyés, ils ne le seront pas que sur le nucléaire — quelle que soit sa filière — mais aussi sur d'autres filières, en particulier la maîtrise d'énergie fortement productrice d'emplois contrairement au nucléaire.

Voilà le message que je voulais faire passer, pas seulement à mes collègues mais aussi à vous-même Monsieur le député qui représentez ici la représentation parlementaire.

M. MAILLARD — Nous travaillons au Collège de France sur les accélérateurs d'énergie, et en particulier nous avons essayé de faire une analyse critique du projet présenté par M. RUBBIA.

Un premier point nous inquiète : cette question de fenêtre. Quand vous avez un faisceau de protons, il interagit avec la fenêtre : c'est de la matière, c'est une loi physique incontournable. Quand on fait les calculs, on trouve qu'au milieu de la fenêtre, 8% du matériel est pulvérisé en un an par l'interaction avec les protons. Cela signifie fabrication de micro-fissures, fabrication de bulles à l'intérieur de ce matériau qui a 1,5 millimètre d'épaisseur seulement.

Il y a une pression de 30 bars d'un côté, mais il faut ajouter le fait que de l'autre côté se trouvent 10 MW (énergie déposée par le faisceau), ce qui fait en réalité 35, voire 40 bars sur la fenêtre.

Vous nous dites que dans le cas d'une sur-criticité, vous augmenterez l'accélérateur et baisserez la criticité. Mais ceci a deux effets. Le premier est d'augmenter l'hétérogénéité du réacteur dont la répartition de puissance montre déjà un facteur 6 entre le centre et la périphérie du coeur, car dans un réacteur sous-critique, il s'agit d'une exponentielle et non pas d'un cosinus.

Il faudra donc s'assurer qu'en mouvement de convection naturelle, celle-ci s'adapte au changement d'hétérogénéité du milieu. Ceci n'est pas évident.

On nous dit que la rupture de la fenêtre n'est pas très importante. Mais elle peut provoquer un choc à l'intérieur du réacteur puisqu'il y aura implosion et oscillation du système. Le système est peut-être à un minimum de criticité locale sur les dimensions actuelles, mais rien n'empêche que, au cours de ces oscillations déclenchées par la rupture de la fenêtre, on puisse atteindre un nouvel état de sur-criticité puisque le système peut se mettre à osciller.

Si on se base sur un incinérateur, une machine dédiée, avec une importance primordiale mise sur la sécurité du système, le Pr. RUBBIA a montré une figure où le gain devient constant après 1 GeV. Il n'est pas évident, pour des raisons de halo qui entoure les particules du faisceau, pour des raisons de fiabilité industrielle, pour des raisons de fenêtre notamment, qu'il ne faille pas monter beaucoup plus en énergie.

Je trouve que les choix techniques ne sont pas mûrs pour lancer des prototypes.

Un autre exemple : j'ai vu en Russie récemment une source de neutrons qui était basée sur un faisceau d'électrons. Elle fournissait un flux de neutrons intéressant, avec un accélérateur qui tenait dans un immeuble de 3 étages et une technologie d'il y a 20 ans. Contrairement au faisceau de protons, il suffisait d'arrêter l'accélérateur et on pouvait rentrer dans le bâtiment parce que l'irradiation des électrons n'est pas celle des protons.

Puisque ce n'est pas mûr, il faut s'interroger pour savoir si nous sommes devant un système évolutionnaire ou un système révolutionnaire. Nous sommes clairement devant un système révolutionnaire mais la procédure à suivre pour développer un système révolutionnaire n'est pas du tout la même que celle pour développer un système évolutionnaire.

Autant un système évolutionnaire demande, partant d'une base industrielle, une évolution lente, très coordonnée et validée à chaque étape par le retour d'expérience de l'utilisateur, autant un système révolutionnaire demande une diversité des approches.

M. RUBBIA, à très juste titre, a plaidé pour la liberté de la recherche. Je voudrais qu'il en soit ainsi pour les équipes de base car il existe une très grande variété d'options encore ouvertes. Nous avons l'exemple de l'informatique où l'on a concentré énormément de moyens sur un projet qui a coûté 1 MdF et qui a été un échec retentissant, alors que d'autres possibilités étaient ouvertes et qu'un système évolutionnaire avait été proposé.

Ici les sommes en jeu sont beaucoup plus grandes mais c'est justement peut-être l'occasion de développer une plus grande variété d'approches. Je ne dis pas que tout soit à jeter dans tel ou tel système, au contraire ! mais mon impression pour l'instant est que les systèmes doivent être beaucoup plus ouverts qu'ils ne le sont.

Nous avons fait une étude que nous pouvons vous communiquer. S'il y a un nouveau système, cela nous intéresse de poursuivre notre travail d'analyse et de proposition de systèmes hybrides.

Pr. RUBBIA — Pourquoi pas des électrons ?

Il y a une propriété fondamentale de la matière qui s'appelle la constante de structure fine. Cela justifie que les électrons soient à exclure parce qu'ils ne réagissent pas aussi bien que les protons. C'est quelque chose qu'on nous explique à l'école.

S'agissant de la fenêtre, vous dites que c'est un problème. Oui, c'est un problème, mais nous sommes là pour le résoudre. On a traité notre programme comme si c'était déjà un projet complet ; il ne l'est pas, c'est une première description de ce que nous pouvons faire. Après nous verrons avec le temps quelles seront les solutions.

Sans un accélérateur capable de produire l'intensité de courant dont nous avons besoin, il serait très difficile pour nous de tester le phénomène dans la cible, dans la fenêtre elle-même. C'est une science expérimentale, il faut avoir une fenêtre pour y mettre la puissance nécessaire et voir ce qui se passe.

L'énergie de la machine n'est pas très importante. Commencer avec un faisceau d'une certaine puissance me semble une nécessité et commencer à construire un véritable accélérateur et voir quels sont les problèmes de la fenêtre me semble également une nécessité.

Je soutiens fortement le point de vue empirique comme une première étape dans ce type de question et je pense que nous pouvons, avec nos moyens modestes, vérifier un certain nombre de choses dans un temps relativement bref.

D'ailleurs, nous avons des expériences en prévision qui mettront en jeu des densités de courant qui correspondent à celui de la fenêtre. L'équipe de Los Alamos a l'intention d'introduire une fenêtre à l'intérieur de son faisceau, etc. Une large communauté internationale va s'attaquer au problème de la fenêtre. Nous verrons si nos idées sur la fenêtre sont correctes ou pas.

Au CERN, nous ne faisons pas d'expérience de fenêtre mais nous avons beaucoup d'expérience de cibles. Nous avons fait beaucoup de cibles qui reçoivent des faisceaux avec une intensité de courant certainement du même ordre de grandeur que dans notre système.

Nous ne parlons pas à la légère. Je ne voudrais pas que vous interprétiez mes propos comme quoi il n'y aurait pas une technologie à développer. Il y en a une mais je ne crois pas que nous soyons appelés aujourd'hui à discuter de détails technologiques, nous sommes invités à discuter de la ligne générale du projet, sachant qu'avec un certain travail, des problèmes qui ne sont pas insurmontables, il est possible d'arriver à des solutions acceptables.

Je pourrais vous montrer certains exemples dans lesquels il n'y a pas de fenêtre, où l'on envoie le faisceau directement dans le liquide.

Pour l'énergie de l'accélérateur, vous avez raison, c'est correct. D'ailleurs, nous sommes en train d'examiner la possibilité d'utiliser la machine du LEP qui arrive à 5 GeV, en augmentant l'énergie du faisceau et pas le courant. Le courant transite correctement, la fenêtre ne sent pas la différence. Un faisceau de 10 GeV ou de 1000 GeV a exactement le même impact sur la fenêtre. Vous avez raison, le choix correct est d'avoir le maximum d'énergie possible et le minimum de courant possible. C'est la direction dans laquelle nous allons.

Dans ma proposition, nous avons pris 1 GeV mais aujourd'hui, surtout grâce aux développements qui se font dans le champ des accélérateurs et des accélérateurs supraconducteurs, style LEP 200, nous pensons avoir des énergies plus élevées. Une énergie de 2,5 GeV ou 2,8 GeV n'est pas exclue.

La variable de l'énergie est considérée automatiquement. Il est certain que le LINAC peut être fait pour une énergie arbitraire. Vous ajoutez un morceau de LINAC, vous gagnez de l'énergie : c'est « à la carte ». Un cyclotron est une machine limitée en GeV.

Tout dépendra du type de machine qu'il faudra définir. Je crois que si on a besoin de très grosses puissances dans les faisceaux, il est évident qu'on ne pourra pas le faire automatiquement avec du courant mais avec une énergie plus grande.

Dans mon transparent, j'ai fait figurer un courant entre 10 et 20 mA comme maximum possible. Il existe des projets dans le monde dans lesquels on parle de courant de 1000 mA. Là, vous avez raison, il y a des problèmes technologiques !

M. SCHAPIRA — Je voudrais mentionner rapidement les activités qui se mènent aujourd'hui à l'IN₂P₃.

Dès 1993, l'IN₂P₃ s'est interrogé sur son insertion dans les programmes de recherche demandés par la loi de 1991 et a fondé un programme appelé PRACEN (Programme de recherche sur l'aval du cycle électronucléaire) qui avait pour but de répondre aux demandes de la loi, avec deux grands axes de recherche :

- toutes les recherches liées à la radiochimie, qui est une activité forte à l'IN₂P₃, pour répondre aux axes 1, 2 et 3 concernant les aspects chimie, radiochimie et géochimie ;
- les études liées à la physique nucléaire, c'est-à-dire essentiellement la transmutation.

Quelles sont les études que nous menons dans le domaine de l'axe 1 qui est celui de la transmutation ?

Nous avons aujourd'hui une quinzaine de chercheurs/an engagés dans un certain nombre de recherches, et d'abord la recherche de base (qui est la vocation première du CNRS) dans le domaine de la spallation — qui est la production des neutrons nécessaires dans les systèmes hybrides. Nous sommes partie prenante avec des chercheurs du CEA aux expériences conduites sur l'accélérateur SATURNE.

Nous avons également initié en Allemagne un programme très original de mesure de résidus par des techniques de cinématique inverse qui consistent à savoir dans les cibles de spallation quels sont les résidus, notamment radioactifs, de la spallation. Ceci est directement lié à une préoccupation que l'on doit avoir lorsque l'on parle de production de neutrons à partir de la spallation car il s'agit d'un problème de déchets.

La deuxième activité dans laquelle nous sommes extrêmement bien placés de par nos relations avec les différents accélérateurs touche le domaine des données nucléaires. Nous sommes en train de mettre sur pied des programmes visant à avoir les données de base nécessaires à la construction des codes de spallation.

Ce sont les recherches de base que nous menons.

Le deuxième type de recherches concerne une participation en collaboration avec 7 partenaires européens (dont le CEA) sur un programme commandité par la Communauté européenne, relatif à l'intérêt du thorium en tant que solution de gestion des déchets radioactifs. L'IN₂P₃ prend une part importante à ce programme.

Notre troisième axe correspond à toutes les études expérimentales relatives aux milieux sous-critiques, en relation avec le programme développé au CERN par le Pr. RUBBIA, auquel nous sommes partie prenante.

Je demanderai à Jean-Marie LOISEAUX, qui est le pilote de ce programme pour le côté français, de vous dire quelques mots pour préciser notre collaboration avec le Pr. RUBBIA d'une part, et pour préciser les développements que nous menons aujourd'hui au laboratoire de Grenoble d'autre part, où nous disposons d'un outil remarquable sous la forme d'un accélérateur. Nous pouvons y faire des études de neutronique et de mesure de taux de transmutation dans des systèmes fondés sur le plomb.

Enfin nous menons également une réflexion sur les études systèmes toujours en relation avec les idées qui ont été développées ce matin par le Pr. RUBBIA.

Comme vous le voyez, ces programmes recouvrent très largement toute une série de thèmes développés par M. SALVATORES dans le cadre du projet ISAAC. Ceci nous a conduits avec EDF, au début de l'année, à fonder un groupement de recherche pour travailler en coopération. Ce groupement c'est GÉDÉON qui pour l'instant démarre mais qui a tout de même reconnu qu'un certain nombre d'opérations scientifiques pouvaient être menées conjointement entre nos deux organismes.

Je tiens à signaler ici que pour l'IN₂P₃ et, d'une manière générale, pour le CNRS, nous ne considérons pas que les recherches que nous apportons dans ce domaine sont complémentaires des recherches qui seraient menées par le CEA mais qu'elles doivent être menées en coopération. Nous demandons, en relation avec les recommandations de la CNE, que la programmation de ces recherches et leur déroulement soient faits en coopération et qu'on privilégie cette coopération.

Si vous en êtes d'accord, Jean-Marie LOISEAUX pourrait donner quelques compléments plus précis sur l'activité menée à l'IN₂P₃.

M. LOISEAUX — Je vais parler de l'activité du CNRS et des physiciens de l'IN₂P₃ concernant les réacteurs hybrides.

Depuis trois ans, nous sommes engagés avec un potentiel de 10 physiciens/an sur ce secteur. Effectivement, notre première action a été de participer en collaboration à la première expérience de démonstration effective de la faisabilité de l'amplification d'énergie avec un faisceau de particules. Notons que jusqu'ici seuls des calculs avaient été faits. La première expérience a été réalisée et mesurée avec des choses qui peuvent être contrôlées.

La deuxième phase a été très rapidement engagée de nouveau avec cette même collaboration internationale et a porté sur la neutronique du plomb. Ceci était relativement important puisqu'en parallèle avec cette activité expérimentale il y avait des études-systèmes, c'est-à-dire la conception de

réacteurs à taille industrielle ou à taille plus réduite, qui tendaient à montrer qu'un réacteur industriel basé sur un système hybride pouvait être viable.

La troisième activité que nous démarrons, c'est l'étude de la neutronique dans un réacteur à neutrons rapides puisque nous avons la chance d'avoir en France un réacteur d'essai qui se trouve à Cadarache, sur lequel nous avons commencé à expérimenter.

Je voudrais mettre en évidence notre démarche collective. En premier lieu, il s'agit de mener en parallèle des études de systèmes — c'est-à-dire de conceptions qui résultent souvent de calculs de simulation par ordinateur — et des études expérimentales où nous nous confrontons avec la dure réalité de la neutronique et l'apprentissage du métier.

Cette démarche est tout à fait caractéristique de notre culture de physicien de recherche plus ou moins fondamentale ; il s'agit de recherche, il s'agit de faire progresser un sujet important pour notre société et il n'y a pas de querelle de mots à avoir.

Nous projetons de développer une activité dans l'étude de systèmes parce que toutes les solutions ne sont pas figées dans le marbre et il existe une certaine flexibilité : diverses solutions peuvent être envisagées. Il est intéressant d'avoir une certaine capacité à proposer différentes solutions. C'est une première chose que nous sommes en train de développer à notre échelle et que nous voulons poursuivre dans les années qui viennent.

Nous voulons accompagner ce programme par un programme expérimental. Cela nous paraît très important. C'est la raison pour laquelle nous pensons poursuivre les mesures de neutronique dans un cadre aussi large que possible, national et international.

Enfin le troisième volet de ces études expérimentales, c'est l'étude en réacteur dans laquelle nous voudrions profiter du fait qu'il existe en France, à Cadarache, un réacteur d'essai qui est un outil extraordinaire pour pouvoir tester quasiment en vraie grandeur une configuration de réacteur sous-critique.

Nous avons l'ambition de participer à ce programme comme un acteur pouvant proposer des solutions, sinon différentes, en tout cas en collaboration étroite, avec la possibilité d'avoir une influence sur ce programme.

En fait, la démarche vers la démonstration de faisabilité ne peut pas se satisfaire d'un empilement de délais. S'il faut 10 ans d'études de sécurité, 10 ans d'étude de matériaux, 10 ans d'études de combustible pour qu'une telle filière soit industriellement acceptable, il est évident que la date de 2006 sera dépassée.

La démarche du physicien a toujours été d'apprendre en faisant et nous sommes fortement derrière le projet d'une installation pilote dont Carlo RUBBIA a dessiné les contours. Cette étape est indispensable pour que la recherche soit intellectuellement acquise sur ce problème.

Les physiciens ne se satisfont pas de papiers ; de temps en temps ils ont envie de toucher et de voir si cela marche vraiment et si les codes ne sont pas erronés.

Que ce soit en physique nucléaire, en physique des hautes énergies ou en physique du solide, la démarche est toujours la même : si l'on veut progresser il faut faire.

M. BIRRAUX — Je ne pense pas que votre intervention appelle une réponse du Pr. RUBBIA, mais il était intéressant pour notre information que le CNRS et l'IN₂P₃ nous disent ce qu'ils faisaient.

M. BACHER — Je me réjouis de ce débat sur la recherche et de l'intérêt que la communauté scientifique porte à la recherche dans le domaine de l'énergie nucléaire. Une industrie sans recherche est une industrie condamnée et ce développement nouveau de la recherche va dans le bon sens.

Je suis également convaincu qu'il est nécessaire de revisiter périodiquement les choix qui ont été faits dans le passé à la lumière des progrès des connaissances et des progrès technologiques. Ce que le Pr. RUBBIA nous a dit des accélérateurs, à l'évidence, montre que quand il y a des éléments nouveaux, on doit se poser des questions que l'on avait écartées à un certain moment.

Je pense également que ce renouveau de la recherche va permettre d'attirer un certain nombre de jeunes et ceci doit permettre d'assurer le renouvellement indispensable des générations.

Je voudrais revenir en tant qu'ingénieur sur la discussion qui a eu lieu ce matin concernant la sécurité, en particulier l'emploi de la convection naturelle et de systèmes passifs par opposition à des systèmes actifs tels que les pompes.

Je voudrais faire part d'une expérience personnelle : j'ai réussi la semaine dernière à faire exploser ma cafetière, de façon « passive », parce qu'il y a eu un phénomène de blocage qui a fait que le système passif n'a pas fonctionné.

Je suis à peu près convaincu, non seulement à cause de cette expérience mais à cause de quelques dizaines d'années passées dans le domaine de l'ingénierie nucléaire, que lorsqu'on utilise un système passif à la place d'un système actif, on résout un certain nombre de problèmes et on en soulève d'autres. On déplace les problèmes.

Je crois que les quelques éléments apportés par M. GROS ce matin montrent qu'on déplace les problèmes des pompes vers la cuve.

Cela me fait penser qu'il n'y a pas de différence qualitative sur le plan de la sûreté entre le système passif et le système actif. Il y aura peut-être une différence quantitative mais on ne pourra en juger que sur la base d'un projet concret et d'analyses de sûreté. J'en tire deux enseignements :

- le premier est qu'il faut être extrêmement prudent en ce qui concerne le discours et qu'il ne faut pas annoncer prématurément que la sûreté sera meilleure avec tel ou tel système ; on ne le sait qu'après coup ; il est donc prudent de le noter et d'en tenir compte dans la communication ;
- le deuxième est que cette même prudence s'impose en matière de coût ; ce n'est que lorsqu'on a réalisé les compromis nécessaires entre les exigences de sûreté, les problèmes technologiques et les objectifs de coût, que l'on peut savoir combien va coûter un dispositif.

A la lumière de ce que l'on sait aujourd'hui, j'ai du mal à imaginer qu'un système hybride puisse produire une énergie moins chère que celle produite par un réacteur traditionnel comme nous en avons en France. Dans l'objectif que le Pr. RUBBIA évoquait ce matin, il me semble que la transmutation des déchets est moins vulnérable à cet aspect coût que l'aspect production d'énergie.

Cette recherche s'inscrit bien dans le cadre de la loi de 1991, peut-être plus que dans la perspective de la production d'énergie.

M. BIRRAUX — L'un n'empêchant pas obligatoirement l'autre.

Mme WOLFF-BACHA — Je suis thésarde, je termine ma thèse sur les réacteurs hybrides pour l'incinération de déchets à vie longue.

J'avais une remarque « philosophique » sur le sujet, comme quoi la sûreté d'un réacteur doit être pensée dès sa conception. C'est pourquoi les dommages par production de gaz ne sont pas un simple problème technologique puisque cela va limiter la durée de vie du réacteur hybride.

Selon les données du Pr. VESCLER au congrès ADTT de 1994, on sait que chaque proton incident de 1 GeV sur du tungstène produit 2,7 atomes d'hydrogène, 0,4 atome de tritium, 0,5 atome d'hélium, entre autres. Or la fenêtre en tungstène entre l'accélérateur et le réacteur reçoit 10 mA en protons. Vous pouvez faire facilement la multiplication pour savoir combien vous obtenez d'hydrogène et de gaz. Cette production de gaz, qui est non négligeable, passe dans l'accélérateur, dans la partie censée être en état de vide poussé.

Par ailleurs chaque proton incident sur la fenêtre de tungstène induit environ la production de 1 neutron de rétrodiffusion de quelques MeV d'énergie, ce qui signifie encore une fois que le vide de l'accélérateur doit recevoir le flux de neutrons en sens inverse de protons, dont l'intensité a le même ordre de grandeur que le flux de protons.

Les conséquences de cette production de gaz et de neutrons seront respectivement un phénomène de halo et une activation très importante de la structure de l'accélérateur. Le halo rend l'accélérateur inopérant à haute intensité et l'activation des structures le fragilise. C'est un problème de résistance mécanique sous irradiation et les spécialistes en métallurgie comprendront ce que je veux dire.

Si on décide de changer le métal de la fenêtre, la production de gaz a lieu quand même puisqu'elle est liée à l'interaction de protons rapides sur le métal. Cela changera peut-être le type de gaz produit mais, de toute façon, le vide de l'accélérateur sera très fortement perturbé.

Si on décide d'ôter la fenêtre, il y aura une spallation directe du plomb produisant des neutrons de façon isotopique, ce qui veut dire qu'il y en aura également qui seront dirigés vers le vide de l'accélérateur.

Avec ou sans fenêtre, les problèmes de production de neutrons et de gaz altèrent fortement le fonctionnement de l'accélérateur, base du système hybride. Comment pensez-vous y remédier ?

Pr. RUBBIA — Je crois qu'un certain nombre de vos paramètres ne sont pas tout à fait corrects. L'essentiel des neutrons produits par la cascade ne sont pas dans la fenêtre ; la fenêtre, c'est seulement le début de la cascade. Heureusement, la perte d'énergie à l'intérieur d'une fenêtre étant la première partie vue par le faisceau de protons, il y a interaction mais la cascade va se développer plus tard.

J'ai une photo de la simulation mais c'est similaire à la distribution expérimentale qui est faite par des mesures au CERN, qui montre où se trouve la distribution énergétique de la cascade neutronique. Il y a un très grand dépôt d'énergie qui se passe à l'intérieur du plomb et qui évite la fenêtre. La fenêtre reçoit une partie très modeste de l'énergie totale.

Cela a été calculé avec une méthode de Monte Carlo. La quantité d'énergie déposée dans la fenêtre que nous avons étudiée dans nos données est correcte.

Dans l'expérience TARC que nous sommes en train de faire, nous avons fait des mesures de chaleur pour vérifier que les choses étaient correctes. Nous introduisons des thermomètres et nous pouvons mesurer la distribution de température pour vérifier qu'il n'y a pas de distribution anormale d'énergie.

Pour l'énergie déposée, nous avons des calculs, des mesures et nous comparons. S'il y a des surprises, elles réapparaissent dans ces mesures.

Votre deuxième objection est relative au fait que les neutrons mis dans la cascade rentrent dans l'accélérateur et peuvent le mettre dans des conditions difficiles. Notre faisceau passe par un aimant qui dévie le faisceau de 90 degrés. Tandis que les protons sont déviés par le champ magnétique, les neutrons continuent tout droit. Nous avons prévu quelque chose qui « ramasse » ces neutrons et peut produire une certaine illumination neutronique vers l'extérieur.

Les neutrons ne rentrent pas dans l'accélérateur parce qu'il y a une déflexion magnétique entre la machine et l'accélérateur.

Mme WOLFF-BACHA — Vous parlez de données simulées sur l'énergie mais je vous parle de données expérimentales qui m'ont été fournies ! Je peux vous donner les références, il s'agit d'un professeur de l'Université de Caroline du Nord qui a fait cette expérience en collaboration avec le laboratoire de Los Alamos.

Vous proposez une simulation informatique sur l'énergie alors que je vous donne des données expérimentales de production de gaz sur une cible qui existe !

M. HARAR — Dans le cas de la transmutation des déchets nucléaires par accélérateur, et non pas de la production d'énergie, nous nous sommes interrogés à la DSM sur les nécessités que nous avons à remplir au niveau des performances d'un tel accélérateur.

En concertation avec les collègues de Los Alamos, nous avons abouti au fait qu'un accélérateur de 1 GeV de proton et d'environ 50 mA avec un cycle utile de 25 % à 100 % était une nécessité pour pouvoir transmuter quelques tonnes d'actinides mineurs avec quelques accélérateurs de ce type.

En fonction de cela, nous avons donc essayé de voir ce qui existait dans le monde comme accélérateurs pouvant avoir le label d'accélérateurs de puissance. J'appelle accélérateurs de puissance ceux qui ont une puissance de 1 MW ou plus. Il en existe deux.

L'un est situé à Los Alamos et fonctionne depuis 1972. C'est un accélérateur linéaire de 800 MeV, de 780 mètres de long, qui, en routine, actuellement, fournit 1,3 mA de protons avec un cycle utile de 10%. C'est un accélérateur qui a 1 MW de puissance dans le faisceau.

Nous avons discuté avec les experts de ce laboratoire et nous leur avons demandé quelles étaient les limitations de cette intensité. La réponse a été que les pertes de particules qu'ils avaient au niveau de leur accélérateur rendaient l'activation dans la machine intolérable dès lors qu'on dépassait ces valeurs.

Moyennant certaines transformations, ils nous ont dit qu'ils pourraient passer à 5 mA si on leur en donnait les moyens financiers dans les années à venir.

Nous avons posé une deuxième question : *"A votre avis, compte tenu de l'état actuel des connaissances sur les accélérateurs linéaires, vous paraît-il raisonnable de penser à une machine de 1 GeV et de 80 à 100 MW de puissance ?"* La réponse a été : *"Raisonnablement, oui"*.

Nous sommes allés ensuite au Paul Scherrer Institut en Suisse, qui est l'autre laboratoire qui dispose de 1 MW de faisceau. C'est constitué de deux cyclotrons en cascade. L'énergie finale est de 590 MeV et, actuellement, leur record au niveau de l'intensité est de 1,4 mA, en continu. Ils ont donné 2 mA comme limite d'intensité dans le cadre de leur accélérateur, s'ils arrivent à vaincre les problèmes de charge d'espace très importants : dans certaines conditions de vitesse et de géométrie, le faisceau explose s'il est trop intense. Ils pensent pouvoir arriver les années suivantes à 1,2 MW de puissance.

Nous leur avons demandé la limite qu'on pouvait obtenir sur les cyclotrons concernant l'augmentation de la puissance. Leur réponse a été que pour eux 5 MW étaient jouables, et 10 MW si un risque d'échec élevé était accepté. A PSI, le rendement de la puissance du faisceau n'est que de 18 % par rapport à la puissance totale.

Au CEA, de plus en plus en collaboration avec nos collègues de l'IN₂P₃, nous avons essayé de voir dans les cinq prochaines années quel type de R&D lancer pour nous faire notre propre opinion sur les potentialités des accélérateurs.

Nous avons rejeté l'option cyclotron parce qu'elle ne nous apparaît pas avoir des perspectives suffisantes pour la justifier, mais nous nous sommes dit que s'il fallait mettre des moyens, il était tout à fait justifié de les mettre dans une configuration qui permettait d'ouvrir l'avenir sur le vrai problème que nous nous étions posé, à savoir la transmutation des déchets.

C'est la raison pour laquelle nous nous sommes orientés vers l'étude d'un accélérateur linéaire.

Pour pouvoir comprendre les problèmes techniques que nous avons à résoudre dans les cinq prochaines années, il faut savoir que si un réacteur a dans ses potentialités la possibilité de devenir « sensible » au niveau de la criticité, un accélérateur n'a qu'une envie : c'est de s'arrêter !

Il nous faut donc avoir des réflexions au niveau technologique qui nous permettent de rendre crédible le fait qu'on ne sera pas avec une machine pour faire la physique et pour s'amuser mais avec une machine qui permette de faire des tests à caractère industriel. Pour cela, il faut se battre énormément sur la fiabilité et sur la disponibilité. La disponibilité est très importante car si on est en présence d'un accélérateur qui, du fait des sécurités multiples, coupe le faisceau tout le temps, ce sera très ennuyeux.

Il faut aussi que l'on puisse en faire la maintenance. Pour en faire la maintenance, il y a des conditions drastiques au niveau des pertes qui sont permises au long de l'accélération, qui sont très impressionnantes.

Si à 10 MeV on peut se permettre une perte de faisceau de 2 particules sur un million, quand on est à 1 GeV, il faut en perdre seulement 1 sur 10 milliard. On peut être dans des conditions beaucoup moins drastiques mais cela voudra dire qu'au niveau de l'intervention il faudra attendre de plus en plus que les structures se « refroidissent » pour avoir accès à l'accélérateur.

Nous avons essayé de développer un système de codes qui permettent d'apprécier les précisions assez extraordinaires qui sont nécessaires pour cela. Nous ne sommes pas habitués au niveau de la physique des accélérateurs à gérer des précisions aussi importantes, et nous sommes dans des régions mal connues au niveau des calculs.

Depuis deux ans, avec l'aide de l'IN₂P₃, nous avons un programme à Saclay (programme SIMI) qui nous permet de produire des hautes intensités de protons à basse énergie, à 100 keV, et ensuite de les faire passer dans toute une série de structures quadripolaires de façon à essayer de comprendre et si possible reproduire la génération du halo. Ce halo est une question fondamentale.

Nous avons actuellement en chantier le lancement d'un programme IPHI, qui est un injecteur de protons à haute intensité, dont la construction prendrait 5 ans, avec la participation de la DAM et de nos collègues d'IN₂P₃. Il nous permettra dans les 5 ans qui viennent de savoir gérer les problèmes qui n'auront pas manqué de se manifester et d'essayer de voir comment on pourrait pousser la construction d'un accélérateur à plus haute énergie sur la base des connaissances que nous aurons acquises.

En outre, la construction de cet injecteur est un passage obligé à la construction du reste parce que si c'est mal fait ou si nous avons des problèmes que nous ne prévoyons pas, la gestion du reste de l'accélérateur sera extrêmement compromise.

Pour terminer, je dirai que nous ne sommes pas originaux : les collègues de Los Alamos développent exactement la même stratégie ; nous avons une convention avec eux. Les collègues du Japon également.

M. BIRRAUX — Pour ceux qui ne sont pas familiers avec les sigles, la DSM est la Direction des Sciences de la Matière et la DAM la Direction des Applications militaires.

Pr. RUBBIA — Je ne sais pas quoi dire... Je me dis qu'en interrogeant le laboratoire du CERN à quelques kilomètres de Genève, vous auriez eu des informations différentes. Je ne sais pas pour quelle raison vous considérez que nous sommes des gens qui n'ont pas les compétences spécifiques.

Je ne comprends pas comment vous êtes arrivé à des conclusions avec cette procédure pseudo-démocratique qui consiste à aller demander à votre voisin ce qu'il pense de votre idée. Je ne pense pas que ce soit une chose à laquelle on puisse répondre en termes raisonnables.

Je suis surpris de votre discours, d'un pessimisme et d'une tristesse sans faille. Je crois que cela n'a rien à faire avec notre problème qui est celui de construire un cyclotron ou de construire une machine linéaire. Les gens au CERN ont des connaissances extrêmement valables dans ce domaine.

Nous ne sommes pas des fous solitaires qui inventons des histoires ridicules qu'il faut mettre après à leur place avec une liste impressionnante de soutiens de la part d'autres scientifiques. Nous sommes un laboratoire très développé, qui a fait marcher beaucoup d'accélérateurs, et ce que vous me dites, vous le dites à une personne qui a construit l'accumulation de cyclotrons en partant de rien.

Nous avons fait des machines comme le LEP, comme le PS, le SPS (1). Donnez-nous une chance d'avoir nous aussi un minimum de respectabilité.

Venez nous voir, nous vous expliquerons.

M. SENÉ — J'appartiens également à l' IN_2P_3 et, tout à l'heure, j'ai été un peu choqué par certaines de ses conclusions. J'aurais aimé tempérer l'enthousiasme de mon collègue LOISEAUX qui disait qu'il fallait aller de l'avant dans l'expérimentation.

Je pense que cet enthousiasme doit être atténué par une chose essentielle qui est que la sûreté est prioritaire dans tous les cas et que même pour un prototype, au-dessus d'un certain seuil de puissance, avant toute construction, en France, il doit y avoir une analyse de sûreté.

Si la machine prototype est construite sur le territoire suisse, j'espère que les autorités suisses feront leur travail, mais je rappellerai que même le LEP est soumis à autorisations et contrôles de la part de la Direction de la sûreté des installations nucléaires. Par exemple, quand il y a eu les tests de calibrage en énergie par injection d'un faisceau de protons, cela a été soumis à autorisation de la DSIN.

Les physiciens en France ne sont pas au-dessus des lois.

¹ *Proton Synchrotron et Super Proton Synchrotron.*

M. BIRRAUX — Je n'ai pas eu l'impression que quiconque dans cette salle envisageait de créer une installation de quelque type que ce soit, d'une manière purement sauvage et qui ne soit pas soumise aux autorisations habituelles.

M. SENÉ — Je souhaitais le rappeler.

M. BIRRAUX — Cela me paraît être un élément de base élémentaire que chacun a intégré. Je ne vois pas le CNRS comme le CEA ou le CERN développer quelque machine que ce soit sans autorisation des autorités compétentes.

Pr. RUBBIA — Je ne peux pas tolérer ce type de discours ! Je voudrais demander à cette personne de s'expliquer quand elle dit que les physiciens ne sont pas au-dessus des lois. Que voulez-vous dire par là ?

M. SENÉ — Je veux dire que je réfutais la notion quand il a été dit : *"On ne peut pas attendre que les études de sûreté soient faites, nous devons aller de l'avant, nous devons démarrer des expérimentations"*. La réponse est que nous devons faire des analyses de sûreté et ne démarrer qu'après.

Pr. RUBBIA — Je pense qu'il y a un problème de compréhension.

Le CERN, comme toute institution de recherche internationale, est régi par des accords précis avec les autorités françaises et suisses. Toutes nos mesures et toutes nos expériences ont été approuvées par des organes compétents. En particulier, les premières mesures avec le système sous-critique ont été autorisées par les autorités suisses de Berne qui nous ont donné l'autorisation pour pouvoir les effectuer.

Concernant le travail qu'indiquait Monsieur LOISEAUX, il ne voulait pas dire qu'il fallait faire les choses en violant la loi. L'argument est qu'il existe beaucoup de mesures que l'on peut faire avec une puissance modeste et qui n'ont pas besoin de ce type de vérification administrative.

La raison est que dans une mécanique de cascades, chaque cascade est physiquement indépendante. Si un seul proton fait une cascade, et si vous en faites un certain nombre, le nombre de protons ne modifie pas la physique du phénomène.

Vous pouvez faire des études sur des matériaux assez difficiles, comme le thorium ou le plutonium ou l'uranium en utilisant des matériaux en microgrammes. Dans ce cas, la législation est claire : ils ne sont pas considérés comme des matériaux mais comme des sources. Ils peuvent être traités comme des sources radioactives et on peut les produire ou les transporter selon les lois sans limitation majeure.

Il existe un domaine de recherche pour vérifier les systèmes avec des conditions qui nous libèrent, par la nature même des mesures, de certaines contraintes de prudence justifiées et justifiables par la loi chaque fois que l'on utilise des grandes quantités de puissance.

C'est cette variance d'échelle qui est intéressante dans notre système sous-critique. Ceci ne s'applique pas à d'autres systèmes critiques où la criticité intéresse toute la machine et pas seulement quelques points.

Je pense compléter le point de vue de M. LOISEAUX en disant qu'il faut procéder avec une méthode empirique qui puisse primer un maximum la mesure dans des conditions moins sophistiquées.

M. LOISEAUX — J'ai parlé de façon qualitative d'une démarche de recherche. Nous sommes dans une phase de recherche et de démonstration de faisabilité. En parallèle d'études fondamentales qui peuvent être faites sans problème de sécurité particulier, un certain nombre de choses expérimentales peuvent être faites mais je n'ai jamais dit que tel ou tel aspect devait être complètement oublié, en particulier les questions de sécurité.

Si on envisage une maquette de 100 MW, il est évident que cela rentre dans la loi, que je le veuille ou pas.

M. MAILLARD — Je voudrais aller dans le sens de Raymond SENÉ. On a un discours assez volontariste pour aller vers une concentration de tous les moyens sur un prototype. Or 1 à 2 MdF représentent la moitié du coût de fonctionnement du CNRS pendant une année, et c'est plusieurs fois le budget de l'IN₂P₃.

Cela signifie que toutes les autres voies de recherche seront éliminées. Les groupes indépendants qui seraient susceptibles d'avoir une approche critique seront éliminés.

Je reviens sur les électrons comme source de neutrons. J'ai vu en Russie une source de neutrons qui fonctionnait — avec des défauts — avec des électrons. C'était un « réacteur à étages ». Je dis que pour des très basses puissances, de 1 MW, les coûts seraient moindres. Peut-être est-ce la bonne voie et peut-être ne faut-il pas commencer à toute vitesse par des prototypes.

Si j'ai cité l'informatique, c'est parce qu'il s'est passé la même chose. En fait, un certain nombre de gens n'ont plus pu travailler. Que des gens puissent travailler, d'accord, mais que les autres aussi.

M. PRONOST — Ici, nous avons trois catégories de personnes : les tenants des lobbies, les ayatollah du désert énergétique et d'autres qui prêchent pour leur paroisse parce qu'ils ont besoin de travailler.

Je suis un expert indépendant, j'essaie de réfléchir. Je voudrais faire une remarque générale sur tous ces centres de recherche pour que certains ici ne soient pas offusqués par mes propos : les premiers hérétiques en France ont été mis au coin ; heureusement parce que nous en serions encore à rechercher des choses. A un moment, il faut prendre des décisions.

Dans un pays comme le nôtre, avec plus de trois millions de chômeurs, on ne peut pas rester à « grattouiller » dans ses bureaux toute la journée — des gens qui sont rarement dans leurs bureaux d'ailleurs...

Je voudrais faire une remarque à M. RUBBIA sur les problèmes d'environnement. Vous avez considéré que l'activité était continue avec le charbon. Je crois que ce n'est pas du tout cela, pour le nucléaire classique non plus. C'est théorique, il y a de la matière qui passe d'un côté et qui sort de l'autre dans une usine mais, malheureusement, des choses sortent, en particulier des gaz.

Dans le charbon, il existe une quantité non négligeable de thorium et d'uranium qui ont un impact sur l'environnement relativement important. Si vous repreniez vos courbes, vous verriez qu'elles ne sont pas horizontales mais qu'elles montent. Ensuite, il faut les comparer.

Je trouve en tant que citoyen que votre concept est vraiment porteur. Votre concept me plaît.

Il est à base de neutrons et cela pose un certain nombre de problèmes techniques. Qu'en est-il de la résistance des matériaux ? Les neutrons ont tendance à se promener partout, dans les structures en particulier ; cela pourrait poser des problèmes. Je pense que vous avez fait une étude et que vous êtes capable de nous dire si les matériaux utilisés tiennent la route.

Quels sont vos problèmes de radioprotection dans cette affaire ? Il existe des problèmes de radioprotection assez compliqués dans les réacteurs de fusion. J'ai visité un centre en Angleterre trois fois, j'ai pris de plein fouet ce problème; J'ai constaté que la radioprotection était un problème très important, toujours à cause des éléments manipulés.

Ensuite le problème de la convection naturelle est capital. La sûreté nucléaire est meilleure à tous points de vue. Avec certains réacteurs français qui fonctionnent actuellement, qui ne sont pas forcément civils, on arrive en circulation naturelle à un pourcentage relativement important de la puissance. C'est une question de thermodynamique et d'hydraulique, et on sait faire cela sur des réacteurs qui ne sont pas à boucle. Il est certain que quand on n'a pas de pompe, cela peut être intéressant.

Votre plomb a certains défauts. Si la réaction nucléaire ne se faisait pas — par manque d'électricité ou autres — il pourrait prendre en masse. Qu'avez-vous prévu ? Y a-t-il un chauffage extérieur sous forme de résistances électriques pour remettre votre plomb sous forme liquide et pour pouvoir le mettre en mouvement ?

La vitesse de votre plomb est de 2 m.s^{-1} ; sur un réacteur ouvert c'est plutôt 12 m.s^{-1} , ce qui pose des problèmes d'érosion dans les tuyauteries et de pollution. Je voudrais savoir si vous avez fait une première approche de la pollution de votre plomb et si vous avez prévu des systèmes d'épuration de ce plomb pour le rendre aussi pur que possible, pour qu'il ne s'active pas.

Enfin, s'il y a un pilote à faire il faut le faire, et au niveau européen. Et qu'on ne passe pas des décennies à discuter avec des gens qui font des études papier !

Pr. RUBBIA — Y a-t-il des chauffages extérieurs ? Ils sont nécessaires, il n'y a pas de doute. Il faut donner une certaine quantité de chaleur. C'est aussi vrai pour le sodium qui a besoin d'une température moins élevée, mais au-dessus de la température ambiante. La même technologie doit être utilisée.

L'expérience que les Russes ont faite avec le plomb a produit un désastre dans un sous-marin où le plomb est devenu solide, ce qui a poussé les Russes à passer à une solution plomb/bismuth.

Vous touchez là un point important qui n'est pas à négliger. Cela fera partie de l'étude à faire pour le développement technologique avant de parler de la construction d'un objet de ce genre.

Vous avez abordé le mouvement que le plomb pouvait avoir sur le système. Il est certain que le plomb liquide est beaucoup plus lourd que le sodium et il est évident qu'on ne peut pas lui donner une vitesse considérable sans la surprise d'une force excessive, etc.

Tout cela fait partie des projets d'ingénierie. Nous avons fait l'hypothèse d'un flux de l'ordre de 1 à 2 m.s^{-1} qui nous semble raisonnable.

A propos de la purification, il faut purifier le plomb. Vous trouverez dans nos documents la liste de tous les éléments produits par les protons et par la spallation. Plusieurs éléments sont produits, chacun provoque des difficultés. Une étude est en cours pour comprendre les conséquences sur le système. L'impression générale est que ce problème de la pollution produite sur les protons à l'intérieur du liquide plomb est acceptable.

Nous sommes aidés par le fait qu'il existe une expérience au CERN depuis plusieurs années. Nous avons donc beaucoup d'informations expérimentales.

La purification du liquide est associée étroitement au problème de la corrosion. Nous savons que la corrosion dans le plomb dépend de la quantité d'oxygène contenue dans le plomb. Les études

de M. ORLOV indiquent que si l'on contrôle très bien la quantité d'oxygène à l'intérieur du plomb, la corrosion n'existe pas. On peut travailler pendant des milliers d'heures avec du plomb liquide et des surfaces d'acier inoxydable sans la présence de la moindre corrosion. Dès que la concentration d'oxygène est modifiée la corrosion s'établit et vous pouvez perdre des surfaces considérables de matériau dans un temps très court.

La purification est très voisine du problème de la corrosion, il faut l'étudier.

Ce sont les buts de l'exploitation du modèle de réacteur de recherche dans lequel ces problèmes doivent être abordés. Je suis d'accord avec vous sur le fait que cela doit être fait d'une façon empirique, en ayant un but spécifique dans la tête plutôt que de rechercher toutes les théories possibles sur la corrosion dans des situations différentes. Il faut se concentrer sur un projet spécifique et arriver à son bon fonctionnement. C'est quelque chose qu'il faut faire avec de véritables expériences.

Vous avez mentionné la radioprotection. Elle est extrêmement importante, surtout dans la partie retraitement. Le retraitement du combustible est nécessaire. Dans notre cas, il faut passer le combustible un nombre infini de fois à travers le système. A chaque opération, on travaille sur une substance qui est plus radioactive.

La radioprotection fait partie du système. Là, tout est à inventer. Notre équipe et moi-même, nous n'avons pas pu faire le travail d'ingénierie détaillée, nous sommes au point du *design* conceptuel. Nous pensons qu'il n'y a pas de problèmes difficiles, mais la quantité de travail à faire est phénoménale.

Pour développer un nouveau système, il faut beaucoup d'années.

M. BIRRAUX — On a remarqué que dans le cas du sous-marin russe, celui-ci a commencé par couler et ensuite les Russes ont pensé au mélange plomb/bismuth. Quel est l'accident le plus grave qui puisse arriver à ce réacteur ?

Pr. RUBBIA — Je ne voulais pas dire qu'il pouvait y avoir un phénomène de type Tchernobyl ou autres. Je veux simplement dire que dans un sous-marin il y a des exigences thermiques particulières. La température finale doit être d'une valeur donnée pour faire tourner les turbines, et la solution initiale avec du plomb pur a produit un blocage à l'intérieur de certains tuyaux.

Le point de fusion du plomb est de l'ordre de 317°C et on parle de températures qui sont entre 50°C et 100°C. Il est difficile de dire ce qui s'est passé dans l'ancienne URSS dans ce domaine. Même le nombre de sous-marins construits par les Soviétiques est difficile à connaître.

Il est certain que beaucoup de sous-marins ont fonctionné pendant longtemps avec du plomb/bismuth. Ajouter du bismuth réduit le point de fusion autour de 200°C et cela rend les choses défendables. D'ailleurs, les Russes m'ont dit que la seule difficulté avec le sous-marin était que les marins ne pouvaient pas arriver dans un port étranger et passer le *week end* à terre parce qu'il fallait toujours quelqu'un pour garder le plomb chaud, tandis qu'avec un réacteur ordinaire cela ne posait pas de difficulté.

Je pense que l'expérience que les Russes ont acquise dans le domaine du plomb et du bismuth est considérable : il existe une grande possibilité de leur part pour nous aider. Je vois un clair optimisme de leur part quand ils nous disent que le plomb est parfaitement défendable. D'ailleurs, des projets russes sont aujourd'hui discutés dans les milieux scientifiques pour faire des réacteurs rapides qui fonctionnent avec du plomb.

Nous avons un certain optimisme sur la qualité du plomb du fait des messages que nous avons de la part de nos collègues russes. La collaboration internationale dans ce domaine ne pourra que passer par leur expérience : cela fera gagner un temps précieux.

M. BIRRAUX — Mis à part les problèmes qui peuvent être posés par le plomb, quel est, en l'état de vos connaissances aujourd'hui, l'accident grave typique qui pourrait arriver sur ce type de réacteur ?

M. SALVATORES — Prenons l'exemple du système que le Pr. RUBBIA a montré ce matin, qui est finalement un réacteur rapide refroidi au plomb avec une technologie spéciale pour le combustible. Quand on parle d'accident grave, pour détecter les accidents graves susceptibles d'intervenir, la démarche est typiquement celle que l'on a pu faire pour l'*European Fast Reactor* ; elle serait appliquée avec les spécificités du projet en question. En principe, mis à part quelques particularités liées au plomb, ce ne sera pas une démarche différente.

Il existe un problème typique, pour lequel un caloporteur plomb est favorable, c'est une éventuelle augmentation de réactivité du cœur. Un réacteur rapide dans sa configuration normale n'est jamais avec la réactivité la plus élevée. Cela s'applique à un réacteur rapide au plomb sous-critique de 2% ou 3%.

Le même type de démarche que l'on a pu faire dans le cadre d'EFR s'applique. Il ne semble pas que l'on puisse attendre des nouveautés spectaculaires de ce point de vue en tant qu'accidents graves.

M. BIRRAUX — Cela nécessite-t-il une attention particulière lors de la mise à l'arrêt ?

Pr. RUBBIA — Quand un réacteur est critique, on sait qu'il l'est parce qu'il produit de l'énergie et on peut avoir un système qui permette de savoir comment on doit agir pour changer les conditions de fonctionnement.

Quand on a un système sous-critique, comment savoir à quel niveau il est sous-critique ? Est-ce que le k est égal à 0,98 ou 0,96 ou 0,95 ou peut-être 0,99 ? Comment allons-nous détecter la criticité dans le système ?

Avec notre système sous-critique du CERN, nous avons mis au point une méthode extrêmement simple dans laquelle nous coupons pour un temps relativement bref le faisceau ou nous changeons l'intensité du faisceau.

Si le faisceau de protons est soudainement arrêté, ou si vous envoyez un paquet de protons très concentré dans le temps, la décroissance de neutrons à l'intérieur de la machine va se faire de façon exponentielle dans le temps.

Le temps caractéristique de cette exponentielle est directement lié à $1 - k$. Dès que vous passez à une machine qui est plus près de la criticité, la décroissance devient plus longue, en fonction de la distance entre le point où vous êtes et la criticité.

Dans ce sens, une machine critique n'est rien d'autre qu'une machine dans laquelle cette exponentielle est « plate ».

Donc, avec une mesure très simple de l'évolution dans le temps des neutrons à l'intérieur du système, en envoyant une quantité pilote de protons, en nombre limité, il est possible de mesurer à chaque moment la criticité. Vous pouvez détecter si votre système est en train de bouger pour devenir près de la criticité, bien avant que celle-ci se vérifie.

Vous avez des moyens de mesures simples et solides pour connaître l'état sous-critique du système.

M. SALVATORES — L'année prochaine, des expériences sont prévues sur MASURCA pour donner une première réponse, une première validation expérimentale, sur ce que Carlo RUBBIA vient d'indiquer.

M. GSPONER — Je voudrais abonder dans le sens de M. HARAR à propos de l'expertise concernant les accélérateurs au CERN.

Effectivement, s'il y a un endroit dans le monde où il faut aller pour connaître les choses les plus importantes concernant les accélérateurs à haute intensité, c'est à Los Alamos, parce que c'est le seul endroit où l'on dispose d'accélérateurs à très haut courant, le genre d'accélérateurs que M. HARAR envisageait pour la transmutation des déchets.

Ce sont des accélérateurs qui ont été développés pour la « Guerre des étoiles » : le programme concernait des accélérateurs tests placés au sol, mais aussi toutes les études en rapport avec la production du tritium, qui demande des accélérateurs à halo extrêmement faible, etc.

Ceci m'amène à un deuxième commentaire sur la méthodologie proposée par le Pr. RUBBIA qui consiste à faire des tests à basse intensité. Malheureusement, on ne peut pas tester les essais qui sont les plus difficiles, ce qui pose de réelles difficultés pour passer à un projet en vraie grandeur.

Dans le système lui-même, on a tous ces effets de convection et il faut s'assurer qu'on reste dans le domaine linéaire de la convection. La non-linéarité est précisément liée à l'augmentation non pas tellement de l'énergie que de l'intensité, donc de la puissance.

Autrement dit, construire un système test à 1 MW, 100 MW ou 1000 MW est quelque chose de totalement différent, et on ne pourra pas extrapoler de l'un à l'autre.

Pr. RUBBIA — Il est vrai que nous ne pouvons pas avoir toutes les réponses mais on peut commencer avec un certain nombre de systèmes.

Je voudrais répondre sur l'accélérateur.

Il est toujours assez difficile, surtout pour beaucoup de mes collègues européens, de ne pas voir ce qui se passe en Amérique comme quelque chose de merveilleux et de voir tout ce qui se passe en Europe comme quelque chose qui est à la traîne de ce qui existe ailleurs. Cette tendance nous met toujours dans l'embarras.

M. GSPONER a mentionné le fait qu'à Los Alamos — où il existe beaucoup d'activités à caractère militaire auxquelles nous sommes fiers de n'être en aucune façon associés — il existe un LINAC. Il a oublié de dire que le nouveau projet de Los Alamos, présenté à une conférence internationale sur les LINAC au CERN, deviendra supraconducteur. A la place de cavités en cuivre, on va utiliser des cavités supraconductrices. Ce sont les cavités que nous avons développées au CERN pour le LEP 200. Ce sont les modèles envisagés maintenant pour la machine de Los Alamos.

Los Alamos va utiliser la même fréquence que celle utilisée par le CERN : 352 MHz. Aujourd'hui, même pour le projet de Los Alamos, on se lance vers une cavité supraconductrice. Or, son champ radiofréquence est de l'ordre de 350 MHz. Tout cela a été construit au CERN !

Nous avons aujourd'hui des cavités opérationnelles de 1,8 GeV qui accélèrent 7 mA d'électrons et 7 mA de positons, donc qui accélèrent aujourd'hui même 14 mA de courant avec une énergie proche de 2 GeV.

Aujourd'hui, nous avons à Genève, en Europe, payée par les Etats européens, une machine capable d'accélérer 14 mA de courant à une énergie de l'ordre de 2 GeV. C'est une réalité ! Ce n'est pas une machine qui fonctionne d'une façon aléatoire. Cette machine est le plus gros accélérateur supraconducteur du monde. La machine qui vient après celle-là se trouve en Amérique, beaucoup plus modeste, avec une énergie inférieure au GeV.

La machine du CERN est capable aujourd'hui d'accélérer une puissance de l'ordre de 15 mA et de 2 GeV et la transformation entre protons et électrons est une transformation cosmique.

Je voudrais aussi noter que la dimension de ces cavités concernant l'espace laissé libre pour les protons est considérable, de l'ordre de 8 centimètres de diamètre. Cette même tendance est reprise par le projet TRISPAL qui pense sérieusement utiliser les cavités supraconductrices à la place des cavités standards.

Il est vrai que l'équipe de Los Alamos a fait une machine LINAC à protons, mais la véritable technologie du futur est la technologie de la supraconductivité, et le CERN dans ce domaine est le seul à avoir réalisé dans le temps et dans le budget une machine qui est la première du monde et qui est utilisée par tout le monde comme modèle, au point que les gens ont choisi la même fréquence à 352 MHz.

M. GONZALEZ — J'entends parler de milliards, et c'est vrai que cela me change par rapport aux projets présentés dans les conseils où devant des instances d'évaluation, pour lesquels les chercheurs ont beaucoup de mal à obtenir des sommes inférieures d'un facteur 10^3 ou 10^4 .

On entend parler de milliards dans les rapports que la Cour des Comptes a consacrés aux établissements à caractère scientifique et technologique — ces rapports sont assez nombreux. On peut poser des questions à tous projets qui visent des sommes aussi élevées.

Par exemple, au stade actuel, serait-il possible de connaître les sommes qui ont été obtenues pour ce projet des différents gouvernements et établissements européens, les engagements qui ont été pris, s'il y a quelques résultats obtenus et si d'autres sommes sont actuellement demandées ?

M. BIRRAUX — Chaque fois qu'on articule un chiffre, il y a toujours un chercheur qui se met à rêver par rapport à sa situation.

Pr. RUBBIA — Ces chiffres qui donnent le vertige à notre collègue sont rituels. Les dépenses que nous avons engagées dans ce type d'activité sont très modestes.

Notre source principale vient de contrats que nous avons reçus de l'Union européenne. Nous avons reçu deux contrats, un premier pour la première expérience pour 150 000 Écus.

Pour la deuxième expérience, l'expérience TARC, nous avons reçu une somme de 1,13 million d'Écus, une somme extrêmement modeste. Cet argent est compensé par des contributions des laboratoires, des compensations en nature, en équipements. Pour une expérience qui a duré pendant 3 ans, une telle somme me semble raisonnable.

Vous voyez les résultats ici. Il y a des gens qui travaillent, qui pensent et se battent pour quelque chose.

Pour ce qui est du contrôle, l'Union européenne est extrêmement précise. Si vous avez déjà essayé d'avoir de l'argent de l'Union européenne, vous savez combien de formulaires il faut remplir avant, pendant et après une action ! Soyez rassuré sur le fait que nous avons travaillé selon toutes les règles en vigueur.

Il est évident que si nous devons produire quelque chose avec une dimension plus grande — la machine pilote — nous devrions penser à des sommes plus importantes. Dans ce cadre, un comité présidé par M. POOLEY a étudié notre projet dans le détail et ce comité a émis un verdict favorable pour notre projet dans son essence et surtout pour son aspect tenant à l'élimination des déchets radioactifs.

Dans le rapport POOLEY, on indique trois domaines qui devraient trouver une place dans le cinquième Programme cadre de Recherche de l'Union européenne : le thorium comme combustible, les systèmes sous-critiques et l'accélérateur (ces deux points étant définis comme un point de substance avec des financements substantiels) et le plomb où les travaux se feront en collaboration avec nos collègues russes.

Cette recommandation de mettre la recherche d'un système sous-critique dans un programme européen a rencontré l'approbation du Comité scientifique et technique dans son ensemble. A partir de maintenant, la balle est dans le camp de la DG XII, en particulier de Madame CRESSON et de Monsieur ROUDY, directeur général de DG XII, qui ont déjà exprimé leur intention de considérer ces trois sujets comme des sujets à mettre dans le prochain programme cadre. Le programme cadre sera disponible pour tous et tout le monde pourra le consulter.

M. BIRRAUX — Je voudrais que nous revenions à notre ordre du jour qui était dans un premier temps la faisabilité et la sûreté. Le Pr. RUBBIA a ouvert la porte du sujet suivant qui est l'utilisation du système dont il nous a parlé pour l'incinération des déchets radioactifs.

Il faudrait aborder également les problèmes éventuels de prolifération, la question de la production électrique. Enfin, il nous faudrait évoquer ce que chacun ici peut apporter directement et indirectement à l'avancement des idées et des projets et comment les choses peuvent se passer concrètement.

J'aimerais que l'on revienne au sujet et que les intérêts légitimes mais très particuliers des uns ou des autres se dégagent pour retrouver les questions générales.

M. PRONOST — Vous parlez constamment de sous-criticité ; quel est l'état de cette sous-criticité en fin et en début de vie de votre réacteur ?

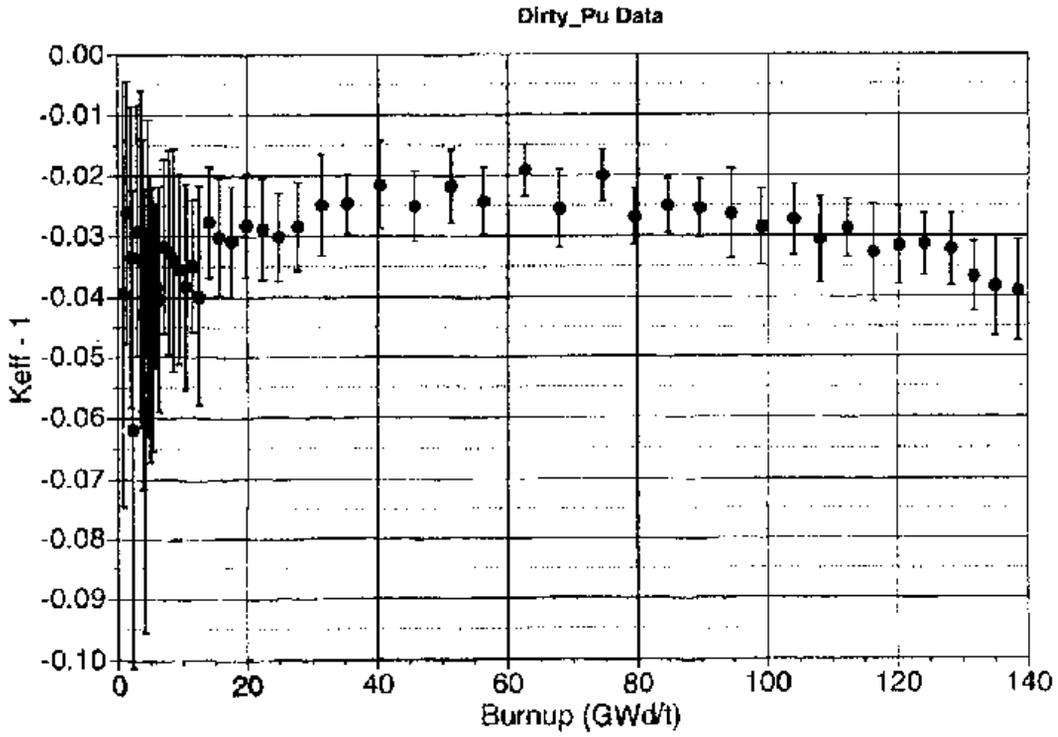
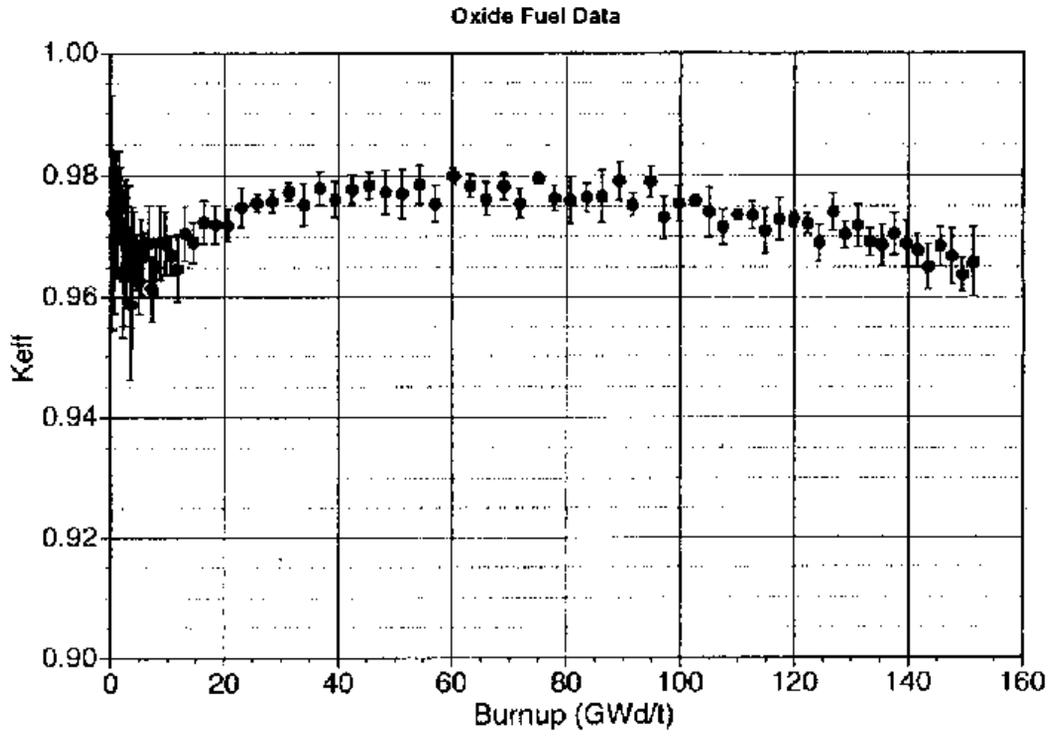
Apparemment, vous avez la prétention de faire de l'électricité avec ce réacteur ; est-il autoclave ? Quand il y a un appel de puissance secondaire, est-ce que le réacteur a tendance à s'étouffer ou à s'emballer dans certaines situations que l'on a connues à Tchernobyl ?

Pr. RUBBIA — Je vous présente une simulation faite par ordinateur avec un programme complet qui inclut l'évolution et les éléments [voir figure page suivante]. Si vous changez les conditions de marche, vous passez au plutonium et vous faites le *dirty plutonium* : c'est du plutonium qui a déjà une longue vie, qui a fait un ou deux passages en MOX. Là aussi, la situation est relativement stable [voir figure page suivante].

Avec ce mélange triple de thorium, de plutonium et d'uranium 233, vous pouvez arriver dans une situation dans laquelle les conditions sont extrêmement stables.

Que se passe-t-il si on coupe la machine et si on l'allume à nouveau ? Nous pouvons faire la simulation avec nos programmes. Nous pouvons contrôler le courant, le réduire, l'augmenter, changer les conditions, sortir une partie du matériel et voir ce que la machine va faire.

Nous avons procédé à plusieurs scénarios, par exemple en coupant la puissance, en mettant plus de courant, en refroidissant le réacteur, en donnant plus de puissance et en laissant monter la température. Nous n'avons pas trouvé de situation nous indiquant des complications.



C'est un programme qui doit être poursuivi. En temps réel, ce programme utilise des ordinateurs en parallèle. Nous avançons très rapidement, un neutron pour chaque processeur demande environ une vingtaine de microsecondes. Vous arrivez à avoir des statistiques considérables. Par exemple, le combustible est divisé dans des petites parcelles, et chaque parcelle se développe de façon indépendante, elle peut avoir sa propre température. Il faut tenir compte des situations nouvelles.

Avec cette méthode de calcul, nous pouvons avancer loin dans cette direction. Nous nous amusons avec ce type de chose et pour l'instant nous n'avons pas observé d'événements importants mais le travail doit continuer.

M. FLISSIC — Je voudrais faire une remarque sur les questions d'électrons et de neutrons. En fait les problèmes que ces faisceaux sous-tendent sont très différents les uns des autres.

M. RUBBIA en sait quelque chose puisqu'il a dû mettre en œuvre un système tout à fait révolutionnaire sur le dispositif qui lui a permis de faire ses expériences, puisqu'en 1956, il a été proposé conjointement par deux physiciens, un soviétique et un italien, des machines à base d'électrons et positrons. Ce n'est que 25 ans plus tard que le développement fondamental de **M. VAN DER MEER** a permis d'accomplir des performances comparables avec des faisceaux de protons.

Faisceaux d'électrons et faisceaux de protons sont des entités très différentes, et on ne peut pas dire que faire 30 mA de protons est à la portée de la main.

En ce qui concerne les collisionneurs, que **M. RUBBIA** connaît très bien, il sait qu'à la base il y a eu un développement fondamental.

Pr. RUBBIA — Il y a des problèmes différents. Dans la situation dans laquelle vous vous trouvez, avec les collisionneurs, on parle de refroidissement. Il est certain que dans ce domaine la différence de masse entre protons et électrons est importante.

Ici on ne parle pas de cela mais de différence de potentiel. Ce qui est en jeu, ce n'est pas le faisceau mais la cavité. Si la cavité produit une différence de potentiel, toute particule est soumise à un champ électrique et va bouger de la même façon.

La présence du faisceau dans ces cavités est importante : il y a des instabilités associées à ce faisceau, mais ce qui compte c'est l'existence d'un gradient et surtout d'un certain courant électrique représenté par le courant du faisceau qui produit une charge sur la cavité et demande une certaine puissance.

Le coupleur transmet une puissance de l'ordre de 400 ou 500 kW à travers une fenêtre. D'un côté de cette fenêtre, il y a la température ambiante et, de l'autre, vous avez la température minimale du système.

Le problème technologique des cavités est au cœur de ce type de problème, ce qui n'était pas le cas des collisionneurs où l'important était de faire interagir les particules elles-mêmes.

Dans ces conditions, on demande au faisceau de produire un courant et que ce courant soit couplé avec le système de cavité. Dans ce sens, la similitude entre un électron et un proton est beaucoup plus grande.

Je suis convaincu que si vous prenez un proton et que vous le lâchez à l'entrée d'une cavité où il y a un certain gradient, le proton va être accéléré par le gradient de la cavité et va prendre l'énergie en question. Il faut régler les phases de chaque cavité afin d'obtenir le signal voulu.

Ce matin, j'ai montré une cavité modèle qui montre comment elle peut être modifiée pour passer des électrons aux protons. Nous avons l'intention de mettre cette cavité dans de l'azote liquide à la fin de cette année. Un modèle de quatre cavités va être construit au début de l'année prochaine, vous aurez une cavité fonctionnelle avec le gradient nécessaire qui marchera avec la distribution des phases requises par le faisceau de protons.

A partir de ce moment-là, la grande majorité des problèmes sera résolue.

M. HARAR — Concernant les cavités supraconductrices, c'est une ouverture importante pour les accélérateurs, en particulier les accélérateurs de puissance. D'ailleurs il existe un développement assez important en ce sens à la DSM.

Les cavités LEP du CERN fonctionnent bien pour des électrons, mais il faudrait les reconfigurer à des énergies inférieures à 1 GeV parce que les protons ne sont pas relativistes. Le vrai problème avec les protons (comparés aux électrons) se situe à des énergies inférieures à 30 MeV.

Pourquoi ? Parce qu'il y a des problèmes de charge d'espace beaucoup plus sévères avec les protons qu'avec les électrons pour la simple raison que les électrons sont plus rapidement relativistes dans les structures accélératrices.

Pr. RUBBIA — C'est vrai. D'ailleurs tous les programmes de machines à haut courant, que ce soit la source de spallation européenne ou la source de spallation américaine ou la production de tritium à Los Alamos ou les systèmes que nous voulons proposer pour l'amplificateur d'énergie, reposent sur des systèmes qui ont beaucoup d'éléments communs. Ils ont tous des cavités supraconductrices avec des champs radiofréquence similaires, selon le modèle LEP parce qu'ils reprennent la forme des cavités LEP, à des fréquences voisines à celle du LEP.

Dans le cas de Los Alamos, on passe à 700 MHz mais au départ on est à 350 MHz, précédé par un système qui arrive jusqu'à 100 MeV. Notre système ne prévoit pas de descendre en dessous de 100 MeV avec les cavités supraconductrices : les premiers 100 MeV sont faits « à la main ».

La machine qui passe de 0 à 100 MeV est une extrapolation à haute puissance d'un système largement utilisé dans les laboratoires de physique de l'énergie. Il y a la machine du CERN et la machine SSC qui utilisent un LINAC, ayant souvent opéré avec des ions négatifs et qui ont des pics pendant la marche de l'ordre de plusieurs dizaines de mA. Le CERN arrive à une centaine de mA pendant une période maximale de quelques microsecondes.

Après, le faisceau est coupé, mais tous les phénomènes d'espace de charge sont bien présents dans les machines ordinaires actuelles, même si ces machines sont pulsées.

Le fait de faire marcher ces machines d'une façon continue n'est pas un problème d'orbite d'électrons ou de protons, car tout cela est déjà vérifié dans des machines existantes. La question consiste plutôt à augmenter le cycle d'utilisation. Il faut passer d'une machine pulsée à une machine continue.

C'est dans le transfert d'énergie radiofréquence, dans le refroidissement, dans les vis et dans les boulons, dans la façon de construire les choses, qu'il faut travailler. S'agissant de la dynamique du faisceau lui-même, les machines actuelles ont largement exploré ce domaine.

M. BARRÉ — Le Pr. RUBBIA a fait allusion à un avis donné par le Comité scientifique et technique d'EURATOM que présidait M. POOLEY. C'est un rapport très intéressant, son résumé ne prend que 4 pages.

Etant moi-même membre de ce comité, je me ferai un plaisir de vous le donner si vous voulez le mettre en annexe au compte rendu de cette audition car il émet des avis non seulement sur les recommandations données à la Commission, que le Pr. RUBBIA a citées *in extenso*, mais aussi des avis sur d'autres points, en particulier sur le caractère plus ou moins futuriste de certaines options.

M. BIRRAUX - J'ai ce rapport du Comité scientifique et technique d'EURATOM, j'en extrais cette phrase : *"Le Comité conclut également que la Commission devrait encourager les travaux futurs sur le multiplicateur sous-critique à neutrons rapides tel que suggéré par le Pr. RUBBIA, mais principalement orienté vers l'incinération des actinides plutôt que pour la production d'énergie"*.

Pouvons-nous examiner cet aspect ?

M. DESBORDES — Je voulais intervenir pour faire avancer le débat sur les sujets suivants qui concernent la production des déchets et la radioprotection.

Au niveau de la protection de l'environnement, les installations nucléaires classiques ont des effluents en fonctionnement normal, gazeux et liquides. D'après ce que j'ai vu dans la documentation, ce type de réacteur RUBBIA ne pourrait pas fonctionner sans rejet pour l'environnement.

M. RUBBIA semble dire que ce genre d'effluent serait moins dangereux, quand on regarde l'effet global au niveau de la radioprotection, à la fin du cycle de ce type d'installation. Il est important de savoir qu'on n'échappe pas à ce problème qui est un problème d'environnement.

Quand on parle de recyclage à des fins de transmutation, je n'aime pas trop les termes *"incinération"*, *"combustible"*, *"fuel"*, etc. ; quand on est physicien, ils ont une autre signification. Malheureusement, pour les gens du nucléaire, ils sont devenus des mots qui ont une signification pour eux mais qui, pour le public, pour la communication, sont différemment interprétés. J'estime qu'on ne doit pas utiliser des mots qui ont d'autres significations.

Je mettrai au moins des guillemets pour ces mots.

Quand on veut faire du retraitement, il faut trier parmi ce qu'on va prélever dans le réacteur pour pouvoir en réinjecter une partie (les actinides majeurs), et cette opération est polluante pour l'environnement et les personnes. Les deux endroits les plus pollués sont La Hague et Marcoule.

Il reste des déchets solide sur l'étagères à la fin de la vie du « combustible ». Le Pr. RUBBIA nous dit qu'au bout de 500 ans leur radioactivité, essentiellement due à l'iode 129 et au technétium, serait équivalente à l'activité du combustible quand il rentre. J'ai du mal à le croire quand on sait que l'activité a énormément augmenté dans la phase de fonctionnement du réacteur. Que l'on soit arrivé à réduire la radioactivité à ce même niveau au bout de 500 ans me paraît difficile mais je suis prêt à accepter le challenge.

En revanche, il ne faut pas négliger le fait que la radiotoxicité de l'iode 129 et du technétium n'est pas la même, même si leur radioactivité est équivalente.

Comme dans le nucléaire actuel, il reste quelque chose « sur l'étagère » au niveau du déchet final.

On a beaucoup parlé de la loi de 1991, qui a enfin permis de légiférer sur un problème important. Seulement, elle permet au chercheur de mobiliser l'attention des hommes politiques et de leur demander de l'argent (les chercheurs ont une bonne raison de demander de l'argent parce qu'il y a un problème à résoudre), mais j'ai peur que cet argent serve aussi à redémarrer un nouveau programme nucléaire, ce qui n'est pas le but actuel.

Il faudrait que les choses soient claires par rapport à la destination de ces différents projets. Il me semble qu'il y a une grande ambiguïté, aussi bien dans le projet de M. RUBBIA que dans un certain nombre d'installations, ne serait-ce que SUPERPHENIX.

Mme SENÉ — Je voulais revenir sur la loi de décembre 1991. C'est une loi qui a permis de faire prendre en charge les déchets et il est important que les parlementaires l'aient votée.

Simplement, je trouve qu'elle est lue d'une façon qui me paraît incorrecte. Fixer comme échéance 2006 pour avoir réussi ne me paraît pas être le sens de la loi. Le sens de la loi dit qu'en 2006 il y aura un examen et qu'on regardera si toutes les parties ont bien fait l'analyse et ont bien travaillé, et si on approche de quelque chose.

Il est vrai qu'on avait négligé un certain nombre de pistes, et il est bon de les revoir, mais on est en train de négliger d'autres pistes qui seraient la reprise de tous les déchets que nous avons déjà, le problème de tous les emballages et ce que l'on va faire ; bref, tout ce sur quoi on est installé parce que, dans l'état actuel des choses, la destruction des actinides ne concernera que quelques grammes pour commencer, et pour le moment il y en a beaucoup et il faut déjà les traiter.

Le problème des déchets mérite que des recherches soient faites et que dans les recherches on tienne compte des nouveaux déchets et de la façon de les traiter. Mais il ne faut pas oublier le passé et il ne faut pas non plus oublier que la partie actinides n'existe que parce qu'on fait du retraitement. Or on ne va pas tout retraiter, donc il y aura un problème.

En revanche, il existe aussi tous les déchets issus des mines qu'on ne passera pas dans les accélérateurs, tous les déchets qui viennent d'un démantèlement, toutes sortes de choses et beaucoup ne pourront pas bénéficier de cet apport.

Le problème des déchets n'est pas simplement résolu avec éventuellement un nouveau réacteur couplé à un accélérateur. C'est un point particulier mais dans la balance, il faut mettre l'ensemble du problème.

Par ailleurs, comme ce projet est aussi présenté pour faire de l'énergie, il ne serait pas correct qu'on reparte sur le nucléaire sans avoir permis à la nation d'avoir un programme beaucoup plus étendu qui lui permette de faire un choix réel entre des solutions réellement étudiées.

On dit que c'est à la marge parce qu'un accélérateur coûte cher et que si on en fait un plus petit avec des cavités qui existent, ce n'est pas grave. Si, c'est grave ! Parce que cela veut dire qu'on ne met pas l'argent ailleurs. Pourquoi la fission ? Il y a beaucoup d'autres possibilités ! Examinons-les. Mais ce n'est pas ce qu'on est en train de faire.

M. BIRRAUX — J'ajouterai à votre tableau qu'il existe encore des tas de terrils de cendre provenant de centrales au charbon qui contiennent des quantités de produits radioactifs non négligeables et que l'on peut encore mettre dans la balance.

Mme SENÉ — Je n'ai jamais dit qu'il fallait se limiter au nucléaire.

M. BIRRAUX — En 2006, on va examiner les choses, et nous n'avons pas à anticiper sur les conclusions qui arriveront en 2006. Je ne peux pas dire que ce que nous faisons aujourd'hui l'est dans la perspective de figer les choses en 2006.

En 2006, on examinera l'ensemble du dossier et il a été précisé que le Parlement aurait à nouveau à débattre d'une autre loi, au vu des résultats évalués par la Commission nationale d'Évaluation. Mais je ne tire aucune conclusion *a priori* sur ce que va dire la Commission nationale d'Évaluation.

M. SALVATORES — Dans le cadre de la fonction éventuelle de transmutation des déchets, des propositions ont été faites par le Pr. RUBBIA. Effectivement, incinération des déchets veut dire une installation avec un objectif à développer, et le Pr. RUBBIA a parlé d'une réalisation pilote.

Dans ce contexte, ce matin, il a mentionné une machine beaucoup plus modeste, un accélérateur de protons d'environ 200 MeV, d'une dizaine de mA. Est-ce que la faisabilité d'une telle machine permettrait de rapprocher d'une certaine façon la réalisation de l'installation expérimentale pilote ?

Pr. RUBBIA — Je commencerai par répondre à M. DESBORDES. Je sais que l'organisation que vous représentez est très soucieuse de la gestion des déchets nucléaires ; c'est une chose importante pour nous aussi. Nous considérons que la production des substances radioactives au début et à la fin du cycle sont des éléments qui doivent être étudiés avec soin.

Je n'ai pas eu le temps aujourd'hui d'en discuter mais je vous suggère de lire notre document, il y a à la fin un certain nombre de chapitres qui s'y rapportent.

Il apparaît qu'une phase critique pour les doses données à l'environnement vient de la phase initiale d'extraction du minerai. Les trois-quarts de ce que nous recevons comme dose radioactive dans l'utilisation de machines nucléaires — en l'absence d'accident nucléaire — sont dus à l'extraction du minerai. On parle de 200 milliSieverts par GW électrique produits par an pour la dose donnée à la population, dont 150 viennent de l'extraction. Tous les accidents, de type Tchernobyl, doublent cette valeur. Chacun de nous a reçu une dose de l'ordre de 2 fois 300 milliSieverts par GW électrique.

Nous pensons améliorer cette situation en utilisant mieux notre combustible, et le thorium est plus propre. M. SCHAPIRA a étudié soigneusement la quantité de radiations émises quand on cherche à produire du thorium et il apparaît que ce qui domine, c'est la fraction d'uranium contenue dans le thorium.

L'impact environnemental dû à l'extraction de l'uranium disparaît si vous utilisez le thorium parce que celui-ci est plus propre et qu'on en a besoin de moins. Mais cela n'enlève en rien le problème de la fin du cycle.

Nous avons essayé de limiter l'idée d'émettre des effluents gazeux dans l'atmosphère et nous disons qu'avec un certain effort, un certain coût, on ferait beaucoup mieux en limitant l'émission du krypton, du carbone 14 et du tritium. Il y a certainement beaucoup à faire dans cette direction et on peut faire certains progrès. Si on fait cela, il apparaît que la quantité de radiations données par les trois phases est inférieure à ce qui se fait couramment.

Serons-nous capables de le faire ? C'est quelque chose sur lequel il faut être très prudent. Il ne faut pas que vous oubliiez que nous faisons un travail de recherche dont le but est de réduire ces quantités. Nous voulons que ce soit notre but final.

Donnez-nous la chance d'essayer. Il est clair que nous n'entendons pas démontrer que nous pouvons le faire, mais nous pensons le faire et nous espérons que cela fonctionnera.

Mme SENÉ, je ne sais pas jusqu'à quel point je dois entrer dans le problème qui relève du fonctionnement interne de votre pays. Je laisse aux autres le soin de commenter vos propos qui me semblent toucher un problème interne. Je ne sais pas quoi dire.

S'agissant de la question de M. SALVATORES, il est évident que cette machine est une merveille : elle semble simple mais elle contient beaucoup de choses intéressantes. Nous pensons que nous pouvons réaliser cette machine dans un temps relativement bref, on parle d'une année et demie

pour commencer à faire quelque chose. Il est certain que si nous avons cette machine, nous pourrions commencer à travailler sur la fenêtre. Dans une période de l'ordre de 2/3 ans, il me semble que cette machine pourra être réalisée, si nous avons les fonds nécessaires. Une telle machine coûterait de l'ordre de 10 M\$, c'est quelque chose de relativement modeste.

S'agissant de la question se rapportant au système sous-critique, je vous laisserai le plaisir de décider vous-même. Je veux souligner que la crédibilité du projet prototype dépend de notre capacité de construire une machine de cette dimension avec les caractéristiques adéquates. Il est urgent de pouvoir démontrer cela.

Notre prochaine étape sera la fenêtre considérée comme un point critique.

M. TISSOT — Je n'ai pas l'intention d'apporter des éléments spécifiques dans cette discussion. Je voulais simplement dire que la Commission nationale d'Évaluation porte tous ses efforts pour travailler sur l'ensemble des trois axes de la loi : tout nouveau procédé fait l'objet d'un examen par cette commission et est inclus dans le rapport.

En 1996, dès qu'est apparue dans un rapport de l'Office parlementaire l'éventualité d'un non-retraitement d'une partie des combustibles irradiés, nous avons immédiatement demandé aux acteurs de la loi de nous faire part de leur stratégie dans ce sens.

Concernant les laboratoires souterrains, les laboratoires expérimentaux, là encore, non seulement nous examinons avec le plus grand soin tout ce qui est fait en France par les grands organismes qui en sont chargés mais également ce qui est fait au niveau international.

Pour le troisième axe de la loi relatif au conditionnement et à l'entreposage, nous insistons auprès des organismes concernés sur le fait que la stratégie qu'ils adoptent sur le premier et le deuxième axe de la loi ont leurs conséquences et qu'on ne descend pas de la même façon dans un ouvrage d'art un colis vitrifié dont le volume est de l'ordre de grandeur d'un véhicule et un énorme conteneur métallique qui pèse 80 tonnes.

Dans ce sens, tout ce qui aboutira à réduire la quantité et le volume des déchets dans les stockages souterrains est regardé avec la plus grande attention.

La Commission opère dans le plus grand esprit d'indépendance et, en particulier, tient beaucoup à ce que les organismes lui rapportent leurs travaux sans filtrage et sans délai. Une fois ces travaux terminés, en accord avec le gouvernement et le Parlement, c'est dans la même journée que le rapport est présenté à ces diverses instances et au public.

Le 2 juillet, nous avons fait venir à Paris les représentants des instances locales de concertation de 4 départements et nous avons, dans un grand amphi, présenté et discuté les résultats de notre dernier rapport.

Voilà l'esprit dans lequel la Commission travaille.

M. FINON — Je suis directeur de l'Institut d'Économie et de Politique de l'Énergie de Grenoble.

Par rapport à un scénario de développement d'un système hybride uniquement destiné à transmuter des actinides, en cas d'usage de cette technologie à des fins de transmutation, est-ce que l'on pourrait produire de l'électricité, comme une sorte de « sous-produit » ?

S'il y a un usage privilégié de cette technologie pour la transmutation, quelle puissance faudrait-il pour transmuter les actinides qui seraient produits par un réacteur normal pendant un an ?

Je me situe maintenant dans un deuxième scénario. Le rapport POOLEY a tendance à recentrer l'usage de cette technologie uniquement pour brûler des actinides. A un moment, ce rapport évoque l'idée d'avoir une première vague de réacteurs où cette fonction serait privilégiée, ce qui prouverait peut-être sa viabilité pour produire de l'électricité de façon économique, dans une deuxième vague de réacteurs.

Ma question s'adresse au Pr. RUBBIA : est-ce que quelque part il n'a pas un regret de voir son projet « réduit » dès lors qu'on ne parle plus de production d'électricité ? A-t-il une espérance, à partir d'une première étape où le projet serait finalisé par rapport à la transmutation d'actinides, de voir la technologie devenir compétitive par rapport aux filières normales ?

Je dois préciser à l'assistance que, il y a deux ans, j'avais travaillé avec beaucoup d'intérêt avec l'équipe du CERN pour faire un premier balayage des perspectives d'accès à la compétitivité économique de la filière de l'amplificateur d'énergie — dans certaines conditions de constitution de l'acceptabilité sociale du nucléaire.

J'aimerais que le Pr. RUBBIA explique à l'assistance, par rapport à ce qui apparaîtrait comme un élément de complexité supplémentaire de cette technologie, c'est-à-dire la jonction d'un accélérateur, ce qui ferait que la filière de l'amplificateur d'énergie pourrait devenir compétitive par rapport à une filière nucléaire bien établie. Est-ce parce qu'elle serait plus simple à un certain endroit, notamment au niveau de la partie du réacteur sous-critique ou à travers le cycle du combustible ?

Dans le cas où l'objectif principal serait de produire de l'électricité, est-ce qu'en même temps cette technologie aurait la possibilité de brûler plus d'actinides qu'elle n'en produit ? A ce moment-là, on pourrait associer deux fonctions qui renforceraient l'intérêt de cette technologie.

Pr. RUBBIA — Regardons un instant la combustion du plutonium par des réacteurs ordinaires. Le plutonium contient en soi à peu près 35 % à 40 % de l'énergie du réacteur qui a produit le plutonium. Vous avez plus d'un tiers de ce que vous avez déjà généré qui est potentiellement créé à l'intérieur de ce plutonium.

Cette énergie est dominante dans l'échelle de valeur, elle est de plusieurs GW pour une quantité assez raisonnable de plutonium. Une tonne de plutonium représente 14 millions de barils de pétrole s'agissant de l'énergie stockée à l'intérieur. C'est beaucoup si l'on pense qu'un pays comme l'Arabie Saoudite produit 10 millions de barils par jour.

Soit on met cette énergie sous terre, soit on la récupère. En détruisant le plutonium, on gagne le facteur énergétique. D'un point de vue économique, cela a une importance considérable car même les gens qui brûlent des déchets ordinaires y trouvent une certaine rentabilité économique.

L'énergie contenue dans le plutonium vaut la peine d'être considérée comme un élément d'incitation économique tendant à la destruction définitive de ce matériel.

Nous avons deux façons de détruire ce plutonium. Nous pouvons entrer ce plutonium à l'intérieur d'une machine style MOX, en faisant l'hypothèse que le MOX puisse trouver une place économiquement viable. Nous pouvons arriver à une situation où la quantité de plutonium est plus ou moins constante, et une bonne partie de cette énergie se retrouve sous forme d'énergie utile à l'intérieur du même réacteur ordinaire avec des neutrons thermiques.

Nous savons que ce processus ne peut se dérouler à l'infini mais peut permettre d'extraire une partie considérable de l'énergie condensée dans le plutonium avec des réacteurs ordinaires.

On ne peut pas sortir toute l'énergie contenue dans le plutonium avec des réacteurs ordinaires. D'ailleurs, la radiotoxicité du produit, après qu'il a été irradié plusieurs fois à l'intérieur d'un réacteur, ne peut pas être améliorée. La quantité d'américium et de curium accumulée devient très grande.

Vous pouvez voir alors un « programme minimal » dans lequel l'élimination du plutonium est le but du MOX et les incinérateurs de type Amplificateur d'énergie ont pour but d'éliminer les actinides mineurs qui ont une toxicité énorme, pour une quantité de l'ordre de 2 à 3 tonnes par an.

2 à 3 tonnes par an, c'est la quantité de matière que nous pouvons éliminer avec une machine qui serait plus ou moins de la taille du LEP qui existe aujourd'hui. On pourrait éliminer 2 à 3 tonnes d'américium qui représentent le produit final d'un pays comme la France.

Si on dit que le MOX en soi n'est pas une solution acceptable parce qu'elle coûte trop cher, nous pouvons bouger cette ligne de séparation entre l'amplificateur d'énergie et un réacteur ordinaire, et dire que le plutonium va passer dans l'amplificateur d'énergie. On ne fait qu'une phase de puissance standard à l'intérieur des réacteurs ordinaires, dans lesquels on produit l'énergie qu'il est possible de produire. A partir de là, ce qui reste est mis dans l'Amplificateur d'énergie.

Dans ces conditions, nous pouvons extraire 35 à 40% d'énergie du réacteur. Un réacteur d'1 GW produit 400 MW dans un amplificateur d'énergie. Tout dépend si l'énergie produite par l'amplificateur d'énergie est compétitive et s'il y a un marché pour cette énergie.

Il existe donc des facteurs économiques qu'il est difficile d'estimer aujourd'hui mais il est possible d'avoir un autre schéma dans lequel toute l'énergie est produite à nouveau à l'intérieur de l'amplificateur d'énergie.

C'est un choix stratégique, le système permet les deux à la fois.

Vous avez soulevé la question de la différence entre l'élimination de déchets radioactifs et la production d'énergie propre. Il est certain qu'un amplificateur d'énergie devrait être capable de produire une énergie nucléaire compétitive économiquement et devrait produire essentiellement beaucoup moins de déchets.

Or, la meilleure façon de résoudre le problème des déchets, c'est de ne pas en produire au départ, c'est-à-dire de mettre au point un système où les amplificateurs d'énergie produiraient de l'énergie. On pourrait parler d'amplificateurs d'énergie à un moment où les réacteurs ordinaires seraient arrivés à la fin de leur vie, c'est-à-dire 2015/2020. Il est possible que cette limite soit améliorée avec le temps mais il y a toujours une durée de vie limitée.

Vous pouvez imaginer une situation dans laquelle l'amplificateur d'énergie devient le nouvel élément d'utilisation d'énergie, après que les réacteurs se soient arrêtés comme tels. Si vous prenez ce scénario, vous pouvez mettre dans une première phase la combustion du plutonium : on nettoie avec l'amplificateur d'énergie le plutonium produit par le système. Dans une deuxième phase, il intervient comme amplificateur d'énergie « pur et dur » dans lequel on ne fait que de l'énergie avec une production minimale de déchets radioactifs.

Le rapport POOLEY est ambigu : il ne dit pas de ne faire que de l'incinération, mais que l'incinération est la porte d'entrée à tous types de possibilités, y compris celle de faire de l'énergie, mais tout cela doit être démontré. La meilleure façon de se rendre utile est de commencer par l'élimination des déchets radioactifs et le reste, si les lois du marché sont favorables, se fera automatiquement. Voilà ce que dit le rapport.

M. BARRÉ — M. FINON demandait quelle serait la proportion, en supposant qu'on les cantonne dans un rôle de transmutation des actinides, de réacteurs hybrides qu'il faudrait dans un parc classique. Je répondrai environ 5% du parc exprimés en puissance installée si je considère que le parc s'occupe lui-même de son plutonium. Ce n'est pas négligeable mais ce n'est pas énorme.

Pourquoi le rapport POOLEY a-t-il dit que c'était une première étape plus accessible ? C'est plus accessible parce qu'il n'est pas en concurrence avec d'autres filières.

Aux environs de 2010/2015, il y aura renouvellement du parc nucléaire actuel. L'hypothèse la plus crédible est que ce sera encore avec des réacteurs à eau, ce qui retarde l'échéance au renouvellement suivant. A ce moment, c'est bien une échéance où éventuellement des réacteurs hybrides pourraient être concevables.

S'ils sont cantonnés à l'aspect transmutation, ils ne sont pas en concurrence économique avec les autres car il est extrêmement difficile d'être persuadé aujourd'hui qu'à cette échéance ils pourront être compétitifs avec les réacteurs à eau de cette deuxième génération.

J'ai dit qu'il était difficile d'être sûr, je n'ai pas dit qu'on était absolument sûr du contraire. Je pèse mes mots.

Ce que dit aussi le rapport POOLEY, c'est qu'ayant des démonstrations en vraie grandeur, il y aurait une vraie base pour savoir si oui ou non ils seraient économiques et s'ils auraient un créneau plus grand que la simple transmutation, qui s'étendrait à toute la production d'énergie.

Tant que nous ne serons pas pas à un stade avancé de démonstration, il sera difficile d'être sûr du contraire.

Pr. RUBBIA — Les 5% du parc énergétique indiqués par M. BARRÉ sont une valeur correcte mais ce ne sont pas 5% de toxicité en moins.

M. BARRÉ — Je répondais à la question qui demandait combien de réacteurs il faudrait. Le chiffre de 5% ne voulait pas dire que c'était seulement 5% de la radiotoxicité qui serait éliminée, bien au contraire.

M. SCHAPIRA — On pourrait aussi partir de l'analyse qu'a faite la commission présidée par le Pr. CASTAING chargée d'évaluer les capacités de SUPERPHENIX et de faire un programme de recherche appelé le PAC (Programme d'Acquisition de Connaissances).

La réflexion de la commission tendait à considérer qu'il y avait deux types de situations extrêmes.

Ou bien vous étiez dans un système où le parc électronucléaire se prolongeait sur des décennies. A ce moment-là, fondé sur des réacteurs à eau, il était possible de gérer le plutonium du parc par le parc lui-même dans un mode de recyclage différent de celui qui est aujourd'hui mis en oeuvre, car il permet la poursuite du multi-recyclage du plutonium. Mais, dans ce cas, il y a une production accrue d'actinides mineurs ; on peut imaginer que des études démontrent que les actinides mineurs peuvent aussi être pris en charge en termes de recyclage dans les réacteurs et on peut imaginer de stabiliser leur production, ou alors il faut faire des réacteurs dédiés.

C'est à ce moment qu'apparaissent les systèmes hybrides qui ont cette vertu très importante qu'ils permettent la gestion de combustibles plus « exotiques » que ceux que l'on peut mettre dans un réacteur de type standard. C'est-à-dire qu'on peut relâcher un certain nombre de contraintes de sûreté, et notamment ce problème de niveau de sous-criticité qui permet de détruire des actinides mineurs mais également du plutonium sans l'accompagner d'une régénération des mêmes produits.

Ce sont des choses difficiles à faire dans des réacteurs à neutrons rapides standards. Les systèmes hybrides sont un véritable créneau et doivent être comparés à la capacité des réacteurs à neutrons rapides pour faire ce genre de chose.

La deuxième situation est celle où l'on déciderait d'arrêter le nucléaire. On aurait alors à gérer un inventaire de produits dont on souhaiterait se débarrasser en les incinérant. Que ce soit la gestion des actinides mineurs ainsi produits ou stabilisés ou celle du plutonium, des réacteurs à neutrons rapides ou des réacteurs hybrides sont intéressants pour réduire ces stocks dans le temps.

Mon sentiment est qu'il faut comparer encore davantage en termes de sûreté, notamment, et de caractéristiques économiques et de cycle, les deux voies qui sont celles des réacteurs à neutrons rapides type SUPERPHENIX et les réacteurs hybrides pour cette tâche.

C'est un véritable débat.

Dans ce contexte que je viens d'expliquer, le thorium peut être conçu comme une matrice intéressante pour des tâches dédiées de destruction de plutonium des armes ou des actinides mineurs, dans laquelle on ne cherche pas à régénérer le produit initial. Le thorium est un bon support dans une matrice à la place de l'uranium.

Où alors, on passe à un système de production d'énergie fondé sur l'utilisation du thorium, en parc mixte ou en parc total. A ce moment on a un spectre de produits radioactifs différent de celui que l'on a dans les systèmes uranium standards.

Dans le cycle du thorium, les impacts radiologiques à long terme sont plus faibles que ceux d'un cycle basé sur l'uranium mais ceci a un prix avec l'augmentation, à technologie égale, des impacts à court terme supportés par les travailleurs et éventuellement le public. Je pense notamment à la pollution du thorium séparé par d'autres isotopes du thorium mais surtout la présence d'isotopes dans l'uranium que l'on est obligé de recycler dans cette économie fondée sur le thorium.

Ceci n'est pas réhibitoire à mon sens dans la mesure où aujourd'hui on dispose de technologies tout à fait nouvelles en termes de robotique. Je pense par exemple à l'exploitation des minerais d'uranium très riche au Canada, procédé qu'a mis au point la COGEMA, qui permettrait peut-être d'exploiter des minerais de thorium qui eux sont toujours très riches en thorium. Les minerais de thorium ont une qualité très intéressante par rapport aux minerais d'uranium, c'est un « plus », mais il faut mettre en oeuvre des technologies qui protègent les mineurs parce qu'il y a un problème de doses.

Il y a également le problème de la robotisation au niveau de la fabrication des combustibles fondés sur l'uranium recyclé.

Le thorium est probablement un combustible extrêmement prometteur à condition de mettre en oeuvre des techniques beaucoup plus performantes que celles que nous utilisons aujourd'hui dans les usines MOX ou dans la fabrication des combustibles MOX. C'est d'ailleurs l'objet d'une étude que la Communauté européenne a lancée dans le quatrième PCRD et à laquelle le CEA et l'IN2P3 participent. Il s'agit d'une évaluation de tous ces impacts pour essayer d'apprécier le gain en termes radiologiques d'un cycle thorium par rapport à un cycle uranium dans les conditions technologiques et industrielles d'aujourd'hui.

M. BIRRAUX — Merci pour ce double rappel portant à la fois sur les problèmes de radioprotection et de radiotoxicité et sur les options technologiques envisageables.

Je n'ai pas de réponse qui me paraisse satisfaisante sur le point de la radioprotection et de la radiotoxicité. Il faut que j'attende que vous ayez rendu votre copie à l'Union européenne avec le CEA pour en savoir plus, mais au moins c'est un point qu'il est important de mentionner dans le débat.

Mme LANGEVIN — Quand on est arrivé à ce stade de la discussion, le problème économique intervient, mais il me semblait que le dernier point qui se rapportait à l'importance de cette affaire par rapport à la prolifération, et aux décisions à prendre ou à ne pas prendre à tel ou tel moment, dans 10 ou 15 ans, était un problème très important, y compris sur le plan économique. En effet on sait parfaitement que les problèmes d'exportation de réacteurs ne sont pas indépendants de la manière dont on considère les risques de prolifération. Donc, c'est un facteur qui se mélange aux autres.

Jean PERRIN disait qu'il y a un équilibre entre l'esprit d'audace et de prudence nécessaire aux progrès de la science. Je crois que c'est vrai également pour le bon développement de projets de ce genre.

Dans mon esprit, être prudent, cela ne veut pas dire avoir le pied sur le frein tout le temps.

M. MAILLARD — Les réacteurs à eau légère sont partis des réacteurs embarqués. Les conditions de mise en oeuvre pour des bateaux n'avaient rien à voir avec celles prévalant aujourd'hui.

Sur les réacteurs hybrides, on se trouve déjà confronté à des questions importantes de sécurité. Ce sont en particulier ces questions cruciales qui vont indiquer quelle sera l'économie générale du système : la question de la fenêtre, des chocs thermiques, etc. S'il y a un incinérateur au début, on pourra déblayer les choses, mais parler aujourd'hui d'électricité me semble prématuré.

Quand on parle du frein, pour avoir lancé une étude dès 1990, je constate que les freins viennent plutôt plus tard. L'audace consiste aussi à savoir à quel rythme avancer.

Ce qui m'inquiète pour ma part — je ne fais partie d'aucun lobby et je ne reçois pas d'argent d'EDF — c'est que nous avons un parc électronucléaire et des réacteurs rapides qui fonctionnent, et leur mise en cause serait extrêmement préjudiciable, pour des choses qui n'existent que sur le papier et qui présentent de graves problèmes de sécurité. Si le bâtiment s'écroule, le refroidissement à air ne marche pas, la cuve n'est pas refroidie et s'enfonce dans le sol. Il peut y avoir également l'inverse, l'air radioactif s'échappe dans l'atmosphère.

On ne peut pas lancer des prototypes à ce niveau de la réflexion. C'est une illusion.

M. PRONOST — Quand on a commencé à brûler les ordures ménagères, on a constaté que c'était une énergie qu'il fallait exploiter.

Il me semble que dans le concept proposé ici, faire de l'électricité pour de l'électricité est un faux problème. Manifestement, ce concept peut faire les deux et la question est sans intérêt. Quand on a de l'énergie, il faut l'utiliser.

J'étais il y a quelque temps sur la centrale nucléaire de Beloyarsk en Russie. Ils avaient de l'énergie et un réacteur prototype, dans sa conception initiale, qui chauffait toute la ville. Dans l'hôtel où j'étais, je ne me suis pas posé de question mais c'était de l'eau chaude qui venait du circuit secondaire des réacteurs. C'est très bien comme cela.

M. BIRRAUX — C'est très bien tant que le système veut que ce ne soit pas de l'énergie venant directement du circuit primaire !

J'aimerais avoir une réponse sur l'aspect prolifération. On me dit que l'uranium 233 est considéré par l'AIEA et les experts comme étant directement utilisable pour faire une arme au même titre que le plutonium, que la catégorie recommandée au titre de la protection physique est identique à celle du plutonium mais qu'il peut être rendu moins sensible que le plutonium par un mélange avec de l'uranium 238.

M. BARRÉ — Ce que vous avez dit est exact : une bonne matière fissile, par définition, est susceptible d'être utilisée dans des réacteurs ou dans des armes.

L'uranium 233 est une très bonne matière fissile, il a une masse critique faible, il n'a pas de fission spontanée, donc il se prêterait très bien à faire des armes prédictibles. Avec le plutonium on réussira toujours à faire quelque chose, mais plus le plutonium est dégradé, moins ce sera bon et moins ce sera prédictible. L' U_{233} est très prédictible, il peut faire quelque chose de très bien.

En revanche, l' U_{233} n'est pas produit directement mais par capture dans le thorium et, au passage, il y a un peu d'uranium 232. Avec le temps, l'uranium 232 émet des radiations importantes. Il n'est pas facile non plus à manipuler. Cela veut-il dire qu'il est plus ou moins proliférant ? cela devient une querelle d'expert. Ceux qui sauraient répondre sont les spécialistes des armes, et ils ne sont pas là. Et s'ils étaient là, ils ne répondraient pas...

Pr. RUBBIA — Il y a beaucoup de questions sur lesquelles nous n'avons pas de connaissances. Il faudrait essayer nous-mêmes et voir si cela marche, mais ce n'est pas une chose que nous pouvons faire.

Comment peut-on s'assurer de la non-prolifération ?

Si on prend une position honnête dans ce type de problème, on se rend compte que c'est le neutron est l'objet proliférant. Avec un morceau de thorium, je peux faire de l'uranium 233 par surgénération ; avec un morceau d'uranium qui n'est pas particulièrement protégé, je peux faire du plutonium en faisant une cuisson plutôt « saignante » que « bien cuite ».

Le véritable problème de la prolifération n'est pas tellement la question du combustible mais surtout celle d'un environnement neutronique déterminé par tout type de machine. Une machine à fusion, un réacteur à fusion, un réacteur rapide, ou un amplificateur d'énergie ou même une machine source de neutrons par spallation pourraient être considérés comme un risque potentiel.

Quelle est la solution possible ?

A mon avis, elle consisterait à faire un conteneur dans lequel nous mettrions des substances radioactives et tâcherions d'assurer que cet objet soit fermé, inaccessible par l'utilisateur pendant une durée de 5 ans. C'est peut-être rêver mais ce sont des réflexions qui rendent les choses plus simples.

La véritable solution au problème de la non-prolifération est d'interdire l'accès à la cuve. Cela implique la condition qu'il n'y ait pas de systèmes actifs. S'il existe des systèmes actifs qui demandent une présence constante, on ne peut pas garantir l'isolement de la partie nucléaire. Cela me semble être la solution la plus sûre.

Après, le combustible doit être transporté dans un récipient fermé comme actuellement, dans des usines de traitement sous contrôle international.

Je verrais donc plutôt un système dans lequel on interdit l'accès à la partie du réacteur, sauf par un groupe de contrôle international, et le combustible n'est jamais possédé par l'utilisateur mais par ce groupe de contrôle qui a toutes les garanties de freiner la prolifération. Je ne vois pas d'autre solution pour une véritable protection contre la prolifération.

De là à dire que si nous laissons les gens accéder à des systèmes nucléaires, ils seront inévitablement enclins à construire une bombe, il y a une grande différence, car pour créer une instabilité politique il existe des méthodes bien plus efficaces aujourd'hui que de construire une bombe avec de l'uranium ou du thorium.

Ce sont des discours très hypothétiques mais, à mon avis, c'est déjà le neutron lui-même qui représente le vrai problème.

M. BARRÉ — Je suis assez d'accord avec le Pr. RUBBIA. Si vous avez un réacteur à eau avec le couvercle vissé, vous ne pouvez pas subrepticement prendre ce qu'il y a à l'intérieur. Une fois que le combustible est irradié, il n'est pas très accessible non plus. S'il va dans une usine de retraitement sous contrôle international, c'est la même chose dans les deux cas.

Il a été mentionné le « cycle dénaturé », c'est-à-dire où on mélange uranium 233 et uranium 238 et où on a une vraie protection parce qu'il y a séparation isotopique. En fait, cela ne fonctionne pas si bien. C'était des idées à la mode en 1976 mais on n'y a jamais beaucoup cru.

M. ROUSSON — Je voulais rebondir sur le fait qu'on avait un parc nucléaire et qu'on allait certainement le renouveler. Or, il faut se poser la question différemment car nous sommes à un moment de rupture à l'heure actuelle.

Les critères de choix sont ceux de l'énergie la moins chère. Le Parlement européen va statuer, début décembre, sur une directive pour l'ouverture à la concurrence de l'énergie, ce qui veut dire que si cette directive passe telle quelle, le parc EDF ne sera plus dans l'état actuel. On va changer la culture de l'entreprise EDF en passant d'une culture technicienne au service de l'intérêt général de la nation à une culture marchande internationale où les investissements à court terme seront forcément prioritaires.

Le nucléaire étant un investissement à long terme, on ne fera plus de nucléaire dans les 20 ans à venir.

Notre organisation syndicale CFTC s'est positionnée vis-à-vis de du projet du Pr. RUBBIA pour le soutenir, dans le sens où cela rejoint deux de nos préoccupations. Si on ne continue pas à faire du nucléaire, on va se retrouver dans la position de beaucoup d'entreprises chimiques qui, quand elles déposent leur bilan, laissent leurs produits à qui veut bien les traiter. Il faudra à ce moment avoir quelque chose qui puisse les traiter.

A l'époque où nous avons abordé le sujet sur le démantèlement des centrales nucléaires, nous avons dit qu'il y avait des provisions. J'avais fait remarquer que les provisions étant intégrées dans les comptes d'EDF on n'était pas sûr que dans 50 ans EDF serait encore là, donc qu'il aurait encore des comptes...

Le temps nous a hélas donné raison puisqu'il semble que l'État aurait des visions sur la masse monétaire qui était là : on prévoit actuellement de la mettre dans un « pot » qui sera fiscalisé, ce qui veut dire qu'il diminuera !

Ce projet serait une bonne solution. Si on peut faire du démantèlement anticipé en prévoyant d'affecter une partie des dépenses de démantèlement à soutenir ce projet, cela permettrait d'avoir un outil de nettoyage des actinides le moment venu. D'un autre côté, si tout va bien, on pourra toujours envisager de faire une production plus propre, si une version moins pessimiste se réalise.

M. SENÉ — Je voudrais apporter un complément à ce qu'a dit M. BARRÉ sur l'uranium 233 qui est en cours d'extraction et qui est contaminé d'une façon dissuasive par l'uranium 232. On peut très bien faire une extraction au niveau du protactinium 233 et récupérer un uranium 233 pur.

C'est une question de volonté au niveau du possesseur du réacteur. L'histoire récente nous a montré qu'un certain nombre de pays voulaient se doter d'outils de production d'énergie nucléaire, non pas pour produire de l'énergie mais pour produire des matières premières pour faire de l'armement. Plus une machine est simple, plus elle est facile d'accès, plus elle est proliférante.

Quant au contrôle par l'AIEA, tout le monde a à l'esprit l'exemple de contrôles extrêmement « performants », et c'est la meilleure façon de se faire une bombe en ayant tout le réacteur.

Dans ces conditions, j'émet des réserves sur une possibilité de contrôle.

M. BIRRAUX — Curieusement, on ne voit jamais dans aucun papier une déclaration quelconque disant que le système Candu est proliférant. Cet acteur passe incognito dans le paysage nucléaire... CEAUCESCU n'avait pas choisi ce système pour avoir un système occidental mais parce qu'il avait d'autres idées derrière la tête.

M. SCHAPIRA — Toute l'expérience que l'on a dans le domaine de la prolifération montre que la lutte contre la prolifération passe d'abord par des mesures politiques plutôt que techniques, et par des contrôles de l'AIEA.

Lorsqu'on a à faire à un système hybride — et le Pr. RUBBIA a montré que toute source de neutrons est proliférante — une première chose serait d'étendre les garanties de l'AIEA aux systèmes produisant des neutrons, ce qui n'est pas pour l'instant le cas en dehors des réacteurs.

Une deuxième chose est que si l'on parle de contrôle, on peut remarquer que l'uranium 233 est beaucoup plus facile à contrôler (ses mouvements en particulier) en raison de la présence d'uranium 232. C'est un avantage technique par rapport au contrôle de la circulation de matières comme le plutonium.

Pour ce qui est de l'extraction à partir du protactinium, qui est en soi une source d'uranium 233 pur, compte tenu de la période du protactinium 233 ceci ne peut se concevoir que dans des retraitements en ligne qui ne sont possibles que dans des systèmes à combustible liquide, c'est-à-dire dans des systèmes à sel fondu. C'est effectivement une possibilité, encore que la proportion d'uranium 233 que l'on extrairait de cette façon, par rapport au stock qui est là par ailleurs, serait faible et dépendrait des caractéristiques du réacteur.

Pour les combustibles solides, je vois mal comment on peut extraire le protactinium 233 avec autant de rapidité compte tenu du fait qu'il faut laisser refroidir les combustibles pour arriver à mettre en oeuvre un procédé de séparation chimique. On parle de 3 ans dans des usines comme La Hague ; or le protactinium 233 a 23 jours de période. En définitive je vois mal comment on arriverait à séparer le protactinium 233, si ce n'est dans des systèmes en ligne, c'est-à-dire avec des combustibles liquides, mais c'est hors sujet aujourd'hui.

Mme SENÉ — A partir du moment où un pays se dote de ses installations, il est maître absolu de ce qu'il en fait ou presque. On l'a vu avec l'Irak. A un moment, nous sommes intervenus mais le pays était déjà très enfoncé. Mais au moment où il a commencé sa prolifération, personne n'a réussi à faire d'inspection. De la même façon, l'Inde vient de refuser de signer le traité d'interdiction des essais et nul ne peut intervenir, sauf à dire que c'est bien embêtant.

La lutte contre la prolifération est probablement politique mais, par ailleurs, il faut se demander dans quelle mesure on est capable de livrer du matériel civil qui peut dans tous les cas de figure être utilisé autrement.

Les réacteurs ont besoin de tonnes de matières, mais pour faire une bombe il suffit de quelques kilos, et cela va très vite !

Pr. RUBBIA — Il est certain qu'il n'est pas possible aujourd'hui de concevoir un nucléaire disponible dans n'importe quel pays et dans n'importe quelles conditions.

Beaucoup de pays nous donnent, avec des structures légales, toutes les garanties. Il est important que les pays capables d'utiliser le nucléaire le fassent pour réduire la charge totale sur la planète de la quantité de matière carbonique. Il ne s'agit pas que tous les pays le fassent mais que ceux qui consomment le plus d'énergie le fassent, afin de laisser à d'autres la possibilité d'utiliser les sources d'énergie traditionnelles comme le pétrole.

Il faudrait décider à un certain moment que les pays ayant des problèmes « pathologiques » spécifiques puissent utiliser le pétrole et le gaz naturel que nous n'utilisons pas parce que nous avons une autre solution.

Il ne faut pas dire que tant qu'on ne fera pas du nucléaire bon pour tout le monde il ne faut pas faire de nucléaire. Il est possible de trouver des solutions où seuls certains pays qui pourraient satisfaire au problème de la prolifération pourraient étendre l'utilisation du nucléaire plutôt que d'obliger tout le monde à en faire peu moins.

M. GSPONER — La question posée au sujet de la prolifération est de savoir si de manière intrinsèque il y a une différence essentielle entre un amplificateur d'énergie et un réacteur ordinaire.

La réponse est oui, parce que dans un amplificateur d'énergie vous avez un accélérateur et les neutrons de spallation sont bien meilleur marché, à peu près dans un facteur 10 du point de vue énergétique, pour leur fabrication. Autrement dit, la complexité du système qui permet de produire une quantité de 1 kg de plutonium est inférieure d'un facteur 10 environ. C'est par exemple la charge thermique du système si on utilise un accélérateur à la place d'un réacteur.

Evidemment, ceci concerne le cas où il y a un détournement de l'usage du système qui n'est plus utilisé pour produire de l'énergie. Mais la prolifération c'est essentiellement cela : dans quelle condition peut-on détourner la fonction d'un système ?

Malheureusement, quand on a un accélérateur couplé avec un réacteur sous-critique, ou même sans réacteur sous-critique, on a quelque chose qui est beaucoup plus souple d'usage pour la fabrication du plutonium ou du tritium. C'est pourquoi aux États-Unis en ce moment on est en train de décider que la génération suivante des machines pour fabriquer des substances à usage militaire sera faite d'accélérateurs et pas de réacteurs.

Pr. RUBBIA — Il y a quelque chose qui ne va pas dans les chiffres donnés par M. GSPONER. Quand il dit qu'il est dix fois plus facile de faire des neutrons avec un accélérateur qu'avec la fission, il se base sur le fait que pour faire un neutron avec des protons, il faut comme énergie 25 MeV, mais il dit que la fission produit 200 MeV.

J'ai des difficultés à comprendre parce que l'énergie de la fission est l'énergie que nous recevons avec les neutrons, tandis que dans le système de production, il faut payer de l'énergie pour le faire. La facilité de produire des neutrons avec la fission est beaucoup plus grande que celle de produire des neutrons avec un accélérateur parce que dans un cas il faut payer de l'énergie, dans l'autre cas on reçoit de l'énergie.

M. GSPONER — C'est un point de détail mais ce n'est pas mon propre calcul, c'est quelque chose de connu, les publications sur ce sujet abondent. Pour produire un neutron avec un accélérateur, il faut à peu près dix fois moins de dissipation d'énergie que dans un réacteur de fission.

Maintenant, quand vous êtes dans un système réel, vous avez peut-être un facteur 5 mais, aux États-Unis, c'est l'argument qui est utilisé pour avoir choisi un accélérateur pour la production.

Pr. RUBBIA — Vous ne tenez pas compte de l'efficacité de l'accélérateur.

M. GSPONER — Ce sont les ordres de grandeur qui comptent. Ce sont des résultats finaux tout compris.

Pr. RUBBIA — Je ne peux pas m'engager là-dessus.

M. GSPONER — Regardez mon article paru en 1981, je ne fais que citer des publications faites par des gens à Los Alamos et ailleurs.

M. MAILLARD — Il n'y a pas que les États-Unis, il y a aussi la France. J'ai entendu parler d'un projet TRISPAL, projet d'accélérateur pour fabriquer du tritium. Les réacteurs qui ont été construits dans les années 50 à 60 viennent en fin de course et maintenant les accélérateurs sont envisagés dans les trois pays — la Russie a aussi ce genre d'accélérateur — pour fabriquer le plutonium et le tritium.

Pr. RUBBIA — Pas l'uranium.

M. MAILLARD — Il y a un certain paradoxe à arguer de la non-prolifération quand on parle d'accélérateur et de faire une *joint venture* avec des laboratoires militaires. Je trouve cela assez curieux.

Il y a un problème au niveau de la prolifération qui est qu'il ne faut pas toujours penser en termes de confrontation mais aussi en termes de solidarité. A ce moment-là, la meilleure antidote contre la prolifération est une certaine transparence et des constructions en commun, y compris de réacteurs classiques.

M. GSPONER — Il faut regarder la page 33 du rapport.

M. BIRRAUX — Non, la parole est au Pr. RUBBIA !

Pr. RUBBIA — Les machines dont nous parlons, aux USA ou en Europe, ne sont pas encore des programmes approuvés. Il y a une étude de faisabilité et, autour de 1998, une décision sera prise sur la solution accélérateur. Les deux projets en parallèle sont, d'une part, la possibilité de faire du tritium avec des réacteurs classiques et, d'autre part, la possibilité d'utiliser un système sous-critique pour réduire la quantité de réacteurs. Le choix entre les systèmes n'est pas fait.

Le courant utilisé par la machine, celle de TRISPAL ou celle de Los Alamos, est de l'ordre de 100 mA. Il y a une différence entre le courant utilisé par les projets d'application militaire et les projets plus optimistes que nous faisons avec la production d'énergie. La production d'énergie utilise des accélérateurs considérablement moins puissants que ceux utilisés pour la production de tritium, et cette dimension est extrêmement importante.

A ma connaissance, la situation du tritium n'est pas couverte par un accord de non-prolifération. Cet accord concerne l'uranium, le plutonium, c'est-à-dire les bombes ordinaires. L'addition du tritium qui est nécessaire pour fabriquer des bombes à hydrogène n'est pas couverte par des accords spécifiques de non-prolifération.

Il serait important de s'interroger sur les conséquences si les terroristes décidaient de passer de la bombe thermonucléaire ordinaire à la bombe à hydrogène style Hiroshima. Le danger n'existe pas. On parle toujours du tritium qui représente certainement des développements de technologies plus avancées que les bombes ordinaires, et la préoccupation de la non-prolifération doit se concentrer plutôt sur des bombes simples de style atomique plutôt que sur la possibilité d'en arriver à des bombes thermonucléaires.

M. GSPONER — Concernant l'utilisation de l'accélérateur pour la production du tritium — pour la production du plutonium, c'est la même chose — on peut se référer à la page 33 du rapport annuel CEA 1995.

Pr. RUBBIA — La production mondiale de tritium dans le monde aujourd'hui est de 3 kilos. Ce ne sont pas des quantités importantes. En outre, la section efficace de production de tritium en partant de l'hélium 3 est de l'ordre de 3000 à 4000 barns. Avec ce système, en utilisant une machine de 100 mA, on produit 2 kilos. Il y a donc des facteurs importants dont il faut tenir compte.

La section de capture de neutrons thermiques de la part de l'uranium est de l'ordre de 4 ou 5 barns tandis que la section efficace de capture de l'hélium 3 est de l'ordre de 2500 à 3000 barns. Il y a quand même un rapport de section efficace dont il faut tenir compte. La capture de l'hélium 3 est comparable, la capture l'hélium 6 aussi. Avec cela, on peut construire 1 ou 2 kilos avec un courant de 100 mA.

Un courant de 100 mA est phénoménal pour des accélérateurs. Il faut être réaliste.

Du point de vue intellectuel, il est possible avec des accélérateurs de faire du plutonium directement mais ce n'est pas la façon la plus simple.

M. BIRRAUX — Nous allons stopper la discussion sur les moyens de faire du plutonium militaire, de faire sauter des bombes.

Mme SENÉ — Il y en a sur le marché.

M. BIRRAUX — Il faut savoir quel marché on fréquente.

M. MAILLARD — J'ai fait le rapport, cela fait 70 g de plutonium par jour.

M. BIRRAUX — Je passe au dernier point de l'ordre du jour.

Tout à l'heure, **M. FINON** semblait regretter que l'on oblige à passer par l'incinération des actinides pour avoir une porte ouverte sur les systèmes hybrides. L'opinion du Comité scientifique et technique d'EURATOM n'est pas aussi négative ; je voudrais la remettre en perspective et traduire le point 3 de cet avis :

"Le Comité scientifique et technique ne considère pas qu'il est réaliste de poursuivre le développement de tout le système d'un coup. Ceci impliquerait de développer de nouvelles technologies pour à peu près tous les aspects de la production d'électricité nucléaire : nouveaux systèmes de réacteurs, nouveaux accélérateurs pour piloter ces réacteurs, nouveaux combustibles, nouvelle fabrication de combustible, nouveau système de retraitement du combustible, et nouvelle gestion des déchets."

Je voudrais faire un rapprochement avec une autre citation extraite du rapport de la Commission nationale d'Évaluation, relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs instituée par la loi de 1991 ; évoquant le système hybride dont vous a parlé le **Pr. RUBBIA**, il y est dit en page 32 :

"De tels systèmes ne font l'objet jusqu'à présent que d'études à caractère théorique dont il serait souhaitable qu'elles puissent déboucher sur la création d'un ensemble expérimental à puissance modeste mais significative visant à une première démonstration de l'intérêt d'un tel système".

J'en viens aux plaidoyers faits successivement par M. DÉTRAZ et M. SCHAPIRA qui nous ont dit de privilégier la coopération, de continuer dans un cadre très large les études expérimentales, de participer à un réacteur expérimental ; M. LOISEAUX avait même ajouté : *"On apprend en faisant, disent les physiciens"*.

Toutes les personnes présentes ici ne peuvent pas donner ce soir une réponse signée en blanc sur un engagement de coopération pour des développements ultérieurs. Simplement, nous avons eu la présentation du Pr. RUBBIA ; nous avons eu la remise en perspective à la fois historique et scientifique avec M. BARRÉ, sur tout le passé des réacteurs hybrides, les choix qui avaient été faits il y a 20, 30 ou 40 ans et leur « pourquoi » ; nous avons eu les développements conduits dans le cadre du CEA avec M. SALVATORES ; nous avons eu les développements conduits dans le cadre du CNRS et de l'IN₂P₃.

Aujourd'hui, le débat est extrêmement riche dans les questions qu'il a soulevées, dans les réponses qu'il a déjà obtenues, dans les questions ultérieures qui demeurent. C'est-à-dire que nous sommes vraiment dans un système de recherche.

J'aimerais avoir l'avis des uns et des autres devant toutes ces initiatives qui sont à la fois parallèles, simultanées, mais parfois aussi un peu individuelles ou individualisées.

Ressentez-vous les uns et les autres la possibilité, au vu du Comité EURATOM et de la Commission nationale d'Évaluation, d'envisager des développements qui permettent les synergies entre ce que vous faites chacun dans vos laboratoires et qui pourraient contribuer à une architecture plus cohérente, une démarche plus consensuelle ou plus volontariste, selon que l'on est optimiste ou moins optimiste ?

Nous ne pouvons pas ce soir tirer de conclusions définitives mais est-ce que cette perspective est envisageable par les différents organismes de recherche ici présents ?

M. DÉTRAZ — Nous pouvons imaginer une réponse à votre question de la façon suivante :

- d'une part, participer à des recherches de base, qui sont apparues tout au long de la journée, où des technologies et même des mesures fondamentales sont à faire ;
- d'autre part, nous inscrire dans la perspective de la construction d'installations pilotes dont je ne définirai ni la taille ni le nombre de MW mais qui vise délibérément à s'installer dans une idée d'installation pilote.

Nous avons conscience de façon aiguë de ne pouvoir le faire, et de ne vouloir le faire qu'en coopération forte, déjà au plan national — parce qu'il y a des enjeux très importants pour notre pays — et bien évidemment dans le cadre d'une coopération internationale que le Pr. RUBBIA a déjà largement stimulée.

Pour être un peu plus précis, et ne pas se contenter de dire qu'il faut de la cohérence, de la concertation et des projets communs, je voudrais relever ici le caractère tout à fait positif de l'initiative du ministère de la Recherche qui a mis en place, comme conséquence assez directe des recommandations de la Commission nationale d'Évaluation, un comité de suivi sur les recherches dans ce domaine qui se réunit régulièrement, à son initiative et sous sa tutelle, et qui réunit les organismes concernés. Ce comité commence à aller au-delà du simple exposé par les uns et les autres de la vision que l'on peut avoir sur l'avenir de ces problèmes et des recherches qui sont menées ; il commence, en réponse à une sollicitation ferme prononcée deux fois par la Commission nationale d'Évaluation, à se préoccuper de donner une cohérence à l'ensemble des recherches et à l'impulser.

Nous souhaitons nous inscrire complètement dans ce mouvement, c'est-à-dire participer autant que nous le pouvons à ce travail — nous avons déjà d'assez nombreuses collaborations bilatérales pour que cela puisse avancer assez vite — qui permettra d'avoir une vraie définition d'une politique nationale dans ce domaine. Nous souhaitons aussi nous orienter vers une coopération internationale dans la perspective de la réalisation d'une installation pilote qui permettrait de valider un certain nombre de concepts, de découvrir un certain nombre de solutions et de voir plus loin.

Voilà notre esprit, je ne suis pas sûr que cette réponse vous satisfasse complètement, mais nous travaillons dans ce cadre.

M. BIRRAUX — Je rappelle que le cinquième programme cadre de recherche et développement de l'Union européenne sur lequel la Commission a émis un avis favorable devra être traduit dans les faits.

Les esprits français ne sont pas toujours très familiarisés avec les méthodes européennes, ce qui leur permet souvent d'adresser des critiques qui ne sont pas toujours justifiées. L'Union européenne aime bien qu'il y ait des coopérations entre différents pays. Un projet de recherche porté par un seul pays ou un seul laboratoire ne plaît guère : on aime bien organiser la coopération entre les compétences existantes.

Le programme PHEBUS PF a été subventionné par l'Union européenne parce qu'il n'y avait pas que les Français qui s'y intéressaient mais également d'autres Européens.

M. SCHAPIRA — Une importante conférence internationale a eu lieu sur le problème des systèmes hybrides au cours de laquelle un certain nombre de pays ont émis l'idée d'un projet style prototype qui pourrait se concevoir au niveau européen.

Que peut-on faire pour s'organiser au plan national dans une telle affaire ? Rien ne serait plus improductif que le fait que les deux organismes essentiellement concernés, le CNRS et le CEA, viennent en rang dispersé, chacun avec un système et créant une sorte de cacophonie. Les groupements de recherche sont des structures adaptées à ce genre de réflexion, et c'est le cas de GÉDÉON pour les systèmes hybrides ; ce sont les lieux privilégiés où ces organismes, à travers leurs chercheurs et leurs responsables, discutent de manière contradictoire de différentes options.

Il y a aussi un problème d'évaluation des idées avancées : il faut qu'elles soient évaluées par un système de publications, d'examen par les pairs, et cela ne peut se faire que dans le cadre d'une recherche ouverte.

Les groupements de recherche ont cette capacité, si on joue vraiment le jeu, d'être ce lieu privilégié où l'on va concevoir et réfléchir à des propositions d'un système qui pourrait ensuite être introduit dans le cadre d'une collaboration européenne.

S'agissant du CNRS, nous sommes très proches des systèmes tels que celui proposé par Carlo RUBBIA et nous pensons qu'il faut mettre cela à plat dans les discussions avec nos partenaires. Un groupement de recherche est un bon niveau pour cela.

C'est également le cas des autres groupements de recherche : PRACTIS marche très bien et, pour un certain nombre de recherches dans le domaine du stockage ou de la séparation, joue ce rôle dans lequel les équipes CNRS et CEA coopèrent.

Je ne vois pas pourquoi ce genre de démarche ne pourrait pas être étendu au problème des systèmes innovants.

M. BOULOT — Je voudrais préciser la position d'EDF et rappeler notamment qu'EDF s'est associée et a même été à l'origine du groupement de recherche GÉDÉON. EDF, depuis maintenant quelque temps, s'intéresse à ces systèmes. Il nous semble qu'un certain nombre d'études doivent être faites et nous y participons, notamment pour évaluer leurs performances et leurs possibilités suivant trois thèmes qui ont été largement évoqués aujourd'hui :

- leur potentiel en matière d'incinération ;
- la faisabilité physique et technologique des différents systèmes ;
- la sûreté de ces systèmes.

Quand on aura avancé sur ces trois problèmes, on pourra envisager des installations d'une certaine dimension. Les études sont maintenant lancées.

M. BARRÉ — Vous avez la chance d'avoir dans cette salle les deux co-directeurs du groupement de recherche GÉDÉON, M. SCHAPIRA et M. SALVATORES, et les trois membres du comité directeur que sont respectivement M. DÉTRAZ, M. BOULOT et moi-même. Ceci vous montre bien que la coopération que vous appelez de vos vœux a déjà commencé.

La question que vous posiez se rapportait au fait de savoir s'il fallait rester au plan national ou s'il y avait un effort plus international, et si on était mûr pour passer à la phase de démonstration.

M. BIRRAUX — Est-on mûr pour aller plus loin dans la perspective d'une phase de démonstration ?

M. BARRÉ — Ma réponse est oui, mais je vous rappelle les chiffres qui ont été cités.

Hors études spécifiques sur les accélérateurs de haute intensité, c'est déjà un effort de 23 personnes de notre côté et de 15 personnes pour le CNRS. Ce ne sont pas simplement des études embryonnaires, il y a déjà un effort considérable qui commence à se coordonner, c'est vrai, et cela correspond à la volonté d'aller plus loin et de se préparer à une phase ultérieure qui me semble incontournable mais probablement pas mûre aujourd'hui.

Mme LANGEVIN — Je profite d'avoir pour voisin un représentant de la COGEMA avec qui j'ai échangé quelques idées. Je crois comprendre qu'à travers le CEA, la COGEMA et FRAMATOME ne sont pas complètement coupés de ce problème. Il n'empêche qu'au stade de questions qui semblent être très en amont de réalisations pratiques, je me pose la question de savoir (quand vous parlez de coordination au plan national) s'ils ont une voie plus directe pour avancer dans ce genre de problèmes. N'y a-t-il pas des sujets sur lesquels ils sont directement très compétents et pour lesquels un dialogue plus direct serait intéressant ?

M. NIGON — Nous avons une activité industrielle qui se trouve très en aval par rapport à la situation de recherche qui se déploie actuellement sur ces sujets.

Nous avons par ailleurs, pour le cycle du combustible en général (retraitement et amont du combustible jusqu'à la fabrication), des accords de recherche et développement avec le CEA et des collaborations avec les autres partenaires, EDF et FRAMATOME.

Nous sommes actuellement en discussion pour définir la précision avec laquelle nous allons collaborer sur des sujets concernant l'application de la R&D dans le cadre de la loi de 1991. Nous définissons comment aujourd'hui les problèmes de séparation poussée, les problèmes d'incinération d'actinides et les problèmes de traitement des déchets seront vus en collaboration quadripartite dans le cadre de la loi de 1991.

Nous avons des programmes de R&D qui, avant même que le cadre d'une collaboration soit définitivement figé, font l'objet d'une participation de la COGEMA. Nous sommes intéressés.

Pour ce qui est de l'amplificateur d'énergie, le combustible ne différant pas de celui que l'on met dans un réacteur classique, et le combustible thorium étant quelque chose aujourd'hui un peu loin devant nous, nous n'avons pas d'étude spécifique.

Nous partageons tout à fait les avis émis par le CEA sur l'intérêt de ces sujets notamment dans le cadre de l'incinération des actinides dans un premier temps.

M. KEMPF (La Recherche) — Il me semble qu'il existe un hiatus entre des intervenants français qui s'intéressent au système hybride pour la transmutation et l'ambition de M. RUBBIA qui est quand même de produire de l'électricité.

Autant je comprends que la science doit être prudente — et la prudence ne consiste pas forcément à avoir le pied sur le frein — autant je me demande comment on fait avancer correctement une voiture quand les uns veulent tourner le volant vers la gauche et les autres vers la droite.

Je voudrais savoir si l'on peut concevoir un système hybride en phase de prototype sans être d'accord sur l'objectif final. Est-ce que l'on peut construire l'appareil et ensuite voir quelle sera sa destination ? Combien pourrait coûter un tel prototype ? Éventuellement à quelle date ?

M. RUBBIA a dit que ce système hybride pourrait être opérationnel vers 2015, au moment du renouvellement de la génération actuelle des réacteurs, et M. BARRÉ semblait dire que 2015 était vraiment très tôt. Je voudrais demander au Pr. RUBBIA son opinion sur le développement actuel du programme des réacteurs du futur ?

Pr. RUBBIA — Je voudrais « réserver » le chiffre qui a été avancé après que l'on aura mieux défini ce que l'on peut faire et ce qui existe. Je ne crois pas que l'on puisse lancer un tel chiffre, il faut faire un travail précis et regarder les possibilités. C'est quelque chose qui demande un certain temps. Ce sera fait.

Peut-on faire à la fois une machine fonctionnant avec du plutonium ou du thorium ? La réponse est oui. Le système permet d'utiliser des combustibles différents. Je ne vois pas aujourd'hui de raison majeure pour dire qu'une machine faite pour incinérer ne pourrait pas contribuer utilement au problème de la production de l'énergie et vice versa.

Est-ce que trois ans sont suffisants pour le projet ? Trois ans, c'est le temps qu'il faut pour la construction de l'accélérateur et la mise au point de la partie fenêtre, etc. Dans une période de trois ans, on peut mettre au point la partie qui n'est pas strictement nucléaire. Le temps nécessaire pour réaliser la partie nucléaire dépend des conditions locales, des licences qui sont très différentes d'un pays à l'autre, etc.

Dans ces conditions, je crois que les gens qui sont préposés à ce type de travaux seraient plus compétents que moi pour estimer le temps nécessaire pour les autorisations pour amener du thorium, du plutonium et de l'uranium dans des conditions favorables.

Le temps pour le juridique dominera le temps pour le technique.

La partie la plus innovante de ce programme est l'accélérateur. Si nous pouvons nous convaincre que l'accélérateur peut donner le courant qu'il faut, dans les conditions qu'il faut et qu'il n'est pas épisodique dans son fonctionnement, nous ferons un grand pas en avant.

M. BARRÉ — Il me paraît clair qu'au stade d'un pilote de démonstration, la même démonstration peut servir, quel que soit l'aiguillage extérieur, à une machine dédiée à la transmutation ou une machine dédiée à l'énergie.

M. BACHER — A ce stade de la discussion, j'éprouve une certaine surprise à entendre deux discours, l'un sur la nécessaire recherche sur un spectre d'options relativement large et l'autre sur un prototype.

Il me semble qu'il y a entre les deux ce qu'on appelle en matière d'ingénierie une étude de faisabilité, qui a pour objectif de s'assurer de la faisabilité technique des actions proposés et également de leurs perspectives économiques. Or cette étude de faisabilité ne peut se faire que lorsque le promoteur du projet a suffisamment figé un certain nombre d'options, pour que l'on puisse s'assurer que les bons compromis ont été faits entre tel et tel impératif.

La même question aurait été posée il y a deux ans, on aurait dit qu'on n'en était pas là puisque le concept lui-même était en train d'évoluer de réacteur thermique à réacteur rapide. Aujourd'hui, la situation est peut-être différente, et il appartient au promoteur du projet de dire s'il en est arrivé à un stade de réflexion suffisant pour qu'une telle étude de faisabilité soit entreprise ou si, au contraire, il est nécessaire de poursuivre un certain nombre de recherches sur l'accélérateur, ou la fenêtre, ou autre chose, pour qu'il y ait un concept cohérent sur lequel on puisse fonder une réflexion.

Ce qui me paraît manquer dans ce débat est le fait de savoir où se situerait une telle étude de faisabilité et qui pourrait la faire.

M. MAILLARD — Il me semble qu'en l'état actuel des choses le système n'est pas assez figé, il est encore du ressort de la recherche fondamentale. Seule une approche diversifiée pourra résoudre le problème de l'évaluation, qui ne peut être qu'indépendante, contradictoire et critique.

Autant la coopération à ce niveau semble naturelle en ce qui concerne les données nucléaires et les éléments fragmentaires ou modulaires, autant sur le concept général il me semble que l'on est encore à un stade où l'approche doit être complètement diversifiée et ouverte, au risque sinon de passer à côté de voies qui pourraient s'avérer performantes.

M. PRONOST — Il a été avancé le chiffre de 4 centimes par kWh.

M. BIRRAUX — Nous sommes au stade de la recherche fondamentale : il n'est pas possible d'évaluer aussi précisément le coût de l'électricité produite dans l'Amplificateur d'énergie. Ne mettons pas les idées dans les « accélérateurs d'idées » et l'économie dans « l'accélérateur d'économie » !

M. PRONOST — Je voulais savoir quel était la partie des coûts relative à l'investissement pour comparer à du nucléaire classique.

M. BIRRAUX — On ne sait pas ! On est au point de la recherche fondamentale.

M. DÉTRAZ — Quand on dit « recherche fondamentale », cela ne veut pas dire forcément recherche papier, idées éthérées, cela veut aussi dire expérience. Beaucoup de physiciens présents dans cette salle le savent.

Je pense qu'il n'y a pas de contradiction avec le fait de réaliser des éléments allant jusqu'à un pilote pour éclairer toutes les questions que Pierre BACHER a justement soulevées et qui se posent effectivement. Mais celles-ci n'interviennent et ne doivent être définies que lorsqu'on commence à parler d'une filière industrielle économiquement viable. Nous sommes dans un processus où la recherche doit dépasser les études papier et les études tellement génériques qu'on les proclame très en amont de tout le reste.

Nous devons commencer à construire et faire des expériences comme nous le faisons par ailleurs.

M. DESBORDES — Il n'y a pas eu un seul mot sur l'acceptabilité des gens du nucléaire. Est-ce qu'en 2005, 2010, 2020, on aura terminé le cycle du nucléaire tel qu'il est aujourd'hui ? Est-ce que les gens accepteront le nucléaire ? Cela fait partie d'un débat qui n'avait pas sa place ici, mais il n'était pas présent non plus dans l'esprit des gens. Je trouve cela regrettable quand on est un scientifique et qu'on bénéficie pour la recherche des biens publics des citoyens.

M. BIRRAUX — Dans notre débat nous étions véritablement au cœur des choix sur la recherche fondamentale, à partir des calculs et des expériences qui ont été menés par le Pr. RUBBIA et ses équipes au CERN. Je les remercie chaleureusement pour nous avoir fait partager, d'une manière accessible — mais je ne dis pas que je vous ai bien suivi dans toutes les cavités des accélérateurs ! — l'état actuel des connaissances.

Je crois que le grand mérite de cette audition est de ne pas avoir figé les choses, de les avoir placées en perspective avec toutes les options qui restent ouvertes, avec des difficultés qui n'ont pas été cachées, avec des interrogations qui demeurent pour les uns et les autres.

C'est peut-être en cela que l'Office parlementaire était le mieux placé pour organiser cette audition puisque sa vocation est d'éclairer les choix du Parlement, et par conséquent du gouvernement, en amont des décisions à prendre.

Les décisions ne sont pas prises, les choses ne sont pas figées.

Je remercie tous les intervenants d'avoir contribué à cette ouverture pour que les paramètres des choix, en l'état actuel des connaissances, c'est-à-dire aujourd'hui 21 novembre, puissent être portés à la connaissance du gouvernement qui était représenté en qualité par deux ministères, le ministère de la Recherche et le ministère de l'Industrie.

Je terminerai par un point qui me paraît être extrêmement important pour la vie de nos méthodes de travail. Je ne pense pas que, lorsqu'en 1983 nous avons débattu du texte créant l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, les parlementaires présents et ceux qui sont intervenus à ce moment-là avaient imaginé un instant que l'on pourrait tenir une telle audition dans l'enceinte du Parlement, où l'on discute des éléments les plus avancés de la recherche fondamentale de la physique nucléaire.

Aujourd'hui, la participation de vous tous montre à la fois l'intérêt pour le Parlement d'organiser ce type de rencontre, sa capacité à les organiser et l'utilité d'une telle démarche pour répondre à une demande sociale extrêmement forte.

Pr. RUBBIA, Mesdames, Messieurs, je vous remercie d'avoir participé à cette audition. A travers votre présence vous avez fait honneur au Parlement français. *(Applaudissements)*

(La séance est levée à 18h40)