



## LE PROGRAMME SILVA

### SOMMAIRE

- LE PROGRAMME SILVA
- ÉTAT D'AVANCEMENT TECHNIQUE



7 mars 1996

## LE PROGRAMME SILVA

Le procédé SILVA de « Séparation Isotopique par Laser de la Vapeur Atomique d'uranium » est un système innovant de production de l'uranium enrichi, combustible des réacteurs électronucléaires. Son énorme potentiel vient de sa sélectivité. Il s'agit d'un programme de recherche ambitieux, faisant appel à des technologies avancées en pleine évolution. L'objectif est de diviser par trois les coûts de production par rapport à ceux des usines actuelles ; son industrialisation est envisagée pour le début du siècle prochain.

### 1 - LES ENJEUX

L'enrichissement de l'uranium occupe une position clé dans la filière nucléaire. Les enjeux sont considérables :

- *enjeu technique* d'abord car la technologie est sophistiquée et peu de pays la maîtrisent ;
- *enjeu politique* en termes d'indépendance énergétique nationale et de contrôle de la prolifération nucléaire ;
- *enjeu économique* enfin, car le marché mondial est important (25 milliards de francs par an) et l'enrichissement représente presque 10 % du coût du kWh. L'offre mondiale est principalement concentrée chez quatre producteurs seulement, dont la société Eurodif pour le quart, et les électriciens ont besoin d'un approvisionnement stable et sûr à long terme.

La production mondiale est la suivante (chiffres 1993) :

USEC (United States Enrichment Corporation)	12	MUTS*
Russie	10	MUTS
Eurodif	7	MUTS
URENCO	2,5	MUTS
JNFL (Japon)	0,5	MUTS
<b>TOTAL</b>	<b>32</b>	<b>MUTS</b>

Un élément nouveau pèse en outre sur ce marché : la réduction des stocks d'uranium militaire russes et américains, qui vient augmenter les quantités disponibles sur le marché.

---

\* UTS : Unité de Travail de Séparation isotopique. 4,2 UTS sont nécessaires pour obtenir 1 kg d'uranium enrichi à 3,2 % à partir de 6,4 kilos d'uranium naturel. Il faut environ 100 000 UTS pour faire fonctionner pendant un an un réacteur de 900 MWe.

La très grande sélectivité des technologies d'enrichissement par laser, entièrement nouvelles, ouvre la voie à des usines compactes, modulaires et consommant peu d'énergie. Elles pourraient changer radicalement ce marché par des coûts très bas, inférieurs aux coûts marginaux des usines actuelles.

**Deux concurrents principaux développent un procédé analogue à SILVA : les Etats-Unis et le Japon.**

Le programme américain AVLIS (Atomic Vapor Laser Isotopic Separation), avec un budget qui a atteint le triple du budget français, dispose d'une avance sensible (5 ans). Les Etats-Unis auront à renouveler complètement au début du siècle prochain des moyens de production déjà anciens (utilisant le procédé par diffusion gazeuse), qui représentent la moitié du potentiel mondial, et chercheront à reconquérir les parts de marché perdues, notamment au profit d'Eurodif.

Parallèlement, la zone Asie/Pacifique en pleine croissance verra ses besoins en uranium enrichi doubler dans les 15 prochaines années. Ayant atteint un niveau voisin de celui de la France sur SILVA, le Japon pourrait mettre en oeuvre un procédé avancé d'enrichissement dans la prochaine décennie, mais ne semble pas avoir de visées exportatrices dans ce domaine.

Il existe par ailleurs d'autres procédés d'enrichissement concurrents de SILVA : l'ultracentrifugation (qui repose sur une forte différence de pression provoquée par la rotation à grande vitesse d'un bol contenant de l'hexafluorure d'uranium), et la séparation par laser de molécules d'hexafluorure d'uranium (à la différence de SILVA qui agit sur des atomes d'uranium). Ces procédés sont développés pour le premier en Europe (Allemagne, Royaume-Uni, Pays-Bas), au Japon, et en Russie ; pour le second, au Japon et en Afrique du Sud.

Les nouveaux procédés pourraient ainsi représenter une part significative de la capacité mondiale de production à partir de 2010. Même si la société Eurodif dispose d'une usine aujourd'hui moderne et performante, il sera alors probablement nécessaire de renforcer l'industrie française d'enrichissement afin de maintenir sa position, voire de capter de nouvelles parts d'un marché en croissance. Cela pourrait se faire en remplaçant progressivement l'usine Eurodif, qui aura alors trente ans, par une usine moderne et compétitive. C'est l'objectif du CEA et de Cogema : tous les efforts sont concentrés depuis 1985 sur le programme SILVA, dont les qualités (grande sélectivité, obtention des performances séparatives en une seule étape) ont déjà été démontrées dans les installations de Saclay et Pierrelatte.

## **2 - PRINCIPES DU PROCÉDÉ SILVA**

### **Bases physiques : photoionisation sélective**

Le procédé SILVA utilise la différence entre les fréquences d'excitation des couches d'électrons (transition électronique) des isotopes d'un même élément. Ainsi, la lumière émise par un laser peut être exactement accordée sur ces fréquences, provoquant l'excitation de l'isotope choisi, en l'occurrence l'uranium 235. Cette excitation conduit à l'ionisation de l'atome ; les ions sont ensuite séparés par un champ électrique et recueillis sur des collecteurs appropriés. La sélection des fréquences laser les plus favorables à la séparation est importante pour plusieurs raisons :

- le faible écart entre les fréquences d'excitation des deux isotopes,
- l'étroitesse de la bande d'absorption de la lumière laser,
- la nécessité de trouver une interaction forte entre la lumière et les atomes d'uranium 235.

La méthode de séparation utilisée dans SILVA est particulièrement sélective. Elle évite la répétition de l'opération nécessaire dans les techniques de diffusion gazeuse et de centrifugation, toutes deux basées sur l'écart de masse entre les deux isotopes. Il faut 1400 étages à Eurodif pour aboutir au résultat obtenu dans SILVA en une seule opération.

### Découpage fonctionnel du procédé SILVA (voir schéma en annexe)

Une installation de séparation isotopique par laser comprend :

- une chaîne de lasers (lasers pompes et lasers à colorant) émettant des pinceaux lumineux de longueurs d'onde parfaitement accordées qui portent l'uranium à l'état ionisé,
- un séparateur dans lequel l'uranium est vaporisé.

La vapeur est éclairée par la lumière laser qui se compose de plusieurs fréquences mélangées, l'isotope 235 de l'uranium est ionisé sélectivement et extrait par un champ électrique. Les deux flux d'uranium, enrichi et appauvri, sont recueillis séparément dans des lingotières.

#### a) Les lasers

Pour être ionisé, l'atome d'uranium 235 doit recevoir une énergie au moins égale à 6,18 électronvolts, énergie qui peut être fournie par trois longueurs d'onde (apportant chacune 2 électronvolts environ) situées dans le domaine du rouge orangé. Cette possibilité, dite « à trois étapes », est actuellement utilisée. Toutefois, une fraction non négligeable des atomes d'uranium produits par la vaporisation étant à un niveau légèrement supérieur au niveau fondamental (niveau métastable), on peut ajouter une longueur d'onde supplémentaire pour lui faire franchir la première étape. Dans un schéma à trois étapes, trois ou quatre longueurs d'onde doivent donc être fournies. Du choix de ce mélange de lumières, appelé séquence de photoionisation, vont dépendre le type et la quantité d'unités laser à mettre en service et globalement la puissance laser nécessaire à la production d'uranium enrichi. Ces choix sont donc d'une grande importance car ils conditionnent dans une large mesure l'économie du procédé.

L'énergie nécessaire au fonctionnement du système est apportée par des lasers à vapeur de cuivre, qui ont été choisis pour leur fonctionnement à cadence élevée (5000 éclairs par seconde) et leurs possibilités d'extrapolation en puissance. Ces lasers, qui émettent des photons d'énergie fixe, alimentent ou « pompent » optiquement des lasers à colorant qui émettent des photons à une longueur d'onde très exactement réglée sur l'énergie d'ionisation de l'uranium 235.

Une chaîne laser comprend :

- une partie puissance, constituée d'un ensemble de « bras » (oscillateur et amplificateurs) laser à vapeur de cuivre (LVC),
- une partie ajustement de l'énergie des photons sur la « couleur » choisie, constituée de « bras » (oscillateur et amplificateurs) laser à colorant.

Les pinceaux lumineux sont ensuite superposés pour donner un faisceau unique (multiplexage spectral) qui est dirigé vers le séparateur.

### ***b) Le séparateur***

Pour être ionisés par la lumière laser puis séparés, les atomes d'uranium doivent être sous forme de vapeur. Pour cela l'uranium métal, placé dans un creuset et bombardé par un faisceau d'électrons à haute énergie, est vaporisé à très haute température (plus de 3000° C).

Le faisceau d'électrons, issu d'un canon à bombardement électronique situé sous le creuset, est recourbé vers la surface du bain d'uranium grâce à l'action d'un champ magnétique. Le canon est alimenté en haute tension continue (plusieurs dizaines de milliers de volts).

La vapeur évolue dans une chambre à vide, le séparateur, où les atomes d'uranium 235 photo-ionisés sont séparés de l'uranium 238, resté à l'état neutre, par un champ électrique. Le séparateur joue un quadruple rôle :

- confinement général de la vapeur d'uranium,
- définition précise des zones réservées à l'interaction entre la vapeur et les photons porteurs de l'énergie lumineuse,
- condensation en phase liquide des flux enrichi et appauvri en uranium 235,
- retour au creuset de l'uranium condensé qui n'a pas interagi avec les photons (reflux).

La conception du séparateur doit prendre en compte un fonctionnement à température élevée en présence de tensions électriques et d'un métal liquide et corrosif. Ces contraintes de température et de corrosion avec des débits importants dans le séparateur (des centaines de kilogrammes d'uranium évaporés par heure dans l'usine), ont conduit à la réalisation de structures de collectage et de ruissellement dans des matériaux à base de carbone, de céramiques et de matériaux réfractaires. Ces systèmes constituent l'un des sujets principaux de recherche et de développement du procédé SILVA.

## **3 - AXES DE RECHERCHE**

### **Plan à moyen terme CEA-Cogema 1993-1997**

La phase 1993-1997 aboutira à la démonstration de la faisabilité technique et économique du procédé. Elle doit montrer que les connaissances acquises sur l'ensemble des processus physico-chimiques et leur mise en oeuvre permettent, sur la base d'expériences intégrées (c'est-à-dire mettant en jeu simultanément des photons et de la vapeur d'uranium) et d'extrapolations validées dans des expériences spécifiques, de concevoir une usine industrielle et d'en préciser les conditions d'exploitation (les teneurs en uranium 235 visées sont 5 % pour le produit et 0,2 % pour le rejet).

Une première génération de composants aura été expérimentée individuellement à une échelle proche de la taille usine ( $\approx 1/2$  ou plus) et on aura fait la preuve de leur aptitude à fonctionner aux performances nominales retenues dans l'analyse économique. D'autre part, les règles de dimensionnement seront maîtrisées.

Les résultats attendus au cours de cette phase sont les suivants :

- spécifications générales du procédé, évaluation technico-économique ;
- solution de référence pour chacun des composants, reposant sur des essais spécifiques ;
- fonctionnement intégré des systèmes laser et séparateur pendant plusieurs dizaines d'heures dans l'installation ASTER (Atomes Séparés par des Techniques d'Evaporation et de Rayonnement);
- fonctionnement d'une cellule unitaire de séparation dans des conditions représentatives d'une usine (à la cadence laser près) ;
- estimation des progrès technologiques futurs (facteurs de progrès).

Le programme de recherches se compose de sept sous-programmes, comportant chacun en moyenne un jalon principal par année :

- études système
- lasers
- séparateur
- matériaux
- assemblage - intégration
- investissements
- gestion des matières

### Grandes échéances

La disponibilité du bilan technico-économique en 1997 est un objectif prioritaire. Récemment révisé, le plan à moyen terme répartit le programme entre différentes démonstrations avec un échéancier qui est parfaitement suivi à ce jour. Les deux ans à venir sont donc caractérisés par l'effort déterminant porté à l'obtention de ces démonstrations grâce aux nouvelles installations.

1996 : « démo matériaux » : contrôle de la tenue des composants constitutifs des séparateurs en présence d'uranium liquide sur de longues durées.

1996 - 1997 : « démo séparation » : obtention locale, dans un secteur limité de l'espace, avec une vapeur représentative, des performances d'enrichissement, d'appauvrissement et de production recherchées.

1996 - 1997 : « démo SOP » (Systèmes Optiques Photons) : vérification sur maquette des performances d'éclairement permettant d'obtenir le rendement d'ionisation voulu dans un séparateur.

1997 : « démo photons » : maîtrise du fonctionnement d'ensemble d'une chaîne lasers.

1997 : « démo source » : maîtrise des performances en débit et de la stabilité de la source vapeur d'uranium.

1997 : « démo flux » : maîtrise de la gestion de la vapeur et des trois flux d'uranium liquide condensés sur les parois d'un module (reflux, uranium enrichi, uranium appauvri).

### Collaborations

Le procédé SILVA met en jeu des technologies de pointe (optique, lasers, électronique de puissance, matériaux ...). Les composants sont développés en collaboration avec des industriels spécialistes de ces technologies : CILAS, THOMSON, SAGEM, MATRA, BERTIN, GEC-ALSTHOM, groupe SNECMA... Des partenariats industriels ont ainsi été mis en place très tôt. L'assemblage fait appel au travail d'ingénieries.

Au CEA même, le projet SILVA, principalement traité à la Direction du Cycle du Combustible, sollicite également d'autres directions opérationnelles (Direction des Réacteurs Nucléaires : modélisation numérique de l'évaporation à Saclay, réalisation de composants à Cadarache ; Direction des Technologies Avancées : étude et essais de matériaux à Grenoble et Saclay ; Direction des Sciences de la Matière : photophysique des colorants à Saclay). Il emploie au total 430 personnes.

### 4 - MOYENS

#### Effectifs, budget

L'évolution des dernières années est la suivante :

	1994	1995	1996
budget (MF)	446	469	453
- dont : investissements (MF)	(72)	(74)	(53)
effectif	430	431	430

Le budget 1996 marque une diminution, qui provient de l'achèvement des investissements ASTER. Le financement du programme est partagé également entre le CEA et Cogema, dans le cadre d'un accord de collaboration en recherche et développement entre les deux partenaires.

#### Principaux investissements

L'installation ASTER de Saclay a coûté 207 millions de francs (hors dépenses de personnel CEA, aux conditions économiques de 1991), dépensés entre 1991 et 1996. Sa réalisation est conforme au calendrier prévu à la fin de 1992 (démarrage de l'ensemble de la chaîne laser en décembre 1995, début des essais thermiques du séparateur ALDEBARAN en décembre 1995, essais en uranium prévus pour l'été 1996).

*Les nouveaux bancs technologiques de Pierrelatte* consacrés à l'étude de la source ont coûté 20 millions de francs chacun ; décidés fin 1989, ils ont été mis en service en 1993 (APIS, ANUBIS) et 1995 (AMON). Ils ont rendu possibles des accroissements importants du rendement de vaporisation de l'uranium.

## 5 - PERSPECTIVES AU-DELÀ DE 1997

Le programme au-delà de 1997 doit fournir tous les éléments permettant de prendre après le tournant du siècle la décision de construction du premier outil industriel SILVA. Il appartient à la Cogema d'en préciser la capacité (1,5 MUTS/an ?) et de définir les modalités de fonctionnement combiné de l'usine actuelle Eurodif et de cette usine SILVA.

Les objectifs des deux partenaires CEA et Cogema pour la période qui commencera en 1998 sont la réduction des coûts à un niveau inférieur à celui obtenu en 1997, et la réduction des incertitudes sur ces coûts (amélioration de la fiabilité des composants). Cette phase comportera cinq types d'actions :

- optimisation du procédé (expérience PELLEAS dans ASTER)
- exploitation en longue durée des séparateurs (banc d'endurance) et des lasers, maintenance
- traitement des matières en amont et en aval du procédé SILVA, gestion des déchets et des matériaux de structure
- études système (ingénierie, économie, sûreté).
- développement de composants technologiques particuliers.

Cette phase serait elle-même suivie par une phase d'industrialisation, à décider par Cogema en fonction des résultats apportés par la réduction des coûts et des données économiques du moment (marché mondial de l'enrichissement, état de la concurrence).





7 mars 1996

## Etat d'avancement technique

### Physique du procédé

La connaissance précise de la physique des phénomènes qui rentrent en jeu dans le procédé est une condition indispensable pour permettre à la fois la qualité des extrapolations et l'optimisation du fonctionnement du procédé. Chaque domaine est étudié dans des installations spécifiques, les résultats étant interprétés par des codes et des modèles. On peut ainsi citer :

- . la spectroscopie de l'uranium, qui permet l'optimisation des séquences d'excitation et de photoionisation, facteur important de réduction des coûts en permettant la baisse de l'investissement laser,
- . l'étude de la propagation de la lumière, en interaction avec les atomes d'uranium, particulièrement dans les conditions d'éclairement qui seront celles existant dans les séparateurs d'une usine de production : c'est l'objectif de la démonstration "Systèmes Optiques Photons",
- . les études concernant l'évaporation par bombardement électronique et la structure des jets de vapeur d'uranium ainsi générés,
- . la physique des plasmas en liaison avec l'extraction des ions,
- . les mécanismes de condensation et d'écoulement de l'uranium,
- . l'optimisation du fonctionnement de l'amplification sur les lasers à colorant, en utilisant toute la puissance de pompage de l'installation ASTER, dans le cadre de la démonstration de production de photons.

La faisabilité scientifique a été démontrée en 1991. Depuis cette date, un nombre important de résultats ont été obtenus à la fois sur la maîtrise du procédé et sous forme de percées technologiques. La sélectivité de SILVA pour l'uranium de retraitement a été confirmée.

### Intégration

Ainsi on dispose aujourd'hui d'une conception innovante et efficace des structures internes du séparateur. On examine comment l'addition d'autres éléments à l'uranium peut améliorer les performances du séparateur. Enfin, l'utilisation de fibres optiques a apporté une grande souplesse dans la conception et la mise en oeuvre du système laser.

On termine actuellement à Saclay l'installation ASTER (Atomes Séparés par des Techniques d'Evaporation et de Rayonnement), qui regroupe des chaînes laser et des séparateurs, conformément au planning et au devis prévus fin 1992. La puissance lumineuse totale de la chaîne de lasers à vapeur de cuivre (ASTER-LVC) est de plus de 1 500 W, avec des modules unitaires de l'ordre de 100 W. Elle permet le pompage optique des chaînes de laser à colorant (ASTER-COL), dont les faisceaux, après mélange et aiguillage, rentrent dans un des séparateurs.

ASTER regroupe deux séparateurs :

- le plus petit, ANDROMEDE, fonctionne depuis 1987, associé jusqu'en 1994 avec une chaîne laser de faible puissance (et qui constitue aujourd'hui la partie basse puissance de la chaîne laser d'ASTER). Ce séparateur, sur lequel plus de 120 essais ont été effectués, recueille l'uranium sous forme de dépôts solides. Il a, entre autres, permis de montrer, sur des quantités de matières de quelques grammes à quelques dizaines de grammes, la faisabilité scientifique du procédé avec notamment l'obtention d'uranium enrichi à plus de 5 %. Une expérience de ce type va être faite avec la nouvelle chaîne laser, montrant qu'on peut obtenir cet enrichissement en extrayant une grande partie de l'uranium 235 (teneur de rejet inférieure à 0,2 %),
- le nouveau séparateur, ALDÉBARAN, sera mis en uranium au milieu de cette année 1996. Il intègre toutes les fonctions du procédé, dont la gestion de l'uranium en phase liquide. Il produira quelques kilogrammes d'uranium enrichi en quelques dizaines d'heures, à différentes teneurs isotopiques sur les fractions enrichies et appauvries : avec l'essai sur ANDROMEDE, ces expériences constituent la démonstration des performances séparatives prévue en 1996-1997. Après 1997, ce séparateur, dont le débit de production sera fortement accru, sera un des outils essentiels pour permettre l'optimisation économique du procédé. Il est à noter que la taille de ce séparateur est voisine de celle d'un module de production d'uranium enrichi permettant d'alimenter une tranche nucléaire.

**Séparateur**

A Pierrelatte, la mise en oeuvre de nouveaux bancs appuyée sur une démarche de modélisation a permis une amélioration spectaculaire des performances technologiques. Le débit d'évaporation de l'uranium métal est étudié sur les bancs d'essais APIS, ANUBIS, AMON.

- L'évaporateur APIS a pour vocation l'optimisation du rendement d'évaporation. Depuis sa mise en exploitation en 1993, les essais réalisés sur ce banc ont permis de multiplier par cinq les débits d'uranium évaporé.
- L'évaporateur ANUBIS, de plus faible puissance, se consacre plus spécifiquement à l'étude des additifs dans les bains d'uranium à évaporer.
- Quant à l'évaporateur le plus puissant, AMON, il est dédié aux études technologiques sur les canons à électrons de la taille de ceux prévus dans une usine. Il validera la gestion de très puissants faisceaux électroniques depuis le canon jusqu'à l'impact dans le bain d'uranium liquide à très haute température. L'instrumentation et le pilotage d'un évaporateur seront optimisés sur ce même banc. Après 1997, AMON sera converti pour démontrer la fiabilité des solutions retenues.

Les bancs MAEVA et HORUS, plus vastes, permettent les études de gestion des différents flux d'uranium liquide et des écoulements associés. Une démonstration sur MAEVA doit prouver notre capacité à gérer des quantités industrielles d'uranium liquide pendant des durées significatives. Une circulation satisfaisante des flux de matière liquide vient d'être validée sur l'évaporateur MAEVA ; le composant extracteur, isolé, a démontré ses capacités sur l'évaporateur HORUS.

Les structures de confinement et de gestion du métal liquide, mais aussi les éléments extrayant les ions d'uranium 235 sont sujets à une très forte corrosion par l'uranium liquide. Le choix des matériaux s'avère délicat selon que les fonctions à assurer sont contraintes par des efforts ou des tolérances exceptionnels. Ce choix, étayé par des expériences, fait donc l'objet d'une troisième démonstration. L'installation CORDY, adaptée pour fonctionner sur plusieurs centaines d'heures donc en soutirant le liquide pour réduire la quantité d'uranium dans la machine, est affectée à la qualification en conditions de service, des matériaux des composants du séparateur.

La viabilité de SILVA repose aussi sur la production d'une très faible quantité de déchets. Sur la base de ce postulat, des études importantes de recyclage des structures internes des évaporateurs sont en cours à Pierrelatte. Des procédures sont en cours d'essai. Elles impliquent un four de grandes dimensions, ARUS, qui permet de traiter la petite quantité de résidus et de réutiliser par la suite les parties internes des évaporateurs.

### Lasers

Le procédé SILVA nécessite des chaînes laser de très fortes puissances. Cette énergie est fournie par des modules LVC, eux-mêmes très puissants, qu'il convient de coupler ensemble. Ces modules sont développés par la société CILAS. Un module intégré de 400 watts a été recetté avec succès. Ces systèmes complexes auront à fonctionner quasiment sans interruption. Une démonstration de la maîtrise de ce fonctionnement pour un ensemble limité de LVC de puissance est à réaliser pour 1997.

A un niveau inférieur de puissance, la chaîne laser C100 installée à Pierrelatte a déjà démontré notre capacité à maintenir une chaîne complète, (LVC et colorant), en fonctionnement automatique plusieurs centaines d'heures. Cette chaîne laser a qualifié les composants optiques "basse puissance" et a mis en évidence les difficultés propres à la fourniture d'un faisceau de haute qualité. Les modules lasers LVC la constituant ont une puissance unitaire de 120 W.

Une nouvelle chaîne complète, C500, dont la partie LVC est en cours de montage, a l'ambition de fournir un faisceau de haute qualité, pour l'une des couleurs ou longueurs d'onde du procédé, mais à un niveau de puissance usine. Cette chaîne sera utilisée en endurance et permettra la qualification des optiques pour les faisceaux de puissance.

Des résultats intéressants ont été obtenus sur les lasers à colorant (rendement de conversion) d'une part, les lasers à solide d'autre part.

Plusieurs systèmes optiques de couplage entre les lasers et les séparateurs sont aussi à l'étude, et, selon les options, ils sont réalisés à Pierrelatte ou à Saclay.

### Technico-économie

Une évaluation technico-économique du procédé a été réalisée conjointement par Cogema et le CEA.

Les études dans ce domaine reposent sur deux volets :

1. *La simulation globale du procédé*, qui utilise un code général (le code LACAN) qui décrit toutes les fonctions du procédé et qui s'appuie sur les modélisations de chaque phénomène physique. Ce code est utilisé, entre autres :

- pour le dimensionnement des démonstrations de séparation, l'interprétation détaillée de ces expériences étant faite grâce aux modèles de physique,
- pour le calcul des dimensions et des performances des usines de production d'uranium enrichi par SILVA.

2. *Les études de coûts* sont effectuées à partir des images d'usine ainsi calculées, en s'appuyant à la fois sur les connaissances des coûts de composants qui ont été réalisés et sur leur évolution dans le cadre d'une fabrication industrielle. Ces études, ainsi que les études d'implantation et d'architecture, sont effectuées avec avec la collaboration des industriels (ingénieries et équipementiers) afin d'obtenir l'estimation la plus fiable possible. Des gisements de gain potentiel ont été identifiés. Il apparaît possible de réduire encore fortement le coût de l'enrichissement par SILVA. La priorité est maintenant à la préparation des démonstrations qui sous-tendront le bilan économique de 1997.