

# SCIENCES

ASSOCIATION FRANÇAISE POUR L'AVANCEMENT DES SCIENCES | FONDÉE EN 1872

N° 2005-2 | 2<sup>e</sup> TRIMESTRE 2005  
ISSN : 0151 - 0304 | PRIX : 15 €

AFAS | SCIENCES  
CNRS - 1 place Aristide Briand  
92195 Meudon Cedex - France  
Tél. : 01 45 07 59 40  
Fax : 01 45 07 59 44  
mél : [avancement-sciences@wanadoo.fr](mailto:avancement-sciences@wanadoo.fr)  
web : [www.avancement-sciences.org](http://www.avancement-sciences.org)

**Directeur de la publication :**  
Pascal Colombani, président de l'AFAS

**Rédacteur en chef :**  
Paul Faugeras

**Assistante de rédaction :**  
Marie-Laure Blanchet

**Comité de rédaction :**  
Roger Diévert, Paul Faugeras,  
Arlette Franceschetti, Roland Néjar

**Comité de lecture :**  
Pascal Colombani, président de l'AFAS,  
Jean Boulaine, Paul Caro, Yves Lancelot,  
Christian Marchal, présidents des groupes  
de disciplines de l'AFAS

Maquette, composition :  
Marie-Laure Blanchet

Impression :  
Reprotechnique

Éditions AFAS

**Abonnements :**  
Abonnement simple : 32 €  
Abonnement de soutien : 40 €  
Membres de l'AFAS : 23 €

**Vente au numéro :**  
S'adresser à l'AFAS.

Les articles peuvent être reproduits à condition d'être accompagnés du nom de l'auteur avec la mention «Reproduit de la revue *SCIENCES*, AFAS, CNRS, 1 place Aristide Briand, 92195 Meudon Cedex» en précisant le numéro et sa date de parution. Un justificatif doit être adressé à la rédaction de *SCIENCES*.  
Les auteurs des articles publiés adhèrent implicitement à ce statut.  
Les articles paraissant dans *SCIENCES* expriment l'opinion de leurs auteurs et non pas nécessairement celles de la rédaction.

## SOMMAIRE

3 Éditorial par Paul Faugeras

**MEDITERRANEE : LE PARTAGE DU SAVOIR**  
(CERN, Genève, 6-7 mai 2004)

4 **Allocution d'ouverture** (P. Colombani)

SESSION 1 :

**LE PROGRAMME LHC ET LES PAYS NON MEMBRES DU CERN**

5 **Le programme LHC** (J. Ellis)

**La collaboration avec le CERN :**

7 **L'expérience marocaine** (A. Hoummada)

8 **L'expérience pakistanaise** (H. Hoorani)

9 **L'expérience iranienne** (H. Arfaei)

10 **La perspective égyptienne** (M. Sherif)

11 **Table ronde : La politique générale du CERN** (R. Aymar)

SESSION 2 :

**LE PROGRAMME SESAME ET LES PAYS D'AFRIQUE DU NORD**

13 **Introduction à SESAME** (H. Schopper)

18 **Le programme scientifique de SESAME** (Z. Sayers)

19 **La première génération des lignes de faisceaux** (S. Hasnain)

20 **Participer à SESAME : le point de vue d'un utilisateur**  
(N. Hamdan)

SESSION 3 :

**LA FRACTURE NUMERIQUE**

22 **Introduction** (M. Spiro)

23 **La grille internationale EGEE. Infrastructure et fracture numérique** (F. Gagliardi)

29 **La participation marocaine à l'analyse du LHC** (D. Bencheekroun)

30 **Le réseau européen, ses extensions vers le Maghreb**  
(D. Vandromme)

34 **Commentaires sur la fracture numérique** (A. Santoro)

SESSION 4 :

**LE DESSALEMENT**

35 **Introduction** (M. Balaban)

- 36 **Le dessalement au Moyen-Orient. Coût et impact environnemental** (R. Morris)
- 39 **Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres : une ressource pour les prochaines décades** (M. Soulié)
- 41 **Développement des technologies thermiques et de membranes pour le dessalement** (C. Somariva)
- 44 **Le recyclage intégré de l'eau pour les pays en manque d'eau** (B. Durham)
- 46 **Gérer la sécurité de l'eau : réutilisation ou dessalement ?** (V. Lazarova)
- 49 **L'expérience marocaine en matière de dessalement** (A. Elmidaoui)

SESSION 5 :

**LES ENERGIES RENOUVELABLES**

- 52 **La mise en valeur de l'énergie solaire** (A. Maccari)
- 56 **Utilisation de l'énergie basse enthalpie pour la production d'eau** (M. Safi)

SESSION 6 :

**CONSTITUTION DU RESEAU EUROMED-NET**

- 58 **Vers la formation d'un réseau Euro-Méditerranée : introduction au débat** (R. Klapisch)
- 59 **Compte rendu analytique de la discussion**

# ÉDITORIAL

---

*Ce numéro de Sciences est exclusivement consacré à la publication des actes du colloque «Méditerranée : le partage du savoir», qui a eu lieu en mai 2004 au CERN, à Genève, dans le cadre des manifestations qui ont marqué le cinquantenaire de cette prestigieuse organisation européenne.*

*Ce colloque, organisée par notre président d'honneur, Robert Klapisch, est en fait la continuation des rencontres de World-Med' 2002 qui avaient eu lieu à Marseille en avril 2002 et avaient été organisées conjointement par l'AFAS (ce fut son 119<sup>e</sup> congrès) et le Club de Marseille. Moins ambitieux que World-Med' 2002, ce colloque a réuni une petite centaine de participants venant des pays riverains de la Méditerranée et même de plus loin. Les sujets traités ont été plus focalisés et ont concerné les bénéfices que les pays méditerranéens peuvent retirer de leur collaboration avec le CERN en physique fondamentale, le projet SESAME, premier laboratoire intergouvernemental implanté en Jordanie, ainsi que des sujets intéressants plus directement les pays méditerranéens, comme la fracture numérique, l'approvisionnement en eau et la problématique du dessalement, ainsi que les énergies renouvelables. Ce colloque a été complété par une session de réflexion sur la poursuite de ces rencontres, leur forme et les sujets à traiter.*

*L'édition des actes de ce colloque a posé quelques problèmes. En effet, à quelques exceptions notables près, les intervenants n'ont pas fourni de version écrite de leurs exposés respectifs. On a donc dû se contenter de l'enregistrement vidéo effectué en temps réel par les techniciens du CERN. Certaines interventions ont alors été*

*transcrites dans leur langue d'origine et ensuite traduites<sup>1</sup> en français si nécessaire et adaptées. Les autres interventions ont été résumées directement en français à partir de l'enregistrement. Certaines des figures qui illustrent ces actes ne sont pas non plus de la qualité que nous aurions souhaitée. En fait, nous n'avons pas pu obtenir les versions informatisées de toutes les présentations et nous avons dû, là encore, utiliser l'enregistrement vidéo, ce qui explique cette qualité moindre pour certaines illustrations. L'équipe de rédaction espère néanmoins ne pas avoir trahi l'esprit des différentes interventions, à défaut d'avoir pu en restituer la lettre et la forme.*

*Pour ceux de nos lecteurs que cela intéresse ou qui voudraient plus de détails, il est possible de se procurer tout ou partie de l'enregistrement vidéo. Nous avons en effet fait transférer sur des disques DVD l'enregistrement original, à raison d'un DVD de deux heures par session (à l'exception des sessions 5 et 6 qui sont regroupées sur le même DVD). Le prix (coûtant) est de 5 € par DVD et de 20 € pour la collection des cinq DVD. Il suffit de les demander au siège de notre association, en précisant le(s) DVD(s) souhaité(s) et en joignant un chèque. Le courrier électronique est également possible.*

*Pour terminer, signalons que cette série de rencontres sur «Méditerranée : le partage du savoir» sera suivie d'une troisième rencontre les 5, 6 et 7 septembre prochains à Casablanca. Le programme, un peu plus conséquent que pour la rencontre de Genève, est disponible sur le site Web de l'Association : [www.avancement-sciences.org](http://www.avancement-sciences.org).*

*En souhaitant à tous une bonne lecture pendant cette période estivale.*

*Paul Faugeras  
Rédacteur en chef de Sciences*

---

<sup>1</sup> Traductions : M.-L. Blanchet et P. Faugeras

# Allocution d'ouverture <sup>1</sup>

**Pascal Colombani**

Président de l'AFAS

Mesdames, Messieurs,

Bonjour et merci de votre présence.

Je suis heureux de vous accueillir au nom de l'AFAS.

Je voudrais remercier, pour leur contribution à l'organisation de cette manifestation :

- en premier lieu bien sûr le CERN - je reviendrai plus tard sur les raisons qui font qu'il était particulièrement opportun de tenir cette réunion au CERN ;
- ensuite, l'IN2P3, Institut national de physique nucléaire et de physique des particules, qui a grandement contribué à l'organisation de ce colloque ;
- enfin, nos partenaires industriels, qui nous ont apporté le soutien financier sans lequel rien n'est possible, et qui sont partie prenante dans l'effort de construction d'un pont entre le Nord et le Sud de la Méditerranée, qui est notre propos aujourd'hui.

Notre démarche s'inscrit dans le cadre d'un effort plus général mené par l'Union européenne pour développer la coopération avec les pays du sud de la Méditerranée.

Mais notre orientation se veut plus «pratique», dans le prolongement d'une rencontre plus importante que nous avons organisée sur le même thème, à Marseille en 2002, et où ces questions du comment partager le savoir, comment mieux coopérer, comment nous développer ensemble ont été abordées sous divers angles.

Notre colloque constitue donc une suite de ces rencontres de Marseille, mais nous avons souhaité cette fois être, je dirais, très pragmatiques, en nous attaquant à un nombre délibérément limité de sujets. Nous allons parler de l'eau, de l'environnement, des procédés de dessale-

ment ; demain nous parlerons de l'énergie, mais aussi de l'Internet et de comment réduire la fracture numérique qui pourrait se développer.

Nous n'aborderons pas de sujets relevant des sciences de la vie comme la santé, l'alimentation, mais nous espérons revenir, lors un prochain colloque, l'an prochain ou l'année suivante, sur les thèmes que nous n'aurons pas encore abordés, et qui sont également importants et vecteurs de progrès.

Une question transversale est de savoir comment développer ensemble la science et la technologie, de sorte que celles-ci ne se concentrent pas d'un seul côté de la Méditerranée, de même que les scientifiques, même si beaucoup d'entre eux viennent de l'autre côté de la Méditerranée. Je pense que nous aurons également un débat intéressant sur cette question.

J'ai dit que je remerciais tout particulièrement le CERN d'avoir apporté son soutien à cette manifestation. N'oublions pas que le CERN a été, durant de nombreuses années, un pont entre les pays de l'Est et le monde occidental, mettant en contact des scientifiques, et, d'une certaine manière, participant ainsi à la construction de la paix et de la compréhension mutuelle entre des personnes qu'un mur séparait.

Le problème ne se situe plus aujourd'hui entre l'Est et l'Ouest, mais notre époque reste difficile. Tout le monde sait bien qu'il y a une guerre qui continue, qu'il existe une méfiance entre les gens, et j'espère qu'en tenant ce colloque ici au CERN, nous pourrions, comme nos prédécesseurs il y a 20 ou 30 ans, aider à une bien meilleure compréhension mutuelle, et travailler ensemble à la paix du monde.

<sup>1</sup> Traduction de la transcription de l'allocution faite en anglais.

## Session 1

# Le programme LHC et les pays non-membres du CERN

Comment et pourquoi étendre le programme LHC du CERN aux pays non-membres du CERN, en particulier ceux du Maghreb ?

Quels en sont les avantages, pour le CERN et pour les pays concernés ?

Responsables de cette session :

**John Ellis** (CERN), **Abdeslam Hoummada** (Université de Casablanca)

---

## Le programme LHC <sup>1</sup>

### John Ellis

Conseiller du DG pour les relations avec les Etats non-membres du CERN

### Introduction au CERN

Le CERN a été fondé en 1954 et fut la première organisation scientifique internationale en Europe avec la mission de conduire des recherches pures en physique fondamentale. Ses fondateurs voulaient créer un environnement où des scientifiques venant de pays qui s'étaient battus quelques années auparavant pourraient travailler ensemble à des objectifs scientifiques communs, en construisant et en utilisant des installations qui n'auraient pas pu être construites par un seul pays européen. Les années passant, le CERN est devenu un endroit où des scientifiques des deux cotés du rideau de fer ont pu travailler ensemble, et c'est la première organisation européenne à avoir admis des membres venant de l'ancien Pacte de Varsovie. Le CERN a maintenant 20 Etats membres, venant de l'Europe de l'Ouest, de l'Europe centrale et de l'Europe du Sud-Est (pl. I, fig. 1)

Par ailleurs, le CERN a des collaborations actives avec les pays voisins, comme la Turquie et d'autres pays méditerranéens. Au total, plus de 6 000 scientifiques et ingénieurs, venant du monde entier, utilisent les installations du CERN pour conduire leurs recherches scientifiques. Environ 30 % d'entre eux viennent d'Etats non-membres (pl. I, fig. 2), avec de gros contingents venant des Etats-Unis, de Russie et du Japon, mais aussi de pays moins développés, comme la Chine, l'Inde, l'Iran, le Pakistan et l'Afrique du Sud. Le CERN a signé plus de 30 accords

de coopération avec les autorités gouvernementales de pays non-membres. Pour la région du monde concernée par cette conférence, le CERN a des accords de ce type avec le Maroc, Israël, l'Iran et le Pakistan, et il développe activement ses relations avec l'Egypte, la Jordanie et les Emirats Arabes Unis.

Dans le reste de cet exposé, je voudrais donner une explication introductive de ce que nous faisons tous ici, et les orateurs suivants de cette session décriront ensuite quelques-uns des projets de collaboration spécifiques dans lesquels ils sont engagés.

### La structure de la matière

Comme vous le savez, tous les différents éléments chimiques sont constitués d'atomes, qui contiennent des électrons tournant en orbite autour de petits noyaux (pl. I, fig. 3). A leur tour, ces noyaux contiennent eux-mêmes différents nombres de protons et de neutrons, qui, cependant, ne sont pas vraiment des particules élémentaires. Protons et neutrons sont chacun faits de constituants plus fondamentaux appelés quarks, et le cœur du travail au CERN est d'étudier les propriétés, les interactions et la

---

<sup>1</sup> Traduction du texte original en anglais de l'auteur.

structure interne (s'il y en a une), de ces quarks, de ces électrons et des particules élémentaires associées.

Grâce, en grande partie, aux expériences conduites au CERN, nous avons une description très précise de ces particules élémentaires, ainsi que de la force électromagnétique, de la force d'interaction forte et de la force nucléaire faible qui s'exercent entre elles. Ce Modèle standard de la physique des particules a été proposé par Abdus Salam, Sheldon Glashow et Steven Weinberg, et a été vérifié avec une très grande précision, en particulier par des expériences faites à l'accélérateur LEP du CERN.

## Questions ouvertes au-delà du Modèle standard

En dépit des nombreux succès du Modèle standard, un certain nombre de questions importantes restent sans réponse, dont certaines ont un impact sur des problèmes de base en cosmologie (pl. I, fig. 4).

### *Quelle est l'origine de la masse des particules ?*

La théorie préférée est que cela serait dû à la présence d'une particule non encore détectée, appelée le boson de Higgs. Cette particule, ou ce qui pourrait la remplacer, devrait peser moins de 1 000 fois la masse du proton, ce qui correspond à une énergie au repos inférieure à 1 TeV environ. Aussi mystérieuse que la théorie de Higgs puisse paraître, elle pourrait être reliée au mécanisme qui a rendu l'Univers aussi grand et âgé qu'il est aujourd'hui, et peut-être aussi à la physique qui semble apparemment causer actuellement une accélération de l'expansion de l'Univers.

### *Pourquoi y a-t-il tellement de types différents de particules de matière ?*

Les particules de matière se composent de six types de quarks, de l'électron et de deux autres particules semblables mais plus lourdes, et de trois types différents de neutrinos. La réponse à ce puzzle peut être liée aux petites différences entre les propriétés des particules de matière et celles d'antimatière qui ont été détectées dans l'Univers. A son tour, ceci pourrait expliquer la petite quantité résiduelle de matière dans l'Univers et l'absence d'une quantité significative d'antimatière.

### *Les forces fondamentales sont-elles unifiées ?*

Le rêve d'Einstein ne se réalisera vraisemblablement qu'à des énergies élevées aux environs de  $10^{16}$  GeV, qui ne peuvent être testées qu'indirectement avec des accélérateurs. Cependant, des tests indirects sont possibles en utilisant des neutrinos, et quelques idées pour cette unification incluent le nouveau concept de «supersymétrie», ce qui fournirait un candidat possible pour la matière noire mise en avant par les astrophysiciens et les cosmologistes.

### *Quelle est la théorie quantique globale de la gravité ?*

Cette théorie pourrait mettre en jeu des dimensions additionnelles de l'espace, comme dans la théorie des cordes, et pourrait expliquer l'origine même du big-bang.

Parmi tous ces problèmes, le plus urgent est probablement celui de l'origine de la masse des particules. Vous pouvez vous étonner de ce problème, parce que Newton a montré que le poids est proportionnel à la masse, et Einstein a montré que l'énergie est reliée à la masse. Cependant, aucun des deux n'a expliqué l'origine même de la masse, et les équations qui sous-tendent le Modèle standard ne font pas intervenir les masses des particules. A la place, on pense que ces masses sont dues aux interactions avec le champ de Higgs, non vu mais imprégnant tout l'Univers. La signature de cette théorie serait d'observer le quantum de ce champ, le boson de Higgs.

## Le grand collisionneur de hadrons, LHC

La recherche du boson de Higgs définit l'échelle de l'accélérateur LHC, le grand collisionneur de hadrons actuellement en cours de construction au CERN, et qui doit être achevé en 2007 (pl. I, fig. 5). Le LHC mettra en collision frontale des protons, chacun d'une énergie de 7 TeV, environ 1 000 000 000 de fois par seconde. Chaque collision va libérer une énergie équivalente à plus de 14 000 fois la masse du proton, ce qui permettra de produire de nouvelles particules massives et de les observer dans de grands détecteurs, qui sont actuellement en cours d'assemblage par des collaborations mondiales, qui incluent de nombreux scientifiques d'Afrique du Nord, du Moyen-Orient et d'Asie du Sud.

En plus du décryptage de l'origine de la masse, les expériences LHC chercheront à comprendre la nature de la matière noire et les propriétés du plasma primordial, qui, pense-t-on, remplissait tout l'Univers quand celui-ci était âgé de moins d'une microseconde. Elles permettront aussi d'explorer les différences subtiles entre la matière et l'antimatière, ce qui pourrait expliquer l'origine de la matière dans l'Univers.

Une des deux plus grandes expériences au LHC s'appelle CMS (pl. I, fig. 6). Elle reposera sur des supports fabriqués au Pakistan et contiendra des pièces importantes fabriquées en Iran. Les physiciens pakistanais sont aussi en train de construire quelques-unes des chambres de détection des muons, et des physiciens égyptiens devraient participer à ce travail. D'autres composants de ce détecteur sont fabriqués avec du laiton recyclé de coques de navire russes ! L'autre grand détecteur, ATLAS, comprend des contributions importantes de physiciens venant du Maroc et d'Israël.

Une fois qu'ils auront commencé à observer des collisions en 2007, chacun de ces deux détecteurs principaux sera en mesure de découvrir le boson de Higgs, quelle que soit sa masse, dans le domaine attendu jusqu'à 1 TeV. La recherche au LHC d'autres particules nouvelles devrait



Fig. 1 : Les Etats membres du CERN

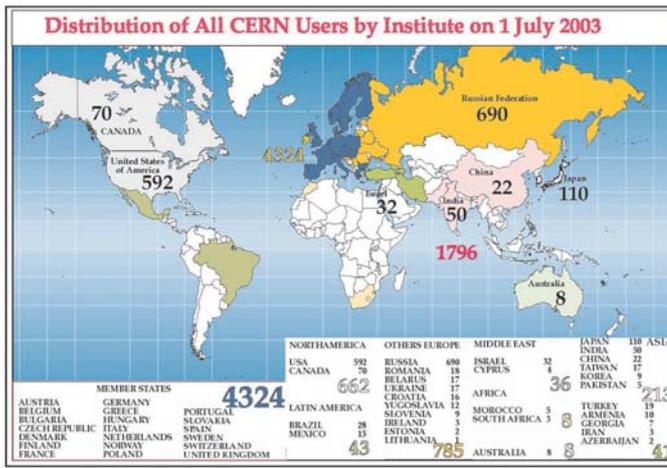


Fig. 2 : Les utilisateurs du CERN

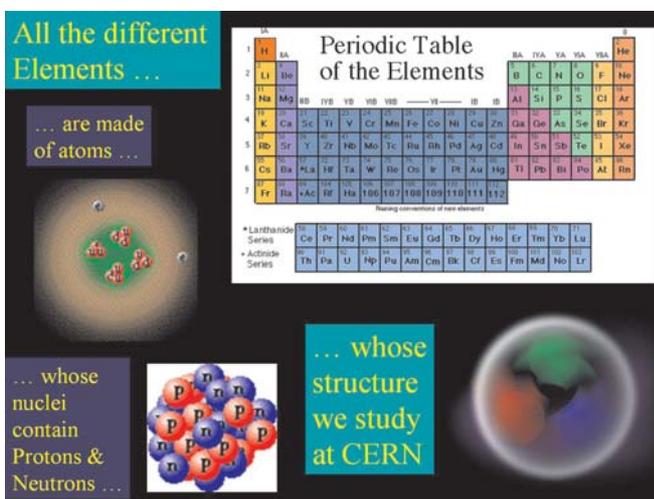


Fig. 3 : La structure de la matière

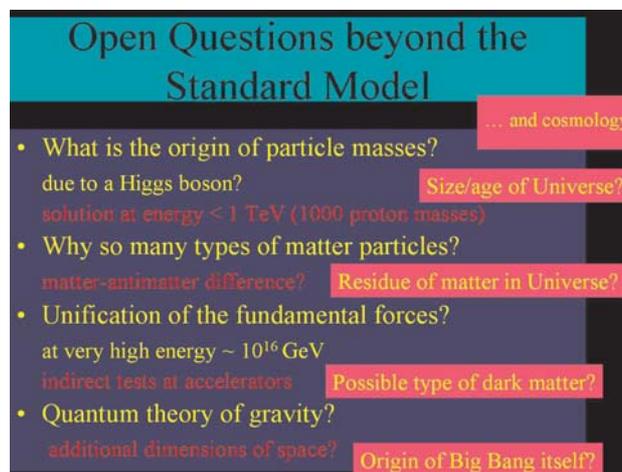


Fig. 4 : Les problèmes du Modèle standard

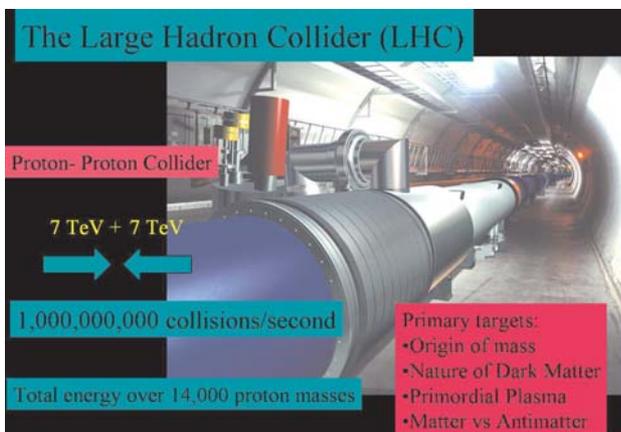


Fig. 5 : La machine LHC

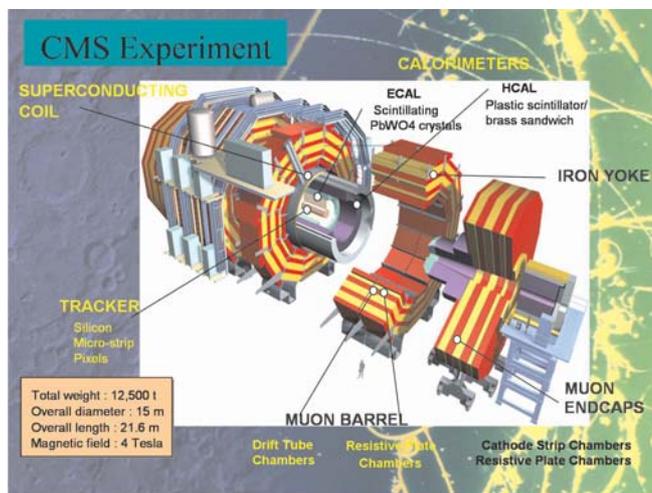


Fig. 6 : CMS, un des deux grands détecteurs du LHC

couvrir la plupart des possibilités pour la matière noire supersymétrique.

On peut dire que le LHC va sonder de nouvelles dimensions de la physique. Il explorera une nouvelle dimension en énergie, jusqu'à dix fois plus élevée que dans les accélérateurs précédents, là où nous pouvons espérer démêler l'origine de la masse. Il permettra aussi d'explorer de nouvelles dimensions de l'espace, soit des dimensions additionnelles de l'espace conventionnel, soit de nouvelles dimensions «quantiques» qui sont prédites dans les théories supersymétriques. Les énergies élevées du LHC nous emmènerons aussi en arrière dans une nouvelle dimension du temps, tout juste après le big-bang, quand l'Univers était rempli d'un nouveau type de soupe

primitive, et où la matière noire et notre matière visible ordinaire ont toutes les deux leur origine.

## La physique est universelle

La physique des particules aborde aussi des questions fondamentales sur l'origine de l'Univers : dans un sens très réel, ses accélérateurs sont des télescopes aussi bien que des microscopes. Notre laboratoire est un microcosme du macrocosme. Nous sommes ouverts à tous les scientifiques qui sont intéressés à participer à la quête humaine universelle pour comprendre l'Univers autour de nous et la matière qu'il contient.

---

## L'expérience marocaine de la collaboration avec le CERN <sup>2</sup>

### Abdeslam Hoummada

Université de Casablanca

Cela fait plus d'une quinzaine d'années que des physiciens marocains participent aux recherches européennes sur les particules élémentaires, mais cela s'est fait au début sur une base purement individuelle, ce qui n'a pas permis une certaine continuité. Au départ, le Maroc a essayé de participer à l'élaboration de la proposition du détecteur ATLAS, en apportant sa contribution dans l'étude du choix des matériaux du détecteur à l'aide d'une station d'irradiation.

Avec l'approbation du projet LHC et de ses deux détecteurs principaux, la nécessité d'une structuration de la recherche au Maroc s'est fait sentir. C'est ainsi qu'a été créé en 1995 le Réseau universitaire de physique des hautes énergies (RUPHE), avec l'appui du ministère marocain de la Recherche. Ce réseau réunit six universités, un institut de recherches nucléaires et deux écoles normales, et il a été intégré en 1996 dans la collaboration ATLAS.

La contribution du Maroc pour le détecteur ATLAS concerne essentiellement la fabrication du pré-échantillonneur qui doit garnir la face interne du calorimètre électromagnétique d'ATLAS. Ce projet est réalisé en collaboration avec l'institut KTH de Suède et l'IN2P3 en France : le Maroc est principalement chargé de tester les anodes de chaque module de pré-échantillonneur, qui viennent de l'industrie, avant leur assemblage à Stockholm et à Grenoble. Ce projet s'est terminé en 2003, à la satisfaction générale, après le test de 53 000 anodes.

Quel bilan tirer de cette expérience ? Tout d'abord, elle a impliqué huit physiciens marocains, mais aussi un certain nombre d'étudiants, soit une vingtaine de personnes au total. Il a fallu mettre en service des équipements nouveaux, comme deux salles propres, des appareillages de test électroniques. Il a fallu aussi changer quelques habitudes, accepter d'être inspectés et évalués, accélérer les processus de décision et les pesanteurs administratives. Cela commence à se réaliser et permet donc au Maroc d'avancer.

Depuis la fin de ce projet, le Maroc se tourne vers l'analyse des données, du moins sa préparation, en particulier avec la création d'une liaison informatique à haut débit. Il faut mentionner aussi que les relations nouées ont permis d'envoyer des étudiants et des post-docs au CERN, en France et en Suède.

L'orateur conclut avec des remerciements chaleureux à tous les organismes et aux personnalités qui ont permis cette insertion du Maroc dans un domaine de recherche de pointe. Il tient à mentionner tout particulièrement Mossadek Talby du CPPM, qui a été la cheville ouvrière de cette collaboration avec le CERN.

---

<sup>2</sup> Le texte ci-dessous est un bref résumé de la communication faite en séance. Il a été établi à partir de l'enregistrement vidéo de la session et le lecteur est invité à se référer à cet enregistrement, disponible sur DVD, pour plus de détails.

## L'expérience pakistanaise de la collaboration avec le CERN <sup>3</sup>

**Hafeez Hoorani**

National Centre for Physics, Islamabad

L'orateur résume d'emblée son exposé en disant que la collaboration avec le CERN est extrêmement positive, mais il pense utile d'expliquer pourquoi, et après avoir donné quelques indications sur son pays et les raisons qui le pousse à cette collaboration, il se propose d'en décrire les étapes et les réalisations.

Le Pakistan est un pays de 141 millions d'habitants, avec une espérance de vie de 62,8 ans. C'est le sixième pays le plus peuplé de la planète, et le produit intérieur brut est d'environ 58 milliards de dollars, ce qui n'est pas très élevé, rapporté au PIB par individu. La moitié de la population adulte est analphabète, et le pays consacre 0,8 % de son PIB à la recherche et au développement.

On peut donc se demander pourquoi un pays en voie de développement comme le Pakistan veut-il s'intéresser à la physique des hautes énergies. La réponse a été faite par Abdus Salam, éminent physicien pakistanais, prix Nobel de physique 1979 pour sa contribution essentielle à l'élaboration du Modèle standard. A. Salam a en effet déclaré que les pays islamiques devaient s'intéresser à la physique fondamentale, non pas en construisant des accélérateurs concurrents de ceux des Occidentaux, mais en s'associant aux Occidentaux pour collaborer dans ce domaine de recherche de pointe.

C'est ainsi que le gouvernement pakistanais a créé et finance le Centre national pour la physique (NCP, pour National Centre for Physics), ouvert à toutes les universités pakistanaïses, et dont le Conseil scientifique a défini comme action prioritaire la collaboration avec le CERN. Cette collaboration doit s'exercer suivant trois axes : la physique des hautes énergies, par la participation à la construction de parties de détecteurs et à l'analyse des données ; l'informatique, avec les grilles de calcul ; et enfin la réalisation de composants et de sous-ensembles par l'industrie locale.

Sans vouloir prétendre que la collaboration CERN-Pakistan est un modèle à suivre, il est cependant intéressant de regarder le processus suivi. Cela a commencé par la visite de hauts responsables du CERN, avec qui on a pu définir un projet bénéfique aux deux parties. Une fois le financement trouvé, il a fallu entraîner et organiser les équipes, avec l'aide des experts du CERN. Actuellement, nous avons 36 scientifiques et ingénieurs pakistanais travaillant sur des projets CERN, y compris dans le domaine des techniques de l'information.

La collaboration avec le CERN a débuté avec la signature en 1994 d'un protocole d'accord. En 1997, le Pakis-

tan a entrepris la construction d'un prototype de support pour l'aimant du futur détecteur CMS. L'année suivante, l'équipe pakistanaïse a demandé à faire partie de la Collaboration CMS, et le NCP est devenu membre à part entière de cette collaboration en 2000, tandis que le Pakistan décidait d'augmenter sa contribution au projet LHC. En 2001, le Pakistan a fait part de son désir de devenir membre de la grille de calcul pour LHC, et en 2004, le NCP est devenu site approuvé pour ce projet de grille.

Concrètement, quelles sont les réalisations ?

- Dans le domaine de la physique des hautes énergies :
  - construction des supports de l'aimant central de CMS et d'autres composants de mécanique lourde ;
  - contribution à l'étude, l'intégration et la mesure des performances de chambres à plaque ;
  - travaux de mécanique pour le détecteur ATLAS ;
  - participation à des études de physique théorique et de conceptions de sous-ensembles de détecteurs avec des universitaires et des étudiants doctorants.
- Dans le domaine informatique :
  - Participation au projet LCG (pour LHC Computing Grid), pour lequel il y a déjà l'équivalent de sept personnes à temps plein, pour la réalisation d'une *PC farm*, avec des ordinateurs personnels travaillant sous Linux.

A l'heure actuelle, de nombreux instituts et universités sont impliqués dans cette collaboration. Dans le futur, on envisage d'étendre le groupe d'études de la physique, de participer à l'expérience ALICE du projet LHC, de participer à d'autres projets du CERN comme le CLIC, et de prendre une part active dans le déploiement de la grille de calcul, avec une liaison informatique à haut débit.

En conclusion, on peut dire avec force que la collaboration avec le CERN a été une excellente expérience, très enrichissante pour le Pakistan. C'est ainsi que le rêve d'Abdus Salam est en train de se réaliser, et c'est à lui qu'on le doit.

<sup>3</sup> Le texte ci-dessous est un bref résumé de la communication faite en séance. Il a été établi à partir de l'enregistrement vidéo de la session et le lecteur est invité à se référer à cet enregistrement, disponible sur DVD, pour plus de détails.

## L'expérience iranienne de la collaboration avec le CERN <sup>4</sup>

**Hessamaddin Arfaei**

Institute of Theoretical Physics, Téhéran

L'orateur se propose d'expliquer pourquoi et comment l'Iran veut collaborer avec le CERN, puis de décrire quels sont les plans de cette collaboration et quel impact on peut en attendre, tant sur le plan scientifique que sur les plans administratif et culturel.

Après la révolution de 1979, les scientifiques iraniens se sont trouvés très isolés. Les premiers contacts entre le CERN et l'Iran remontent à 2001, quand une délégation du CERN, conduite par le directeur général de l'époque, le P<sup>r</sup> Maiani, a visité Téhéran et a participé à un séminaire pour voir comment on pouvait promouvoir la physique expérimentale des hautes énergies en Iran. Il en a été conclu que l'Iran devait participer à quelques expériences au CERN, et un groupe de travail, sous la direction du P<sup>r</sup> Mo a été créé. Ce dernier est allé ensuite au CERN pour signer un protocole d'accord (*Memorandum of understanding*, suivant l'expression consacrée), qui fixe les grandes lignes de la collaboration avec l'Iran, qui a alors choisi de participer à l'expérience CMS.

En fait, la signature de cet accord est le résultat d'un long processus, qui a commencé en 1990 durant la quatrième conférence régionale sur la physique mathématique. A l'époque, l'Iran avait des théoriciens actifs, en liaison avec Abdus Salam, mais pas d'activité dans le domaine expérimental. L'idée d'une collaboration avec le CERN, proposée par J. Ellis, date de ce moment, et un groupe de travail fut créé. Il a fallu attendre quelque temps pour que cela débouche, jusqu'à ce que Reza Mansouri, actuellement vice-ministre, aplanisse les obstacles.

L'Institut d'études en physique théorique et en mathématiques (IPM) a alors été choisi pour l'implémentation des décisions du groupe de travail. Cet institut avait une certaine habitude de la collaboration internationale et a acquis un rôle prépondérant en physique théorique et en mathématiques : 45 % des publications en physique et 60 % de celles en mathématiques faites en Iran sont supportées par cet institut IPM, pour la plupart sur la théorie des cordes. Pour illustrer son propos, l'orateur montre la variation au cours des années des publications scientifiques en Iran : on voit un creux qui correspond à un exode à la suite de la révolution de 1979, mais le nombre de publications remonte ces dernières années, grâce à l'action de l'IPM.

La collaboration avec le CERN qui se met en place vise à faire la même chose sur le plan de la physique expérimentale. Elle s'articule sur deux plans :

- Sur le plan scientifique, la collaboration prévoit que des scientifiques et des étudiants iraniens participent à toutes les phases de l'expérience CMS, de la construction à l'opération du détecteur, la prise des données et l'analyse des données. Des étudiants iraniens travaillent déjà sur CMS et leurs successeurs devraient s'orienter plus vers l'informatique.
- Sur le plan technique, le groupe iranien contribuera à la construction de certains composants du détecteur CMS, en particulier des éléments du blindage en acier du détecteur. Une partie de ces éléments très lourds a déjà été livrée. Pour l'orateur, c'est l'occasion de remercier ici des membres de la collaboration CMS qui les ont aidés dans cette tâche.

L'impact de cette collaboration avec le CERN se fait sentir sur les plans scientifique, technique et culturel. Les étudiants apprennent ainsi à faire de la recherche scientifique de haut niveau, mais ils apprennent aussi l'art de collaborer et du management. Leur expérience aura un impact considérable, à leur retour, sur la science et l'administration de la science en Iran. L'impact sur l'industrie n'a lieu que sur une petite échelle, mais il est très profond. Là aussi, l'impact technique s'accompagne d'un impact culturel.

En conclusion, l'auteur espère qu'un rapport semblable fait dans le futur permettra de mettre en avant plus de réalisations concrètes des étudiants iraniens, principalement dans le domaine informatique.

<sup>4</sup> Le texte ci-dessous est un bref résumé de la communication faite en séance. Il a été établi à partir de l'enregistrement vidéo de la session et le lecteur est invité à se référer à cet enregistrement, disponible sur DVD, pour plus de détails.

## La perspective égyptienne de collaboration avec le CERN <sup>5</sup>

**Mohammed Sherif**

Université du Caire

Au cours des âges, les pays de la Méditerranée ont été les témoins de chocs violents, et l'idée de coexistence et de coopération était obscurcie, permettant au concept de conflits entre les civilisations de prévaloir. Mais, avec le temps, ces civilisations sont devenues plus raisonnables et ont commencé à être convaincues que le dialogue et l'échange des connaissances étaient les seuls moyens pour assurer le progrès et la paix.

C'est ainsi que la Méditerranée est devenue une voie de communication et de transfert de connaissances entre ces pays. A un moment donné, l'héritage culturel est devenu un chemin entre l'ancienne civilisation égyptienne et l'Europe, puis à un autre moment, c'est l'héritage des Grecs et des Romains qui est allé au Sud. Ensuite vint la civilisation islamo-arabique, qui a préservé l'héritage des Grecs et des Romains avant de l'exporter à nouveau vers le nord au Moyen Age et a ainsi contribué à la Renaissance.

A l'ère moderne, l'attention s'est portée sur la physique avec le démarrage des activités académiques à l'université du roi Fouad (université du Caire, maintenant) en 1925. Cette université a un rôle conducteur dans ce domaine et cela permet de progresser dans différents domaines scientifiques, tout particulièrement en physique. En 1956, la physique nucléaire a commencé à devenir une branche importante à l'université du Caire (faculté des sciences). En 1970, la branche «physique des hautes énergies» (HEP) a débuté par l'acquisition de plaques d'émulsion irradiées de Dubna (JINR). Depuis cette époque, la physique des particules a commencé à être une branche importante, en même temps que la physique des hautes énergies. Le travail dans ce domaine a continué pendant plus de 20 ans, pendant lesquels l'Egypte a pu collaborer avec beaucoup de laboratoires et d'universités du monde entier, comme JINR à Dubna, l'université de Lund en Suède, l'université d'Heidelberg en Allemagne, LBL et le CERN (dans les années quatre-vingt, notre laboratoire HEPL a obtenu des émulsions du CERN). Le groupe de l'université du Caire a étudié les interactions de nombreux noyaux légers et lourds et de particules avec des émulsions nucléaires, à des énergies de 2,1 GeV/n jusqu'à 200 GeV/n.

L'utilisation d'émulsions nucléaires s'est répandue pour atteindre bien plus que quatre universités égyptiennes sous la supervision de l'université du Caire, et pour lesquels plus de 70 scientifiques avaient été formés pour travailler dans ce domaine. En plus, cinquante diplômés de

Ph.D et de M.Sc. ont été décernés (sept d'entre eux étaient des candidats venant de pays arabes différents). Plus de 130 articles ont été publiés dans des journaux scientifiques nationaux et internationaux. Si l'on se réfère à l'interaction culturelle et de civilisation de notre pays avec l'Europe et d'autres pays, nous avons eu 9 visiteurs d'Allemagne, 9 de Russie, 2 de Suède, 3 de France, 2 du Japon, et 6 des Etats-Unis et d'Israël. Nous voyons donc que l'échange des connaissances était très actif dans la période 1970-1994. Cependant, pour beaucoup de raisons, tant internes qu'externes, des raisons économiques et politiques, et aussi l'arrêt par beaucoup de firmes de la production d'émulsions nucléaires, le progrès dans ce domaine a pratiquement été stoppé dans les années quatre-vingt-dix, à l'exception de la reprise d'anciens résultats dans les plaques à émulsion. De cette façon, HEPL a réussi à continuer à faire des recherches en étudiant des phénomènes singuliers et en utilisant des techniques de simulation pour comparer les résultats avec des résultats astrophysiques.

Dans la période 2001-2002, l'université de Heidelberg, le CERN et le NCP du Pakistan furent contactés par notre HEPL pour se mettre au courant de leurs activités récentes. Un colloque a eu lieu au Caire en janvier 2003, avec la participation de CERN et du NCP, que nous avons considéré comme un succès, car il nous a clarifié la situation au CERN et il a reflété l'esprit de coopération et d'échange culturel. Ce colloque a aussi encouragé le CERN à offrir plusieurs visites courtes à quelques participants du HEPL de l'université du Caire, pour se familiariser avec le travail au CERN. Les instituts COMSATS et NCP du Pakistan ont offert deux stages à des jeunes physiciens de l'HEPL.

Ces succès ont conduit à un protocole d'accord (*Memorandum of Understanding*, MOU) avec le CERN et NCP pour impliquer l'Egypte dans l'expérience CMS, à travers l'assemblage de 25 sous-ensembles de RPC (*Resistive Plate Chambers*), pour CMS. L'université du Caire a bien accueilli ce MOU et l'a signé, fournissant le support financier, la place et tout l'équipement nécessaire pour l'assemblage et les tests.

Depuis la première visite d'une équipe du CERN à l'université du Caire jusqu'à maintenant, nous avons constaté de nombreux changements dans le domaine de

<sup>5</sup> Traduction du texte original en anglais de l'auteur.

la physique des particules. Une partie des études pour le grade de B.Sc. a été changée, en ajoutant de nouvelles parties sur la physique des particules et les collisionneurs. Un autre ajout est l'enseignement de la physique des particules aux étudiants diplômés (*postgraduate*). Nous avons également organisé de nombreux séminaires sur la technologie des grilles de calcul, la simulation, le Modèle standard et au-delà. Il y a juste un mois, nous avons eu une conférence internationale sur les tendances modernes de la recherche en physique, incluant les lasers, la matière condensée, la physique des hautes énergies et des particules. Tout au cours de cette conférence, nous avons observé beaucoup d'échanges de connaissances, avec pour résultat le développement des liens humains entre les participants.

Nous avons maintenant une équipe de 12 personnes pour la collaboration CMS, d'une qualification adéquate et travaillant sur la technologie des grilles, les simulations, l'analyse des données et l'électronique des RPC de CMS. Nous pouvons ainsi dire que les réalisations qui ont suivi cette mise en relation avec le CERN sont plus importantes que toutes les réalisations qui les ont précédées au cours des douze dernières années.

Et maintenant je peux dire (*Inch'Allah*) que l'attitude positive du CERN, la création de canaux d'échange de connaissances dans le domaine de la physique des particules et des sujets connexes entre les pays méditerranéens et l'Europe, comme la formation et la participation des Egyptiens et des Arabes dans ces domaines, créeront un lien de civilisation important dans cette région. Cela nous

aidera aussi à assembler beaucoup de groupes de recherche en Egypte et dans d'autres pays, sous la supervision du CERN. Le rôle majeur du CERN dans le développement et la construction du LHC et des expériences associées sera considéré comme l'ombrelle protectrice de la coopération scientifique la plus large, pas seulement au niveau de l'Europe et de la Méditerranée, mais aussi au niveau global. Le concept même de cette conférence confirme l'idée d'une intégration des civilisations et abolit l'idée de conflit, et c'est ce dont le monde a besoin aujourd'hui.

Nos perspectives de cette collaboration en physique des particules sont les suivantes :

- Echange de scientifiques entre les différents pays méditerranéens, pendant assez longtemps pour acquérir la technologie.
- Comme il y a une grande différence technologique entre certains pays, il est essentiel d'inclure des pays de niveau intermédiaire pour faciliter le transfert de technologie.
- Organisation de conférences dans le domaine de la physique des particules en Egypte, non seulement pour développer la coopération scientifique mais aussi pour renforcer les liens humains, ce qui est essentiel pour développer un esprit d'équipe au-delà des différences politiques.
- Développer un environnement scientifique pour faciliter la formation et les connaissances de jeunes scientifiques, tout en maintenant les liens avec leur pays d'origine.

---

## Table ronde

### La politique générale du CERN <sup>6</sup>

Allocution de **Robert Aymar**  
Directeur général du CERN

Je suis désolé de n'avoir pu être présent dès le début de cette séance, mais j'étais pris par d'autres réunions. Je suis très heureux de vous voir si nombreux à cette session qui est très importante à mes yeux.

Je commencerais peut-être en disant qu'en cette année du 50<sup>e</sup> anniversaire du CERN, il est opportun de revenir sur les objectifs de ses fondateurs lorsqu'ils ont lancé l'idée du CERN.

Sans doute pensaient-ils à réconcilier la physique en Europe, après sa presque disparition du fait de la guerre.

La mission du CERN était de faire de la recherche et des découvertes, ce qui était très facile à promouvoir. Mais dans le même temps, il avait une autre mission, qui s'est développée au fil des ans, et qui consistait à favoriser la coopération entre des pays ayant des niveaux de connaissance scientifique et des niveaux de communauté scienti-

---

<sup>6</sup> Traduction de la transcription de l'allocution faite en anglais.

fique différents, et à essayer de les réunir au sein d'une structure unique, après formation des membres dans leur pays d'origine. Je considère que cette mission, qui ne vise pas seulement à la connaissance scientifique mais principalement au lien social - ce qui a été mentionné par le dernier intervenant, le P<sup>r</sup> Sherif - est également très importante. La science et le lien social sont nécessaires et vont de pair.

Considérer la science comme étant sans frontière est si important que nous avons l'habitude de ne faire aucune distinction entre nos scientifiques, quelle que soit leur origine, qu'ils viennent de pays qui s'entendent ou de pays qui s'observent à distance. Nous avons eu des Russes qui sont venus travailler ici du temps où le mur existait encore. Nous avons eu des Chinois qui se regardaient chez eux avec hostilité, mais qui, ici, ont pu apprécier de se trouver ensemble et de parler la même langue. C'est pourquoi, à mon sens, c'est une des missions fondamentales du CERN que d'aider les scientifiques de différents pays à rejoindre le CERN, certes pour y faire des découvertes, mais aussi pour y vivre ensemble. Je comprends que vous soyez à la recherche d'une expérience comme celle du CERN, où des pays ont essayé de construire une communauté parce que c'était une occasion de formation et de contacts avec le monde scientifique. Je crois que c'est quelque chose que nous aimons faire et que nous continuons à faire.

Vous savez que 20 Etats membres financent le budget annuel du CERN, qui sert à faire fonctionner les équipements et à faire des investissements. Mais je crois que s'il n'y avait pas d'autres pays qui participent à des expérimentations spécifiques, en apportant leur propre expérience et leurs propres idées, et quelquefois un financement, le succès du CERN n'aurait pas été le même. Nous dépendons de la générosité des 20 Etats membres en Europe pour notre fonctionnement au quotidien, mais nous avons besoin et nous apprécions le soutien d'autres pays qui apportent leurs éminents cerveaux, et si certains d'entre vous voulaient nous rejoindre, nous serions prêts à les y aider par tous les moyens, et je serais personnellement ravi d'aider quiconque d'entre vous.

Je ne sais quels points vous souhaitez discuter ni ceux qui ont déjà été abordés. Si John Ellis pouvait nous guider, cela nous aiderait.

*Interventions (demandant au DG de préciser sa pensée par des exemples concrets.)*

J'ai mis en avant l'idée que le CERN a à la fois une mission de recherche et une mission de lien social entre différentes origines et différentes cultures. Mais je crois que nous ne devons pas oublier le fait que nous avons une longue tradition et une mission de formation de scientifiques, de physiciens, d'ingénieurs et même de techniciens, que nous avons utilisées pour mettre sur pied différentes écoles, qui tournent en Europe et parfois hors d'Europe afin de former et de confirmer des scientifiques, des informaticiens, des ingénieurs sur accélérateurs, etc. En outre, il y a beaucoup d'écoles d'été qui sont extrêmement utiles et pour lesquelles nous essayons, avec l'aide de l'Unesco, d'avoir des étudiants en dehors de Etats membres. Je ne saurais trop vous recommander d'aider les étudiants à suivre des formations en dehors de leur propre pays parce que cela leur donne une «saveur» différente.

Le second point qui a été mentionné, dont je pense qu'il est tout à fait central, est qu'il est très bien d'envoyer des étudiants pour obtenir une licence ou un doctorat, au CERN ou dans des pays importants, mais que si, ensuite, ils ne retournent pas dans leur pays, c'est un investissement qui est complètement perdu. De l'extérieur, il est très difficile de forcer les gens à revenir. Aussi, je pense que nous devrions, durant la phase de formation, nous assurer que les étudiants ou les post-doctorants alternent des périodes au CERN et dans leur pays d'origine afin de maintenir des liens, qui sont sociaux et parfois de soutien - il faut s'assurer que le soutien n'est maintenu que s'ils reviennent de temps en temps chez eux. Ensuite, c'est à chaque pays de trouver une solution. C'est un point crucial et il serait dommage que l'important investissement consenti, avec l'aide d'autres pays, soit complètement perdu après la formation.

## Session 2

# Le programme SESAME et les pays d'Afrique du Nord

Comment intensifier la collaboration de pays d'Afrique du Nord et du Proche-Orient autour du programme SESAME de l'Unesco (Source de lumière synchrotron qui sera implantée en Jordanie) ?

Responsable de cette session :  
**Herwig Schopper**

---

## Introduction à SESAME <sup>1</sup>

**Herwig Schopper**

Président du Conseil de SESAME

### Genèse et motivation de SESAME

SESAME (*Synchrotron light for Experimental Science and Application in the Middle East*), est un projet de centre international de recherche et de technologie avancée. SESAME, je l'espère, va ouvrir beaucoup de portes, en faisant la promotion de la science et de la technologie dans la région, en rassemblant des nations de différentes traditions, religions, races ou systèmes politiques, en formant les scientifiques, les techniciens, les administrateurs à coopérer internationalement. Les deux premiers objectifs étaient ceux du CERN à sa fondation - la formation est venue plus tard. De plus en plus, j'observe que dans les pays en voie de développement, il est nécessaire d'apprendre aux gens à coopérer. Très souvent, dans ces pays, les activités se font au sein de très petits groupes isolés, et ils ont besoin d'apprendre à travailler ensemble dans leur pays, et plus encore au niveau international.

SESAME est un enfant du CERN : l'idée a germé lors d'un atelier organisé par Sergio Fubini sur la coopération scientifique au Moyen-Orient. G.-A. Voss et H. Winick y suggérèrent que les éléments d'une machine qui devait être arrêtée à Berlin (Bessy 1) soient réutilisés pour construire une machine pour le Moyen-Orient. Compte tenu des tensions politiques dans cette région, cela ne pouvait se faire que sous les auspices de l'Unesco, comme pour le CERN au lendemain de la seconde guerre mondiale.

Il existe beaucoup de similitudes entre le CERN et SESAME, mais ils sont aussi complémentaires. Le CERN est une organisation européenne, dont seuls les pays européens peuvent être membres ; SESAME concerne les pays du Moyen-Orient, défini ici très généreusement puisqu'il s'étend pour nous du Maroc au Pakistan. Le CERN est un laboratoire de physique nucléaire et de hautes énergies, tandis que SESAME, étant un laboratoire de rayonnement synchrotron, couvrira de nombreux domaines, de la physique à la biologie, la médecine, l'archéologie, etc. Le CERN gère de grands équipements alors qu'un laboratoire de rayonnement synchrotron fait de petites expériences. En conséquence, on a au CERN de très grands groupes et on aura à SESAME de petits groupes. Il a été dit à plusieurs reprises aujourd'hui que les mentalités et les traditions jouent un certain rôle ; le CERN est gouverné par des Européens, donc une mentalité occidentale, tandis que SESAME relèvera de mentalités et traditions moyen-orientales.

La Méditerranée et l'Asie de l'Ouest ont un passé impressionnant dans le domaine des sciences, et ont eu, il y a mille ans, une grande influence sur la science en

---

<sup>1</sup> Traduction de la transcription en anglais de l'exposé de l'auteur.

Europe. J'espère et je suis confiant que cette tradition va reprendre et continuer - SESAME peut en être l'élément central - mais, comme je l'ai dit, cela nécessitera un grand effort de changement de mentalité de certains politiques.

SESAME est-il vraiment nécessaire dans la région ?

Je citerai Abdus Salam qui, en 1983, lors d'un symposium sur les perspectives d'avenir de l'université du Golfe arabe tenu au Bahreïn, se plaignait de ce que la Turquie, les pays du Golfe, l'Iran ou le Pakistan semblaient ne montrer aucune ambition de rejoindre le CERN. Abdus Salam suggéra alors, pour la première fois je pense, qu'un laboratoire de rayonnement synchrotron soit créé au Moyen-Orient. Par la suite, j'ai été invité à donner plusieurs conférences en Arabie saoudite, où l'on pensait à construire un réacteur, et je leur ai suggéré également de construire une source de rayonnement synchrotron, ce qui est beaucoup plus simple. Malheureusement, ce ne fut pas suivi d'effet. Je crois que nous sommes tous très heureux que la situation dont Salam se plaignait ait changé et que beaucoup de ces pays collaborent maintenant avec le CERN, et que la Turquie, les pays du Golfe, l'Iran et le Pakistan soient membres de SESAME.

Je mentionnerai une autre citation qui dit que la coopération scientifique au-delà des frontières géographiques et culturelles est très importante pour stimuler les progrès dans le domaine professionnel mais aussi pour construire des ponts durables entre les personnes. C'est un point de vue qui a déjà été exprimé mais je pense qu'il ne le sera jamais assez.

Une autre raison de construire un tel équipement est de stopper ou d'inverser la fuite des cerveaux. Dans certains pays en voie de développement, le système d'enseignement des scientifiques et des ingénieurs est très bon mais à la fin de leurs études, ceux-ci ne trouvent pas, dans leur pays, d'emploi dans la recherche scientifique. Ils ont donc deux possibilités : soit émigrer vers les pays industrialisés, soit se tourner vers des emplois autres que scientifiques (banque, courtage...) où ils sont mieux rémunérés - ce que j'appelle la fuite interne des cerveaux. Un des remèdes consiste à fournir des équipements de recherche ou des infrastructures scientifiques attractifs dans le pays ou la région. Un laboratoire de rayonnement synchrotron comme SESAME est, de ce point de vue, excellent car interdisciplinaire.

Un protocole d'accord a été signé en juin 2003 au CERN en présence du roi Abdullah II, qui se transformera bientôt, nous l'espérons, en accord CERN-SESAME-Jordanie, avec pour objectifs :

- une coopération en science fondamentale et en formation ;
- des échanges de physiciens, ingénieurs et techniciens ;
- une participation à la physique expérimentale et théorique, au développement d'accélérateurs et de détecteurs, aux technologies de l'information.

Des protocoles spécifiques restent à signer pour des collaborations définies.

## Historique du projet

Je vais dire quelques mots sur l'histoire de SESAME. Comme je l'ai dit, les prémisses datent de 1997, avec la suggestion d'utiliser les éléments de la machine Bessy 1 qui devait être arrêtée définitivement à Berlin. C'était une machine de 0,8 GeV et l'idée initiale était non pas de la réinstaller en Jordanie telle qu'elle était à Berlin, mais de la faire passer à 1 GeV. Pour les raisons politiques que j'ai évoquées, Sergio Fubini et moi-même avons contacté le directeur général de l'Unesco, qui était à l'époque Federico Mayor, pour lui demander de prendre l'initiative d'inviter les gouvernements de toute la région à une réunion à Paris en juin 1999, où la poursuite du projet a été décidée. Un Conseil provisoire a été créé, avec 12 membres et 6 observateurs, qu'on m'a demandé de présider. En 2000, le gouvernement allemand a accepté de faire don des composants concernés, le démantèlement étant financé par SESAME et l'Unesco. Le site a été sélectionné en avril 2000. En juin 2001, SESAME passe à 2 GeV, et en 2002, Bessy 1 est acheminé en Jordanie. En 2002, il est décidé de passer à 2,5 GeV.

L'idée était de suivre exactement la procédure de fondation du CERN, c'est-à-dire de créer un laboratoire qui soit une organisation internationale indépendante. Cela nécessitait l'approbation de l'Assemblée générale de l'Unesco, qui est la plus haute autorité de cette organisation, et de son Bureau exécutif. En principe, cela prend trois ou quatre ans car l'Assemblée générale ne se réunit que tous les deux ans et tout doit être préparé par les comités exécutifs. Heureusement nous avons réussi à boucler la procédure en 9 mois. Le projet a été présenté en novembre 2001 à l'Assemblée générale de l'Unesco (plus de 150 pays), qui a donné un accord de principe et délégué la décision finale à son Bureau exécutif, y compris l'approbation des statuts. En mai 2002, le Bureau exécutif (plus de 50 pays) a approuvé le projet SESAME à l'unanimité, soulignant que SESAME est «un projet modèle pour d'autres régions», «un projet Unesco type, alliant la capacité de construction et l'établissement d'une paix vitale à travers la science». Il a suggéré que l'Unesco mette à disposition des capitaux de départ pour des projets similaires dans d'autres régions du monde. De fait ils encouragent maintenant l'Afrique du Sud et l'Amérique latine à suivre cet exemple.

Le 6 janvier 2003, au cours de la cérémonie de pose de la première pierre en Jordanie, l'existence de SESAME a été proclamée par le directeur général de l'Unesco, Koïchiro Matsuura. Des formalités légales de ratification ont dû être réglées ultérieurement, sur lesquelles je ne m'étendrai pas.

Dans le même temps le Conseil provisoire devenait un Conseil calqué sur le modèle du CERN : chaque pays a

deux délégués et un vote. Les statuts de SESAME sont plus ou moins copiés sur les statuts de la Convention du CERN. Nous avons dû produire tous les documents concernant les règles de financement, de personnel, etc. Cette procédure légale compliquée est heureusement achevée et, depuis le 15 avril 2004, SESAME est une organisation internationale intergouvernementale comme le CERN. Nous avons également signé un accord avec l'Etat hôte, la Jordanie, par lequel celui-ci garantit à SESAME tous les privilèges internationaux (politiques, financiers, etc.) dont le CERN bénéficie en Suisse et en France, ses deux Etats hôtes.

Les principaux acteurs sont le roi Abdullah II de Jordanie, le directeur général de l'Unesco, Koïchiro Matsuura, le prince, frère du défunt roi Hussein, qui est une sorte de conseiller scientifique auprès du roi et qui a joué un rôle très positif, et Khaled Toukan, ministre jordanien de la Science.

La figure 1 (pl. II) montre le dévoilement de la plaque en marbre, lors de la cérémonie du 6 janvier 2003, par Koïchiro Matsuura et le roi Abdullah II.

La figure 2 (pl. II) montre les membres du Conseil : je citerai juste Reza Mansouri d'Iran, Moshe Deutsch d'Israël. Je dois dire que mon grand plaisir dans ce projet est de voir tous ces gens, Palestiniens, Israéliens, Iraniens, Pakistanais, etc., assis autour d'une même table, et parlant de science. Tout le monde est d'accord : SESAME est un projet scientifique et l'on doit essayer de mettre la politique de côté autant que possible.

Les membres de SESAME sont tout d'abord les pays pour lesquels le processus de ratification légale est maintenant terminé : Bahreïn (Ahmed M. Rafea), Egypte (Aly Islam M. Aly et Hamid Roushdy El Kady), Israël (Moshe Deutsch et Eliezer Rabinovici), Jordanie (Khaled Toukan et Abdul-Halim Wriekat), Pakistan (Masoud Ahmad et Aslam Baig), Turquie (Mehmet Tomak et Dincer Ülkü). Pour d'autres pays comme l'Iran (Ahmad Jalali et Reza Mansouri), l'Autorité palestinienne (Said A. Assaf et Salman M. Salman), les Emirats Arabes Unis (Usama Al Khawaja), cette procédure légale est toujours en cours, mais je pense qu'elle sera réglée très prochainement. J'espère vivement qu'avec ce colloque nous pourrions avancer un peu en ce qui concerne le Maroc (Abdeslam Houm-mada), et je considère qu'il est très important que les autres pays d'Afrique du Nord comme la Tunisie, l'Algérie, soient informés de ce projet, où ils seraient les bienvenus. Il est possible que le Qatar se joigne également au projet.

Je suis ravi que certaines des personnes qui siègent au Conseil et aussi d'autres qui travaillent avec SESAME soient en fait issues de la physique des hautes énergies car ce sont des personnes qui connaissent le CERN et qui savent travailler en collaboration, par exemple Reza Mansouri (Iran) ou Eliezer Rabinovici (Israël), qui travaillent au CERN et qui savent comment organiser les collaborations internationales, ce qui est d'une grande aide pour SESAME.

Nous avons également des observateurs : Allemagne, Arménie, Chypre, Etats-Unis, France, Italie, Japon, Koweït, Libye, Royaume-Uni, Russie, Sultanat d'Oman. J'espère que certains pays, comme la Libye par exemple, deviendront finalement membres. Ce qu'il faut, et qui est raisonnable pour ces pays, c'est d'abord de bâtir une communauté scientifique et ensuite devenir observateurs. Les observateurs n'ont pas d'obligations financières. Certains nous apportent un soutien, en particulier pour la formation et les bourses universitaires.

Comme le CERN, SESAME a plusieurs comités consultatifs. Nous en avons quatre :

- Comité technique (présidé par Constantin Papanicolas, Grèce), qui conseille sur la machine ;
- Comité des lignes de faisceaux (présidé par Samar Hasnain, Pakistan), qui forme les collaborations pour les lignes de faisceaux, organise la première génération de faisceaux, y compris le financement et l'obtention d'équipements d'occasion auprès d'autres laboratoires (ultérieurement il évaluera les propositions individuelles) ;
- Comité scientifique (présidé par Zehra Sayers, Turquie), qui conseille sur le programme scientifique global à long terme du projet ;
- Comité de formation (présidé par Reza Mansouri, Iran), qui coordonne les ateliers, les séminaires, l'attribution de bourses universitaires, etc., y compris les collectes de fonds pour la formation.

Nous nous réjouissons que ces comités soient présidés par ces personnalités compétentes.

## Le site de SESAME

Je ne parlerai pas du programme scientifique. Je laisse ce soin aux personnes qui parleront après moi.

Je ferai quelques remarques sur le site de SESAME. Trouver un site est bien sûr toujours très difficile. SESAME étant une organisation internationale, cela nécessitait aussi un changement de mentalité car les gens ont l'habitude de considérer qu'un laboratoire situé dans un pays appartient à ce pays, or là, ce n'est pas le cas - le CERN en est un autre exemple, et la Norvège ou la Suède, par exemple, doivent se sentir tout autant «propriétaires» du CERN que la Suisse ou la France. Mais il est très difficile de changer les mentalités et d'impliquer les gens quand le laboratoire est en Jordanie et qu'il appartient de la même manière à tous les membres. Les membres ont des droits égaux en ce qui concerne les prises de décision, l'exploitation, le personnel, les contrats industriels. Le pays hôte a, en plus, des obligations particulières. Le bénéfice de chacun des membres dépend de ses initiatives.

Lors de la sélection du site, sept des Etats membres avaient proposé en tout douze sites, donc le choix n'était pas facile. Les critères étaient :

- en premier lieu, l'accessibilité pour les scientifiques du monde entier ;

- une localisation géographique centrale ;
- un engagement politique ferme des autorités ;
- une contribution particulière du pays hôte ;
- des infrastructures techniques (eau, électricité, aéroport à proximité, etc.).

Une réunion restreinte du Conseil provisoire, les 10 et 11 avril 2000 au CERN, a débouché sur le choix, à vote secret, du site d'Allan (près de l'ancienne capitale Salt) de l'université appliquée d'Al Balqa, en Jordanie, à 20 km d'Amman. Nous avons un soutien important de Sa Majesté Adbullah II et la Jordanie fournissait le site et le financement de la construction (voir pl. II, fig. 3)

En fait, j'avais suggéré, à une certaine époque, de construire SESAME, comme le CERN, sur la frontière, c'est-à-dire à moitié en Jordanie et à moitié en Palestine. Mais on m'a opposé qu'au Gohr (vallée du Jourdain) il fait trop chaud, alors que de ce côté, c'est très agréable ; on est à environ 1 000 m d'altitude, avec un climat sec, mais ce n'est pas le désert - en fait cela ressemble un peu à la Californie.

Le site proprement dit est actuellement un collège de filles mais ces bâtiments seront finalement cédés à SESAME et pourront être utilisés comme laboratoires et autres installations.

L'obtention du permis de construire aurait demandé plusieurs années dans certains de nos pays. En Jordanie, tout a été très vite grâce au soutien des autorités. La construction a commencé à l'été 2003 : la fig. 4 (pl. II) montre les fondations du hall principal et la fig. 5 (pl. II) le projet tel qu'il sera une fois achevé.

Nous en sommes maintenant à la mise en place du personnel exécutif et de direction :

- Le directeur provisoire est actuellement le ministre Khaled Toukan (Jordanie), longtemps physicien dans un laboratoire national. Il a été décidé de le solliciter pour occuper ce poste pour faciliter les contacts avec les autorités locales, qui sont essentiels pendant la phase de construction, et également les contacts en vue d'attirer de nouveaux Etats membres de la région et de négocier avec eux. Il est en poste pour 3 ou 4 ans.
- Directeur administratif : Hany Helal (Egypte).
- Directeur technique : Gaetano Vignola (Italie) - après D. Einfeld, Allemagne - est l'un des meilleurs experts en accélérateurs de rayonnement cyclotron.
- Directeur scientifique : Aslam Baig (Pakistan).

Nous commençons maintenant à embaucher d'autres personnels.

Les bâtiments n'étant pas encore prêts, le siège provisoire est au bureau local de l'Unesco.

Notre politique générale est un point très important. Je me souviens qu'au lendemain de la seconde guerre mondiale lorsque nous avons voulu, en Europe, nous mettre à la physique des hautes énergies, nous avons bénéficié d'une aide importante de nos collègues américains, sans laquelle nous y aurions mis bien davantage de temps.

L'idée est, de même, de monter ce laboratoire dans la région, avec une aide initiale de l'Occident qui peut être nécessaire, mais le laboratoire devra ensuite être sous la responsabilité de personnes de la région qui devront occuper les postes de direction.

## Description de la machine

La fig. 6 donne l'historique des paramètres de SESAME.

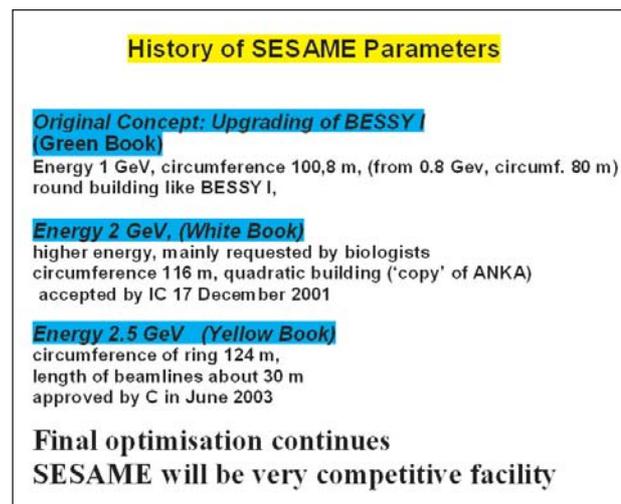


Fig. 6 : Evolution des paramètres de la machine

Comme je l'ai dit, l'idée au départ était de faire passer l'accélérateur Bessy 1 de 0,8 GeV à 1 GeV. Mais lorsque les discussions sur les utilisations potentielles ont commencé, les appétits ont bien sûr grandi, pour obtenir une machine d'abord de 2 GeV, puis de 2,5 GeV, qui est la configuration actuelle. Bien entendu l'optimisation finale se poursuit.

Voici à quoi ressemble la machine (pl. II, fig. 7), avec l'anneau principal d'environ 130 m de circonférence, et les deux injecteurs : un booster de 800 MeV, (synchrotron élanceur), et un préaccélérateur qui est un microtron. Ces deux accélérateurs viennent de Berlin et sont déjà en Jordanie.

Les investissements de SESAME peuvent être ventilés en quatre postes :

- Les coûts de construction du bâtiment, qui sont couverts par la Jordanie. Ils sont estimés à 5,5 millions de dollars, mais la Jordanie est prête à assumer les éventuels dépassements ainsi que la construction de bâtiments supplémentaires.
- Les éléments de l'injecteur et d'autres composants venant de Bessy qui sont donnés par l'Allemagne (valeur : 6,5 millions de dollars).



Ci-dessus :

Fig. 1 (à gauche) :  
Cérémonie de la pose de la première pierre

Fig. 2 (à droite) :  
Les membres du Conseil de SESAME



Fig. 3 : Implantation du site de SESAME en Jordanie



Fig. 4 (à gauche) :  
Les fondations du bâtiment de SESAME

Fig. 5 (à droite) :  
Le projet du bâtiment de SESAME

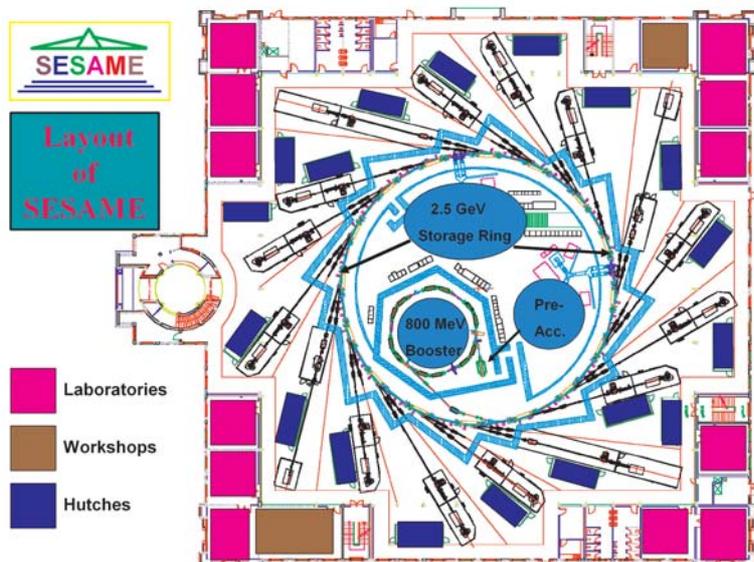


Fig. 7 :  
Vue générale de la machine et des lignes de faisceaux

- L'anneau de stockage lui-même, qui impliquait l'Union européenne pour la mise à niveau de la machine. Tous ceux qui ont eu affaire à l'Union européenne savent combien les procédures sont longues ; nous avons eu il y a deux mois des discussions avec les responsables techniques et l'accord porte sur 12 millions de dollars, ce qui devrait suffire pour démarrer avec une machine de 2 GeV qui soit fiable, et qui pourrait ensuite être portée à 2,5 GeV. Les discussions continuent sur les programmes à utiliser car l'argent ne peut être donné directement à une organisation internationale et doit être canalisé à travers un programme bilatéral ou régional, et tout cela prend du temps.
- Les faisceaux expérimentaux de rayonnements : je ne parlerai pas de leur financement, qui sera abordé par Samar Hasnain.

Une estimation des coûts d'exploitation a aussi été faite :

- Les coûts matériels de fonctionnement de la machine, de maintenance, d'améliorations, etc. seraient de 2 millions de dollars par an.
- Les coûts d'électricité seraient de 650 000 dollars par an.
- Les coûts de personnel sont plus difficiles à estimer : la première année d'exploitation (2009) nécessiterait 32 personnes et, en pleine exploitation, après que des lignes de faisceaux auront été ajoutées, 71 personnes. Les coûts salariaux seraient respectivement de l'ordre de 800 000 dollars/an, puis de près de 2 millions de dollars/an.

Actuellement notre budget annuel est de 700 000 dollars. Les prévisions sont de 3,5 millions de dollars/an au démarrage de l'exploitation en 2009, puis 4,5 millions de dollars/an en pleine exploitation.

Bien sûr ces sommes peuvent paraître importantes pour ces pays - beaucoup d'entre eux n'ont pas d'infrastructures scientifiques - mais j'espère que d'ici au démarrage nous aurons 10 États membres ou plus, ce qui donnerait des contributions de l'ordre de quelque centaines de milliers de dollars par an et par État membre. La répartition ne sera évidemment pas égale entre les membres ; cela fait l'objet de discussions en cours. En tant qu'ancien directeur général du CERN et à la lecture des minutes des réunions de Conseil du CERN, j'ai découvert que lors de la discussion sur la répartition de la contribution décennale entre les États membres, il y a eu une bataille terrible, le président du Conseil du CERN

de l'époque se fâchant et demandant qu'on en finisse avec ces négociations stupides. Ce type de discussion est toujours difficile, mais j'espère que nous allons finir par trouver une issue.

Le calendrier de SESAME est maintenant bien défini. La construction des bâtiments a débuté en septembre 2003 et devrait s'achever en août 2005.

Pour ce qui concerne la machine, sous réserve que les fonds soient disponibles en 2005, l'installation et la mise en service des injecteurs du synchrotron booster devraient être achevées en janvier 2007. L'assemblage de l'anneau de stockage lui-même devrait commencer en octobre 2007 et se terminer en septembre 2008. Cela prendra environ 6 mois pour mettre la machine en fonction, et la mise en service de l'anneau de stockage devrait pouvoir débuter en octobre 2008.

Dix ans se seront écoulés entre le point de départ du projet en 1999 et le démarrage de la machine, ce qui est un délai très court pour un projet international, surtout si l'on tient compte de toutes les difficultés inhérentes à la région.

Bien sûr, parallèlement à l'installation de la machine, les lignes de faisceaux et les expériences doivent être préparées pour être prêtes en 2008. Samar Hasnain vous en parlera.

## Conclusion

En résumé, SESAME sera un laboratoire de rayonnement synchrotron de classe internationale pour la région. Il permettra de promouvoir la recherche interdisciplinaire, fournira un très bon environnement pour les collaborations autant que pour la formation individuelle, favorisera les applications, la technologie ; ce sera un établissement de formation avancée, où l'on pourra apprendre à coopérer ; en dernier point, mais non le moindre, il aidera à une meilleure compréhension entre des personnes de différentes nations, mentalités et traditions.

Un éditorial de *Nature* disait en 1999 : «Aucun investisseur potentiel ne doit être écarté car c'est un investissement qui en vaut la peine. De telles initiatives quand elles se présentent, et ce n'est pas fréquent, devraient être soutenues sans hésitation.»

SESAME est lancé. Beaucoup d'obstacles ont été franchis, d'autres restent à franchir. J'espère que tout le monde contribuera à conduire ce projet au succès et je vous invite tous à nous y rejoindre.

## Le programme scientifique de SESAME <sup>2</sup>

### Zehra Sayers

Istamboul, présidente du Comité scientifique

Sans reprendre l'exposé du P<sup>r</sup> Schopper, l'auteur tient à rappeler que le projet SESAME est la construction d'une source de rayonnement synchrotronique, qui permettra de faire des recherches de niveau mondial en sciences et technologie au Moyen-Orient, tout en fournissant une formation à de jeunes scientifiques de la région. Un des buts fondamentaux est aussi de contribuer à améliorer la compréhension entre les peuples de la région et leur apprendre à collaborer pacifiquement dans le domaine scientifique.

Ces dernières années, le projet SESAME est entré dans une phase active. Outre un programme de formation important pour les jeunes scientifiques, on a engagé un directeur technique, établi une communauté des utilisateurs potentiels, au travers de *workshops* et de formation, mis en place une structure de directoire et obtenu le support financier des Etats membres et d'agences spécialisées, comme l'IAEA et l'Unesco.

Sur le plan organisationnel, on a maintenant :

- un Conseil permanent, avec un délégué par Etat membre ;
- un Directoire, comprenant le directeur du projet, le directeur technique, le directeur scientifique et le directeur administratif ;
- un ensemble de comités consultatifs, pour conseiller les directeurs et coopérer avec eux, à savoir le Comité scientifique, le Comité des lignes de faisceau, le Comité technique et un Comité pour la formation.

Comme vous le savez, le bâtiment de SESAME, entièrement financé par la Jordanie, est en cours de construction. Il abritera la machine proprement dite, mais aussi les laboratoires et bureaux associés. On espère qu'une fois opérationnelle, la machine pourra stocker un faisceau de 40 mA à 2,5 GeV.

Il a fallu plusieurs années pour établir une communauté d'utilisateurs. Pour ce faire, on a organisé une douzaine de *workshops* de 1999 à 2002, impliquant quelque 150 scientifiques des futurs pays membres et des observateurs, et où l'on a traité des accélérateurs et des applications du rayonnement synchrotronique à la biologie, à la science des matériaux, etc. On a ainsi pu organiser les deux premières réunions des utilisateurs de SESAME, à Amman en Jordanie en octobre 2002 et à Ispahan en Iran en décembre 2003. La prochaine réunion doit avoir lieu en Turquie.

Ces réunions ont permis de définir les grands axes de recherche avec SESAME, à savoir :

- biologie moléculaire structurale,
- physique moléculaire et atomique,
- science des surfaces et des interfaces,
- sciences de l'environnement,
- sciences des matériaux,
- archéologie,
- applications industrielles.

L'aspect «éducation» a également bien été mis en évidence : SESAME est une installation qui doit servir aussi à former des jeunes, en développant une recherche interdisciplinaire.

Dans une première étape, on se contentera de six lignes de faisceau, sur lesquelles seront installées les expériences. On aura ainsi des lignes spécialisées pour :

- la cristallographie des protéines, avec un rayonnement variable de 5 à 15 keV, produit par un wiggler ;
- la diffusion des rayons X aux petits et aux grands angles, à 10 keV, avec un onduleur ;
- la spectroscopie par photoémission et photoabsorption, de 5 à 1000 eV, aussi avec un onduleur ;
- la spectroscopie de structure fine par absorption et par fluorescence, avec un wiggler multipolaire donnant des rayons X de 3 à 30 keV ;
- la diffraction des poudres, avec la même source ;
- la spectroscopie microscopique dans l'infrarouge, (0,01 à 1 eV), avec un aimant de déflexion à large ouverture.

A ce jour, on a reçu 61 propositions d'expériences sur ces lignes de faisceau, venant de tous les Etats membres et de certains pays observateurs. On peut les classer ainsi :

- Pour la biologie et la médecine :
  - structure des éléments pathogènes,
  - densité génétique de plantes et microorganismes,
  - métalloenzymes et métalloprotéinases,
  - biotechnologie, caractérisation de biosensors,
  - biominéraux et biominéralisation.
- Pour la science des matériaux :
  - céramiques et verres,
  - matériaux magnétiques,
  - physique et chimie des polymères,

<sup>2</sup> Le texte ci-dessous est un bref résumé de la communication faite en séance. Il a été établi à partir de l'enregistrement vidéo de la session et le lecteur est invité à se référer à cet enregistrement, disponible sur DVD, pour plus de détails.

- films minces,
- supraconducteurs.
- Pour les sciences de l'environnement :
  - argile et analyse des roches,
  - contamination des sols,
  - applications pour l'agriculture et la biologie.
- Applications industrielles :
  - caractérisation de polymères,
  - synthèse et caractérisation de nouveaux matériaux,
  - analyse chimique pour des médicaments.

En conclusion, on peut dire que SESAME est une installation de la lumière synchrotrone internationale et

pluridisciplinaire, où les utilisateurs pourront venir sans discrimination pour collaborer, qui servira aussi à la formation de jeunes scientifiques de la région et qui contribuera au développement de l'économie locale.

Cependant, il reste des problèmes en suspens : la communication doit être améliorée et SESAME doit se faire connaître dans les pays de la région. Le support financier de SESAME doit être stabilisé et il faut trouver le moyen de compenser les disparités entre les ressources financières et humaines des différents pays, comme résoudre les problèmes de déplacement des utilisateurs. Bien entendu, tous ces points sont conditionnés par la stabilité politique de la région.

---

## La première génération des lignes de faisceaux <sup>3</sup>

### Samar Hasnain

Daresbury, président du Comité des lignes de faisceaux

L'orateur commence par faire remarquer que SESAME est une petite machine, 130 m de circonférence, à comparer aux 27 km du LHC, que les lignes de faisceaux où se dérouleront les expériences sont très près de la machine, et qu'enfin les utilisateurs appartiennent à des disciplines très différentes, allant de la physique à la médecine et la biologie. Le processus de définition des lignes de faisceaux a donc dû tenir compte de ce contexte.

La première étape a consisté à identifier la communauté des utilisateurs. On a pu alors organiser la première réunion des utilisateurs en octobre 2002, avec pour but de définir les caractéristiques souhaitées pour les différentes sources de lumière, de recenser les différents types d'expériences envisagées, quelles sortes d'échantillons intéressaient les utilisateurs potentiels, quelle chambre d'expérience ils souhaitaient, en se limitant à un nombre de lignes de faisceaux compris entre 2 et 12 dans une première phase. On a voulu également identifier au cours de cette réunion des «champions» pour chaque ligne de faisceaux, c'est-à-dire 2 ou 3 personnes expertes de la ligne en question. On est ainsi arrivé à douze lignes potentielles :

- cristallographie MAD des protéines, avec une petite cellule ;
- cristallographie de protéines à haute résolution et avec une grande cellule ;
- diffusion de rayons X aux petits et aux grands angles pour des polymères ;
- diffraction des poudres ;
- cristallographie chimique ;
- spectroscopie par photoélectrons de gaz et de solides ;

- microspectroscopie ;
- cristallographie de matériaux magnétiques ;
- spectroscopie infrarouge ;
- diffraction UV pour la biologie ;
- XAFS ;
- Micro-diffraction.

Pour faire un choix cohérent et raisonnable - on ne peut pas tout faire du premier coup -, il a fallu d'autres réunions, en particulier des réunions conjointes entre le Comité des lignes de faisceaux et le Comité scientifique. Pour la petite histoire, l'orateur mentionne une réunion à Daresbury, juste avant Noël 2002, et qui s'est déroulée sur un vendredi et un samedi, sans que les participants s'en offusquent.

Ce processus de concertation a conduit les deux comités à recommander de porter l'énergie de la machine à 2,5 GeV, pour conserver la compétitivité de SESAME avec d'autres machines analogues comme l'ALS (Advanced Light Source). On a également recommandé d'installer deux onduleurs dans la chambre à vide et de faire en sorte que la machine permette aussi de faire des recherches avec des UV sous vide. Un autre point important a con-

<sup>3</sup> Le texte ci-dessous est un bref résumé de la communication faite en séance. Il a été établi à partir de l'enregistrement vidéo de la session et le lecteur est invité à se référer à cet enregistrement, disponible sur DVD, pour plus de détails.

cerné le mur de blindage qui devait être construit en fonction d'extensions futures possibles.

On a ainsi abouti à six lignes de faisceaux dans une première phase, chacune étant dédiée à un domaine spécifique, comme indiqué par l'orateur précédent. On envisage de compléter ce dispositif par six lignes supplémentaires : cette phase 2 pourrait se faire sur 3 ou 4 ans, en installant en moyenne deux lignes nouvelles par an.

La deuxième réunion des utilisateurs a entériné ces décisions et a aussi recommandé que la machine soit construite avec deux sections droites longues de 5 ou 6 m, pour y installer des ondulateurs dans la chambre à vide. Elle a demandé également l'installation de deux aimants de

déflexion à large ouverture et noté que l'espace dans le hall de la machine était très restreint et que donc, les bureaux et ateliers auxiliaires devaient aller dans un autre bâtiment. Enfin, la formation des personnes en charge des premières lignes de faisceaux doit commencer immédiatement.

En conclusion, les pays membres de SESAME disposeront donc d'une machine performante, tout à fait compétitive avec les installations analogues dans le monde. Mais il faut remarquer que cette machine desservira 300 millions d'habitants, alors que la proportion moyenne dans le monde développé est d'une source de rayonnement synchrotronique pour 40 millions d'habitants, mais c'est un bon point de départ.

---

## Participer à SESAME : le point de vue d'un utilisateur <sup>4</sup>

**Nasser Hamdan**  
Emirats Arabes Unis

Cet exposé sera quelque peu différent de ceux qui précèdent, car il fait part de l'expérience personnelle d'un utilisateur potentiel de SESAME, explique comment et pour quoi il est impliqué dans ce projet, et termine en indiquant quels sont les espoirs mais aussi les soucis de l'orateur quant à l'avenir de la recherche scientifique dans la région, en particulier avec une source de rayonnement synchrotronique multinationale.

L'orateur a été impliqué dès 1999 dans une collaboration multinationale dans la région : il a en effet été contacté par des scientifiques palestiniens pour élaborer une proposition de création d'un laboratoire de sciences des matériaux, pour préparer les scientifiques palestiniens à l'utilisation d'une source de rayonnement synchrotronique. Malheureusement, ce projet n'a pas débouché, par manque de support financier assuré.

L'auteur a reçu alors une proposition pour aller à l'ALS (Advanced Light Source à Berkeley), qui est un institut coopératif du Département de l'énergie des Etats-Unis (DoE), mais en fait la position proposée faisait partie d'un programme de formation pour SESAME.

Après quelques hésitations pour des raisons financières, l'auteur est arrivé en juin 2000 à l'ALS, où on lui a assigné la position de *beamline scientist* (scientifique en charge du fonctionnement physique d'une ligne de faisceaux) pour une ligne de faisceaux dédiée à la chimie et la science des matériaux. Avant de pouvoir effectuer des recherches personnelles, il a fallu apprendre le métier de *beamline scientist*, ce qui a obligé l'orateur à se confron-

ter à tous les problèmes techniques de l'installation. Ce fut dur, mais très enrichissant.

Au bout de quelques mois, l'auteur a pu entreprendre des recherches personnelles portant essentiellement sur les supraconducteurs à haute température critique. La ligne dont il avait la charge pouvait délivrer  $10^{11}$  photons/s, d'une énergie comprise entre 30 et 1200 eV, avec une très bonne résolution en énergie et une polarisation linéaire ou circulaire. Au bout de la ligne, il y avait trois stations de tests, qu'on pouvait commuter très rapidement. Les problèmes étudiés concernaient la concentration et le rôle des porteurs de charge, l'échange de cations ou d'anions dans différents supraconducteurs, etc. Toutes ces recherches ont été faites avec des techniques de spectroscopie aux rayons X, par émission ou par absorption.

L'auteur a également participé à d'autres sujets de recherche à l'ALS, avec des groupes du Moyen-Orient et d'ailleurs. Il s'est intéressé en particulier à la catalyse de corps à base de tungstène et d'aluminosilicates, et également à des problèmes portant sur les films minces, pour lesquels il a utilisé la spectroscopie X de haute résolution

---

<sup>4</sup> Le texte ci-dessous est un bref résumé de la communication faite en séance. Il a été établi à partir de l'enregistrement vidéo de la session et le lecteur est invité à se référer à cet enregistrement, disponible sur DVD, pour plus de détails.

par photoémission, en collaboration avec des physiciens espagnols et américains. Après son départ de Berkeley, l'auteur a pu poursuivre ses recherches en obtenant du temps de faisceau sur la machine ELETTRA l'année dernière. Il a demandé du temps pour cette année au travers d'une collaboration avec une équipe française.

Ces activités ont permis à l'auteur de participer à l'élaboration du projet SESAME, en tant que membre du Comité de lignes de faisceaux. C'est ainsi qu'il a collaboré à la conception du hall d'expériences de SESAME (Amman, juillet 2001), à la première réunion des utilisateurs (Amman, décembre 2002), à la réunion conjointe des Comités scientifique et de lignes de faisceaux à Daresbury, à la deuxième réunion des utilisateurs (Ispahan, Iran, décembre 2003) et à la dernière réunion conjointe des Comités scientifique et de lignes de faisceaux, à Paris en avril 2004.

L'auteur en a tiré un certain nombre d'espoirs pour le futur, mais aussi quelques soucis. Pour les espoirs, il se félicite tout d'abord du nombre de scientifiques qui se montrent intéressés par le projet SESAME, et il espère fermement qu'encore plus de scientifiques se joindront à ce projet, qu'il y ait de nouveaux Etats membres ou non. Cet optimisme est tempéré par quelques sujets d'inquiétude, comme le fait que Recherche et Développement ne semblent pas une priorité pour les populations et les gouvernements de la région. Il y a aussi un manque d'infrastructure scientifique et de recherche, qui peut limiter l'utilisation d'une source de rayonnement synchrotron, tout comme le manque de coordination entre les chercheurs, qui souvent conduisent leur travaux de façon personnelle. Enfin, les pays de la région doivent faire un effort pour le financement de la recherche scientifique, à la fois pour le financement public et pour le financement privé.

## Session 3

# La fracture numérique

Lutter contre la fracture numérique. Pour un accès généralisé des chercheurs du Maghreb au réseau Internet à haut débit et à la grille de calcul

Responsable de cette session :

**Guy Wormser** (IN2P3, LAL-Orsay, France)

---

## Introduction <sup>1</sup>

**Michel Spiro**

Directeur de l'IN2P3, France

Pour reprendre le fil de la discussion de tout à l'heure, je vais dire encore quelques mots pour souligner l'importance de cet espoir que l'on met dans la réduction de la fracture numérique, qui est un véritable défi pour les dix prochaines années. Ce qui est en jeu, c'est d'essayer de rassembler davantage de gens de tous les pays par l'accès numérique, et, ainsi, de réduire les fractures qu'on voit se creuser sur les plans politique, religieux, sur celui des civilisations, et contribuer à éviter ce choc des civilisations qui nous menace.

De ce point de vue, je crois qu'à notre niveau plus modeste, on peut considérer que le LHC, cette grande entreprise mondiale que mène le CERN en collaboration avec tous les pays, pourra être un jalon dans cette lutte contre la fracture numérique et dans cette action de rassembler des gens de tous les pays.

Quels sont les défis du LHC ?

On a réussi - et c'est déjà un grand succès - à rassembler des pays extrêmement différents, avec des religions, des positions politiques, des civilisations différentes, dans cette aventure de la construction des détecteurs du LHC. Les grandes collaborations, ATLAS et CMS par exemple, rassemblent des pays comme le Pakistan, l'Iran, l'Inde, Israël, la Turquie, maintenant le Maroc, bientôt l'Égypte je crois, donc un panel de pays qui, sur beaucoup d'autres plans, sont souvent opposés. On a donc réussi, sur cette base de quête de connaissances fondamentales, ce concert des nations pour la recherche et la science, qui rassemble des pays de partout. Modestement, l'IN2P3 y a contribué en associant le Maroc à la construction du détecteur ATLAS et, maintenant, en le faisant entrer dans la col-

laboration ATLAS. C'est l'étape de construction, où il y a quand même des inégalités technologiques, puisque ce sont, bien sûr, les pays développés qui contribuent à apporter l'essentiel de l'équipement nécessaire pour réaliser ces expériences.

Le prochain défi va être d'essayer de créer réellement une démocratie d'accès aux données, c'est-à-dire que n'importe quel collaborateur, qu'il soit en Asie, en Afrique, en Europe, en Amérique ou en Australie, puisse contribuer d'une manière égale à des découvertes en physique. L'espoir est que le succès couronnera les meilleurs, indépendamment de leur origine. C'est un vrai défi, qui suppose d'avoir l'état d'esprit adéquat, et je crois qu'on l'a, mais qui suppose aussi une égalité d'accès aux données. Pour cela, trois conditions sont requises. D'abord, le concept de *grille*, dont on va parler, doit être un succès sur le plan technique. Il faut, ensuite, un réseau de communication qui permette de transmettre toutes les informations nécessaires pour faire des découvertes de manière égale quel que soit l'endroit du monde, ce qui suppose des connexions entre le CERN notamment et les grands pays, puis, à l'intérieur des pays, d'irriguer les universités. Enfin, il faut que, dans tous les pays, on ait accès à tous les logiciels, et à tous les développements qui permettent la maîtrise de ces logiciels.

---

<sup>1</sup> Transcription de l'exposé de l'auteur en français.

En ce sens d'ailleurs, pour être plus concret, je pense que ce qui a été fait entre le Maroc et la France doit se prolonger peut-être par une unité mixte de recherche, où des chercheurs de l'IN2P3 du CNRS participent au Maroc, avec des chercheurs marocains, à récupérer toute l'information, à établir la connexion avec le CERN et à faire vraiment des recherches ensemble, pour être sûr qu'on a vraiment cet égal accès. Si la séparation entre les gens est trop grande, ce sera plus difficile.

Donc trois défis : mélanger les équipes, des réseaux qui soient impeccables, et le concept de grille.

Le LHC sera, je pense, un pilote pour instaurer cette démocratie dans la découverte, donc un partage du savoir. Bien entendu, le but n'est pas de le faire uniquement pour la physique des particules, et, à travers le programme EGEE qui va être décrit, l'espoir est qu'un spectre beaucoup plus large d'activités scientifiques puisse être irrigué. C'est un enjeu majeur pour nos disciplines de montrer qu'on est un peu pionnier, de la même manière que le CERN l'a été pour rassembler les nations autour de lui. Il faut offrir les moyens, où qu'on soit dans le monde, d'être capable de faire des découvertes.

---

## La grille internationale EGEE Infrastructure et fracture numérique <sup>2</sup>

**Fabrizio Gagliardi**  
CERN

Je suis très reconnaissant de cette invitation qui me donne l'occasion de débattre de l'évolution des nouvelles technologies dans le contexte de la fracture numérique, problème majeur pour nous tous. Si ces nouvelles technologies peuvent aider, et je crois qu'elles le peuvent, c'est sans aucun doute une occasion que le CERN et les scientifiques ne doivent pas laisser passer.

Tout le monde n'étant peut-être pas familier des technologies informatiques, et particulièrement de ce que nous appelons maintenant les grilles informatiques et le stockage des données, je vais, en quelques mots, décrire ce que sont ces technologies, et pourquoi nous pouvons parler aujourd'hui de technologies de grille, ce qui n'était pas possible il y a encore quelque temps. Ce que nous appelons la *grille* est simplement l'évolution de ce que nous appelons depuis de nombreuses années l'*architecture distribuée*. Le CERN a une longue tradition de répartition, de calcul et de transferts des données entre différents ordinateurs depuis le début des années quatre-vingt, et, récemment, on a connu une accélération d'un certain nombre de technologies de base qui sont des éléments fondamentaux des grilles informatiques et de stockage de données.

Le facteur technologique majeur qui a rendu possible la grille est le travail en réseau. Nous avons ici des représentants du plus grand réseau de recherche au monde, le consortium GEANT. Parmi les performances de tout premier plan qui sont maintenant possibles, je voudrais signaler qu'il y a quelques jours, fin avril 2004, dans le cadre d'une collaboration de l'Union européenne avec nos chercheurs américains, nous avons pu à nouveau battre le

record du monde de vitesse de transmission sur Internet, avec une vitesse 10 000 fois plus rapide qu'avec l'ADSL que vous avez chez vous. Pour vous donner une idée de la quantité de données que vous pouvez transférer, un DVD de 5 gigaoctets, par exemple, peut être transféré en moins de 10 s - vous pouvez ainsi transférer plusieurs films en moins de 10 s, ce qui peut intéresser vos enfants !

Ce que je veux souligner, c'est qu'un certain nombre de technologies de base qui existent depuis longtemps deviennent maintenant non seulement puissantes parce que le réseau est capable d'énormes performances, mais aussi très abordables du fait de l'évolution des technologies et de la libéralisation du marché. On peut donc maintenant transférer à travers le monde une quantité importante de données de manière sécurisée, très rapide et à des conditions financières abordables. Cela a donné l'idée de déplacer notre architecture distribuée de campus ou de centres informatiques vers un campus ou un centre informatique virtuel, élargi au monde.

À côté de la technologie, il y a les besoins de la science, du fait, à nouveau, de l'évolution technologique. La science a longtemps été analogique - vous regardiez simplement l'écran d'un appareil pour prendre des mesures -, aujourd'hui elle est totalement numérique. De plus,

---

<sup>2</sup> Traduction de la transcription en anglais de l'exposé de l'auteur.

ce n'est pas seulement le cas de la physique mais aussi de la biologie, etc., et aussi de l'observation terrestre. Tous les instruments produisent des données numériques, ils en produisent beaucoup, et l'électronique suit la loi de Moore : tous les dix-huit mois, vous pouvez mettre deux fois plus d'électronique dans vos composants. Comme les scientifiques veulent toujours plus de données parce qu'avec plus de données on fait une meilleure science, ils ont besoin de plus de puissance informatique pour gérer, traiter les données et faire l'analyse d'une science instructive. Ces deux facteurs ensemble : la technologie qui pousse les nouvelles idées scientifiques et la science qui tire la technologie, constituent, je crois, ce qui a créé cette idée de grille informatique et a permis, ces dernières années, toute cette éclosion de projets de grilles.

Les fruits de ce que nous appelons l'*ère informatique* sont réels dans la plupart des pays développés mais malheureusement moins évidents dans les pays encore en voie de développement. La bonne nouvelle est que, grâce à l'activité de GEANT, et avec le soutien de l'Union européenne et des Etats-membres, les réseaux s'étendent maintenant de plus en plus, y compris dans les pays en voie de développement. Il est assurément beaucoup plus facile d'apporter un réseau hautement performant à un pays en voie de développement que d'y construire une lourde infrastructure informatique. Pour ce qui est de la fracture numérique, qui est l'un des sujets de ce colloque, je n'ai pas besoin de préciser combien il est dangereux de laisser s'élargir le fossé entre les pays développés et les pays en voie de développement, car toute cette technologie accélère la croissance de ces derniers, et il nous faut donc vraiment combattre cette fracture.

Je vais maintenant vous parler de cette technologie et de ce que nous pouvons faire avec, et dire en quoi la grille change notre manière de faire de la science et, au final, change aussi d'autres choses.

D'abord, le fait de pouvoir réunir, de manière dynamique et facile, des ressources informatiques qui existent déjà en plusieurs endroits, et de créer une sorte de centre informatique virtuel, évite bien des problèmes, comme en cas de désastre majeur où les récupérations de données sont beaucoup plus efficaces si l'on dispose de toute la puissance informatique nécessaire, et si l'on peut utiliser beaucoup de modèles différents.

Prenons l'exemple de l'évolution de la crue du Danube il y a deux ans. En principe, rien n'empêche les pays responsables de la surveillance et du contrôle du Danube de mettre en place une infrastructure informatique très lourde et de l'utiliser tout le temps. Mais c'est peu probable politiquement car personne ne va investir des fonds considérables dans une infrastructure qu'on utilisera peut-être qu'une fois tous les dix ans quand le fleuve sort de son lit. L'on pourrait, à la place, dès qu'on pressent un danger, réunir suffisamment de puissance informatique pour créer ce centre informatique virtuel, en rémunérant, peut-être chèrement, tous les centres informatiques contributeurs -

mais on trouve les moyens en cas d'urgence -, et, une fois l'urgence passée, revenir au fonctionnement normal.

Plus en rapport avec la fracture numérique, il est clair que l'accès à l'enseignement supérieur est coûteux. L'enseignement supérieur implique de plus en plus d'avoir accès à d'importants équipements informatiques. De plus en plus d'étudiants ont besoin de technologies logicielles sophistiquées. Avec un bon accès au réseau et donc un bon accès à la grille, une université isolée peut offrir à ses étudiants, avec un budget relativement modeste, un accès aux plus récentes technologies logicielles comme l'utilisation du rendu tridimensionnel ou de CAD-CAM. (conception et fabrication assistées par ordinateur). Si l'on pouvait disposer de systèmes où l'on payerait pour l'utilisation d'un progiciel très sophistiqué quelques heures par semaine, même un petit institut pourrait se le permettre. On pourrait même imaginer des systèmes permettant à une petite université d'accéder gratuitement, pour un usage académique, à toutes sortes de systèmes complexes. Voilà un bon exemple d'utilisations possibles des technologies de grilles pour réduire la fracture numérique.

Plus généralement, l'accès, à la demande, à une puissance informatique presque illimitée pourrait permettre une meilleure science. Prenons, par exemple, le cas d'un colloque technique d'où une nouvelle idée surgit. Les participants pourraient immédiatement utiliser leur PDA (*Personal digital assistant*) ou même un téléphone pour lancer une application, effectuer des simulations et vérifier une idée avant qu'elle ne s'échappe. Et ce n'est pas de la science-fiction ! A l'IST 2003, à Milan l'an dernier, dans le cadre d'un projet récemment achevé dont je vais vous parler brièvement, nous avons pu utiliser l'un de ces téléphones de dernière génération pour lancer des simulations de physique des particules sur des ordinateurs répartis à travers l'Europe et en recevoir les résultats. Ces systèmes fonctionnent très bien - il suffit d'une connexion sans fil ou téléphonique.

Ces trois scénarios que je viens de décrire ne sont pas de la science-fiction, ils sont réalisables aujourd'hui.

Le projet que je viens d'évoquer est Datagrid. Il est important d'en parler car il montre ce que nous avons pu réaliser ces trois dernières années. Le projet s'est achevé récemment, en mars 2004. Sur la figure 1 (pl. III), les points de couleur correspondent à tous les centres informatiques des instituts de physique et d'autres instituts scientifiques, la plupart en Europe mais pas uniquement. Trois centres américains, Stanford, Argonne et Caltech, ont contribué au banc d'essai à différents niveaux. La Russie a participé à différents essais et nous sommes allés jusqu'à Taiwan, en Corée du Sud, et ailleurs. Grâce à la formidable extension des réseaux nous avons déjà pu réaliser un banc d'essai de Datagrid, qui, bien entendu, en tant que banc d'essai n'est pas fiable ni performant à 100 %, mais nous avons pu déjà faire un travail utile. L'important est qu'avec les trois applications pilotes choisies - physique des parti-



Fig. 1 : Localisation des centres de Datagrid

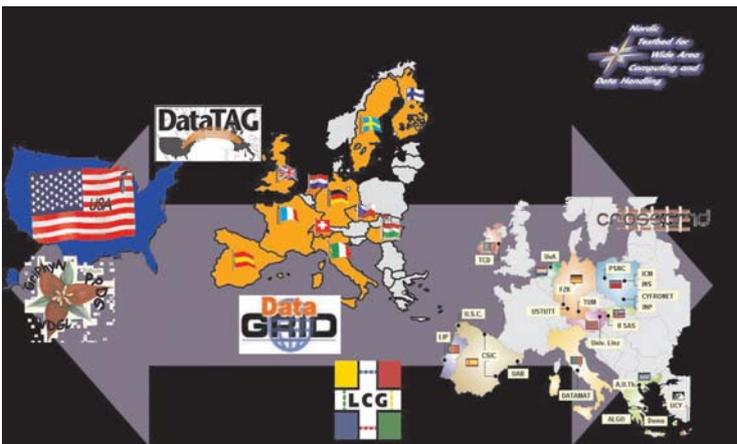


Fig. 2 : Les partenaires mondiaux de Datagrid

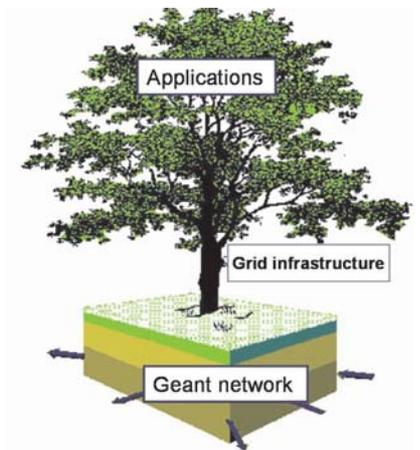
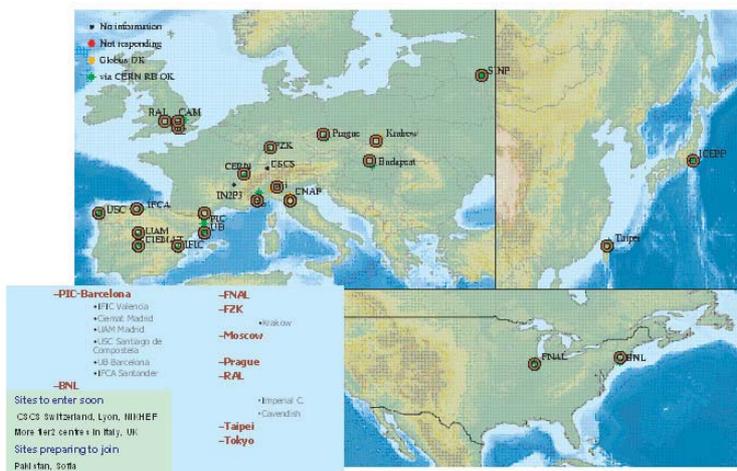


Fig. 3 : Manifeste symbolique de EGEE

Fig. 7 : Localisation des centres participant à EGEE



Fig. 8 : Quatre vues du centre de calcul du CERN

cules, observation terrestre avec l'ESA, et sciences biomédicales - nous avons pu faire de la science.

Nous formions un consortium relativement important : presque 10 millions d'euro de l'Union européenne sur 3 ans, 21 partenaires, en tout 150 scientifiques, ingénieurs, programmeurs impliqués. Il est important de constater que beaucoup des choses, dont j'ai dit qu'elles pouvaient être faites, ont déjà été réalisées, à un niveau expérimental certes, au cours des trois dernières années. Parallèlement, nous avons participé à un effort international. Vous pouvez voir au centre de cette carte (pl. III, fig. 2) le logo de Datagrid mais aussi sur la gauche, les logos de projets américains similaires, et l'ensemble s'est déroulé constamment en bonne collaboration. Datagrid est le projet le plus important de ce type en Europe. A travers un autre projet de l'Union européenne, Datatag, nous avons pu nous connecter et nous assurer que les bancs d'essai pouvaient communiquer avec le projet américain.

Puis, nous avons eu d'autres projets en Europe. Il y a eu quelques remarquables idées d'utilisation des logiciels Datagrid en développement, comme Crossgrid, soutenu par l'Union européenne. D'autres projets ont démarré au niveau national. Beaucoup de gens ont entendu parler des investissements très importants dans plusieurs pays européens (Royaume-Uni, Italie, France, etc.). Dans les pays scandinaves, ils se sont associés pour créer une grille, appelée Nordugrid.

Tous ces projets internationaux ont travaillé ensemble et LCG, la grille développée pour le LHC, se construit beaucoup sur les résultats de tous ces projets.

Pourquoi avons-nous décidé de nous rapprocher de l'Union européenne pour franchir un pas de plus ? Pourquoi, après Datagrid, avons-nous décidé de lui proposer EGEE (Enabling Grid technologies for E-science in Europe) et pourquoi EGEE est-il pertinent dans le contexte de la fracture numérique ? Nous avons pensé qu'une infrastructure européenne de grande grille, une véritable infrastructure et non plus un banc d'essai prototype, pourrait aider à fournir un accès facile à la technologie à de petits groupes de recherche, comme je l'ai déjà mentionné, à des sciences qui n'ont peut-être pas de capacités financières suffisantes pour acquérir de bons outils informatiques, et surtout aux pays en voie de développement les plus isolés. Les possibles fruits de l'EGEE, dès qu'il pourra déployer son infrastructure globale, seront : la création de nouveaux emplois, de nouveaux types de collaborateurs (de plus en plus sont appelés *collaborateurs* les ordinateurs et leurs responsables qui aident à construire un environnement de collaboration), un accès facilité aux marchés mondiaux, un nouvel esprit d'entreprise, l'accès à un meilleur enseignement. Tout cela est important à savoir dans le contexte numérique.

Pour décrire le projet, nous avons une sorte de *manifeste EGEE*. Certains de nos collaborateurs ont eu au début l'idée de cet arbre (pl. III, fig. 3). En bas, on a le réseau GEANT, qui est la colonne vertébrale et qui

permet la communication entre toute l'informatique et le répertoire de données, et l'on peut imaginer toutes les feuilles de l'arbre comme un très large éventail de toutes sortes d'applications scientifiques. La partie qui concerne EGEE est le tronc, et développer ce tronc consiste à développer l'infrastructure, le levier, l'interconnectivité du réseau GEANT et à fournir la puissance informatique et les mouvements de données pour toutes ces applications. Voilà où nous en sommes actuellement.

J'ai déjà mentionné les bénéfices et les potentialités pour nombre d'applications ; voici une liste d'applications (fig. 4) pour lesquelles nous sommes déjà en contact, et toutes sortes d'applications que nous espérons bientôt voir fonctionner sur EGEE. Pour résumer, les bénéfices ne vont pas concerner uniquement les scientifiques mais aussi les compagnies, les étudiants qui vont pouvoir bénéficier d'un meilleur enseignement, les enseignants qui vont pouvoir utiliser et développer des salles d'enseignement virtuel (fig. 5).

Nous avons eu au CERN, le mois dernier, la visite de la ministre italienne de la Recherche et de l'Enseignement, qui était venue pour discuter de la possibilité pour 1 000 instituts d'enseignement secondaire italiens de faire de la science concrète en classe. Plutôt que de faire de petites expériences de laboratoire qui ne marchent jamais, elle souhaite confronter les élèves aux résultats récents de la science. Il existe beaucoup d'initiatives similaires aux Etats-Unis, en Allemagne et ailleurs. En physique des particules, on pourrait installer de simples détecteurs de rayonnement cosmique dans ces 1 000 écoles. Les écoles sont maintenant toutes connectées à l'Internet - ce qui n'était pas le cas il y a cinq ans - et équipées d'au moins un ordinateur comme celui-ci. Cet ordinateur ne peut à lui tout seul analyser les données de rayonnement cosmique générées dans l'établissement, mais si l'on rassemble les 1 000 établissements sur une grille en utilisant le logiciel que nous avons développé, c'est-à-dire qu'on rassemble à la fois leurs données et leurs puissances informatiques, alors on peut imaginer des élèves faisant de la science concrète et, pourquoi pas, une découverte importante. Vous voyez ce qu'on peut faire avec des moyens simples et abordables, comme le logiciel et les systèmes que nous avons développés, et tout ce qu'ils permettent potentiellement.

Quels sont les partenaires impliqués dans EGEE ?

A cause de sa nature non plus de test mais de production réelle, nous devons nous assurer qu'une plus large communauté de scientifiques ait accès à cette infrastructure. C'est un très grand projet et un gigantesque défi sur le plan de la gestion et de l'administration - j'ai du mal à trouver le sommeil certaines nuits ! Mais nous nous devons d'être grand sinon cela n'aurait pas eu de sens. Ce sont 70 instituts de tout premier plan dans 27 pays. CERN, Europe centrale, France, Allemagne, Suisse, Irlande et Royaume-Uni, Italie, Europe du Nord, Russie, Europe du Sud-Est, Europe du Sud-Ouest, Etats-

Fig. 4 : Applications potentielles de EGEE

**Bénéfices dans plusieurs champs d'application**

- **Médecine/santé** (imagerie, diagnostic et traitement)
- **Bioinformatique** (étude du génome du protéome humains pour comprendre les maladies génétiques)
- **Ingénierie** (optimisation de conception, simulation, analyse d'échec, accès et contrôle à distance des instruments)
- **Ressources naturelles et Environnement** (prévisions météorologiques, observation de la Terre, modèles et prédiction de systèmes complexes)

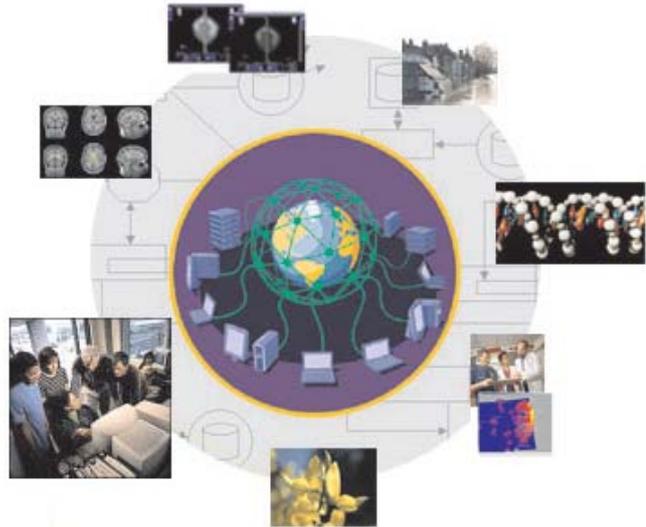


Fig. 5 : Bénéfices potentiels de EGEE sur le plan humain

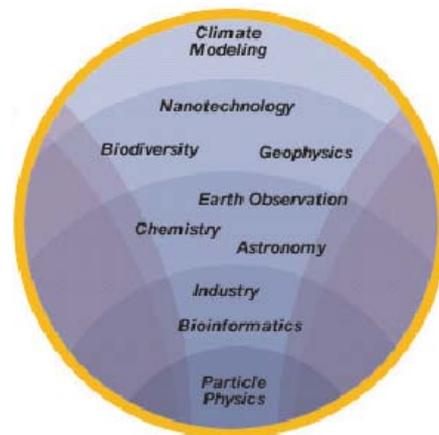
**Bénéfices pour différents acteurs**

- **Scientifiques**
- **Collaborations à toutes échelles** (projets pluri-institutionnels à grand échelle + petits groupes de recherche dans des pays isolés)
- **Compagnies** (entreprises mondiales, partenariats industriels...)
- **Etudiants** (compétence en technologie, réflexion critique et travail en équipe)
- **Enseignants** (salles et laboratoires d'enseignement virtuel, bibliothèques numériques)



Fig. 6 : Applications prévues de EGEE

- Applications-cadres de EGEE y compris les applications académiques (ouvertes aux mondes industriel et socio-économique également)
- Le **critère majeur de succès de EGEE** : combien d'utilisateurs satisfaits dans combien de domaines différents ?
- **5 000 utilisateurs** (3 000 après l'année 2) dans au moins cinq disciplines
- Deux applications pilotes sélectionnées pour orienter la mise en œuvre et certifier la performance et la fonctionnalité de l'infrastructure en développement : **physique et bioinformatique**



Unis, presque tout le monde y figure ; les Balkans sont couverts par une mesure d'accompagnement ; les Républiques Baltes sont en discussion avec nous, et nous sommes extrêmement intéressés par une collaboration avec nos collègues de l'ONU pour commencer à couvrir la région méditerranéenne. Nous collaborons également avec l'Asie, Taiwan et la Corée du Sud. Notre ambition est d'inclure absolument tout le monde.

En ce qui concerne les applications (fig. 6), nous pensons commencer avec deux applications pilotes : la physique et la bio-informatique. Pourquoi ces applications ? Parce qu'elles émanent de communautés dont l'approche informatique inclut déjà une décision d'investir dans la grille et de l'utiliser. Nous prêchons donc des convertis et nous savons que nous aurons une très bonne intégration avec nos utilisateurs. Nous commençons avec des applications pilotes mais notre cible est d'atteindre 5 000 utilisateurs en trois ou quatre ans, et, dès la fin de la seconde année, au moins 3 000 utilisateurs de cinq disciplines.

Les deux applications pilotes que j'ai citées nécessitent de grandes quantités de données produites en différents endroits. Si l'on prend la physique des hautes énergies, la majeure partie des données brutes, issues de l'observation des expériences de collisions, vont être produites au CERN mais les données simulées qu'on va comparer avec les données expérimentales sont produites partout dans le monde. C'est à peu près la même chose dans le domaine biomédical, avec des données produites de par le monde dans divers groupes. Dans les deux cas, on a à la fois les données et la puissance informatique, et c'est ce qui en fait tout l'intérêt. Dans les deux cas, ils ont décidé que leur infrastructure informatique ne consistait plus en des superordinateurs ou des ordinateurs dédiés, mais en des ordinateurs répartis du type de ceux qu'on utilise avec la grille.

Je vais dire quelques mots sur le LCG, qui constitue une très importante force conductrice. Pour nombre de raisons, financières, techniques, scientifiques, politiques, il ne peut se faire qu'avec la grille. Dans un monde idéal, on aurait pu imaginer convaincre tous les Etats-membres du CERN et les instituts collaborateurs d'investir des fonds gigantesques au CERN pour y construire le plus grand centre de superinformatique et y réaliser tous les calculs. Mais ce n'est pas viable dans la pratique, ni politiquement réalisable, ni une bonne approche sur le plan technique parce qu'on préfère une voie plus dynamique, «grimpeuse», où l'on peut voir les calculs avancer en différents endroits et les rassembler.

Le LCG est donc une collaboration des quatre expériences LHC. Dans la collaboration des Etats-membres à ces quatre expériences LHC, il y a déjà le concept de centre informatique régional : Lyon en France, RAL au Royaume-Uni, Bologne en Italie. Ces centres informatiques régionaux sont les éléments de construction de l'infrastructure informatique LHC et bien entendu, ils sont

eux-mêmes au service de tous les instituts de physique dans leurs pays. Imaginez une sorte d'infrastructure à plusieurs niveaux où l'on part du sommet O, disons le CERN, où l'on a ensuite un centre principal sur le niveau 1 dans les principaux pays au niveau régional, et puis des centres d'un bout à l'autre du niveau 2, et l'on peut imaginer que le niveau 3 est l'ordinateur sur le bureau du scientifique.

La mission est de préparer et de déployer l'environnement informatique qui sera utilisé par les expériences, pour traiter et analyser les données LHC.

La stratégie est la grille, et donc d'intégrer les milliers d'ordinateurs de tous les d'instituts participants dans le monde dans une ressource informatique globale. Cela a déjà commencé, et ce n'est donc pas de la science-fiction ; c'est parfaitement réalisable et en fait, nous en sommes maintenant à la deuxième génération de bancs d'essai LCG (pl. III, fig. 7). LCG2 utilise comme levier les résultats de projets comme Datagrid, Datatag et les projets américains, donc, en quelque sorte, il récupère tous les meilleurs logiciels médiateurs, toutes les meilleures procédures opérationnelles des projets précédents. Il se base évidemment beaucoup sur les résultats de Datagrid. On a de nouveau une dimension similaire à celle que nous décrivons avec Datagrid, avec plus ou moins les mêmes instituts des deux côtés de l'Atlantique et d'un bout à l'autre de la ceinture Pacifique.

A quoi ressemblent ces centres ? Si l'on va dans l'un de ces centres, on constate que l'un des concepts de la grille est d'utiliser les composants qui sont présents. Voici des photos (pl. III, fig. 8) prises il y a quelques semaines au centre informatique du CERN. Nous avons dans les sous-sols, de très grandes séries d'étagères à bandes magnétiques. Maintenant toutes les bandes sont totalement automatisées et mises en silos et nous n'avons donc plus besoin de tout cet espace. L'enjeu majeur de l'informatique aujourd'hui n'est plus d'acquérir le superordinateur le plus rapide au monde, mais c'est en fait l'encombrement au sol parce que nous utilisons maintenant des PC normaux et qu'ils prennent de la place. Ils utilisent de l'espace, exigent climatisation et puissance électrique, et ce sont là les enjeux majeurs. Tous ensemble, ils peuvent fournir une puissance informatique considérable. Là où l'on pouvait voir, au centre informatique du CERN, les gros IBM, les gros CDC, on ne trouve plus que toutes ces étagères. En fait l'enjeu, comme je l'ai dit, est plutôt ceci : nous avons presque construit une nouvelle centrale électrique. Quelle puissance électrique est nécessaire pour faire tourner ces PC ? Et plus on a de puissance, plus on a de chaleur à dissiper.

Le LCG, comme Datagrid, utilise le réseau GEANT et l'on a le même schéma typique avec toutes les connectivités. Ce qui est important, c'est que le projet EGEE servira de levier à l'infrastructure que le LCG est en train de déployer. C'est un cercle vertueux plutôt qu'un cercle vicieux ! Datagrid développe le logiciel médiateur, qui est

maintenant utilisé par le LCG pour déployer une infrastructure, puis arrive EGEE qui accroît l'infrastructure du LCG pour la rendre meilleure, plus rapide et plus étendue, pour ensuite l'élargir aux autres sciences. C'est un rôle très intéressant pour la physique des particules qui doit, pour ses besoins, anticiper certains systèmes, certaines approches, certaines méthodes informatiques qui sont ensuite mis à la disposition du reste des communautés scientifiques, et pour finir, dans bien des cas, comme cela l'a été pour le Web, de la société toute entière.

Encore une fois, l'Union européenne fait un investissement majeur dans cette technologie (fig. 9). Datagrid était le plus grand projet de ce type au monde. Maintenant, avec 32 millions d'euro sur deux ans, EGEE est devenu le plus grand projet au monde, et c'est très bien que l'Union européenne reste en tête. L'accent est plutôt mis maintenant sur la production que sur la Recherche et Développement parce que nous savons désormais ce que nous devons faire, et nous devons juste le faire avec le niveau nécessaire de qualité. En conséquence, presque la moitié des investissements portent sur les services ; l'infrastructure du LCG est en fait une infrastructure de production pour la communauté scientifique entière. Pour ce faire, nous devons continuer à croître pour améliorer la qualité du logiciel médiateur et d'autres logiciels, ce que nous réalisons avec le quart de l'investissement total. Le reste est ce que nous appelons le réseau. Il ne s'agit pas de réseau informatique mais de réseau humain : dissémination et *outreach*, formation des utilisateurs et enseignement, identification de demande et assistance, politique et coopération internationale, et bien entendu la gestion pour permettre à l'ensemble de fonctionner.

L'industrie, dont je n'ai pas beaucoup parlé, joue indéniablement un rôle dans EGEE. Nous avons assez peu de partenaires industriels mais ils sont importants

pour s'assurer que ce que nous développons pourra en fin de compte être repris par l'industrie et mis à la disposition d'une plus large communauté. L'industrie joue donc beaucoup de rôles différents.

Elle est partenaire pour développer la technologie et par conséquent son savoir-faire sur la grille pour le vendre ensuite aussi à d'autres.

L'industrie a également un rôle d'utilisateur. Nous avons comme partenaire une industrie de pointe, qui se trouve d'ailleurs être encouragée et animée par Guy Wormser, et nous avons eu récemment un événement en Irlande, dans le cadre de la présidence irlandaise de l'Union européenne, qui a été un franc succès. Des représentants de l'industrie sont venus discuter des possibles utilisations industrielles de la grille. Le directeur de la recherche informatique de Mercedes Chrysler me disait que lorsqu'ils développent un moteur, ils recourent à la location ou au leasing d'ordinateurs, et le coût de leasing de l'ordinateur le plus puissant du monde par rapport au coût de développement d'un moteur est de 1 à 2 %. Donc les grandes industries s'intéressent à la technologie mais leur motivation n'est pas énorme. Ils sont plus concernés par le fait que s'ils font tout en vase clos, ils sont mieux protégés de l'espionnage industriel, etc. EGEE est plus attractif pour les PME, particulièrement en Europe où celles-ci sont une des forces de l'économie européenne. C'est le cas également dans les pays en voie de développement où l'on rencontre plus de PME que de grandes entreprises, et où les infrastructures ne sont jamais assez bonnes ; ils doivent satisfaire à des exigences standard internationales très strictes, pour lesquelles il faut beaucoup de simulations, de tests, ce qui est très difficile sans une infrastructure informatique puissante. Les PME, de par leur nature, ont tendance à aimer le travail sur la grille. Accéder à la grille, même à un coût élevé, pourrait être une bien meilleure solution pour les PME que de développer chacune leur propre infrastructure informatique. Il y a donc là un potentiel énorme.

Fig. 9 : Répartition des dépenses de EGEE

#### 24 % Joint Research

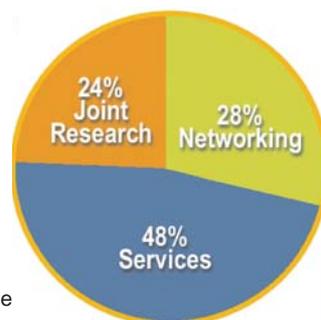
**JRA1** : Middleware Engineering and Integration  
**JRA2** : Quality Assurance  
**JRA3** : Security  
**JRA4** : Network Services Development

#### 48 % Services

**SA1** : Grid Operations, Support and Manage  
**SA2** : Network Resource Provision

#### 28 % Networking

**NA1** : Management  
**NA2** : Dissemination and Outreach  
**NA3** : User Training and Education  
**NA4** : Application Identification and Support  
**NA5** : Policy and International Cooperation



32 M € EU funded (2004-2005), 100 M € total budget.  
 Emphasis in EGEE is on production grid and supporting the end-users

L'industrie a enfin un rôle de fournisseur : certains des plus importants vendeurs de technologie informatique (comme IBM) investissent dans les services de grilles et pourraient finalement absorber le centre d'appel et le centre d'assistance et devenir en fin de compte le fournisseur de ressources informatiques, moyennant un coût, peut-être pour les PME.

La mission d'EGEE, et nous pensons que nous allons réussir, est :

- de livrer une vraie infrastructure de production de grille pour de réelles applications scientifiques en Europe ;
- de le faire en mettant à disposition une importante puissance informatique à travers le réseau mondial de

recherche dont j'ai parlé et qui permettra aussi à de petits groupes de recherche dans des pays lointains et encore en voie de développement de contribuer aux efforts majeurs de recherche internationale ;

- d'intégrer à l'infrastructure EGEE un grand nombre d'activités de grilles nationales et régionales existantes y compris dans un grand nombre de pays en voie de développement. J'ai mentionné les Républiques Baltes, les Balkans, et nous visons maintenant d'autres régions comme l'Amérique latine, la région méditerranéenne, etc.

Ma conclusion est qu'il est de la responsabilité de chacun de combattre la fracture numérique et ceci constitue notre modeste contribution.

---

## La participation marocaine à l'analyse du LHC <sup>3</sup>

**Driss Benchekroun**  
Université de Casablanca

La participation marocaine dans l'expérience ATLAS est intéressante, non pas pour elle-même, mais parce qu'elle permet d'illustrer ce qu'il faut faire et les efforts à fournir. Comme cela a déjà été dit, il a fallu commencer par regrouper les universités et les instituts concernés dans un réseau appelé RUPHE (Réseau universitaire de physique des hautes énergies) et qui comprend les universités de Casablanca, Rabat, Marrakech et Oujda, ainsi que le CNESTEN à Rabat, donc des établissements dispersés sur le territoire.

Dès le début, la participation marocaine à ATLAS a été dépendante d'une liaison informatique avec le CERN. On a commencé par des liaisons avec des lignes spécialisées entre les différents établissements et le CERN, à des vitesses faibles, de 64 kbit/s à 2 Mbit/s. Cependant, il est apparu très vite nécessaire de mettre tous les instituts marocains en réseau, pour pouvoir développer cette participation à ATLAS et cela a été la création du réseau MARWAN. En effet, les physiciens concernés voulaient pouvoir développer de nouveaux sujets de simulation, avoir accès aux nouveaux outils de simulation et d'analyse et également pouvoir analyser les données recueillies. Pour cela, il faut que chaque institut ait un accès transparent aux multipetabytes des bases de données distribuées du LHC ; il faut également mettre en place un centre de calcul commun à tous les instituts, qui soit un serveur miroir du CERN et que tous les acteurs du réseau puissent utiliser les moyens de ce centre de calcul.

Par ailleurs, on a demandé en 1997 à disposer d'une ligne à haut débit entre Casablanca au Maroc et l'IN2P3 à Lyon. Cette demande s'est concrétisée par l'initiative EUMEDIS, qui a pour but l'extension du réseau GEANT aux trois pays du Maghreb avec des liaisons à 45 Mbit/s, et a été approuvée en 1999. La mise en place a démarré en 2003 et le Maroc dispose d'une liaison à 34 Mbit/s, limitée par l'opérateur marocain de télécommunications. La Tunisie doit être aussi bientôt connectée et l'Algérie devrait suivre.

Pendant ce temps, le réseau MARWAN a été mis en place et on espère passer à la phase 2 cette année, où chaque institut pourra choisir entre 2 Mbit/s et 34 Mbit/s pour sa vitesse de liaison au réseau.

On a également procédé à la mise en place du centre de calcul marocain, qui doit avoir une puissance de calcul assez élevée et surtout des capacités de stockage des données suffisantes. Pour ce faire, on a copié la solution mise en place au CERN en installant une batterie d'ordinateurs PC, travaillant sous Linux et avec une capacité de mémoire de l'ordre du terabyte (c'est ce qu'on appelle

---

<sup>3</sup> Le texte ci-dessous est un bref résumé de la communication faite en séance. Il a été établi à partir de l'enregistrement vidéo de la session et le lecteur est invité à se référer à cet enregistrement, disponible sur DVD, pour plus de détails.

une *computer farm*). Cette infrastructure est complétée par des centres de calcul locaux, dans chaque établissement, utilisant la technologie de grille de calcul, qu'on espère introduire ainsi au Maroc et étendre à d'autres domaines que la physique des hautes énergies.

Toute cette infrastructure a pu être mise en place, grâce à l'expertise du CERN et du GRDI, qui a été concentrée et déposée au CNRST, le Centre marocain de la recherche scientifique et technique.

Bien entendu, cet effort a dû être accompagné par la mise en place de formations spécialisées au niveau *Master*, formations qui bénéficient de collaborations avec des instituts et des universités européennes : par exemple, on a créé à Marrakech en 2003 un *Master* en astrophysique et physique des hautes énergies avec Annecy et Nice. Une autre collaboration entre le RUPHE, Grenoble et Stockholm permettra de lancer cette année un *Master* en techniques informatiques pour la physique des hautes énergies.

Enfin, le Maroc a créé l'Institut marocain de l'information scientifique et technique (IMIST), qui concentre la documentation dans ces domaines, rationalise les moyens et les ressources au niveau national et met en place une base de données de compétences au Maroc. On espère aussi que cet institut permettra d'établir des relations entre scientifiques et décideurs.

En conclusion, on peut dire que la collaboration du Maroc pour ATLAS peut maintenant franchir une nouvelle étape, grâce à cette nouvelle infrastructure, basée sur l'extension de GEANT 2 au Maghreb, sur le centre de calcul marocain et sur le réseau universitaire MARWAN. On espère que cela servira de modèle pour d'autres projets, comme SESAME, et la e-science commence à devenir une réalité au Maroc, qui est heureux de participer à cette aventure.

L'auteur tient à adresser ses remerciements à tous ceux qui, en Europe ou au Maroc, ont permis cette réalisation.

---

## Le réseau européen, ses extensions vers le Maghreb <sup>4</sup>

**Dany Vandromme**

RENATER, DANTE, NRENPC, ESFRI, et IRG

Je suis très heureux d'être ici car, n'étant pas physicien, je me suis senti, par moment, un peu éloigné de vos discussions. Je me situe plutôt du côté des sciences de l'ingénieur et ma spécialité est la mécanique des fluides, et je vais vous parler de réseaux... ce qui semble tout aussi étranger à mon domaine de compétences de base !

Je m'occupe essentiellement du réseau RENATER (Réseau national pour l'éducation et la recherche en France), et accessoirement de la société DANTE, qui est le maître d'ouvrage du réseau européen GEANT.

Je participe également à un consortium de tous les réseaux européens qui constituent le projet GEANT en interaction avec la Commission européenne (NRENPC).

Je représente aussi la France dans une entité qui s'appelle le Forum stratégique européen pour les infrastructures de recherche (ESFRI). Les infrastructures de recherche comprennent les réseaux, les moyens de calcul, etc., mais aussi tous types d'infrastructures : infrastructures pour la physique, la chimie, la biologie, les sciences humaines, l'océanographie, bibliothèques numériques, etc. - le champ est très large. Cela permet de replacer la problématique des infrastructures de recherche réseaux dans un contexte plus large, et de connaître les attentes et les besoins des utilisateurs ou des scientifiques par rap-

port aux services qu'on peut amener par le réseau.

Enfin, l'e-IRG, ou Groupe de réflexion pour les infrastructures électroniques - que la Commission européenne appelle des e-infrastructures -, est en fait l'intégration des couches réseaux et des couches d'intergiciels qui font les projets de grille aujourd'hui.

Il existe également des groupes de réflexion pour savoir comment cela va évoluer, et, en termes de règles d'usage, de règles d'accès, comment cela va se déployer.

Le but de mon exposé est de vous parler d'abord de GEANT, pour vous donner une idée de ce qu'il représente, mais plus en tant que communauté scientifique disponible ou mise à la disposition des autres pays du monde, qu'en tant qu'infrastructure.

GEANT est un réseau d'infrastructures qui, aujourd'hui, raccorde à peu près 32 pays. Dans chaque pays il existe un réseau national - pour la France, c'est RENATER ; pour l'Angleterre, KERNAL ; pour l'Allemagne, DFN -, qui fait la liaison entre tous les établisse-

---

<sup>4</sup> Transcription de l'exposé de l'auteur en français.

ments de recherche et les universités, GEANT jouant un peu de rôle de la *holding* paneuropéenne, qui a l'avantage d'interconnecter déjà 32 pays, avec une infrastructure physique homogène, et aussi d'interconnecter l'ensemble au reste du monde.

Pour l'instant, nous sommes encore qualifiés de «premier réseau au monde». En termes de technologie, il suffirait qu'un pays prenne des fibres optiques qui vont un peu plus vite ou qui sont un peu plus épaisses pour que nous ne soyons plus premiers - c'est une compétition perpétuelle. En revanche, nous pourrions bien rester premiers encore un bon moment pour ce qui est du modèle d'organisation, à savoir le fait d'avoir un réseau pour 32 pays, alors qu'en général, les pays avancés ont plusieurs réseaux pour un seul pays. Notre modèle d'organisation est vraiment typique et unique au monde et c'est ce modèle organisationnel que nous essayons de proposer et d'étendre au reste du monde plus que la technologie elle-même, qui est très fluctuante et qui change au gré des progrès qui sont faits par l'industrie.

Derrière ces 32 pays, ce sont plus de 3 500 universités ou organisations de recherche. En termes de nombre d'individus, cela fait beaucoup, mais je n'oserais pas avancer de chiffres.

Cette organisation permet également de discuter avec les autres régions du monde de la connectivité globale : nous gérons aussi les liaisons entre le continent américain et l'Europe, avec l'Asie...

GEANT est un peu le pilote de la Commission européenne pour proposer d'étendre ce modèle d'organisation au monde. Celui-ci est robuste parce que très fédératif, très collectif : il est basé sur le fait que tout le monde travaille ensemble et décide en même temps. De par ces qualités, il a été adopté par la Commission européenne pour être proposé aux autres régions du monde, éventuellement avec une participation active et financière.

Le premier projet, EUMEDCONNECT, s'inscrit dans le programme EUMEDIS (Société d'information pour l'Europe et la Méditerranée), qui a pour objet de construire un réseau équivalent à GEANT - peut-être pas en capacité mais au moins en termes d'organisation -, qui va interconnecter tous les pays du Bassin méditerranéen et les raccorder à l'infrastructure GEANT, et, au-delà de GEANT, leur donner aussi accès au réseau américain, au réseau asiatique ou aux autres réseaux auxquels GEANT est connecté. On espère contribuer ainsi, dans la mesure du possible et même si les moyens sont limités, à la réduction de la fracture numérique, et surtout, donner un accès global aux ressources pour la recherche et pour l'éducation. On espère aussi qu'une fois les tuyaux mis en place, cela serve de support pour développer ce qu'on appelle les réseaux humains, qui sont le ferment de l'activité de recherche scientifique.

Le projet EUMEDCONNECT est coordonné par un partenaire, qui est la société DANTE, maître d'ouvrage de GEANT. Les pays concernés par le projet sont tous les

pays situés autour de la Méditerranée à l'exception de la Libye, mais cela va peut-être changer : Algérie, Chypre, Egypte, Israël, Jordanie, Liban, Malte, Maroc, Autorité palestinienne, Syrie, Tunisie, Turquie.

Pour accompagner DANTE et porter ce projet, nous avons décidé de ne pas mettre à contribution les 32 partenaires de GEANT mais seulement un sous-ensemble, plus proche culturellement ou scientifiquement des pays méditerranéens. Les pays partenaires du côté européen sont l'Italie (GARR), la Grèce (GRNET), l'Espagne (RedIRIS) et la France (RENATER).

Le projet est financé à 80 % par la Commission européenne (direction EuropAid), pour un montant de l'ordre de 10 millions d'euro. C'est un montage à 80/20, c'est-à-dire qu'on demande que 20 % du projet soient financés par les pays utilisateurs pour témoigner de leur intérêt, de leur motivation, et que ce ne soient pas uniquement des allocations, dont on est pas sûr de l'efficacité.

Le projet a démarré en décembre 2001. On a fait des études de définition jusqu'en juin 2002, et il y a eu une revue de projet avec la Commission, une validation des résultats et une proposition pour une phase 2. Cette phase 2 consiste en un appel d'offres pour mettre en place de l'infrastructure, puis l'exploitation de cette infrastructure, sur la durée la plus longue possible afin d'utiliser tout l'argent disponible. On estime que la durée totale de l'exploitation ira jusqu'en 2006, mais en fonction des performances de l'appel d'offres, elle pourrait durer un peu plus puisqu'on travaille à budget constant.

Les difficultés que nous avons pour mettre en place ce projet sont liées au fait qu'en Méditerranée, il existe assez peu d'infrastructures de câbles sous-marins qui correspondent à nos attentes, et, du fait qu'il y en a assez peu, les liaisons sont assez chères. On retombe donc sur des problèmes d'ordre économique.

Le deuxième type de difficultés vient de ce que la liaison entre l'Europe et un pays du Bassin méditerranéen ne peut être le fait d'un opérateur européen seul et doit se faire en partenariat avec l'opérateur du pays d'origine puisqu'il existe encore une situation de monopole des opérateurs nationaux dans 11 des 12 pays concernés. Le modèle est donc que chacun vende un demi-circuit. Par conséquent, même lorsqu'un opérateur européen, habitué à la concurrence, est prêt à consentir des prix intéressants, cela ne concerne que 50 % du coût total de la liaison, et il faut se battre pour faire baisser le prix des 50 % restants.

Une autre difficulté est que les réseaux nationaux sont encore en cours de développement. Ils existent à peu près dans tous les pays - je dis à peu près car tous les pays ne sont pas à égalité. Très souvent, ils sont encore à bas débit - on a vu que MARWAN est seulement en train de passer de 2 mégabits actuels à 34 mégabits dans un avenir proche, et il y a beaucoup de pays qui n'en sont même pas encore à ce niveau de développement.

Il y a aussi un manque de cohésion. Lorsque nous avons lancé le projet EUMEDCONNECT, nous étions probablement un peu naïfs et nous avons pensé que cela

allait peut-être aussi aider les pays à travailler entre eux, le Maroc, la Tunisie et l'Égypte par exemple. En fait, au fur et à mesure qu'on avance dans les discussions et les échanges avec les partenaires du projet, il s'avère que la première attente de tous les pays est d'être raccordés à GEANT, éventuellement pour aller après au CERN, aux États-Unis ou ailleurs, mais qu'il y a assez peu de projets d'usages qui réunissent plusieurs pays du Bassin méditerranéen. Le projet SESAME, qui a été présenté hier, correspond, par exemple, au type d'initiatives qui devraient renforcer les actions interrégionales.

Voici la topologie actuelle d'EUMEDCONNECT : fig. 1 (pl. IV).

A ma connaissance le circuit entre l'Espagne et l'Algérie est opérationnel.

Pour les circuits venant du Maroc, on a un point de présence à Catane en Sicile. Ces circuits et celui de Tunisie sont en test, c'est-à-dire qu'ils sont installés mais pas encore réceptionnés commercialement, donc pas encore utilisables par les utilisateurs. Une recette durant au maximum une semaine, s'ils sont en test cette semaine, la semaine prochaine, ils devraient être mis en service et disponibles pour les utilisateurs.

Le circuit avec la Turquie est installé. C'est un circuit satellite parce qu'on n'a pas eu d'alternative.

Il y a encore tout le groupe de pays de la Méditerranée orientale où je n'ai pas représenté les circuits pour la raison simple qu'on est encore en discussion avec les opérateurs pour avoir mieux que 2 mégabits sur les liaisons internationales.

Quand nous avons commencé à discuter avec les opérateurs, on ne nous proposait que des liaisons à 2 mégabits. Nous voulions beaucoup plus, mais cela n'a pas été facile. Au départ nous avons eu des offres qui étaient si chères que nous avons refusé de discuter. Nous avons alors activé les réseaux, le *lobbying*. Nous avons contacté les gouvernements locaux pour leur demander d'expliquer à leurs opérateurs nationaux que, s'ils baissaient les prix, cela leur rapporterait à terme, en contribuant au développement économique du pays, et qu'il était par conséquent justifié pour eux de consentir des prix spéciaux «sur mesure» pour l'éducation et la recherche. C'est un processus assez long car il faut trouver les bons interlocuteurs au bon endroit, les bons relais de pression ou d'influence, mais il a été couronné de succès puisque des liaisons à 34-45 mégabits sont là, alors qu'initialement on n'imaginait même pas les obtenir.

C'est à cette étape que nous en sommes (pl. IV, fig. 2). C'est un peu plus compliqué du fait que la région est un peu tendue politiquement, avec le conflit du Moyen-Orient, mais on ne rencontre toutefois pas, dans les relations entre opérateurs de télécommunications, les tensions politiques qu'on observe via les médias, par exemple entre l'Autorité palestinienne et Israël. Ainsi, le raccordement physique pour l'Autorité palestinienne sera fourni par un opérateur israélien, qui est très content de faire des propositions.

Il est envisagé de créer un deuxième nœud à Chypre, pour le relais avec la Jordanie et Chypre. Derrière la Jordanie, il y aura sans doute l'Autorité palestinienne. L'Égypte vient également de signer pour participer au projet, et nous sommes en train d'ouvrir les discussions pour les raccorder sur le nœud de Catane.

Les liaisons, ce sont les circuits qu'on achète aux opérateurs. Il faut un peu d'équipement. Pour le premier nœud de Catane, nous avons mis sur le projet un équipement que nous avons en réserve. Nous discutons aussi avec les fabricants de routeurs pour obtenir des dons d'équipements. Comme ce ne sont pas de très gros équipements, on devrait pouvoir réussir à obtenir quelques équipements neufs des fournisseurs de matériel.

Le principe du PoP (nœud d'interconnexion) est plutôt lié, en fait, à l'optimisation des offres technico-financières qu'on a par les opérateurs. Nous n'avons pas la volonté de mettre un PoP en Sicile au départ mais les offres reçues ont conduit à une solution beaucoup plus efficace ainsi. La liaison entre la Sicile et l'Italie est ramenée sur GEANT par le PoP de Milan, et c'est le réseau national d'Italie, GARR, qui le fait.

La supervision du réseau se fait en extension du contrat avec la société qui assure la supervision du réseau GEANT lui-même.

En conclusion, pour le projet EUMEDCONNECT, nous avons encore la perspective de raccorder 9 pays sur les 12 qui sont partenaires du projet. Par rapport aux discussions que nous avons eues au début du projet, nous considérons que c'est un succès. En revanche, nous n'avons pas réussi à mettre tout le monde à la même table pour discuter. Nous n'avons pas réussi, par exemple, à proposer une structure de consortium entre tous les membres du projet, pour des raisons essentiellement politiques, sur lesquelles je n'ai pas d'avis à avoir. Le seul modèle que nous avons pu appliquer consiste en des accords bilatéraux entre la société DANTE, qui est un peu le porteur de projet, le maître d'ouvrage, et chacun des représentants des pays, car faire signer tous les pays ensemble n'a pas été possible. Cela n'empêche pas de d'avancer quand même et de construire quelque chose, mais on voit bien qu'il existe des difficultés politiques sur lesquelles nous n'avons pas de maîtrise, et que nous ne pouvons surmonter complètement.

Au-delà d'EUMEDCONNECT, je vais mentionner quelques initiatives qui sont portées par GEANT et qui ne sont pas spécifiques au Bassin méditerranéen.

La première porte sur les ex-composantes de la Yougoslavie. C'est le projet SEEREN, porté essentiellement par le réseau grec, et cofinancé par l'Union européenne avec un appui de l'Unesco et du CERN et aussi de quelques organisations de recherche allemandes, dont l'Institut Max Planck.

Nous avons un projet analogue à EUMEDCONNECT sur l'Amérique latine (ALICE) qui est également bien avancé : nous sommes en train de dépouiller l'appel d'of-

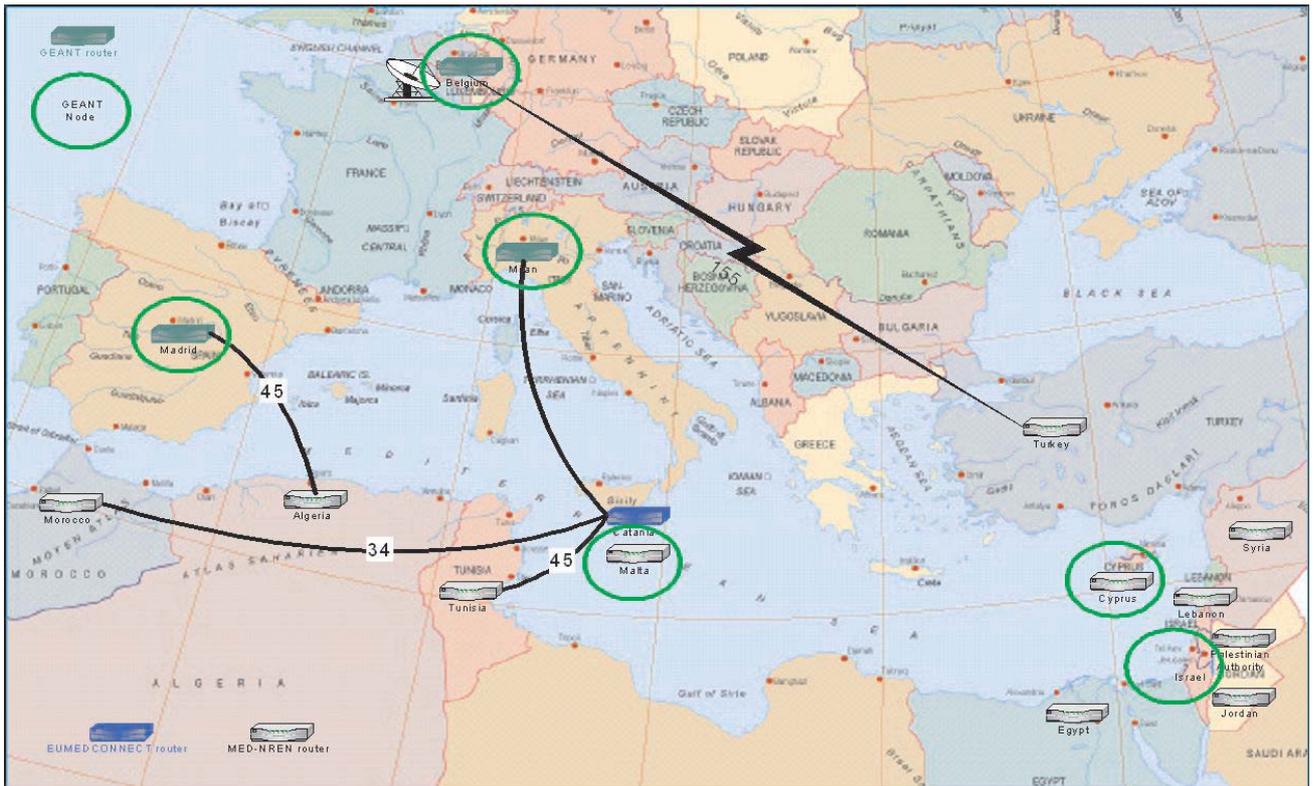


Fig. 1

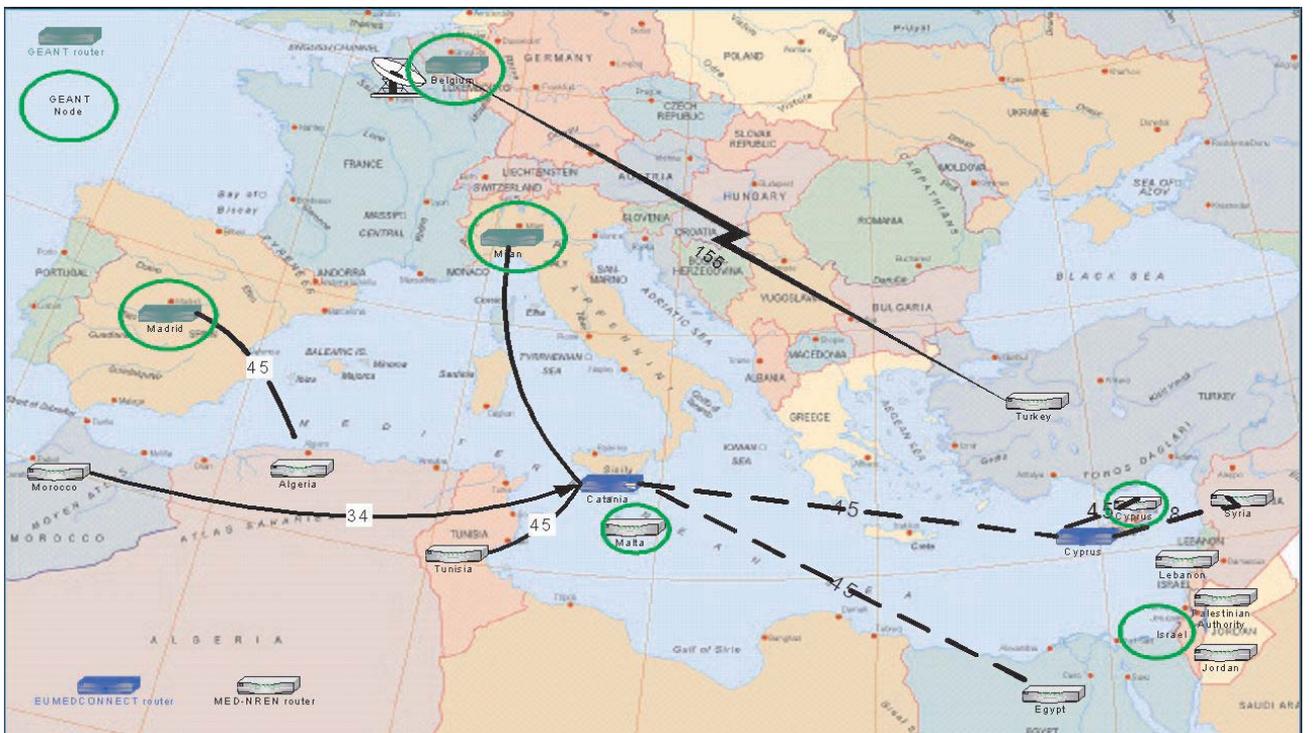


Fig. 2

fres. Il concerne les 18 pays qui forment le continent Amérique centrale et Amérique latine. Nous aurons un anneau à 155 mégabits qui s'appuiera sur le Chili, l'Argentine, le Brésil, le Mexique, le Panama ; tous les autres pays se raccrocheront à cet anneau et l'anneau sera lui-même raccordé à 622 mégabits sur GEANT, avec des liaisons directes.

Nous avons un autre projet qui n'est pas encore aussi défini, et qui s'appelle TEIN-2. TEIN-1 est une initiative de RENATER pour déployer une liaison directe entre Paris et Séoul, avec la Corée. TEIN-2 en est un peu la suite mais aura une topologie complètement différente. Il a pour ambition de déployer sur le Sud-Est asiatique (Birmanie, Thaïlande, Indonésie, etc.) un réseau d'interconnexions comme pour la Méditerranée, de le raccorder à l'Europe et aussi à tous les pays développés de l'Asie pacifique comme le Japon, la Corée, Singapour.

Ces projets sont des projets un peu structurés où l'on peut appliquer le modèle de «hub», c'est-à-dire qu'on groupe les pays régionalement et on raccorde l'ensemble en une fois.

Cela ne suffit pas pour couvrir le reste du monde, et nous avons donc aussi beaucoup de discussions, pays par pays, en fonction des opportunités, disons des moments politiques. Nous en avons avec la Russie, l'Ukraine, la Biélorussie. Récemment nous sommes allés en Inde, ce qui s'est traduit par une demande explicite de raccordement de ce pays sur le réseau GEANT.

Nous sommes également en train de regarder comment on pourrait reprendre tous les pays d'Asie centrale qui sont aujourd'hui interconnectés par une infrastructure satellite à bas débit, en utilisant plutôt des infrastructures optiques, pour tout ramener sur Moscou et de Moscou redescendre sur GEANT.

Nous avons enfin des discussions avec l'Afrique du Sud et, un peu plus loin, avec les pays d'Afrique centrale - il s'agit là plus une réflexion à l'intérieur de RENATER sur comment donner accès à ces pays. Les pays d'Afrique de l'Ouest sont relativement bien desservis car il existe un câble avec des épissures sur presque chaque pays, comme le Sénégal, le Gabon. Mais dès qu'on pénètre dans le continent africain, c'est beaucoup plus difficile parce qu'il n'y a que des accès par satellite, qui ne sont pas de bonne qualité et qui sont très chers, hors de portée pour le monde universitaire. Nous réfléchissons à la possibilité de contribuer à une offre un peu générique d'accès à un ou plusieurs réseaux européens ou directement à GEANT, avec des accès satellite à tarif aménagé pour l'éducation et la recherche dans ce continent.

L'intérêt de ces projets est de construire l'infrastructure de base nécessaire pour toutes les autres initiatives - par exemple, on ne peut pas faire de grille de calcul si l'on n'a pas l'infrastructure de communication qui est sous-jacente. Cela s'inscrit naturellement dans la problématique

globale des infrastructures de recherche, mais aussi de l'accès à des infrastructures de recherche qui sont ailleurs, le CERN par exemple, ou à des sources de rayonnement, comme SESAME, et aussi de l'accès aux bibliothèques, aux revues scientifiques. Dans toutes les discussions avec les pays sur lesquels nous avons ces projets, la première chose qui est demandée est l'accès aux revues scientifiques, parce que les abonnements sont très chers et que le fait de pouvoir y accéder via les réseaux constitue une aide importante pour le support de la recherche.

J'ai effectué récemment une mission de conseil auprès du Gouvernement algérien, qui n'est pas représenté ici, je crois. Les deux points que nous avons identifiés sont un besoin de faire évoluer le réseau académique, l'équivalent de MARWAN du Maroc, et un besoin de conseils sur comment s'organiser, ce qu'il faut prendre comme technologie, comment on gère le relationnel avec les opérateurs - ce qui voulait dire aussi : comment sortir du monopole, bien que cela n'ait pas été dit explicitement. J'ai également identifié des besoins en termes de moyens de calcul - les plus gros moyens de calcul en Algérie, au moins pour la recherche universitaire, sont constitués par des PC éventuellement un peu gonflés. Nous sommes donc partis sur un modèle de donation d'un superordinateur qui était en France, avec 32 gigaoctets de mémoire vive, 64 processeurs, déjà beaucoup plus gros qu'un PC. Ce faisant, nous avons levé beaucoup de problèmes de logistique, d'organisation qu'il faut résoudre pour faire que de tels moyens soient disponibles dans ces pays. Il ne suffit pas de mettre en place des liaisons à haut débit, il faut aussi des services d'accompagnement, de l'information sur les technologies réseau. Tout cela forme un ensemble, et c'est cet ensemble qui fait la collaboration scientifique. Il ne faut pas faire l'erreur de segmenter l'offre ou la participation mais voir le problème de façon globale et répondre, en fin de compte, aux besoins des utilisateurs réels. Il ne s'agit pas seulement de prendre une bonne initiative pour se donner bonne conscience, puis de dire : débrouillez-vous ! Le besoin d'accompagnement est permanent et doit être soutenu. La discussion de ce matin sur le réseau va dans ce sens.

Je vais conclure en disant que les infrastructures constituent la couche de base mais qu'il faut mettre des services par dessus. Les réseaux d'infrastructures, c'est bien, mais les réseaux humains, c'est beaucoup mieux, surtout pour la coopération scientifique.

Quand on s'occupe de réseaux, c'est gratifiant de le faire aussi dans cette optique et de ne pas gérer que des réseaux avec 10 ou 40 gigabits, qui sont à la pointe de la technologie, car souvent les difficultés sont sur d'autres réseaux que ces réseaux de cœur où finalement, il n'y a qu'à se laisser porter par la technologie. Là, il faut regarder plus en détail sur les facteurs humains d'accompagnement.

## Commentaires sur la fracture numérique <sup>5</sup>

**Alberto Santoro**

CERN et Université d'Etat de Rio de Janeiro

La fracture numérique est un problème vaste et complexe, qui fait intervenir beaucoup de facteurs. En fait, pour bien la comprendre, il faut aussi comprendre l'économie, l'organisation sociale du pays, comme les relations entre les pays d'une même région, ou même du monde entier.

Un des points à noter en particulier est que le succès des recherches futures en physique des hautes énergies dépend fortement de la grille de calcul, qui elle-même dépend de l'élimination complète de la fracture numérique. Un des sous-comités de l'ICFA (International Committee on Future Accelerators) s'est penché sur la question et a produit un rapport qu'on peut trouver sur le site <http://icfa-scic.web.cern.ch/ICFA-SCIC/> et qu'on peut lire avec profit. Il ressort de ce rapport que la fracture numérique reflète notre organisation sociale. La fracture numérique ne peut être éliminée complètement que si l'on se soucie d'autres fractures, comme l'exclusion sociale. La fracture numérique ne concerne que l'accès aux technologies de l'information, mais sa relation avec le reste de la société est claire : si vous n'avez pas de radio, de télévision, de DVD et de CD, de PC, de réseaux, vous n'avez pas accès au monde numérique et vous êtes exclu.

Or, les expériences du CERN rassemblent chacune des milliers de scientifiques et des centaines d'institutions et vont produire des quantités de données à analyser considérables : on estime qu'en 2010, on aura accumulé environ un exabyte de données ( $10^{18}$  bytes) et on ne pourra traiter ces données qu'avec des réseaux. Pour concrétiser,

si l'on enregistre ces données produites sur des CD que l'on empile, la hauteur de la pile atteindrait 20 km ! Un autre chiffre : un petabyte ( $10^{15}$  bytes) donnerait une pile de CD haute comme cinq tours Eiffel.

Cette avalanche de données n'est pas limitée à la physique des hautes énergies : l'astronomie, la détection des ondes gravitationnelles, la médecine, en particulier l'oncologie, vont aussi produire un flux d'informations considérable, et la réponse à ce défi est la mise en place de la grille de calcul, avec sa structure hiérarchisée et à plusieurs niveaux, du centre de production des données jusqu'à la station de travail en bout de chaîne. Autrement dit, ces projets scientifiques ne seront couronnés de succès que si l'on sait mettre sur pied des collaborations globales, les physiciens de tous les pays participants étant tous sur un pied d'égalité, des partenaires à part entière. Pour cela, il faut des réseaux avec une bande passante suffisante et avec des performances qui doivent croître sans cesse, pour faire face aux besoins grandissants.

Le lecteur est invité à se référer au rapport rédigé par Michael Minge et collaborateurs pour le Sommet mondial sur Information et Société, intitulé : *Rapport 2003 sur le développement des télécommunications mondiales : indicateurs d'accès à une société de l'information*.

<sup>5</sup> Au cours de la table ronde qui a suivi cette session, A. Santoro a fait un exposé sur la fracture numérique par vidéoconférence de Rio de Janeiro, dont nous donnons l'essentiel ici.

## Session 4

# Le dessalement

Peut-on dessaler l'eau de mer et l'eau saumâtre à des conditions économiques acceptables? L'eau dessalée peut-elle permettre la réhabilitation de terres rendues impropres à la culture? Peut-on recycler les eaux usées urbaines et industrielles ?

Responsables de cette session :

**Miriam Balaban** (European Desalination Society)

**Azzedine Elmidaoui** (Université Ibn Tofa, Kénitra)

---

## Introduction <sup>1</sup>

### Miriam Balaban

European Desalination Society

Cette session est dédiée au dessalement et aux problèmes d'utilisation de l'eau. Les travaux sur le dessalement ont commencé il y a plusieurs dizaines d'années et ont pris beaucoup d'importance aujourd'hui. Une façon de le mesurer consiste à regarder le nombre de publications annuellement sur le sujet. Au début des années soixante, on comptait environ 90 publications annuellement sur ce sujet pour le monde entier. Maintenant, quand nous organisons une conférence, les comptes rendus comportent à eux seuls plus d'une centaine d'articles. On voit donc le changement considérable.

L'European Desalination Society a été fondée en 1962, avec pour premier président Richard Mayer. Je suis particulièrement fière d'y appartenir, car le dessalement est devenu un parfait exemple de coopération au niveau mondial, et nous avons la chance d'avoir ici des représentants du Maroc et d'autres intervenants majeurs dans ce domaine. A l'instigation du P<sup>r</sup> Abdus Salam, nous voulons étendre cette coopération aux autres pays, en particulier ceux d'Afrique du Nord, et pour ce faire, nous avons organisé deux conférences en Tunisie, à l'Académie des sciences du Tiers-Monde. Nous allons en avoir bientôt une autre dans la même série au Maroc, à Marrakech, et

nous avons prévu d'en organiser d'autres en Europe. Avec le P<sup>r</sup> Safi, nous pensons en effet que nous avons tous une mission dans ce domaine du dessalement, qui est de partager nos techniques, nos recherches, mais aussi des relations amicales entre les participants.

Le dessalement et l'utilisation de l'eau ont plusieurs aspects qui sont représentés ici par les différents intervenants qui sont issus du secteur public, des institutions académiques et du secteur privé. Je vais donc demander à chaque intervenant de venir successivement exposer l'aspect qui le concerne, avant de donner la parole au public pour des questions sur les points exposés. Nous entendrons donc d'abord un état des lieux au Moyen-Orient surtout, puis l'utilisation des ressources en eau, les techniques de dessalement, le cycle de l'eau, le problème de la sécurité de l'eau et enfin l'état de la situation au Maroc.

---

<sup>1</sup> Résumé de l'exposé d'introduction de l'auteur fait en anglais.

## Le dessalement au Moyen-Orient, Coût et impact environnemental <sup>2</sup>

**Richard Morris**

R. Morris & Associates, Glasgow

Je voudrais commencer par remercier le CERN de m'avoir invité à prendre la parole à cette table ronde. C'est un honneur et un privilège d'être ici. Et je dois dire que cela incite à l'humilité de vous entendre parler de la «grande» science. Le dessalement n'est pas de la «grande» science mais l'eau est une denrée dont nous avons tous besoin, et une grande partie de la population mondiale en manque. Nous avons besoin d'en produire en grandes quantités, et donc besoin d'installations qui permettent de la fournir de manière fiable et à bon marché. Ce n'est pas de la «grande» science, mais c'est un grand problème, et nous avons fait quelques progrès dont je vais vous parler.

Je parlerai du dessalement au Moyen-Orient et en Afrique du Nord, de quelques études auxquelles j'ai participé (études de la Banque mondiale, réunion d'experts de la FAO), des coûts de l'eau et des impacts environnementaux du dessalement.

Le dessalement existe depuis bien avant ces études puisqu'en fait il a commencé à bord des bateaux. Mais le dessalement moderne a essentiellement débuté autour de 1960 avec le développement du procédé dit MSF (*Multi-Stage Flash* = distillation flash à détentes étagées), inventé, je le dis avec une certaine fierté, par un Ecossais, le P<sup>r</sup> Silver, professeur d'ingénierie mécanique à l'université de Glasgow, où j'ai moi-même travaillé. La MSF est le procédé de dessalement le plus utilisé autour du Golfe. C'est là qu'elle s'est développée. Pendant cette période, un procédé alternatif, l'osmose inverse, s'est également développé, mais c'est la MSF qui a eu la plus forte croissance. Cette croissance a été déclenchée par la crise du pétrole de 1973, lorsque d'énormes quantités de capitaux se sont déversées sur les Etats du Golfe. Ces Etats connaissaient quelques problèmes d'eau et la technologie MSF leur a permis de construire de grandes installations et d'avancer. Cela a été le véritable début de l'expansion du dessalement moderne.

L'osmose inverse, le procédé alternatif, a commencé un peu plus tard mais il est en fait, maintenant, plus répandu que la MSF. Corrado Somariva vous parlera plus en détail de ce procédé. Il y a également d'autres procédés, comme l'électrodialyse et des procédés mixtes de dessalement et de production d'électricité.

La majeure partie du dessalement mondial se fait dans la région du Golfe, mais on en trouve aussi en Amérique du Nord, en Méditerranée et en Asie, et un peu aussi en

Afrique et en Amérique centrale. Le plus gros du dessalement s'est effectué dans le Golfe au cours des deux dernières décennies.

L'augmentation de la consommation en eau est due à la croissance démographique, à l'amélioration du mode de vie, au développement industriel, au développement agricole, et au tourisme, vecteur très important, notamment en Méditerranée. L'eau dessalée est, comme vous allez le voir, un peu chère, mais les touristes ont les moyens.

La région du Moyen-Orient et de l'Afrique du Nord se caractérise par une superficie de 6 millions de km<sup>2</sup> où vivent 326 millions d'individus, dont 45 % ont moins de 15 ans (18 % aux Etats-Unis), avec une croissance démographique de 3 % (0,8 % aux Etats-Unis). Le climat est méditerranéen avec prédominance de déserts. Les économies sont en voie de développement. Certains pays ont du pétrole et du gaz. Les infrastructures techniques sont en voie de développement.

La proportion d'eau dessalée dans l'alimentation en eau municipale et d'irrigation selon les pays montre que le Koweït et le Qatar dépendent à 100 % du dessalement. Les Emirats arabes unis, Bahreïn, Malte, le Sultanat d'Oman, l'Arabie saoudite sont fortement dépendants (plus de 40 %). Dans d'autres pays, le dessalement, à l'évidence, ne joue quasiment pas de rôle - ce qui ne signifie pas que ces pays ne manquent pas d'eau, bien au contraire, mais qu'ils n'ont pas les moyens de dessaler l'eau.

Depuis la seconde guerre mondiale, les états du Golfe sont divisés en deux zones. Ceux qui possèdent de gigantesques réserves de pétrole forment une région unique, d'une relative richesse, qui leur a permis d'investir dans le dessalement. En fait le reste du monde doit en quelque sorte attendre que les coûts du dessalement baissent pour pouvoir se permettre de l'utiliser. Nous en prenons maintenant le chemin.

Pour faire face à la demande accrue en eau, il faut :

- *Développer les ressources naturelles existantes et des ressources nouvelles.*

<sup>2</sup> Traduction de la transcription en anglais de l'exposé de l'auteur.

- *Réduire les pertes dans la distribution d'eau potable*, qui peuvent aller jusqu'à 50 % - et, franchement, c'est une proposition bien plus satisfaisante d'investir dans la réduction de ces pertes que dans le dessalement, car il s'agit clairement d'eau gaspillée.
- *Réformer les tarifs*. C'est un point important car les populations des Etats du Golfe payent à peine l'eau et, dans ces conditions, il y a beaucoup de gaspillage. Il faut que les structures tarifaires soient solides afin que les individus aient assez d'eau pour s'en sortir, mais il faut aussi que les autorités compétentes récupèrent une part raisonnable de ce que cette eau leur coûte. Les gouvernements hésitent à le faire : l'eau a toujours été subventionnée, et augmenter le prix de l'eau à un niveau plus réaliste est un problème politique majeur.
- *Améliorer l'efficacité de notre utilisation de l'eau* est manifestement d'une importance cruciale.
- *Recycler les eaux usées*. En fait, nous devrions dépenser autant dans la récupération et le traitement des eaux municipales - parce que cela coûte moins cher - que dans le dessalement de l'eau de mer. L'eau de mer est hautement contaminée (3,5 % de salinité). Pour l'eau recyclée, on parle en termes de quelques milliers de ppm. Il est moins cher de récupérer cette eau et c'est une partie vraiment importante du cycle. L'eau dessalée qui entre par le haut finit par ressortir en eau recyclée. Nous devrions donc collecter très efficacement les eaux usées, les traiter et les réinjecter dans le système.
- *Améliorer les techniques d'irrigation*. L'agriculture consomme énormément d'eau, et dans les pays dont nous parlons, elle est un élément très important car pourvoyeur d'emplois.
- *Dessaler*. Nous devrions pouvoir faire face à ces besoins, au moins en partie, à travers le dessalement.

Les procédés de dessalement sont :

- les *technologies de distillation*, pour l'eau de mer uniquement : MSF (*MultiStage Flash* = distillation flash à détentes étagées) et MED (*MultiEffect Distillation* = distillation à effets multiples). Historiquement la MSF a été le procédé par lequel les pays du Golfe se sont développés. La MED est plus efficace en termes d'énergie ; elle devient plus populaire et la taille des installations s'accroît. Les techniques de distillation sont prédominantes dans le Golfe, avec co-production d'électricité et d'eau ;
- les *technologies de membranes*, en particulier l'osmose inverse (*Reverse Osmosis*, RO) qui a émergé comme technologie de pointe et qui est beaucoup plus efficace en termes d'énergie que la MSF ou la MED ;
- l'*électrodialyse* ;
- d'autres technologies non encore compétitives.

La capacité de dessalement par pays et par procédé donne une idée du clivage : l'Arabie saoudite utilise la MSF et une part croissante d'osmose inverse ; les Emirats arabes unis utilisent la MSF et une part relativement faible d'osmose inverse, mais qui s'accroît. Beaucoup de pays ont un peu de MSF et la plupart un peu d'osmose inverse. Les investissements en dessalement dans ces pays commencent seulement à décoller. En fait la MSF domine mais l'osmose inverse s'accroît.

Pour vous donner une idée concrète, voici des unités MSF à Al Jubail, en Arabie saoudite (pl. V, fig. 1). Dans le contrat de 1983, les Saoudiens ont acheté 40 unités qui s'étendent au loin comme vous le voyez sur la photo. Chacune produit 22,5 m<sup>3</sup> d'eau fraîche par jour. La qualité de l'eau est d'environ 20 ppm de sels dissous, ce qui est effectivement de l'eau distillée, très pure. Les procédés de membrane produisent typiquement une eau de moins de 500 ppm, ce qui est de l'eau potable. Cela ne sert à rien de produire une eau plus pure car cela revient très cher, et les gens n'ont pas besoin d'une eau à 20 ppm qu'il faut, en fait, «durcir» pour la rendre potable.

J'ai parlé de l'osmose inverse, mais il existe toute une famille de procédés émergents utilisant des membranes et, ces dernières années, il y a eu d'énormes progrès dans les membranes, qui se sont améliorées techniquement, et dont les prix ont baissé. Un large éventail de membranes est en train de se développer. Cela va continuer, et les possibilités d'amélioration sont tout à fait considérables.

Dans une installation d'osmose inverse d'eau de mer avec des membranes, une pompe à haute pression exerce sur l'eau une pression jusqu'à 60 bars pour passer la membrane. Afin d'éviter l'obstruction des membranes, on effectue un prétraitement pour ôter toute particule ou tout élément susceptible de boucher les membranes et d'empêcher l'eau de passer à travers. C'est une partie extrêmement importante du procédé, qui consomme beaucoup d'énergie.

Ces installations permettent 40 à 50 % de récupération, donc la moitié de l'eau qui sort de l'installation est à 60 bars de pression et l'énergie correspondante est récupérée et réinjectée dans le système. Corrado Somariva vous l'expliquera plus en détail.

Les distillations MSF et MED sont des procédés matures. Leurs évolutions concernent l'amélioration de la fiabilité et les économies d'échelle - ces installations vont devenir beaucoup plus grandes. Mais les procédés n'ont pas fondamentalement changé.

Pour l'osmose inverse, il existe beaucoup de possibilités d'évolution : prétraitement, consommation d'énergie, amélioration du débit, distribution des flux, amélioration du rejet (bore), résistance au chlore et à l'entartrage, modules de plus large diamètre... En fait, il y a beaucoup de possibilités de modification et d'amélioration des membranes.

Voici l'installation de Dhekelia à Chypre (pl. V, fig. 2), qui produit 40 000 m<sup>3</sup> d'eau par jour, avec le système de

filtration, les pompes à haute pression, et les membranes. Elle a été construite par le secteur privé.

Les tendances du marché du dessalement sont :

- la baisse du coût des unités, plus de concurrence ;
- plus de contrats BOOT/BOO (*Build Operate Transfer*) : les utilisateurs préfèrent acheter l'eau plutôt que les installations. Toutes les installations du Golfe construites jusqu'à assez récemment l'ont été par les gouvernements, ce qui était, il me semble, un frein important au développement. Les gouvernements sont traditionnellement hostiles au risque et ne sont pas disposés à innover. Le secteur privé est également hostile au risque mais s'il voit un avantage à entreprendre quelque chose, il prendra un risque calculé ; il est donc plus ouvert aux procédés innovants. La privatisation est maintenant très à la mode et la plupart des contrats passés aujourd'hui se développent à partir d'investissements du secteur privé dans des installations de dessalement ;
- la qualité de l'eau se politise, créant un important potentiel de croissance ;
- plus de réemploi de l'eau ;
- les régions du Moyen-Orient et d'Afrique du Nord vont rester le plus important marché de dessalement au monde pour quelque temps encore.

J'ai dit que j'avais participé à des études de la Banque mondiale (Moyen-Orient/Afrique du Nord et Asie Centrale, et Arabie Saoudite). Les dirigeants de la Banque mondiale se sont avisés, il y a deux ans, de la baisse des coûts du dessalement et ont décidé d'en savoir plus. Ils ont alloué un contrat à des consultants pour établir un rapport sur les perspectives du dessalement dans le monde en voie de développement. Ce rapport a maintenant été remis et doit être publié à l'automne 2004. J'y ai moi-même participé en parcourant le Moyen-Orient et l'Asie centrale pour voir les installations de dessalement, et rassembler des informations pour que la Banque puisse décider quelle orientation adopter.

En ce qui concerne les études de la Banque mondiale en Arabie saoudite, j'ai été surpris car la Banque mondiale s'implique généralement dans les pays pauvres en voie de développement. L'Arabie saoudite est peut-être en voie de développement mais certainement pas pauvre. Dans ce cas, en fait, l'Arabie saoudite a payé la Banque mondiale pour venir la conseiller pour restructurer la gestion de l'eau dans ce pays. J'ai participé à cette étude et ai examiné leurs installations de dessalement. Les Saoudiens ont un problème car leurs installations MSF ont maintenant 20 ans - en fait ils ont beaucoup d'installations qui vont rapidement atteindre la tranche des 20-30 ans d'âge et nécessiter une remise à neuf ou une mise au rebut. Ils nous ont demandé quoi faire. D'une certaine manière, cette technologie a évolué. La MSF ou la MED sont des technologies qu'ils ont épousées, qu'ils comprennent et apprécient, qui se sont avérées très fiables, et il est peu probable qu'ils en changent.

La FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) a également pris conscience de la baisse des coûts du dessalement de l'eau de mer et ils ont tenu une réunion d'experts sur ce sujet à Rome la semaine dernière, à laquelle j'ai assisté. Ils sont en train d'essayer de définir quelle devrait être leur stratégie, c'est-à-dire où le dessalement pourrait être appliqué à l'agriculture. La réponse est dans les cultures à haute valeur et non pas pour l'irrigation du blé et d'autres cultures analogues.

L'électrodialyse est un autre procédé. A titre d'exemple, une installation en Ouzbékistan, fournie par les Russes, produit 40 m<sup>3</sup> d'eau, avec 25 paquets de membranes. C'est une technologie très simple, avec des membranes robustes. Les membranes doivent être retirées et nettoyées physiquement tous les mois. La main d'œuvre étant très bon marché dans la région, ils peuvent se permettre de le faire. C'est un bon procédé et l'application d'une technologie adaptée aux personnes qui l'utilisent. L'osmose inverse est un procédé beaucoup plus délicat qui ne conviendrait pas ici.

Les coûts de dessalement ont chuté au cours des dix dernières années. Par exemple les coûts de dessalement de l'eau de mer à partir de plans BOOT à Chypre sont passés de 1,47 US cent/m<sup>3</sup> en 1991 à 0,61 en 1999. De même, l'investissement à faire varie de 700 à 2 000 US\$ par m<sup>3</sup> et par jour pour produire à partir d'eau de mer, et de 150 à 700 US\$ par m<sup>3</sup> et par jour à partir d'eau saumâtre. L'investissement dépend essentiellement de la taille de l'installation, de la qualité d'alimentation en eau et de l'infrastructure existante.

Enfin, le coût de production dépend essentiellement de l'amortissement en capital de l'usine et du coût du combustible. A partir d'eau de mer le coût est de 0,45 à 1 US\$/ m<sup>3</sup> pour les grandes installations, de 1 à 1,5 pour les installations moyennes, et de plus de 1,5 pour les petites installations. A partir d'eau saumâtre, le coût varie de 0,1 à 1 US\$/ m<sup>3</sup>.

On doit également se soucier de l'impact du dessalement sur l'environnement. Il existe pour ce faire des lignes directrices approuvées par l'UNEP (Programme environnemental des Nations unies), ainsi que la Convention de Barcelone.

Le principal problème provient du déversement de la saumure. Si on le fait :

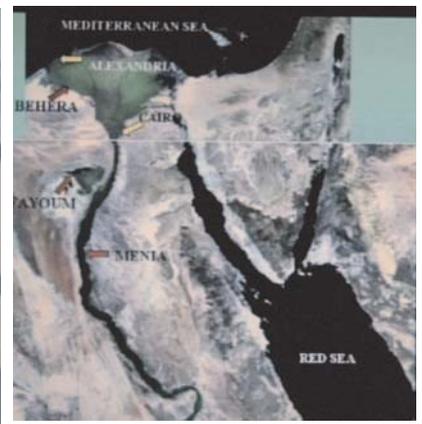
- dans la mer (haute concentration d'eau de mer, produits chimiques utilisés dans les procédés de dessalement, produits de corrosion), selon l'endroit où le déversement se fait, son importance, cela constitue un problème ou non. A Chypre et Malte, ce n'en est pas un ; dans les Etats du Golfe, cela pourrait poser problème du fait de l'importance des déversements ;
- à l'intérieur des terres, l'évacuation de la saumure des installations d'eau saumâtre pourrait devenir un problème majeur et il n'existe aucune solution évidente pour y remédier.



Fig. 1 (R. Morris) :  
Usine de dessalement MSF à Al Jubail (Arabie saoudite)



Fig. 2 (R. Morris) :  
Usine de dessalement par osmose inversée à Dhekelia, Chypre



Ci-dessus (M. Soulié) :

Fig. 1 (à gauche) :  
La planète bleue

Fig. 2 (au milieu) :  
Le Bassin méditerranéen, zone de transition

Fig. 3 (à droite) :  
La vallée du Nil, zone typique du Sud méditerranéen



Fig. 4 (M. Soulié) :  
La vallée de la Durance, en zone plus humide

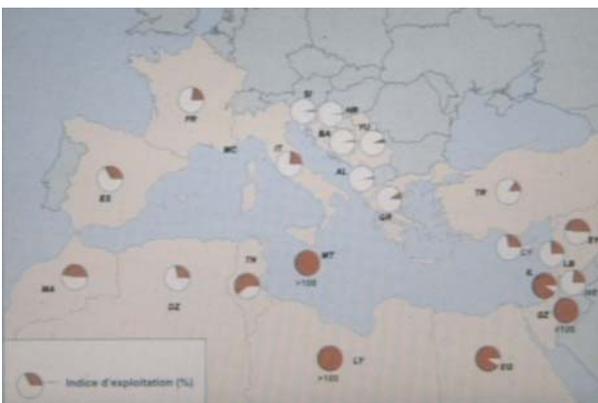


Fig. 5 (M. Soulié) :  
Indices d'exploitation des ressources en eau

L'énergie fossile, le réchauffement de la planète, les émissions de CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub> et NO<sub>x</sub> sont évidemment des problèmes car les unités de dessalement sont consommatrices d'énergie.

Les pollutions visuelle et sonore sont également des problèmes mais qui, généralement, peuvent être surmontés.

En conclusion, le dessalement offre une voie fiable vers l'eau potable. Les coûts ont baissé et vont continuer

à baisser mais pas aussi vite qu'avant. Néanmoins, ils sont à un niveau où beaucoup de pays peuvent maintenant se le permettre, et un grand nombre de communautés optent pour le système BOOT.

Il n'y a pas de découverte capitale à attendre dans un futur proche.

Le dessalement a des impacts sur l'environnement mais ceux-ci peuvent être atténués et, dans la plupart des cas, sont compensés par les bénéfices.

## Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres : une ressource pour les prochaines décades <sup>3</sup>

**Michel Soulié**  
Agropolis, Montpellier

Nous allons parler des aspects stratégiques et généraux concernant l'utilisation relativement récente de la création de ressources naturelles en eau non conventionnelles.

Jusqu'à présent, on s'était habitué à considérer l'eau comme en abondance. La planète est bleue (pl.V, fig. 1), avec finalement relativement peu de terres émergées, et l'on ne s'est donc jamais posé la question de la quantité d'eau à disposition, d'autant plus qu'on sait que cette eau est, en termes de bilan, parfaitement équilibrée puisqu'elle ne disparaît ni ne se crée et reste en volume constant au niveau de la planète ; seules les différentes étapes du cycle peuvent être influencées.

Mais quand on voit cette quantité d'eau, on oublie un certain nombre de choses. D'abord, que seulement 6 % du volume total de l'eau de la planète est de l'eau douce, utilisable à des fins telles que donner ou maintenir la vie. Dans ces 6 %, 72 % ne sont pas visibles car il s'agit d'eaux souterraines, plus ou moins facilement accessibles, 28 % représentent les glaces, essentiellement dans l'Arctique et l'Antarctique, et seulement 0,002 % de cette masse d'eau douce est de l'eau soit atmosphérique soit de surface. Dans ces 0,002 %, tout n'est pas accessible. 97 % sont stockés dans des lacs et dans des zones humides, mais le lac Baïkal, à lui seul, représente déjà plus de 60 % de ces 97 %. L'eau atmosphérique (3%) est très difficilement accessible, bien que des techniques permettent actuellement de la récupérer. Et seulement 0,045 % se trouve dans les rivières. Donc, sur cette planète qui paraît couverte d'eau, les volumes utilisables sont finalement extrêmement restreints.

De plus, ces volumes sont très inégalement répartis. Certaines zones de la planète sont largement pourvues, avec de très importantes quantités d'eau disponibles par habitant, et d'autres en sont totalement ou presque totalement dépourvues.

La zone méditerranéenne (pl. V, fig. 2), clé entre l'Europe, l'Afrique et l'Asie, est justement la zone frontière entre la zone d'abondance et la zone de pénurie en eau. Dans les deux cas, on sera amené à gérer au mieux ce dont on dispose. Il est évident que gérer l'eau en Angleterre ou gérer l'eau en Libye ou au Maroc sont deux problématiques extrêmement différentes.

En voici la preuve, avec le Bassin du Nil (pl. V, fig 3), qu'on peut qualifier de zone typique du Sud de la Méditerranée, à savoir une région sub-désertique ou totalement désertique où seuls quelques endroits privilégiés où se trouve l'eau sont susceptibles de permettre le maintien de la vie, de permettre des productions agricoles et l'installation de villes. L'inconvénient est que, si l'espace dans lequel toutes les activités peuvent être menées ensemble est réduit, l'impact de ces activités les unes sur les autres est extrêmement fort, et que les conflits d'usage deviennent, dans ces zones, extrêmement virulents, non seulement pour des problèmes de quantité, mais aussi de qualité d'eau. Dans la zone du delta du Nil, par exemple, on ne peut pas vraiment dire qu'on manque d'eau pour faire de l'irrigation, mais en revanche, en termes de qua-

<sup>3</sup> Transcription de l'exposé de l'auteur en français.

lité, la situation est dramatique voir catastrophique. Ce sont donc des zones extrêmement fragiles et difficiles à gérer.

De l'autre côté du Bassin méditerranéen, par exemple dans la vallée de la Durance (pl. V, fig. 4), on ne peut pas parler de pénurie d'eau, même si, quelquefois, la gestion en est rendue difficile par un certain nombre de conflits d'usage. Dans cette vallée, un conflit permanent existe entre les zones urbaines qui se trouvent dans la vallée du Rhône ou au sud, les zones qui sont irriguées en agriculture, et également l'une des plus grosses centrales hydro-électriques françaises ; il va falloir arriver à gérer, même la quantité, de manière assez serrée, pour éviter les conflits.

J'en reviens au Bassin méditerranéen, avec cette figure (pl. V, fig. 5) où les pastilles représentent les indices d'exploitation des ressources en eau naturelles renouvelables, c'est-à-dire le pourcentage de ces ressources actuellement utilisé par le pays. C'est extrêmement important, puisque des zones comme Malte, la Libye, Gaza, utilisent plus de 100 % de leurs ressources renouvelables, donc il faut bien qu'ils aillent chercher de l'eau ailleurs que dans leurs ressources renouvelables. Certains pays s'en approchent : c'est le cas d'Israël, de l'Égypte, de la Tunisie. Cette carte donne un état aux alentours de l'an 2000, mais si l'on projette ces données dans le contexte actuel d'accroissement de demande en eau, on va vers une pénurie plus ou moins généralisée des pays du Sud.

De plus, il faut savoir que, dans la quantité d'eau renouvelable dont dispose un pays, tout n'est pas exploitable (pl. VI, fig. 6) : en vert, la quantité d'eau naturelle renouvelable ; en rouge, ce qui est exploitable - le reste ne l'est pas, car non accessible pour des raisons techniques ou autres. La quantité exploitable est donc relativement réduite.

La fig. 7 (pl. VI) montre la prospective des demandes en eau au nord, au sud et à l'est du Bassin méditerranéen. Les chiffres n'ont pas beaucoup évolué entre 1990 et 2000. En leur appliquant différents scénarios de gestion, on peut prévoir ce qui risque de se passer. Avec un scénario tendanciel conventionnel (en vert), qui consiste à continuer comme actuellement, sans aucune attention à la gestion et aux économies d'eau, en 2025, on risque d'avoir un accroissement extrêmement important de la demande et l'on dépasserait, sur la Méditerranée, les 600 km<sup>3</sup> par an, quantité énorme qu'on n'est pas susceptible de trouver en l'état. Avec un scénario de gestion de l'eau axé sur une volonté de faire du développement durable (en jaune), on s'aperçoit que, dans le Nord, on aura plutôt une baisse de la demande - la tendance est déjà amorcée, et l'on pense que dans les vingt ans qui viennent, si cette politique continue à être menée, la baisse de la demande en eau dans les pays de la rive Nord deviendra effective. En revanche, quel que soit le scénario, dans les pays de l'est et du sud de la Méditerranée, pour des raisons purement démographiques et économiques, la demande en eau continuera à croître. On se trouve donc devant le paradoxe suivant : dans le Nord, où l'on a de l'eau, la

demande baisse, et dans le Sud et l'Est, où l'on n'en a pas, la demande augmente. D'où la nécessité de trouver des solutions.

La situation en 1995 montrait déjà les États en pénurie d'eau (Libye, Israël, Jordanie) et les États en pauvreté d'eau (Algérie, Tunisie, Égypte, Cisjordanie), tous les autres étant en situation plus ou moins normale.

Les projections en 2025 donnent tout le sud et l'est de la Méditerranée passé en zone de pauvreté (Maroc, Égypte, Cisjordanie, Chypre), voire de pénurie d'eau (Algérie, Tunisie, Libye, Israël, Jordanie). Il est donc nécessaire de développer des scénarios et des techniques pour pallier ces problèmes.

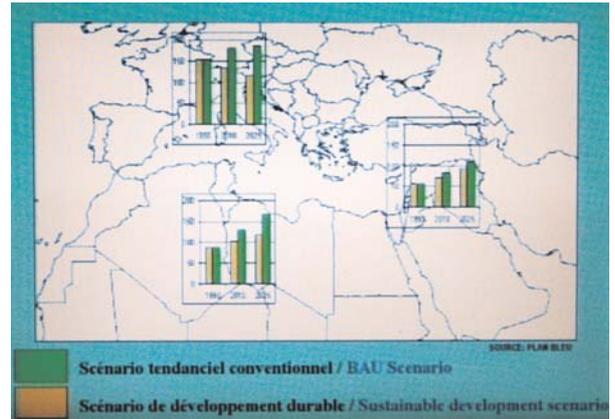
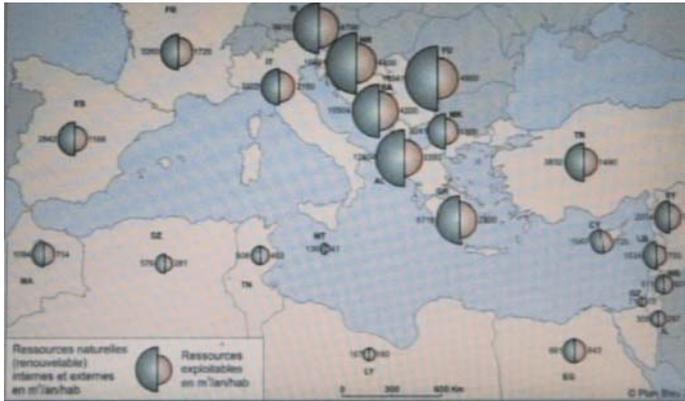
Il faut quand même réaliser que dans le sud de la Méditerranée, par exemple, les pays exploitent déjà 70 % de leurs ressources exploitables. On ne peut pas imaginer qu'on puisse atteindre 140 % des ressources exploitables renouvelables puisque ces ressources n'existent pas. Il va donc falloir s'orienter vers de nouvelles technologies.

De plus, on a besoin de cette eau pour tous les usages. Les usages domestiques, civils, industriels, énergétiques ou de plaisir, ne consomment pas énormément. En revanche, l'agriculture représente en Méditerranée, suivant les pays, entre 65 et 80 % des eaux utilisées. C'est par conséquent un leurre de croire qu'en investissant des milliards dans l'approvisionnement en eaux urbaines, on va résoudre le problème de la pénurie dans le sud la Méditerranée, car celui-ci va se poser ailleurs que dans les villes. Il va se poser au plan de l'agriculture, ce qui constitue un énorme problème social et économique, et il va falloir trouver des solutions.

Actuellement, on en est au virage qui consiste, en termes de stratégie et de politique, à aller vers l'usage de ressources non conventionnelles. Qu'on le veuille ou non, dans le Sud et dans l'Est, on n'a plus le choix - dans le Nord, on l'a encore. Certains pays ont commencé à intégrer plus ou moins dans leurs stratégies nationales et dans leurs politiques, une mise en œuvre d'utilisation de ressources non conventionnelles.

Voici par exemple (pl. VI, fig. 8) les pays qui ont commencé à appliquer des stratégies plus ou moins élaborées de réutilisation des eaux usées - on parlera plus tard des techniques qu'on utilise.

Parmi les ressources non conventionnelles, il en est une qui est extrêmement dangereuse, c'est le recours aux nappes, aux eaux fossiles. Certains pays ont la chance de se trouver sur un réservoir de pétrole et d'autres sur un réservoir d'eau. Dans les deux cas, ces réservoirs sont des réservoirs finis et dont la ressource naturelle ne se renouvelle pas : une fois qu'on aura exploité l'eau de la nappe fossile, il restera un trou à la place, et l'eau ne se régènera pas. Donc, autant ce peut être une ressource de secours à court terme, autant il serait déraisonnable d'envisager les eaux fossiles comme une ressource à long terme. Or certains pays ont déjà recours à ces eaux fossiles. C'est le cas dans le sud de la Tunisie en partie, en Libye, en Égypte et en Jordanie.



Ci-dessus (M. Soulié) :

Fig. 6 (à gauche) : Ressources naturelles renouvelables et ressources exploitables

Fig. 7 (à droite) : Evolution prévisible de la demande en eau



Fig. 8 (M. Soulié) :

Pays méditerranéens avec une politique de recyclage des eaux usées



Fig. 9 (M. Soulié) :

Implantation des premières usines de dessalement en Méditerranée

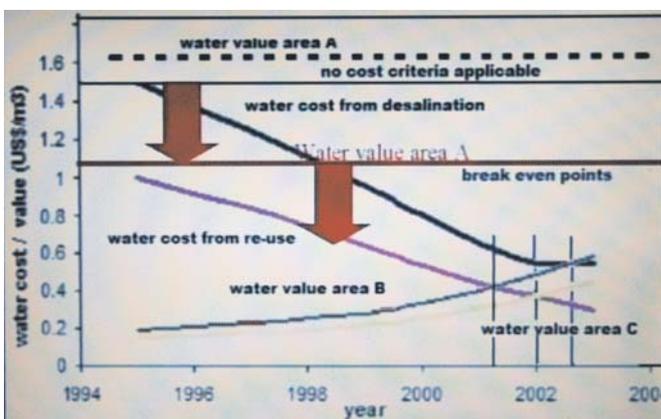


Fig. 1 (C. Somariva) :

Evolution du coût du dessalement de l'eau



Fig. 2 (C. Somariva) :

Modèle 3D d'une usine de dessalement MSF

En ce qui concerne l'alimentation en eau pour la consommation humaine, on a commencé à se lancer dans des techniques de dessalement des eaux saumâtres ou des eaux de mer (pl. VI, fig. 9), sachant que les pays se sont engagés dans cette voie relativement lentement, pour des raisons d'abord économiques car ces techniques sont encore relativement chères, même si elles commencent à devenir abordables. Certains pays y sont contraints car ils n'ont pas d'autres possibilités. C'est le cas notamment des grandes îles méditerranéennes : Malte, qui a été l'une des premières à se lancer dans l'opération, les Baléares, Chypre, certaines îles grecques. De plus, ces îles n'ont pas toujours des eaux saumâtres, et sont donc obligées d'avoir recours aux eaux de mer.

Enfin, et ce sera l'une de mes conclusions, si, jusqu'à présent, on n'avait pas trop sérieusement envisagé l'uti-

lisation de techniques de dessalement à des fins agricoles, le contexte économique actuel en ouvre la porte et l'on commence à voir apparaître les premières stations de dessalement à des fins d'irrigation - en général, il s'agit d'eaux saumâtres ou peu saumâtres. C'est le cas autour de la Mar Menor en Espagne, non loin de Murcia, où l'on récupère les eaux agricoles de drainage, qui sont bien sûr polluées, salées, etc., qui sont retraitées par osmose inverse et renvoyées dans les réseaux d'irrigation.

Nous sommes arrivés à un moment où le savoir-faire technique, le contexte économique et la demande arrivent à un point où tout le monde se rencontre, et l'on est à un virage où le dessalement des eaux, qu'elles soient saumâtres ou de mer, va devenir, pour la Méditerranée, possible, impératif en termes de ressources, et politiquement viable.

---

## Développements des technologies thermiques et de membranes pour le dessalement <sup>4</sup>

**Corrado Somariva**

MottMac Co, Abou Dhabi

C'est un plaisir d'être ici à Genève et je vous remercie pour votre invitation.

Les progrès dans les technologies thermiques et de membrane pour le dessalement ont été considérables ces dernières années. Une manière de voir les progrès technologiques est parfois de considérer les impacts financiers que ces développements ont sur la technologie.

Par exemple, si l'on regarde ces graphiques (pl. VI, fig. 1), on voit que le dessalement de l'eau peut s'appliquer à deux zones géographiques. Dans la première zone, aucun critère de coût n'est applicable : il s'agit de l'Arabie saoudite, des Emirats arabes unis, de Bahreïn, du sultanat d'Oman, du Qatar, où l'eau doit être dessalée de toute façon car il n'existe aucune alternative. On s'achemine également vers le dessalement dans la deuxième zone, où se pose pourtant le problème du coût et de la comparaison des coûts par rapport à l'approvisionnement traditionnel en eau. Entre 1994 et 2004, le coût de l'eau issue du dessalement a chuté de 1,4 à 0,6 US\$/m<sup>3</sup>, ce, en fonction de la nature de l'alimentation en eau. Il y a maintenant des projets BOT au Moyen-Orient signés sur un tarif à long terme de 0,6 US\$/m<sup>3</sup>.

La situation est encore plus encourageante pour la réutilisation de l'eau où l'on avait traditionnellement un

coût de 1 US\$/m<sup>3</sup>, et où l'on arrive maintenant à 0,4 ou 0,3 US\$/m<sup>3</sup>. En comparaison de ce coût de l'eau produite par les techniques de dessalement, nous pouvons voir quelle est la valeur de l'eau - parce que nous payons généralement l'eau ce qu'elle coûte et non ce qu'elle vaut, ce qui a beaucoup pénalisé la technologie du dessalement. En réalité, la valeur de l'eau augmente de jour en jour parce que l'eau a une valeur sociale et une valeur environnementale. Par exemple, l'eau extraite d'une source naturelle, d'un oued ou d'une nappe aquifère provoque une déplétion dans l'environnement et par conséquent la valeur de l'eau augmente. Bien que ces deux courbes puissent être contestées, dans beaucoup de régions, les technologies de dessalement et de réutilisation de l'eau ont déjà atteint le seuil de rentabilité avec les ressources traditionnelles d'alimentation en eau. Cela explique pourquoi on trouve des installations de dessalement à Singapour ou au Royaume-Uni, où il pleut tous les jours. On peut voir aussi que la zone A, où la valeur de l'eau n'a pas

---

<sup>4</sup> Traduction de la transcription en anglais de l'exposé de l'auteur.

de critère de coût applicable, s'étend malheureusement.

La technologie a donc rapidement réagi à cette exigence, et la technologie du dessalement, parce qu'elle est plutôt basique, offre un champ immense de perfectionnements, conduisant à l'optimisation des performances et à la réduction des coûts. Ces améliorations sont identifiables à la fois dans la technologie spécifique du dessalement et dans la rencontre de cette technologie avec toutes les technologies connexes. La plupart du temps, les installations de dessalement sont couplées avec des centrales électriques. Par conséquent on parle de production de charbon et de comment accroître et optimiser les systèmes de production de charbon. Elles peuvent être couplées avec des installations de traitement des eaux usées et des installations pétrochimiques. Dans tous les cas, ces critères de couplage peuvent améliorer les coûts d'exploitation et les coûts d'investissement.

## La technologie MSF

Voyons les progrès récents apparus dans la technologie MSF (*MultiStage Flash* = distillation flash à détentes étagées). Sans trop entrer dans les détails, la MSF est une grosse bouilloire, mais avec un intense transfert de chaleur. Les critères de transfert de chaleur se sont énormément améliorés au cours des dernières décennies, au travers de techniques sophistiquées, et, d'une manière ou d'une autre, en réduisant les facteurs d'encrassement, et en augmentant les produits chimiques qui réduisent l'entartrage.

Le principal domaine où l'on est parvenu à une optimisation pointue est vraiment celui de la conception thermodynamique.

En ce qui concerne le choix des matériaux, ces grosses bouilloires étaient, avant, construites en acier au carbone, qui rouillait en quelques années ; maintenant, elles sont toutes construites en acier inoxydable. Pour cette raison, certaines des installations de dessalement construites au Moyen-Orient sont d'une conception qui fait qu'elles durent depuis soixante ans, et constituent donc une alimentation en eau fiable sur le long terme.

Les facteurs de taille et d'entartrage sont un autre point important, qui a contribué jusqu'ici à augmenter et améliorer la technologie MSF. Richard Morris a montré une photo de 40 distilleries, chacune de 5 MIGD (*Mega Imperial Gallon per Day*). Les installations récentes ont une capacité de 20 MIGD dans une seule cuve. Ces cuves sont des monstres qui pèsent 6 000 tonnes et mesurent plus de 100 m le long, avec une largeur de 25 m. Ce faisant, les coûts d'exploitation et d'investissement se réduisent, et il y a aussi un effet sur le tartre qui a un impact substantiel.

Bien sûr les techniques de conception ont contribué à améliorer la technologie. Voici une image 3D (pl. VI, fig. 2), d'une installation de dessalement MSF à deux ponts, qui peut maintenant être entièrement conçue en deux mois.

Sur le plan thermodynamique, il y a eu des améliorations très substantielles dans l'effet d'entartrage. C'est important car, pour le dessalement thermique, le coût d'investissement de l'installation réside principalement dans les faisceaux de tuyauteries. Si vous avez beaucoup de surface de transfert de chaleur et donc beaucoup de faisceaux de tuyauteries, alors l'installation est chère. Ce qui se passe, c'est qu'on est forcé d'avoir de grands faisceaux de tuyauteries si l'on a des facteurs d'encrassement élevés. En développant de nouveaux produits chimiques, à travers l'évolution des techniques de nettoyage, les facteurs d'encrassement ont diminué de 50 % ces trente dernières années et vont diminuer encore pour atteindre un niveau plancher de 0,05.

Si l'on regarde, dans le coût d'une installation MSF ou MED, quelle est la part du coût relative aux canalisations de transfert de chaleur, soit 22 %, on verra qu'en augmentant le coefficient de transfert de chaleur et en diminuant le facteur d'encrassement, on peut obtenir une importante réduction de cette composante du coût d'investissement.

On peut se faire une idée en regardant la tendance actuelle à l'augmentation de la taille. Comme je l'ai dit, ce n'est pas de la science de poche, mais quelquefois les kilos disent combien valent vos dollars. Les anciennes générations d'installations MSF, pour 5 MIGD, pesaient quelque chose comme 2 000 tonnes, et maintenant, pour la même capacité, une unité actuelle fait quelque chose comme 1 000 tonnes, c'est-à-dire moins de matériel à fournir, moins de matériel à livrer sur le site et à monter, moins de maintenance.

## La technologie MED

L'évolution est la même pour la technologie MED, (*MultiEffect distillation* = distillation à effets multiples). La technologie MED est une technologie intéressante dont on ne parle pas assez. Elle n'est entrée que récemment dans les applications industrielles à grande échelle, et comme c'est une technologie relativement récente, elle présente plus de possibilités d'améliorations techniques. Avant, elle se limitait à 2 à 3 MIGD par unité mais elle évolue maintenant vers des unités plus importantes, autour de 8 MIGD, avec pour conséquence que l'effet d'échelle en est l'aspect prépondérant.

Il y a deux domaines principaux où la MED peut être vraiment utile, spécialement au Moyen-Orient, où il y a de très importantes fluctuations dans le réseau de distribution électrique. En effet, en été, à cause de la climatisation, quand la température est élevée, la consommation d'électricité est élevée, mais en hiver, la consommation peut chuter de 50 %. Il y a donc beaucoup d'électricité inutilisée au Moyen-Orient : en hiver, on utilise à peu près 30 % de la capacité électrique, et les centrales électriques fonctionnent donc de façon très inefficace. Avec la MED, on peut régler l'alimentation en vapeur sur basse ou haute pression, modifiant ainsi le rendement de la MED. Ainsi,

en hiver on peut avoir une MED hautement efficace avec une vapeur haute pression, et en été, lorsque la consommation électrique est élevée, on peut abandonner l'efficacité et laisser passer toute la vapeur dans la turbine qui alimente la centrale électrique, et produire ensuite, avec la même installation, le même approvisionnement en eau dessalée.

L'innovation a donc été réalisée en adaptant le rapport entre les débits des circuits à différentes pressions de vapeur en fonction de la consommation électrique.

Une autre possibilité intéressante des installations MED est qu'on peut utiliser la vapeur à très basse pression, autour de 0,4-0,35 bar. En exploitant cette caractéristique, la MED peut effectivement remplacer le condenseur de la centrale électrique et l'on peut ainsi utiliser une installation MED pour condenser la vapeur sortant de la turbine à vapeur avec une petite baisse de rendement électrique, car on perd normalement de 0,05 à 0,035 bar. Mais en échange, on a une production d'eau dessalée.

D'autres développements concernent une MED fonctionnant à l'eau chaude, avec une cogénération diesel ou, dans certains cas, en combinant des installations MSF et des condenseurs pour extraire la vapeur basse pression afin de faire fonctionner l'unité MED.

## La technologie de l'osmose inverse

La technologie d'osmose inverse a un champ d'application totalement différent. Ce n'est pas une grosse bouilloire comme la MSF et la MED, et ses défis technologiques sont de nature complètement différente. Notre procédé, qui était considéré il y a 50 ans comme un procédé de laboratoire, est maintenant reconnu comme l'un des procédés majeurs dans l'industrie du dessalement. Du fait d'améliorations techniques dans la proportion de récupération de membranes, de la réduction du coût des membranes et du taux de remplacement, les coûts d'exploitation de l'osmose inverse se sont considérablement réduits ces dernières années.

Le procédé de membranes a connu de multiples formes, dont les principales sont : de type plaque ou sur des cadres ; à fines fibres creuses ou enroulées en spirale. Les principaux matériaux de fabrication sont l'acétate de cellulose et le polyamide.

Les principaux domaines dans lesquels l'osmose inverse s'est récemment développée et améliorée sont : les rejets de sel, le taux de récupération, la récupération d'énergie, le coût des membranes, la vie des membranes et leur capacité à travailler à de plus hautes pressions. Ces développements ont fait de l'osmose inverse une technologie plus fiable et plus économique. Les taux de produits dissous après osmose inverse qui ont pu être réalisés dans les années 1980 à 2000 ont diminué de 500 mg/l en 1980, à 300 en 1990, et 100 en 2000. Le taux de récupération est la quantité d'eau

qu'on doit pomper pour que la station de dessalement d'eau de mer produise une certaine quantité d'eau distillée (25-35 % en 1980, 35 % en 1990, 40-45 % en 2000). Plus le taux de récupération est élevé, moins on doit pomper d'eau, moins on doit en traiter. La consommation d'électricité en kwh par m<sup>3</sup> d'eau produite est passée de 15 en 1980, à 12 en 1990, et 6 en 2000.

On voit donc que la diminution du coût a été un progrès majeur dans cette période et que l'énergie a également baissé substantiellement alors que les performances ont augmenté.

Les efforts actuels des fabricants de membranes se concentrent sur la conception et le développement de nouveaux types de membranes avec une productivité accrue, ce qui inclut par exemple un débit plus rapide, un taux de récupération plus élevé, une plus grande surface de membrane.

En tant que consultant, je voudrais dire quelques mots du point de vue de l'utilisateur final. L'amélioration du facteur de fiabilité de service et de la robustesse est en général nécessaire. L'osmose inverse est encore une technologie très sensible au site. Il y a des sites avec une mauvaise eau, et il y a de mauvaises installations. Dans des pays comme au Moyen-Orient où il n'y a pas de stockage de l'eau produite, si l'installation de dessalement s'arrête, il n'y a plus d'eau au robinet, plus de douche, donc la fiabilité est un facteur essentiel. La recherche et développement s'oriente par conséquent vers des produits avec une plus grande tolérance aux pollutions par huile ou autre, une durée de vie plus longue, un taux de remplacement plus faible, et des intervalles plus longs entre les nettoyages.

## Autres technologies

Mes deux dernières diapos décrivent les exigences de certaines options hybrides. Ces considérations techniques sont probablement trop spécialisées pour cette audience et très focalisées sur le Moyen-Orient, où, comme je l'ai déjà dit, il y a un gros problème pour faire coïncider les demandes en électricité et en eau suivant la saison. En hiver, l'électricité produite dans des installations hybrides peut être utilisée pour l'osmose inverse ou en général pour des technologies fonctionnant à l'électricité. Comme l'électricité est une composante majeure du coût de l'eau dessalée, cela pourrait diminuer radicalement le coût de l'eau issue du dessalement, puisque cette électricité est disponible à certaines périodes.

La nanofiltration est une autre technologie qui combine le dessalement thermique et le dessalement par osmose inverse. Cette technologie autorise l'augmentation de la température de fonctionnement des installations de dessalement thermique. En augmentant les températures de fonctionnement, on augmente aussi le rendement de l'installation et on augmente sa capacité. Cela implique la conception de membranes capables de fonctionner

à des températures de 38 à 42 °C, ainsi que la mise au point de techniques de chlorination compatibles avec la MSF et l'osmose inverse.

En conclusion, les améliorations technologiques des cinq dernières années ont été considérables et pointues dans toutes les technologies (thermique et de membrane).

Le coût de l'eau et l'impact environnemental du dessalement pourraient être encore réduits en augmentant le rendement.

L'eau issue du dessalement doit être un bien de grande consommation, c'est-à-dire qui doit pouvoir être mis à la disposition de tous en grande quantité.

## Le recyclage intégré de l'eau pour les pays en manque d'eau <sup>5</sup>

**Bruce Durham**

Project manager, Veolia Water

Je vais vous parler du cycle de l'eau, ce qui inclut tout ce dont nous avons débattu aujourd'hui. Une partie du problème est que, généralement, nous ne comprenons pas ce cycle de l'eau. C'est la faute de nos gouvernements, de nos agences de l'environnement, de nos compagnies des eaux qui scindent leurs affaires en eau potable et eaux usées. Elles conçoivent ces eaux comme des activités différentes, alors qu'en fait tout cela fait partie du même cycle de l'eau.

Si vous allez chercher les données disponibles sur l'Internet, vous trouverez typiquement ce cycle de l'eau (pl. VI, fig. 1a). Le problème est que cette représentation est fautive car il n'y a personne dans ce cycle de l'eau, et c'est dramatique car le message que nous enseignons à nos enfants à l'école est faux. C'est une question importante que nous devons résoudre si nous voulons amener les gens à penser correctement et de manière responsable le cycle de l'eau. Voici un diagramme éducatif du cycle de l'eau que j'ai trouvé sur un site d'enseignement (pl. VII, fig. 1b). Nous avons entendu parler ce matin de ce fantastique réseau international d'aide à l'enseignement, mais nous avons besoin d'informations exactes, et celle-ci est totalement erronée.

En fait un cycle de l'eau ressemble probablement plutôt à ceci (pl. VII, fig. 2) où nous avons les eaux de distribution qui sont drainées dans les nappes phréatiques, où nous obstruons ces nappes phréatiques drainées, où nous réutilisons constamment notre eau, même dans le dessalement, où nous rejetons nos eaux usées à la mer, puis nous dessalons l'eau de mer. Tout cela fait partie du grand cycle de l'eau. En fait, nous devons considérer la situation dans son ensemble (pl. VII, fig. 3), prendre en compte les problèmes de fuites et d'évaporation, protéger nos ressources et notre environnement parce que si nous ne le faisons

pas, nous mourrons. Beaucoup d'enfants meurent du fait d'une réutilisation non contrôlée des eaux usées ; c'est actuellement la principale cause de mortalité infantile et c'est une question-clé que nous devons aborder, mais l'une des raisons pour laquelle nous ne le faisons pas est que nous ne comprenons pas ce cycle de l'eau.

Si nous regardons ce qui se passe dans le cycle de l'eau, nous avons le grand cycle de l'évaporation, mais en fait nous passons par les ressources en eau, la consommation domestique, industrielle, le traitement des eaux usées.

La société Veolia est en train de construire l'une des plus grandes installations d'osmose inverse en Méditerranée orientale, que Richard Morris vous a montrée. Veolia fait également partie du groupe qui a construit les grands systèmes MED dans le Golfe et ailleurs dans le monde, y compris en Afrique du Nord. Nous réutilisons également une quantité incroyable d'eau, comme à Durban, directement pour l'industrie, que nous fournissons en eau à faible coût. Nous faisons un travail considérable sur la recharge aquifère, et les nappes phréatiques alimentées par cette recharge aquifère sont une des principales ressources d'eau potable dans le monde. La réutilisation pour l'industrie et l'irrigation - l'irrigation des terrains de golf, activité importante pour l'industrie du tourisme, est largement pratiquée en Méditerranée -, et puis des applications inhabituelles comme à Windhoek (Namibie) où nous avons été associés à une opération où l'on réutilise directement : un raccordement de canalisation va directement

<sup>5</sup> Traduction de la transcription en anglais de l'exposé de l'auteur.

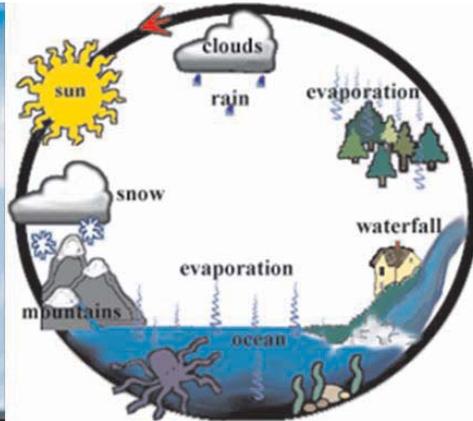
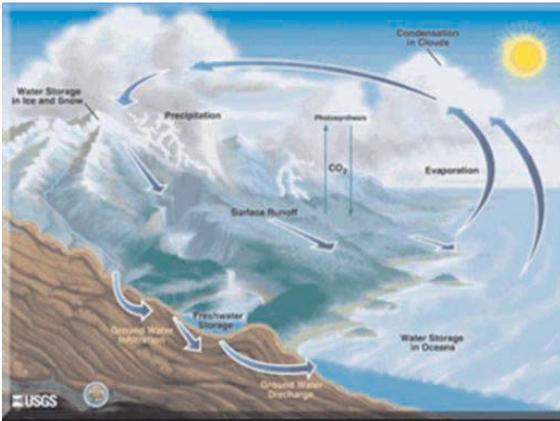


Fig. 1 (a et b) : Représentations classiques du cycle de l'eau

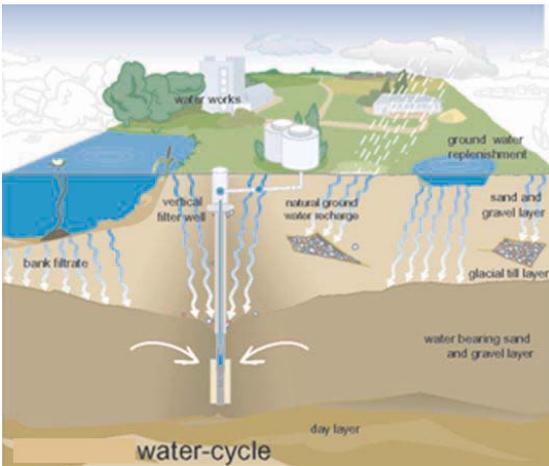


Fig. 2 : Représentation du cycle de l'eau en incluant l'homme



Fig. 3 : Les actions à prendre au cours du cycle de l'eau

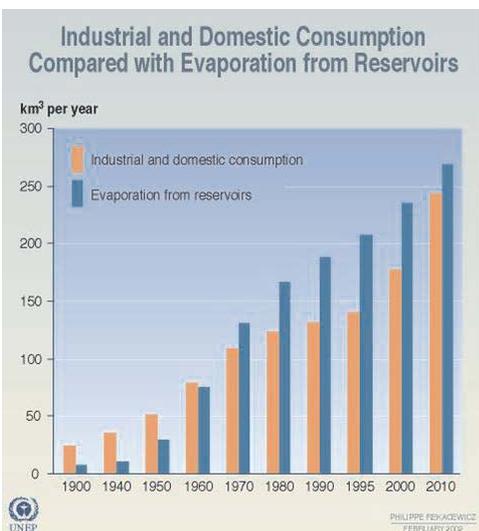


Fig. 4 : Comparaison de la consommation humaine et de l'évaporation

des stations de récupération d'eau atmosphérique vers les stations d'eau potable, et cela fonctionne depuis maintenant plus de 25 ans.

Si nous regardons très brièvement les applications de la réutilisation :

- Nous pratiquons depuis des siècles la réutilisation non programmée de l'eau. C'est la recharge de l'environnement des rivières et des nappes phréatiques avec des eaux usées traitées. «Non programmée» définit historiquement cette pratique, parce que par bien des aspects, ce n'était pas pris en considération et que l'eau n'était pas gérée correctement.
- La plupart de notre travail est maintenant lié à une activité planifiée, où nous utilisons des eaux usées correctement traitées pour la recharge aquifère, pour le stockage, pour la recharge des rivières et des retenues. La législation européenne, par exemple, dans le plan-cadre de l'eau, explique clairement la meilleure pratique, en termes de réutilisation de l'eau, pour l'environnement.
- Et bien sûr, directement en fabriquant beaucoup d'installations à zéro décharge de liquide, en utilisant des évaporateurs pour éliminer le concentré d'osmose inverse et en produire du sel solide - dans un cas, une usine de papeterie, en fait on peut brûler le sel concentré parce que celui-ci a une plus forte valeur calorifique que le charbon. Les forts concentrés peuvent donc être utiles dans quelques applications.
- L'irrigation, et bien sûr les marécages et toutes les applications comme la lutte contre le feu, le nettoyage des routes et l'irrigation paysagère dans les villes pour rendre celles-ci plus attractives pour la communauté locale et le tourisme.
- Puis l'eau potable directe comme en Namibie, où l'on est loin de la mer et où l'on n'a donc pas d'autre choix.

Un des points-clés qui nous pose problème est la réutilisation de cette eau potable et l'expertise des eaux usées. C'est un problème en termes de comment gérer cette réutilisation. Cela couvre aussi toutes les applications urbaines et industrielles, ce qui nécessite une équipe pluridisciplinaire. Par exemple, les régions d'Espagne qui font réellement un gros travail de réutilisation sont celles où l'eau potable et les eaux usées sont sous la responsabilité d'une même autorité, c'est-à-dire une instance qui prend les décisions, et non pas plusieurs qui se battent entre elles comme si elles étaient en compétition.

La réutilisation de l'eau s'accroît-elle ? Je m'attache ici à la réutilisation à cause de son taux de croissance. Voici en effet ce qui est arrivé en Australie, où ils ont appris la façon de faire des Américains. Ils ont reconnu qu'ils avaient un problème de pénurie d'eau, et maintenant il y a une législation et des initiatives gouvernementales qui ont permis d'avoir un taux moyen de 41 % sur les dix dernières années. Il y a même un homme politique qui utilise le recyclage comme argument électoral, ce qui est incroyable.

Mais si l'on regarde la situation dans le monde, plus précisément les taux de croissance en capacité qui existent actuellement et qui ont existé sur la base de projets contractés, on voit que depuis 30 ans, le Japon a une croissance de plus de 25 % par an. Les Etats-Unis sont au même taux, mais pour les dix dernières années. L'Europe est assez intéressante : 27 % sur neuf ans. L'Australie, Singapour avoisinent 40 % sur la même période. En Malaisie, le nouveau ministre de l'environnement a reconnu que la disponibilité en eau posait un sérieux problème qu'il fallait résoudre, et ils ont rapidement avancé en profitant des expériences australiennes et californiennes. En Espagne, notre voisin, ce qui a été fait est prodigieux, car ils arrivent à plus de 55 %. Et bien sûr, qui produit le plus et de tout ? La Chine. Les Chinois produisent des membranes, ils produisent tout ce qui est possible et imaginable dans le domaine du dessalement et de la réutilisation de l'eau, avec une croissance de plus de 60 % par an, en profitant de l'expérience de chacun. Nous aurions besoin de faire de même en Méditerranée, de développer nos propres technologies et notre propre expérience.

Nous devons savoir gré de cette croissance à un parasite appelé *Cryptosporidia*, car dans l'alimentation en eau potable et aussi pour le retraitement des eaux usées, il a hâté le développement de technologies de membrane sur les applications à très haut débit. Ces technologies sont utilisées comme prétraitement pour l'osmose inverse, pour produire ce taux de croissance.

C'est tout à fait intéressant quand on compare à l'Arabie saoudite, qui a le plus fort taux de croissance annuel de dessalement - le taux de croissance maximum en capacité avoisine les 17 % -, donc la réutilisation croît à un taux considérablement plus élevé que le dessalement, la raison étant qu'elle coûte moitié moins cher. Le plus récent rapport de GWY sur le dessalement indique que le recyclage est une solution plus durable que le dessalement. On commence par les fuites, par arrêter de gaspiller l'eau, par obtenir le respect de l'eau, puis on en vient aux solutions de réutilisation et de dessalement.

L'évaporation constitue le plus important problème de fuite que nous connaissons au monde. Les Nations unies ont réalisé ce diagramme (pl. VII, fig. 4) qui démontre qu'il y a plus d'eau perdue par évaporation au niveau des retenues - pas au niveau des mers ni des lacs - que d'eau effectivement consommée par nous. Le problème avec l'évaporation est qu'elle vous laisse avec les résidus dont vous ne voulez pas, alors que lorsque les canalisations d'eau fuient, elles laissent tout passer. C'est donc un problème important, qui n'est pas identifié dans bien des endroits. En Australie, on commence à le faire, et les jeux olympiques à Sydney ont été l'occasion de réunir le gouvernement et les compagnies des eaux. Voici une vue (pl. VIII, fig. 5) d'un vieux site industriel, une jungle de béton, où la réutilisation de l'eau a été l'un des éléments-clés pour re-développer ce site en parc aquatique (pl. VIII, fig. 6). Le bénéfique en a été une revalorisation du terrain

qui est maintenant attractif, ce qui est un agrément pour la communauté, qui dispose de 5 000 maisons sur le site, toutes alimentées en chasses d'eau et autres applications par de l'eau non potable. 80 % de l'eau utilisée sont des eaux usées, assainies et réutilisées. C'est une fantastique opportunité de re-développer des zones pauvres en aménagements pour les populations locales. Un bâtiment unique abrite toute la technologie, qui utilise l'osmose inverse, la technologie de dessalement avec membranes.

Mais les Australiens vont plus loin : ils projettent maintenant dans le Queensland un programme immobilier industriel de 50 000 maisons. L'introduction de circuits d'eau intelligents, d'égouts intelligents, de canalisations intelligentes, d'égouts qui ne fuient pas, se traduit par une diminution de 85 % de la demande en eau potable, une réduction de 30 % du CO<sub>2</sub>, et une réduction de 70 % des effluents. Le surcoût de ces systèmes est de 10 %.

Pour appuyer ce que disait le précédent intervenant, cette très importante centrale électrique en Australie a 10 heures d'électricité inutilisée qu'ils ne peuvent pas vendre

à cause des pics de demande. Les banques sont intéressées par le stockage d'énergie, et je suggérerai donc de prendre la situation du Moyen-Orient où l'on a une installation de dessalement de l'eau de mer intégrée à la centrale avec une MED, un système thermique combiné à un système d'osmose inverse d'eau de mer, système hybride qui produit de l'eau potable pour la ville. La nuit, quand la demande d'eau est faible, pourquoi ne pas utiliser la capacité de la centrale électrique pour traiter une énorme quantité d'eau de réutilisation - car la ville est là, et les eaux usées sont là en permanence - pour produire une eau de bonne qualité qu'on remet dans le sol ? On le fait déjà en Californie et partout dans le monde en termes de stockage de nappes phréatiques. Ce peut être aussi dans des zones saumâtres et pas nécessairement dans des zones d'eau douce. On peut ainsi faire tourner les centrales électriques au maximum de leur rendement, et produire cette eau qui est redevenue souterraine, et transforme en fait une production d'énergie qui était partiellement gaspillée en un précieux programme de stockage d'énergie par l'eau recyclée.

---

## Gérer la sécurité de l'eau : réutilisation ou dessalement ? <sup>6</sup>

**Valentina Lazarova**

Suez Environnement

Je suis très honorée d'être ici et de résumer en quelque sorte cette session. Je ne présenterai pas les technologies de réutilisation de l'eau mais je voudrais poser la question provocatrice de la réutilisation ou du dessalement pour gérer la pénurie en eau.

Avec l'augmentation de la croissance démographique et le développement urbain accéléré, de plus en plus de gens et de pays souffrent de manque d'eau et de stress hydrique. Comme on le voit sur cette carte (pl. VIII, fig. 1), il y a des zones importantes de pénurie d'eau et l'Afrique et l'Asie sont extrêmement concernées. Des projections récentes montrent qu'en 2050, la plupart des pays du Moyen-Orient et d'Afrique du Nord connaîtront non seulement un stress hydrique, mais que les ressources renouvelables en eau seront réduites au minimum vital, c'est-à-dire 100 m<sup>3</sup> par habitant et par an, ce qui n'est suffisant que si la réutilisation domestique fonctionne. C'est la pénurie physique dont tous les intervenants ont parlé.

Mais nous ne pouvons oublier que nous avons un second type de pénurie qui est la pénurie économique en eau, qui concerne des centaines de millions de personnes

dans le monde qui n'ont pas les moyens de se payer de l'eau, et malheureusement, dans beaucoup de pays méditerranéens, en Algérie, en Tunisie, au Maroc, et même dans d'autres pays riches, des populations n'ont pas accès à l'eau.

L'eau est la vie, mais n'oublions pas que les installations sanitaires conditionnent la santé des populations. Si les décideurs résolvent le problème de l'alimentation en eau, que feront-ils des eaux usées ? Les eaux usées non traitées qui sont utilisées, par exemple, dans beaucoup de villes comme Mexico et Marrakech, pour irriguer les cultures alimentaires, sont responsables de nombreuses maladies qui affectent nos enfants. Donc les installations sanitaires, le traitement de l'eau sont des points très importants et c'est la tâche des chercheurs et des décideurs d'en tenir compte. La sécurité de l'eau et la santé sont en danger du fait des pénuries critiques à venir, de

---

<sup>6</sup> Traduction de la transcription en anglais de l'exposé de l'auteur.



Fig. 5 (B. Durham) : Un site industriel en friche en Australie



Fig. 6 (B. Durham) : Le même site après réhabilitation et irrigation

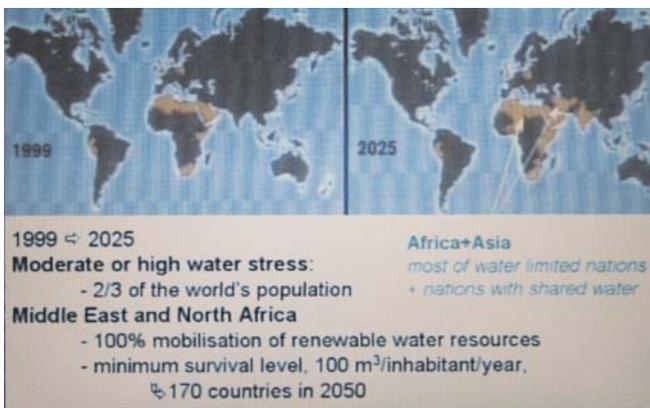


Fig. 1 (V. Lazarova) : Zones géographiques de pénurie d'eau et évolution



Fig. 2 (V. Lazarova) : Carte mondiale de la réutilisation de l'eau

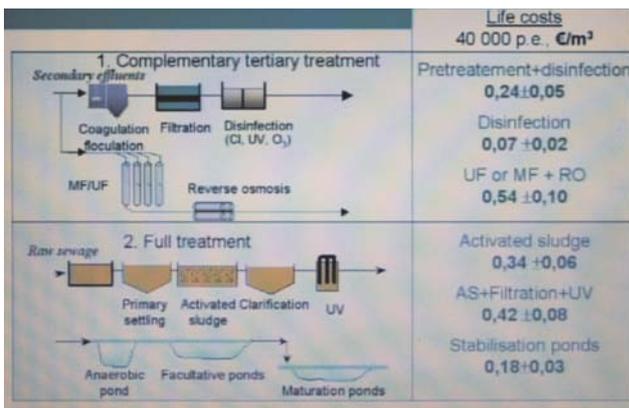


Fig. 3 (V. Lazarova) : Coût du du traitement des eaux usées

Characteristics	Chlorine	Ozone	UV	MF	UF
Bactericidal action	++	++	++	+++	+++
Virucidal action	+++	+++	+	++	++
Bacterial reviviscence	+	++	+	-	-
Residual toxicity	++	+	-	-	-
By-products	++	+	-	-	-
Operating costs	+	++	++	+++	+++
Investment costs	+	+++	++	+++	+++

.. none ; + low ; ++ middle ; +++ high

Fig. 4 (V. Lazarova) : Caractéristiques des techniques de désinfection



Fig. 5 (V. Lazarova) : Comparaison du coût du retraitement des eaux et de la désalinisation

l'augmentation des impacts environnementaux négatifs et de l'inadéquation des installations sanitaires. Et malheureusement, ce sont les populations les plus désavantagées qui souffrent de cette situation.

Quel est le coût des dommages environnementaux ? Le coût total en Afrique du Nord et au Moyen-Orient est de 12 à 14 milliards d'US\$ (soit 3 % du produit intérieur brut régional). La part la plus importante concerne la détérioration de la santé (8,8 milliards de \$). C'est ensuite la perte de tourisme (2,11 milliards de \$), qui est une activité importante dans les pays méditerranéens, la dégradation des ressources (1,2 milliards de \$) - les ressources naturelles, qui sont de plus en plus polluées, et le traitement de l'eau de boisson représentent la moitié du coût -, et enfin le traitement des maladies (1,2 milliards de \$). Si nous investissons une petite part pour les installations sanitaires, nous pouvons grandement améliorer la situation.

La solution, comme Bruce Durham l'a dit, est la gestion du cycle global de l'eau, soit des ressources naturelles au stockage et au traitement, puis aux usages urbains et industriels, au traitement des eaux usées, à la réutilisation de l'eau et enfin au retour de l'eau à la nature. C'est là le défi majeur des scientifiques et des décideurs.

Voici une carte (pl. VIII, fig. 2) de la réutilisation de l'eau dans le monde, avec en beige et jaune les zones de pénurie d'eau (de moins de 500 à 1 000 m<sup>3</sup> par personne et par an d'eau renouvelable). Bien évidemment, c'est dans les régions où l'eau est rare que la réutilisation de l'eau est la plus développée, mais on a de plus en plus d'expériences de réutilisation de l'eau dans des régions sans pénurie d'eau, dans un but de préservation de l'environnement. La réutilisation de l'eau pour des usages non potables est donc une pratique qui existe dans les régions méditerranéennes. Nous avons eu un atelier en France, avec un président de coopérative agricole qui produit les pommes de terre les plus chères de France en irrigant cette culture de prestige avec de l'eau recyclée.

Les défis technico-économiques de la réutilisation de l'eau sont nombreux dans la région méditerranéenne :

- économiques : coût de construction et de fonctionnement à l'échelle macro-économique ;
- financiers : prix et valeur du marché des services ;
- sociaux, psychologiques : acceptabilité du public et éducation ;
- réglementaires : normes et règlements ;
- organisationnels : structure administrative adéquate ;
- techniques.

A l'exception de quelques pays, comme Israël, la Tunisie, le Maroc, nous avons besoin d'appliquer des structures administratives nouvelles. Mais, de mon point de vue, le défi technico-économique le plus important est pour la recherche, et nous sommes ici pour aider les décideurs à le résoudre.

Suez Environnement, qui est une compagnie privée, a mis en œuvre beaucoup de programmes de recherche liés

à la réutilisation de l'eau en collaboration avec différents pays pour développer les technologies adéquates, à petite ou grande échelle, pour développer des systèmes de traitement naturels tels que la co-infiltration-percolation, la désinfection avancée pour la production d'eaux de haut niveau par les technologies de membrane, l'osmose inverse pour le dessalement et la recharge aquifère comme aux Etats-Unis, mais aussi pour améliorer la qualité de l'eau dans le transport - l'eau qui est produite à un endroit doit être transportée sur de longues distances pour l'irrigation et d'autres usages. Nous avons coordonné un grand projet européen pour définir des plans appropriés de traitement et de gestion des risques, et des micro-indicateurs pour le développement de la réutilisation de l'eau dans les régions méditerranéennes.

Je n'énumérerai pas les technologies existantes dont nous disposons pour les différentes échelles. Voici le coût type du traitement des eaux usées (pl. VIII, fig. 3), qui dépend bien entendu de l'échelle. N'oubliez pas que le traitement naturel est bon marché. Ici vous voyez le coût d'un bassin de stabilisation pour une production de 40 000 m<sup>3</sup>/jour qui est celui d'une installation de traitement au Maroc. Cette technologie présente des coûts similaires pour les pays européens. Les boues d'égout activées sont une technologie très courante pour le traitement des eaux usées, et coûtent environ 0,3 €/m<sup>3</sup> selon la taille de l'installation. Ce qu'il faut savoir, c'est que pour la réutilisation de l'eau, on ne peut se contenter du traitement secondaire pour retirer le carbone, nous devons aussi effectuer une désinfection, ce qui implique un coût additionnel, indépendant du type de technologie, de l'ordre de 0,1 €/m<sup>3</sup>.

Comme nous l'avons déjà entendu, la technologie de membrane est de moins en moins chère, même pour le traitement des eaux usées.

Au moment de nous décider pour une technologie, nous devons comparer (pl VIII, fig. 4) non seulement les coûts d'investissement mais aussi les coûts d'exploitation parce que même si nous avons des sociétés filiales pour payer l'installation, quelqu'un doit payer les coûts d'exploitation et de maintenance et nous avons besoin de personnes qualifiées pour avoir une qualité d'eau fiable. Nous devons aussi considérer l'efficacité de la désinfection : nous devons retirer toutes les bactéries ou diminuer le taux de bactéries en fonction de l'application voulue - nous n'avons pas besoin d'eau distillée pour irriguer toutes les cultures, même les cultures vivrières. Bien entendu nous devons également regarder la toxicité résiduelle et les sous-produits - par exemple, si la chloration génère des sous-produits toxiques, cela affectera le système d'eau potable. Donc quand nous devons trouver une solution, il ne suffit pas de faire des comparaisons techniques, mais nous devons faire aussi une analyse coûts/bénéfices. Nous sommes capables de calculer le coût du traitement de l'eau mais nous devons aussi inclure le coût de stockage et de distribution. Le coût du dessalement est 0,5 US\$/m<sup>3</sup> pour les très grandes installations, et transporter l'eau peut

coûter jusqu'à cinq fois plus - nous devons garder cela à l'esprit. Nous avons besoin du stockage pour l'irrigation car nous ne pouvons pas produire suffisamment pour satisfaire les pics de demande pour l'irrigation estivale si nous mettons en place la réutilisation de l'eau. C'est la même chose pour le dessalement, où nous devons évaluer les impacts positifs ou négatifs sur l'environnement. Il y a beaucoup de bénéfices économiques que nous pouvons évaluer, par exemple ceux de la collecte des eaux usées : si nous introduisons une pollution dans la rivière, nous devons traiter l'eau pour la rendre potable et quelqu'un devra payer. D'autres bénéfices économiques concernent l'énergie, l'alimentation en eau et le tourisme. Les bénéfices environnementaux sont l'amélioration de la santé et la protection de la ligne de partage des eaux.

La question est donc aujourd'hui : dessalement ou réutilisation de l'eau ? Tout dépend des besoins.

La première question est celle du coût (pl VIII, fig. 5). Vous avez compris que le coût de la réutilisation des eaux usées est plus bas que celui du dessalement. Lorsque nous parlons de 0,5 €/m<sup>3</sup> pour le dessalement, c'est le coût pour de très grandes installations, comme celle de Tampa Bay où il s'agit de traitement d'eaux saumâtres. Pour les petits et moyens bassins, le coût du dessalement reste très élevé, transport non inclus. C'est la même chose pour la réutilisation de l'eau. Par exemple, avec le bioréacteur à membrane à grande capacité, le coût de traitement est de 0,5 €/m<sup>3</sup>. C'est peu mais cela ne concerne que les très grandes installations (de l'ordre de 200 000 m<sup>3</sup> par jour). Or les grandes installations d'eaux usées et de dessalement ne représentent qu'environ 2,3 % du nombre total d'installations. Donc lorsque nous parlons de coût de traitement, n'oublions pas la taille de l'installation de traitement dont nous avons besoin. Si l'on regarde les unités construites par Degremont (notre compagnie d'équipement) pour le dessalement, nous avons maintenant de très grandes installations de traitement qui peuvent produire de l'eau à partir d'eau de mer ou d'eaux saumâtres, à très faible coût du fait de leur très grande capacité. Mais ce n'est pas vrai pour les petites installations.

Second point important : si nous avons besoin de produire de l'eau recyclée pour l'irrigation, il est important également de comparer avec la qualité de l'eau de la ressource naturelle. Par exemple, à Clermont-Ferrand, nous sommes en train de mettre en œuvre une technologie de traitement à faible coût, avec des bassins de maturation qui fonctionnent uniquement pendant l'été. Si nous comparons la qualité de la rivière et celle de l'eau traitée sur le plan microbiologique, nous constatons qu'il est dangereux d'irriguer les cultures avec l'eau de la rivière parce que celle-ci est hautement polluée (salmonelles, boues). Et nous sommes dans le centre de la France ! En d'autres endroits, la situation est bien pire. En Europe, nous n'avons toujours pas de législation concernant la qualité de l'eau pour l'irrigation.

Avant de conclure, je voudrais prendre l'exemple de l'île de Majorque aux Baléares avec ses 10 millions de touristes par an et avec un déficit en eau, particulièrement en été. Si nous faisons une estimation de la demande et des ressources en eau, il est clair que nous avons un manque d'eau, et dans le cadre du projet européen «Catch water», nous avons comparé différents scénarios pour évaluer les bénéfices et les coûts relatifs de la réutilisation et du dessalement. Il faut savoir qu'à Majorque, alors qu'ils ont deux grandes installations près de Palma, 56 % de l'eau traitée est recyclée, principalement pour l'irrigation, mais il faut souligner qu'il existe des mesures législatives - l'irrigation des terrains de golf n'est autorisée qu'avec de l'eau recyclée. On a donc un usage institutionnel et statutaire, ce qui permet de développer les applications urbaines.

Le premier scénario consiste à étendre les eaux recyclées aux usages urbains, avec une irrigation agricole existante ; le coût global de traitement est de 0,23 €/m<sup>3</sup>. Si l'on double la capacité pour irriguer l'agriculture, le coût additionnel est extrêmement faible, de l'ordre de 0,04 €/m<sup>3</sup> et la durée d'amortissement supplémentaire est très courte. Si nous comparons avec un scénario de construction d'une installation de dessalement, le dessalement reste non compétitif puisque que le coût de construction de cette installation est de 0,25 €/m<sup>3</sup>, et rien que le coût d'exploitation et de maintenance est de 0,41 €/m<sup>3</sup>. C'est donc presque deux fois plus cher que la réutilisation, uniquement sur la base du coût d'exploitation et de maintenance.

En conclusion, ce que je veux souligner est qu'avant de traiter, on doit prendre en compte de meilleures pratiques pour la réutilisation de l'eau, parce que nous avons des barrières à mettre en place pour assurer la protection. La première concerne les installations sanitaires. Nous avons besoin de collecter les eaux usées car si celles-ci vont à la rue nous ne pouvons protéger la santé humaine. Nous avons ensuite besoin d'un niveau de traitement, qui dépend du type de réutilisation. Nous devons prendre en compte le stockage, qui peut être une barrière sanitaire de plus contre les pathogènes. Nous avons différents types d'applications selon le type d'irrigation et nous pouvons ainsi avoir des barrières supplémentaires, avec un niveau plus bas de désinfection que l'irrigation par pulvérisation par exemple. Donc même si nous choisissons différentes barrières, et bien sûr nous pouvons introduire des restrictions de culture ou des mesures d'exposition humaine, nous pouvons beaucoup diminuer le coût requis pour la réutilisation de l'eau en fonction de l'utilisation.

Les principaux résultats de cette étude ont été publiés dans le livre *Irrigation with recycled water*.

Ma conclusion est que retourner l'eau à la nature est un défi qui demande encore un grand effort de recherche, mais qui est aussi une contribution précieuse à la société humaine et à son développement durable, tout simplement parce que l'eau est la vie.

## L'expérience marocaine en matière de dessalement <sup>7</sup>

**Azzeddine Elmidaoui**

Université Ibn Tola, Kénitra

Je vais parler de l'expérience marocaine en matière de dessalement, mais avant tout je vais parler de la problématique de l'eau au Maroc et je voudrais m'arrêter sur des petites choses qui ont été mentionnées par mes prédécesseurs et qui intéressent justement la rive sud de la Méditerranée, à savoir la réduction des coûts, le cas de l'osmose inverse, qui est le procédé le plus appliqué au Maroc et en Tunisie et les nouvelles orientations techniques en dessalement.

L'approvisionnement et l'assainissement de l'eau constituent, comme il a été signalé, les plus grands défis de notre civilisation contemporaine. C'est un problème qui ne touche pas simplement les pays en voie de développement, mais qui touche aussi les pays développés. La demande en eau ne fait qu'augmenter, comme cela a été signalé par Michel Soulié, et dans certains pays du Sud elle va doubler d'ici à 2025. Les ressources sont inégalement abondantes, inégalement mobilisables, surexploitées, disputées, en diminution, et ce sera effectivement l'une des causes de guerre de ce siècle. Pour le Maroc, nous disposons d'un potentiel hydrique de quelque 29 milliards de m<sup>3</sup> dont 20 milliards sont mobilisables exclusivement en conventionnel. Pour 16 milliards de m<sup>3</sup>, ce sont des eaux de surface, et 4 milliards sont des eaux souterraines. Il faut aussi remarquer que 3 milliards de m<sup>3</sup> des eaux souterraines sont déjà mobilisés.

La disponibilité de l'eau a diminué, de 1960 à 2004, de quelque 3 500 m<sup>3</sup> par habitant et par an à 900 m<sup>3</sup> ; elle ne sera que de l'ordre de 500 m<sup>3</sup> en 2020, le seuil du stress hydrique. La demande en eau a aussi augmenté, elle a été en 2003 de quelque 450 m<sup>3</sup> par habitant et par an. Les régions du Sud sont déjà dans une situation de stress hydrique. Les causes de cette demande, comme on l'a signalé, sont des causes humanitaires : c'est la sécheresse, la démographie, la croissance économique, l'exode rural, l'urbanisation, l'irrigation (qui consomme un peu plus de 70 % de ressources en eau), la pollution des nappes et des cours d'eau. Pour les ressources en eau, au Maroc, on a choisi la politique de la planification attentive et de la gestion vigilante et intégrée, mais dans le cas où nous ne disposons pas d'eau, comme dans le cas des régions du Sud, nous sommes obligés de faire appel au dessalement. Pourquoi le dessalement ? Avant tout parce qu'il y a un manque de ressources naturelles et parce que les coûts sont plus compétitifs par rapport aux autres moyens, comme le transport par des camions citernes ou autre.

Je dirai juste deux mots sur quelques technologies, en particulier les technologies à membrane. Le dessalement, c'est soit la distillation soit les membranes avec l'osmose inverse ou l'électrodialyse. L'électrodialyse est une technologie qui n'est pas compétitive par rapport à l'osmose inverse en matière de dessalement. Mais c'est une technologie complémentaire, qui trouve son champ d'application, non pas dans le dessalement de l'eau de mer, mais beaucoup plus dans celui des eaux saumâtres, dont la salinité varie de 0,5 à 5 g/l.

Dans le monde, il y a aujourd'hui une production annuelle d'un million de m<sup>3</sup> par jour pour un million de m<sup>2</sup> de membrane. Les consommations électriques sont de l'ordre de 1 à 2,5 kWh/m<sup>3</sup> pour une eau saumâtre. Effectivement, ce n'est pas applicable pour une eau de mer parce que la consommation monterait alors à 7 kWh/m<sup>3</sup>.

Un petit bilan de quelques stations de dessalement par électrodialyse : aux Etats-Unis, on a des stations d'une capacité de 950 m<sup>3</sup> par jour, on abaisse la salinité de 1 450 à 360 mg/l, et la consommation électrique est de l'ordre de 1,3-1,4 kWh/m<sup>3</sup> ; en France, pour la station de Harroncourt-Dronville, elle est de l'ordre de 2,4 kWh/m<sup>3</sup>.

Pour l'osmose inverse - cela a été effectivement signalé avant moi -, nous avons assisté, il y a quelques années, au dépassement de la production d'eau dessalée par osmose inverse par rapport à la production par des techniques de distillation, grâce à la maîtrise des problèmes de colmatage des membranes, au taux de rejet du sel, qui est passé de 98 à 99,8 %, et surtout grâce à l'abaissement de coûts énergétiques de 16 à 4 kWh/m<sup>3</sup>. On parle aujourd'hui de consommations bien moindres qu'avant, qui ramènent pour certaines installations le prix du dessalement à ordre de grandeur de 0,55 €/m<sup>3</sup>. Il faut noter que l'apport des universités et de la recherche est très important en matière d'amélioration de la qualité des membranes, de la mise au point des membranes en fibres creuses, de la connaissance des mécanismes de colmatage et de la maîtrise et de la combinaison de procédés ou de plusieurs opérations unitaires.

La vraie question qui reste posée à tous les spécialistes du dessalement est de savoir comment réduire les

<sup>7</sup> Transcription de l'exposé de l'auteur en français.

coûts du dessalement. C'est une question primordiale. Si l'on regarde la répartition des coûts, on constate que l'énergie représente de 50 à 70 % du coût d'exploitation d'une installation d'osmose inverse, la maintenance et les membranes n'intervenant que pour 8 %, la main d'œuvre pour 15 %. Le facteur principal pour diminuer le coût est donc de diminuer le coût de l'énergie. Pour ce faire, la tendance, actuellement, est d'optimiser le prétraitement de l'eau pour réduire le colmatage des membranes, dans le cas de l'osmose inverse. Cela peut se faire par infiltration ou microfiltration en prétraitement, ou par la production de nouveaux séquestrants. On a ainsi utilisé de nouveaux produits comme un gel qui permet d'absorber les colloïdes avant traitement des eaux d'une manière particulièrement efficace, ce qui augmente l'efficacité des séquestrants. Un deuxième point concerne l'amélioration de la récupération de l'énergie du concentré à haute pression (partie de l'eau où le sel est concentré) et plusieurs travaux menés dans ce sens ont permis le remplacement de générateurs par des turbines, par des démarreurs, comme l'apparition des osmopompes, etc.

En matière de dessalement, les nouvelles orientations aujourd'hui sont en premier lieu la percée de l'osmose inverse par rapport aux techniques de distillation, même pour des installations de forte capacité. La station d'Ashkelon de 320 000 m<sup>3</sup>/jour est la plus grosse station de dessalement par osmose inverse. C'est une grande percée qui montre l'opportunité pour un développement plus accentué de l'osmose inverse par rapport à la distillation. Ceci est dû aux baisses des coûts des modules de l'osmose inverse, et des équipements associés. Nous avons assisté en effet, depuis les années quatre-vingt dix, à une baisse de quelque 40 % de ces coûts.

La deuxième tendance, c'est l'utilisation des installations hybrides, combinant l'évaporation et l'osmose inverse : le principe est d'utiliser les eaux de refroidissement des évaporateurs pour l'alimentation des unités à osmose. Cela permet une diminution de la consommation énergétique et une économie en matière d'investissements, mais cela pose des problèmes de pollution biologique à haute température et diminue la qualité de l'eau produite. Le deuxième avantage des centrales hybrides est l'optimisation du rendement énergétique des centrales thermiques et l'exploitation de la disponibilité d'énergie en période creuse.

La troisième tendance concerne les nouvelles technologies de récupération d'énergie grâce à l'apparition de nouveaux équipements de récupération meilleurs : remplacement des générateurs par des turbines, des démarreurs par des variateurs de fréquence, utilisation d'osmopompes, de systèmes à huile, etc.

La quatrième tendance, également importante est le respect des nouvelles exigences en matière de réglementation et d'environnement ; le cas du rejet du bore en est un exemple.

Je passe maintenant à l'expérience marocaine en dessalement, dont le début remonte à 1973. Il faut d'abord

situer le dessalement au Maroc. Les deux organismes qui s'en occupent et qui ont accumulé une expérience dans ce domaine sont l'Office national de l'eau potable (ONEP) et l'Office chérifien des phosphates (OCP). Je parlerai de l'expérience de Tarfaya et Boujdour qui a commencé en 1973 par l'installation de plusieurs petites unités de l'ordre de 75 à 250 m<sup>3</sup>/jour qui sont aujourd'hui toutes arrêtées. La première station moyenne - grande à notre échelle - est la station de Laayoune, réalisée en 1995 avec une capacité de 7 000 m<sup>3</sup>/jour avec une extension de 6 500 m<sup>3</sup>/jour qui est en cours, la station de Boujdour d'une capacité de 800 m<sup>3</sup>/jour avec aussi une extension de 1 600 m<sup>3</sup>/jour en cours. Une nouvelle station à Tarfaya a vu le jour avec 860 m<sup>3</sup>/jour, à partir d'une eau saumâtre, C'est aussi le cas de celle de Tan Tan avec quelque 1 728 m<sup>3</sup>/jour. Bien sûr, ce sont toutes des petites stations par rapport à ce qui existe dans le Golfe.

Les prévisions de l'ONEP sont tout d'abord, en 2006, une station par osmose inverse de quelque 11 500 m<sup>3</sup>/jour dans la ville de Tan Tan, et surtout la station d'Agadir avant 2020. Pour cette dernière, on parlait d'une réalisation à l'horizon 2025, puis pour 2020, mais aujourd'hui on espère un peu avant 2020. La capacité de cette usine a été revue à la hausse : au début du projet, on parlait de 80 000 m<sup>3</sup>/jour, puis on est passé à 100, 120 000, et aujourd'hui on parle de 160 000 m<sup>3</sup>/jour d'eau traitée.

L'ONEP a, par ailleurs, mené plusieurs études et réflexions sur la partie énergétique de ces usines, en regardant les possibilités d'énergies alternatives, principalement les étangs solaires, les énergies gravitaires, le nucléaire, l'éolien. De ces études, il ressort que c'est l'énergie éolienne qui est plus encourageante et qui mérite un peu plus de réflexion et d'étude pour exploiter les riches gisements du Maroc en matière d'énergie éolienne. D'autres études ont été menées aussi par l'ONEP, pour optimiser le prétraitement et la réduction de la consommation des produits chimiques, pour adapter de nouveaux matériaux contre la corrosion.

Pour le Maroc, en ce qui concerne la réduction de la charge énergétique, les tendances sont les suivantes : d'abord la baisse du coût du kWh, qui est continueuse au Maroc depuis plusieurs années ; ensuite l'essai de systèmes de mise sous pression à l'aide d'osmopompes, en cours avec la société OCTA ; et surtout le dessalement couplé à l'énergie éolienne.

Concernant les perspectives de l'OCP, cet organisme dispose actuellement d'une station par thermo-compression de quelque 6 000 m<sup>3</sup>/jour dans le sud du pays, et prévoit une station dont le cahier des charges va apparaître incessamment, de quelque 60 000 m<sup>3</sup>/jour. Ce projet est ouvert pour la production de l'énergie, comme la production de l'eau potable.

En conclusion, je dirai qu'en parallèle avec toute cette activité industrielle, il y a une activité universitaire intense en matière de dessalement au travers d'un pôle mis en place par le ministère de l'Enseignement supérieur, le

«Pôle eau et environnement», qui englobe l'ensemble des laboratoires qui travaillent sur l'eau et l'environnement en général. L'un des deux axes de ce pôle porte sur le dessalement, avec des recherches sur la synthèse des membranes, sur le prétraitement et son amélioration, sur le couplage de l'énergie, sur les traitements spécifiques et sur les traitements des eaux usées.

Au total, le dessalement, dans certaines régions du Maroc, est l'unique solution pour l'approvisionnement en eau potable, en eau d'irrigation ou en eau industrielle,

et peut devenir une solution intéressante de secours pour d'autres régions du Maroc. L'utilisation d'énergies renouvelables en dessalement est une solution intéressante, à reconsidérer et à approfondir. Cela nécessite bien entendu la permanence d'une veille technologique et scientifique, une vraie coopération scientifique avec des institutions spécialisées, et la possibilité de contrats de concession aux intervenants privés qui peuvent être une source de réduction des coûts d'investissement et d'exploitation du dessalement.

## Session 5

# Les énergies renouvelables

Les énergies renouvelables : une ressource pour le développement durable des pays du soleil

Responsables de cette session :

**John Ellis** (CERN)

**Abdeslam Houmada** (Université de Casablanca)

## La mise en valeur de l'énergie solaire <sup>1</sup>

**Augusto Maccari**

ENEA

Je veux remercier M. Klapisch de me donner l'occasion de vous mettre au courant de l'état du projet ENEA relatif à l'utilisation des hautes températures pour stocker de l'énergie solaire. Ce projet est né d'une idée originale de notre président Carlo Rubbia, et d'une considération générale : quelle énergie pour le futur de l'humanité ? La communauté scientifique sait qu'il existe, dans l'état actuel de nos connaissances, deux solutions pour satisfaire les besoins de l'humanité en termes d'énergie, qui sont : l'énergie solaire dans ses diverses formes : énergie solaire proprement dite, énergie éolienne, biomasse, etc., et l'énergie nucléaire.

Pour l'instant, les nouvelles énergies renouvelables représentent environ 2 % des ressources en énergie primaire et toutes les prévisions (IEA, DOE...) prédisent au mieux une augmentation de seulement 3 % d'ici à 2020. Les raisons de cette modeste pénétration du marché sont bien connues :

- le coût de l'énergie produite, avant des mesures incitatives, doit devenir en définitive compétitif par rapport au coût des énergies fossiles - la meilleure énergie est l'énergie la moins chère.
- le système de production d'énergie doit maîtriser le facteur «variabilité» inévitablement associé, par exemple, à l'énergie solaire et l'énergie éolienne - l'énergie doit être disponible quand le client le demande.

Nous pensons que la technologie de l'énergie solaire a les possibilités de surmonter tous ces problèmes.

Le moyen le plus simple pour utiliser directement l'énergie provenant du soleil est de chauffer un support adapté. Pour atteindre des températures comparables à celles atteintes avec les énergies fossiles traditionnelles, l'énergie solaire doit être concentrée. Avec une irradiation directe normale moyenne de 280 W par m<sup>2</sup> et par an (typique de beaucoup de régions sahariennes) chaque mètre carré de zone de captage produit, sous forme de chaleur haute température (rendement moyen de 65 %), à peu près la même énergie qu'un baril de pétrole brut (5,74 GJ/an).

Avec 1 km<sup>2</sup> brut de champ solaire (la surface totale des capteurs solaires efficaces est moitié moindre), on peut produire jusqu'à 300 GWh/an, soit la production annuelle d'une installation traditionnelle de 50 MW.

Sur cette carte (pl. IX, fig. 1), on montre le potentiel mondial de production d'électricité solaire en GWh par m<sup>2</sup> et par an, et l'on voit que le Sahara et les pays du sud de la Méditerranée sont en très bonne position. Le petit carré dans l'Atlantique Sud représente la superficie d'installations thermodynamiques solaires théoriquement nécessaire pour répondre à la demande mondiale en électricité (estimée à 36 000 TWh/an en 2050), et vous voyez que cela ne représente pas une surface très considérable.

<sup>1</sup> Traduction de la transcription en anglais de l'exposé de l'auteur.

Il faut savoir que le potentiel total du Sahara est 500 fois plus élevé que la consommation actuelle des nations européennes en électricité.

Un réseau EURO-MED d'interconnexion d'électricité (pl. IX, fig. 2) est prévu, et même déjà construit dans certaines régions, pour acheminer à bas coût l'électricité de l'Afrique du Nord vers l'Europe. Evidemment c'est aussi une question politique, car beaucoup de pays européens ne souhaitent pas dépendre de l'électricité africaine, mais ceci est un autre débat. Une autre possibilité est d'utiliser des gazoducs pour transporter de l'hydrogène, qui est également produit par l'énergie solaire.

En 2001, un énergétique programme ENEA a été lancé sur deux sujets principaux, ces deux activités étant convenablement financées (par le Gouvernement italien) et organisées en tant que grands projets :

- captage et stockage de chaleur moyenne température (de l'ordre de 550 °C), initialement prévus pour la production d'électricité ;
- captage de chaleur haute température (plus de 850 °C) pour la production directe d'hydrogène.

Ainsi que M. Klapisch l'a rappelé, en 2002 à Marseille, j'avais juste montré des graphiques et des souhaits, qui sont maintenant devenus réalité.

Pour la première activité, l'ENEA a choisi la technologie cylindro-parabolique (pl. IX, fig. 3). Elle consiste en des gouttières de miroirs qui concentrent les rayons solaires le long d'un tube, à l'intérieur duquel circule un fluide, qui est ainsi chauffé.

C'est une technologie au point : 354 MW de capacité de pointe d'électricité sont en exploitation commerciale dans le désert Mojave aux Etats-Unis depuis plus de 20 ans, avec une production d'énergie électrique de plus de 9 TWh. Néanmoins cette technologie doit être modernisée et actualisée en fonction des progrès de la technique et des connaissances.

L'ENEA a apporté plusieurs améliorations à cette technologie, indiquées sur la fig. 4 (pl. IX) :

- l'introduction d'un stockage d'énergie adapté,
- l'utilisation d'un fluide caloporteur différent,
- une nouvelle conception du capteur solaire,
- une conception innovante du tube récepteur.

#### • *Stockage thermique*

Toute technologie de production d'énergie parvenue à maturité doit pouvoir fournir l'énergie en fonction de la demande. Pour ce faire, le système ENEA comporte deux réservoirs thermiques afin de dissocier complètement la phase de captation de la chaleur de la phase d'utilisation de cette chaleur. Cela permet de dimensionner le générateur électrique en fonction de la valeur moyenne du rayonnement et non de sa valeur de pointe. Le coût du stockage thermique est partiellement compensé par la baisse du coût du bloc de production d'électricité.

Nous utilisons deux réservoirs thermiques, à volume variable et chacun à température fixe. Le principe de

fonctionnement est assez simple. Lorsqu'il y a de l'ensoleillement, du liquide est pompé dans le réservoir froid, passe dans le capteur solaire où il est chauffé, puis est stocké dans le réservoir chaud. De façon dissociée, du liquide du réservoir chaud produit de la vapeur dans le générateur électrique, et le liquide refroidi par le générateur de vapeur est ensuite récupéré dans le réservoir froid. Le procédé de stockage thermique est très efficace (moins de 1 % de pertes par jour). Avec un mélange de sel fondu entre 290 et 550 °C, il faut environ 5 m<sup>3</sup> de réservoir par MW.

Nous compensons ainsi des discontinuités d'ensoleillement telles que des nuages passagers, la nuit, et partiellement les mauvais jours - mais pas des semaines de mauvais temps. Nous ne compensons pas les variations saisonnières car cela reviendrait trop cher.

Si l'on compare les dimensions relatives de stockage de différents fluides pour une même quantité d'énergie stockée, on constate que pour une dimension linéaire de stockage thermique de 1, on a une dimension linéaire de stockage, pour de l'essence, qui est du tiers, soit 1/27<sup>e</sup> en volume. Il faut noter que les dimensions indiquées correspondent à la même quantité d'énergie stockée. En pratique, l'énergie solaire est disponible presque quotidiennement, tandis que le remplissage des réservoirs de combustibles fossiles se fait généralement sur de plus longues périodes (mois ?). Par conséquent le fonctionnement réel d'un stockage thermique adapté est obtenu avec des volumes comparables à ceux pour des combustibles fossiles.

#### • *Fluide caloporteur*

La technologie américaine utilise de l'huile minérale à une température moyenne de fonctionnement de 390 °C. Elle a un coût relativement élevé, un important impact environnemental, et l'huile est facilement inflammable. Elle n'est pas un bon support de stockage thermique.

L'ENEA a choisi un sel fondu à l'état solide, qui est un mélange de KNO<sub>3</sub> et de NaNO<sub>3</sub> à haute température de fonctionnement (290-550 °C). Son coût est faible. Il est favorable à l'environnement : il n'est pas toxique et est utilisé comme engrais dans l'agriculture. Et c'est un excellent support de stockage thermique. Il a quand même un inconvénient car il se solidifie à 240 °C et il faut donc veiller à ce que chaque fois que le fluide circule, chaque point du circuit soit à une température supérieure à 240 °C.

#### • *Capteur solaire ENEA (pl. X, fig. 5)*

Une autre innovation importante que nous avons apportée a été de redessiner complètement le capteur solaire. Notre objectif était principalement de diminuer les coûts :

- du panneau solaire,
- du montage du champ solaire

Pour le premier point, nous avons utilisé la technologie en nid d'abeille. C'est un sandwich fait de deux pel-

licules, entre lesquelles on a une structure aluminium en nid d'abeille. Sur les pellicules sont collés de fins miroirs classiques en argent (0,74 mm d'épaisseur). Les panneaux sont légers, très rigides et robustes. Chaque panneau, qui constitue une moitié de parabole, mesure 1,2 m de long et pèse 15 kg, ce qui est très léger. Cela autorise une structure de soutien très légère et facile à installer sur le champ solaire.

- *Tube récepteur ENEA* (pl. X, fig. 6)

Le tube récepteur qui fonctionne à Casaccia a une structure classique pour ce type d'application : il s'agit d'un tuyau d'acier inoxydable à l'intérieur d'un tuyau en verre, avec du vide entre les deux, de façon à ce qu'il n'y ait aucun échange thermique par convection et conduction, seulement par radiation. Pour limiter les pertes thermiques, le tube absorbant est recouvert d'un matériau de haute technologie, une couche CERMET, qui est une très fine couche céramo-métallique déposée par pulvérisation. C'est une technique très complexe et il y a un brevet ENEA en instance sur ce projet. Nous produisons cet élément à Portici.

Le but est d'absorber complètement les radiations solaires dans la gamme des longueurs d'onde courtes et de n'émettre aucune radiation à la température de fonctionnement qui est de 580 °C. Voici la courbe idéale de la couche spectrale (pl. X, fig. 7) : les lignes en pointillé sont les courbes d'émission effectivement mesurées pour nos produits.

## Vers une installation industrielle ENEA

Durant ces années, nous avons fait beaucoup de recherche et développement sur les matériaux et les composants pour les qualifier : tests sur les tubes récepteurs, sur les miroirs, tests de corrosion pour le sel fondu, d'écoulement et de chauffage des tuyaux, etc.

Nous avons construit une boucle de test grandeur nature afin de vérifier tous les composants que nous utiliserons dans le système final, et nous envisageons de construire le premier prototype industriel. Cette boucle de test comporte deux sections, Chaque section peut tester deux modules de capteurs de 50 m de long ou un module de 100 m de long. Elle fonctionne déjà à Casaccia, avec les composants auxiliaires et la salle de contrôle et ses pompes de stockage, etc. Pour l'instant nous n'avons qu'une section installée, mais l'installation de la seconde est prévue, et sera utilisée bien sûr à la prochaine série de capteurs.

Pendant la construction, nous avons vérifié les capteurs paraboliques, les tubes récepteurs éclairés par les miroirs, les conduites, la salle de contrôle. Nous avons, bien entendu, fait aussi des tests et des validations pour les conduites thermiques en utilisant des conduites longues pour ce type de système.

Voici une vue générale (pl. X, fig. 8) de la première section de la boucle, pendant le test du mouvement des capteurs, qui se fait à l'aide de deux pistons hydrauliques à huile permettant de mouvoir tous les miroirs.

Nous devons maintenant évoluer vers des installations prototypes. Il faut savoir que tous les composants que nous avons utilisés pour le circuit test à Casaccia sont faits en stricte coopération avec les industries nationales. Nous ne voulons pas d'un projet qui soit parfait mais que personne ne veuille construire. Depuis le début, nous avons collaboré et effectué des recherches avec les industries, trouvant les meilleures solutions sur les plans de l'efficacité et de la technique mais aussi de la production et de l'économie du projet. Nous utilisons donc des pompes, des vannes du marché. Les composants ne doivent pas être «spéciaux» mais des composants «normaux» fabriqués en série et en grand nombre.

## Le projet Archimède

Les installations prototypes souffrent généralement de coûts élevés dus au fait qu'on se trouve au début de la courbe d'apprentissage de nouvelles technologies, mais aussi à la limitation en taille des premières applications.

La possibilité d'utiliser, à frais réduits, des équipements existants (générateur électrique, terrain, personnel et infrastructures) offre une bonne opportunité de monter un projet commercial viable pour un système très innovant, avec une contribution limitée du gouvernement.

La «solarisation» d'une installation de production électrique à cycle combiné, conventionnelle, moderne et efficace, est assez simple avec la technologie ENEA et ne nécessite pas de lourdes modifications du système existant parce que la vapeur produite par le champ solaire a pratiquement les mêmes caractéristiques (température et pression) que celle provenant du groupe turbogaz de l'installation existante. (pl. X, fig. 9)

Nous avons choisi une installation à Syracuse, l'une des zones les plus ensoleillées de Sicile : 1 725 kWh/m<sup>2</sup> et par an - par comparaison, au Sahara on a 2 900 kWh/m<sup>2</sup>, soit 70 % d'énergie de plus qu'en Sicile. Nous avons un accord avec ENEL, qui est le principal fournisseur d'électricité d'Italie, Il est à nos côtés dans le projet, et le 19 mai 2004, ENEL et ENEA vont présenter ensemble le projet au public.

C'est une installation électrique traditionnelle au pétrole, qui a été récemment convertie en installation moderne à cycle combiné, avec une puissance nominale de 760 MWe, et que nous allons solariser. Pour aller vite et ne pas occuper beaucoup de terrain, nous avons décidé de n'utiliser que du terrain appartenant à ENEL et nous pouvons installer 360 capteurs de 100 m de long.

Un autre aspect important que je veux souligner est qu'en utilisant du sel fondu, nous avons augmenté la température de fonctionnement des capteurs solaires d'en-

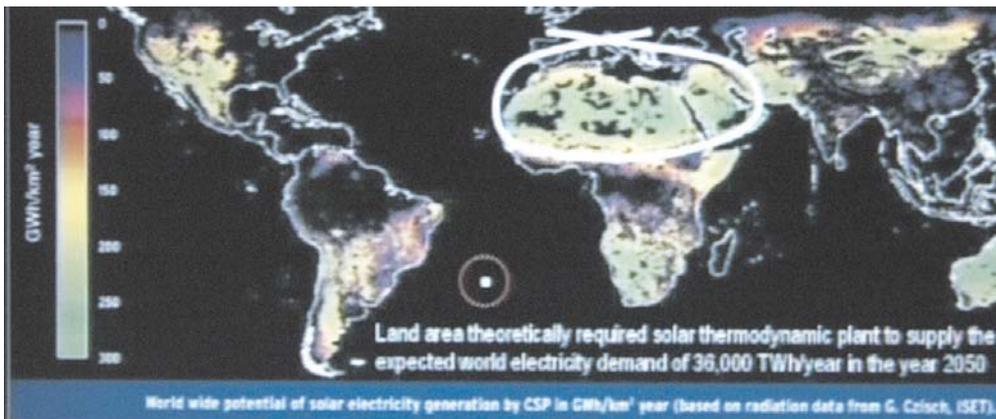


Fig. 1 : Répartition géographique du potentiel de l'électricité solaire



Fig. 2 : Réseau d'interconnexion électrique Euro-Med



Fig. 3 : Technologie cylindro-parabolique de captage de l'énergie solaire

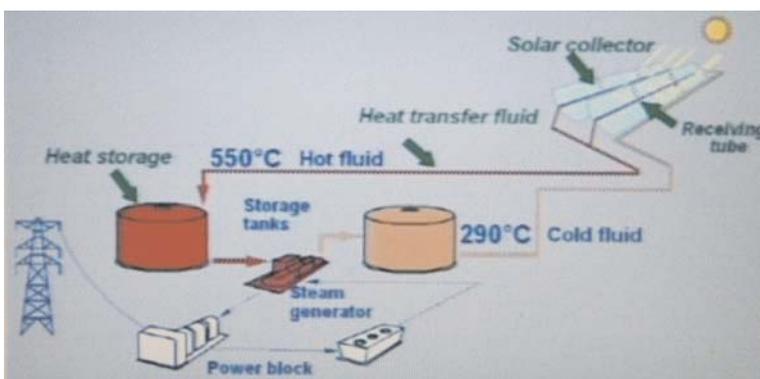


Fig. 4 : Schéma des innovations de l'ENEA

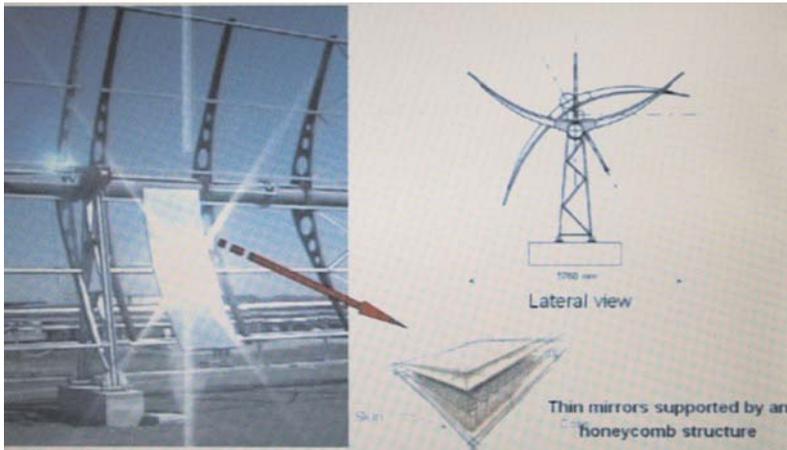


Fig. 5 : Principe du réflecteur



Fig. 6 : Le tube récepteur de chaleur

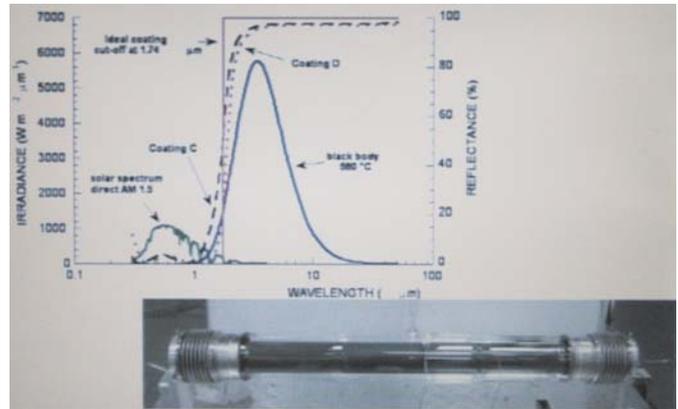


Fig. 7 : Détail du tube de captage et courbes d'absorption



Fig. 8 : Vue générale de la boucle de test

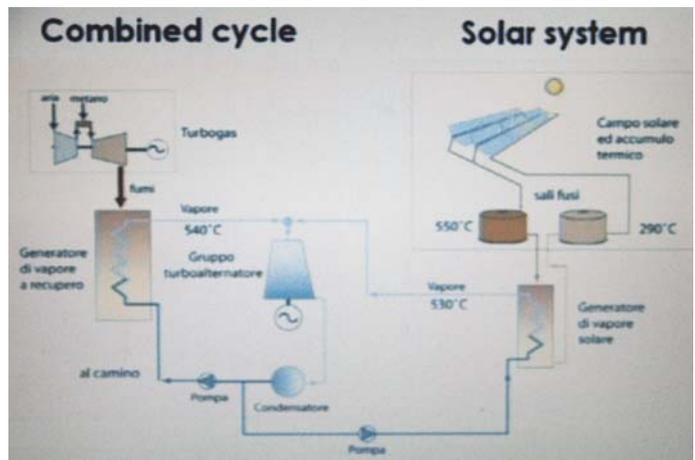


Fig. 9 : Schéma du projet Archimède

viron 200 °C. De cette manière nous pouvons fournir directement de la vapeur à la turbine à haute pression du cycle combiné sans modification importante du cycle. Cela n'aurait pas été possible avec de l'huile minérale. A la place, nous avons augmenté la température jusqu'à 540 °C et produit de la vapeur à 530 °C pour alimenter la turbine à haute pression afin d'obtenir une plus grande efficacité des convertisseurs thermo-électriques.

Au total, nous avons une puissance nominale de 20,8 MWe. Nous prévoyons de produire quelque 60 GWh/an avec une économie d'énergie primaire de 12 703 tonnes équivalent pétrole par an, et 39 458 tonnes/an d'émission de CO<sub>2</sub> évitées. Pour un même système situé dans la «ceinture solaire», ces chiffres seraient presque doublés, d'une part, parce qu'il y a beaucoup plus de potentiel solaire dans ces régions, d'autre part, parce qu'avec un plus haut niveau de radiations, on a une meilleure efficacité.

Je n'entrerai pas dans le détail des coûts du projet mais je voudrais souligner que le coût du champ solaire est de 143 €/m<sup>2</sup>. Ce sera un chiffre intéressant à comparer plus tard, puisque c'est la première installation utilisant cette technologie. Le champ solaire représente 60 % du coût total du projet Archimède. Avec la contribution gouvernementale de 40 %, nous avons un temps de récupération du capital investi de 7,5 ans en Sicile. Vous pouvez imaginer le type de projet commercial qu'on peut monter avec la même installation dans des régions offrant plus d'ensoleillement.

## La production d'hydrogène

Dans la dernière partie de mon exposé, je parlerai de l'hydrogène. La plupart d'entre nous pensons que l'hydrogène offre une excellente perspective pour l'avenir comme transporteur d'énergie. L'hydrogène n'est pas une source d'énergie mais seulement un excellent vecteur d'énergie. L'hydrogène n'existe pas dans la nature et il y a plusieurs manières d'en produire. On peut le produire à partir de combustibles fossiles : charbon, gaz naturel, pétrole. On peut le produire par les énergies renouvelables : solaire, éolien photovoltaïque, biomasse. On peut en produire à partir du nucléaire.

Cela nécessite des procédés de conversion, dont certains doivent inclure la séquestration de CO<sub>2</sub>, pour être totalement sans émissions.

Nous envisageons évidemment d'utiliser la chaleur solaire pour produire de l'hydrogène. Chauffer l'eau et attendre que la molécule d'eau se scinde en hydrogène et oxygène est trop cher, inefficace et impossible du point de vue technologique, car il faut atteindre des températures de 4 000 °C pour obtenir une efficacité raisonnable. Nous pouvons produire de l'hydrogène à partir de thermoélectricité par électrolyse mais à nouveau, du point de vue de l'efficacité, ce n'est pas intéressant.

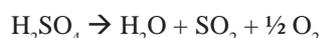
Un autre moyen est d'utiliser les procédés thermochimiques, avec une efficacité d'environ 50 % et des tem-

pératures tout à fait acceptables. Nombre de procédés intéressants ont été rapportés dans la littérature et font l'objet d'un examen approfondi par l'ENEA :

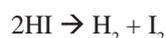
- UT-3 (université de Tokyo) (760 °C)
- soufre-iode GA (General Atomic) (850 °C)
- oxydes de métaux (1 000 °C)
- oxydation du zinc (2 000 °C)

Bien sûr, plus la température augmente, moins le procédé thermochimique est complexe ; plus elle diminue, plus il est complexe. Il faut donc trouver un équilibre entre la complexité et la température et les problèmes techniques associés.

Juste pour vous montrer comment fonctionne un procédé thermochimique, voici les réactions chimiques illustrant le procédé soufre-iode : avec la chaleur solaire, on crée une réaction, la dissociation de l'acide sulfurique en eau, dioxyde de soufre et oxygène :



Par ailleurs, l'acide iodique peut être scindé en hydrogène et iode :



Au milieu il y a la réaction de liaison qui combine les procédés venant de ces deux réactions et termine le cycle :



A la fin de la journée, on a donc une décomposition d'eau en oxygène et hydrogène utilisant uniquement la chaleur solaire. La température maximale de ce procédé est de 850 °C et ce n'est donc pas impossible.

La technologie cylindro-parabolique ne convient pas pour ce type d'applications car nous avons affaire à un système de déplacement des paraboles sur un axe double.

## Conclusion

L'énergie solaire doit et va jouer un rôle important dans le scénario d'approvisionnement en énergie du futur, particulièrement pour les pays de la «ceinture solaire».

L'ENEA a lancé, il y a plus de trois ans, une recherche énergétique, avec un programme de développement et de démonstration sur la concentration de l'énergie solaire, afin de poser les bases d'une utilisation massive de l'énergie solaire.

La réalisation d'un circuit de test grandeur nature démontre que la technologie est viable et que les principaux objectifs du projet ont été atteints.

Nous espérons que le projet Archimède marquera le début de la réalisation de nombreux systèmes solaires utilisant la technologie ENEA.

La production d'hydrogène solaire est très prometteuse, et l'activité de recherche poursuivie à l'ENEA crée les bases pour la conception et la réalisation de la première installation pilote dans les années qui viennent.

## Utilisation de l'énergie basse enthalpie pour la production d'eau <sup>2</sup>

**Mohamed Safi**  
ENIT, Tunis

Tous les procédés examinés lors de la session sur le dessalement utilisent de l'énergie à enthalpie élevée. Dans cet exposé, nous nous intéresserons à l'utilisation d'énergie à basse enthalpie, c'est-à-dire où la température est inférieure à 100 °C, pour dessaler l'eau ou pour la recycler.

Bien que cela ait été déjà dit, il faut rappeler qu'actuellement 1/5<sup>e</sup> de la population mondiale n'a pas accès à de l'eau potable. En 2025, deux personnes sur trois vivront avec un stress hydrique (pénurie d'eau potable), tandis que 1,4 milliard d'individus seront confrontés à une sévère pénurie d'eau dans les 25 ans qui viennent.

Mais pour avoir de l'eau, il faut de l'énergie : sans énergie, pas d'eau. Or :

- deux milliards de personnes n'ont aucun accès à une source commerciale d'énergie ;
- la population mondiale et la demande en énergie doubleront dans le siècle à venir, avec des conséquences dramatiques prévisibles ;
- les réserves d'énergie correspondent à 60 ans au niveau de consommation actuel, ce qui est moins que la durée de vie d'une génération ;
- les énergies fossiles sont devenues la principale source de pollution, avec des conséquences sur la santé humaine ;
- toute nouvelle source d'énergie implique une technologie nouvelle, et donc un temps pour la mise au point qui risque de durer plus qu'une génération.

En fait, seulement 3 % de l'eau existant sur terre peut être utilisée par la population humaine pour tous ses besoins. Mais les océans représentent 75 % de la surface de la terre et constituent donc la première ressource en eau, ce qui implique le dessalement. D'un autre côté, les eaux usées sont rejetées et ainsi gaspillées, alors qu'elles représentent une deuxième source d'approvisionnement, si on les recycle. Dans les deux cas, il faut de l'énergie, si possible renouvelable, alors qu'actuellement, les énergies renouvelables ne représentent que 2 % de la consommation mondiale.

Nous allons maintenant nous concentrer sur quelques énergies renouvelables qui peuvent servir à la production d'eau.

### L'énergie solaire

Le rayonnement solaire est de 1400 W/m<sup>2</sup>, à la limite de l'atmosphère terrestre. Le rayonnement reçu par toute la terre en une année correspond à cinq fois l'énergie disponible dans tous les combustibles fossiles sur terre. C'est donc une source d'énergie considérable, qu'on peut utiliser sous forme thermique, directement ou avec des collecteurs, sous forme électrique avec des cellules photovoltaïques, et enfin sous forme chimique par la biomasse. Son inconvénient est d'être dispersée dans le temps et dans l'espace, et il lui faut trouver un stockage diurne ou saisonnier. C'est ce qui a été fait avec des expériences de réservoirs d'énergie solaire sous forme d'étangs d'eau salée : l'étang a une profondeur d'eau de 3-4 m. La couche d'eau profonde est plus salée que la mer et absorbe le rayonnement solaire, tandis que la couche superficielle, moins salée, sert d'isolant. On peut atteindre facilement des températures de stockage de 40 à 80 °C.

Cette technique a été expérimentée en Italie, au Portugal, en France, en Israël, en Libye, en Tunisie et aux Etats-Unis. A titre d'exemple, un étang de 1 500 m<sup>2</sup> et profond de 3,5 m construit en Tunisie a permis d'atteindre 97 °C en juillet 2000, avec une température moyenne de l'ordre de 60 °C sur une année. Un exemple comparable, mais d'une surface double, a été construit à El Paso, mais a dû être arrêté, faute de crédits.

### L'énergie géothermique

Une des installations les plus connues est celle de Nesjavellir, en Islande, où l'on capte l'eau géothermique soit à basse température (50 à 75 °C), soit au-dessus de 100 °C, et jusqu'à 150 °C. On utilise ce gisement pour

<sup>2</sup> Le texte ci-dessous est un bref résumé de la communication faite en séance. Il a été établi à partir de l'enregistrement vidéo de la session et le lecteur est invité à se référer à cet enregistrement, disponible sur DVD, pour plus de détails.

produire de l'électricité, chauffer des logements et des serres.

En Tunisie, il y a environ 80 points géothermiques, essentiellement dans le nord du pays. Dans le sud, quelques sources à basse enthalpie et eau salée servent pour le chauffage de serres. A signaler l'installation de Gabès où une source de ce type alimente une unité de dessalement par osmose inverse, qui produit 22 000 m<sup>3</sup>/jour d'eau. On aurait pu dessaler directement l'eau géothermale, car elle arrive à 75 °C et à 7 bars.

## L'énergie éolienne

Cette source d'énergie est aussi ancienne que la civilisation : Hammourabi, roi de Babylone en 1700 av. J.-C., l'a utilisée pour irriguer la plaine mésopotamienne. L'utilisation principale de l'énergie éolienne est actuellement la production d'électricité, à basse puissance pour des applications individuelles, mais jusqu'à 5 MW à grande échelle. Les «fermes» d'éoliennes poussent très vite, la puissance installée a plus que décuplé ces dernières années, et l'Union européenne a l'ambition de porter à 21 % la part des énergies renouvelables dans la production totale d'électricité de l'Union dès 2020, grâce principalement au développement de l'énergie éolienne. La Tunisie a une ferme modeste de 10 MWe, qu'elle projette de porter à 200 MWe en 2010.

## La pression osmotique retardée

Le principe de cette énergie renouvelable est le suivant : on fait circuler de l'eau pure et de l'eau salée dans deux canaux différents, séparés par une membrane semi-perméable. Par osmose, l'eau pure passe de l'autre côté de la membrane, augmentant ainsi la pression. Pour une concentration de 3,5 g/l pour l'eau salée, on arrive à une pression osmotique de 28 bars, ce qui est équivalent à une chute d'eau de 270 m et permet donc de produire de l'électricité. Mais pour ce faire, il faut quelque 10 000 m<sup>2</sup> de membrane. Pour que cela soit praticable, il faut donc canaliser des rivières et faire circuler de l'eau de mer, juste avant que la rivière ne se jette à la mer. Ce procédé a été proposé par les Norvégiens en 1974, qui ont beaucoup d'eau douce. Pour les pays du Sud qui en ont moins, on

pourrait remplacer l'eau douce par des eaux usées, actuellement rejetées à la mer sans retraitement.

## Les énergies perdues

Dans cette catégorie, on peut ranger les gaz brûlés dans les raffineries, les énergies rejetées dans certains processus industriels, comme la métallurgie, les cimenteries et autres fabriques de matériaux de construction. Le plus souvent, ce sont des gaz de combustion qui sont rejetés à haute température - plusieurs centaines de degrés - et qui contribuent à l'effet de serre. On pourrait au contraire les faire passer dans des échangeurs de chaleur, parfois dans des pompes à chaleur, et récupérer ainsi une énergie à bon compte.

\*

Il apparaît donc qu'il y a des réserves d'énergie renouvelable qu'on peut utiliser pour la production d'eau. Avec des énergies sous forme thermique, on peut dessaler l'eau de mer par distillation (ce qui est intéressant pour les zones rurales), par MED. Sous forme électrique, la production d'eau se fera par osmose inverse ou par électrodialyse. Il ne faut pas oublier le recyclage des eaux usées par désinfection à l'aide de rayons UV (énergie solaire) ou avec une microfiltration.

La Tunisie a fait plusieurs réalisations dans cet état d'esprit. Je mentionnerai des installations de distillation dans des collèges, non seulement pour produire de l'eau distillée des laboratoires, mais aussi pour sensibiliser les élèves à ces problèmes. L'énergie solaire est aussi utilisée dans une installation de démonstration pour dessaler de l'eau par distillation avec une membrane. Pour les énergies perdues, on envisage de s'en servir pour le traitement des eaux usées des agglomérations.

En conclusion, on voit qu'il y a des sources alternatives d'énergie et d'eau qui sont disponibles et considérables. Mais leur utilisation suppose que nous changions notre culture et adoptions un développement durable. Cela ne sera pas immédiat, car nous devons trouver et mettre au point les technologies adaptées, ce qui demande du temps. Dans ce domaine, la coopération internationale et le respect mutuel entre les pays sont essentiels pour assurer un meilleur avenir aux générations futures.

## Session 6

# Constitution du réseau Euromed-net

L'expérience de World-Med' 2002, co-présidée par l'AFAS et le Club de Marseille, a montré que des progrès concrets de coopération peuvent naître à la suite de rencontres informelles entre acteurs de la société civile. L'AFAS propose donc la création de ce réseau, dont le seul but serait d'organiser des rencontres entre décideurs de pays d'Europe et du Maghreb afin d'explorer les liens et synergies possibles entre leurs projets de développement.

Responsable de cette session :

**Robert Klapisch** (président d'honneur de l'AFAS)

---

## Vers la formation d'un réseau Euro-Méditerranée : Introduction au débat <sup>1</sup>

**Robert Klapisch**

Président d'honneur de l'AFAS, organisateur du colloque

### Bilan de World-Med' 2002

La rencontre a connu un grand succès. Elle a rassemblé 850 personnes, dont 150 venant du Maghreb. De nombreux thèmes ont été abordés (une trentaine). Mais le principal succès sans doute a été la variété des contacts bilatéraux qu'elle a permis. Plusieurs projets importants sont nés de ces contacts.

Cette manifestation ambitieuse a également été très coûteuse pour l'AFAS et ses partenaires marseillais. Le budget en était de 500 000 € environ. Le retard de versement de subventions votées par la région PACA, le refus de l'Union européenne de nous soutenir ont été la cause de sérieuses difficultés financières pour l'AFAS et l'Institut de la Méditerranée. L'AFAS pour sa part y a perdu 30 000 €

Le désir universellement exprimé par les participants de donner une suite se heurtait donc à de sérieuses difficultés qui expliquent le délai de deux ans entre Marseille et la rencontre d'aujourd'hui.

### Comment l'AFAS pouvait-elle donner suite ?

La seule possibilité réaliste était de changer d'échelle en visant 10 fois moins de participants (85 au lieu de 850). Corrélativement, nous avons décidé de restreindre le nombre de thèmes (5 au lieu de 30). C'est évidemment

cela qui a permis d'envisager une rencontre hébergée par le CERN.

Qu'il me soit permis, en votre nom, de remercier la Direction générale du CERN d'avoir accepté de nous accueillir en nous accordant l'appui de son infrastructure. Je voudrais également remercier l'IN2P3 dont le laboratoire de Grenoble a bien voulu assurer la gestion des inscriptions. Nous avons également bénéficié de soutiens financiers (Unesco, France Telecom, Veolia Water, Suez Environnement), qui, joints aux droits d'inscription, nous ont permis de disposer d'un budget de près de 30 000 €

Nous sommes donc maintenant en position de discuter de la façon de créer une structure permettant des rencontres sur une base périodique.

### Aspects scientifiques : pourquoi ces cinq thèmes ?

Comment avons-nous choisi ces thèmes plutôt que d'autres tout aussi intéressants traités à Marseille ?

Il y a pour cela des raisons de circonstances tout à fait claires, tenant à notre projet de nous intégrer au programme des 50 ans du CERN, mais aussi, soyons francs, à des sujets proches de mes propres intérêts.

---

<sup>1</sup> Texte original de l'auteur.

Mais par-dessus tout, j'aimerais vous faire observer que chacun des thèmes retenus est porté par une structure qui déjà connu des premiers succès depuis 3-5 ans. Citons :

- L'extension du programme CERN vers les pays du monde arabo-musulman a pris corps progressivement depuis 1999.
- Le programme SESAME, qui était un projet en discussion au moment de Marseille, est maintenant officiellement approuvé par l'Unesco.
- L'implication de l'IN2P3, de RENATER, du CERN dans l'accès du monde méditerranéen aux capacités de calculs est encore plus récente et on peut la considérer comme une concrétisation de ce qui était encore un souhait au moment de Marseille.
- L'European Desalination Society organise depuis longtemps des conférences où les spécialistes européens rencontrent leurs clients venant en majorité des pays du Golfe. Depuis 2000, elle a commencé une nouvelle série axée sur les pays du Maghreb qui n'hésitent plus à inscrire cette technologie dans leurs plans à moyen terme.
- L'énergie solaire thermodynamique (dont la France fut pionnière, peut-être un peu trop tôt) semble prendre un nouveau départ en Italie depuis 2000, sous l'impulsion de Carlo Rubbia, président de l'ENEA.

C'est le fait de l'existence de ces structures en émergence qui nous a permis de trouver, pour chacun des thèmes du colloque des responsables («*conveners*») dont le rôle a été essentiel dans la définition du programme et le choix des intervenants. Bien sûr, il nous faut les remercier et leur en savoir gré, mais surtout noter que c'est un format que nous devons conserver lors des prochaines éditions de ces rencontres.

Il nous faudra évidemment aborder des thèmes nouveaux. J'attends que vous fassiez part de vos suggestions durant la discussion qui va suivre.

Pour citer des domaines qui viennent à l'esprit :

- agronomie,

- sciences du vivant,
- santé, prévention des épidémies,
- environnement,
- risques naturels,
- rôle des femmes dans l'évolution sociale,

et bien d'autres sans doute qui surgiront dans la discussion de tout à l'heure.

Pour que ces thèmes soient choisis, il faudra, comme je l'ai déjà remarqué, que des organisations se chargent de porter ces thèmes pour identifier les intervenants et participants les plus prometteurs.

## Elargir le cercle des participants

Un autre thème de notre action doit être l'élargissement du cercle des pays participants. La participation inégale des pays du Maghreb aujourd'hui nous interpelle. Les raisons doivent en être analysées si nous voulons que cette situation évolue. À cet égard, le rôle des diasporas est primordial comme il a été remarqué hier.

## Recherche de financements

Une recherche systématique, tenant compte de délais souvent longs, doit être entreprise. Il paraît essentiel de ne pas dépendre d'une seule source, mais au contraire d'avoir des sources publiques et privées qui se complètent.

## Proposition de l'AFAS

Constituer un groupement qui permettra d'avancer vers la constitution d'un tel réseau, en particulier pour signer des demandes de crédits (Europe).

Préparer un programme de rencontres sur trois ans (2005-2007), aussi bien du point de vue des sujets abordés que des questions d'organisation (finances, localisation).

---

# Compte rendu analytique de la discussion <sup>2</sup>

### Jean-Patrick Connerade :

Le lieu des prochaines conférences devrait être déterminé par un concours entre les villes candidates offrant les meilleures prestations.

### John Ellis :

Les technologies de grilles de calcul s'appliquent évidemment à bien d'autres disciplines que la physique des

hautes énergies. La climatologie en est un exemple.

### Hans Hoffmann :

Le réseau CERN comprend 250 universités qui pourraient être sollicitées pour faire partie du réseau.

<sup>2</sup> Préparé par R. Klapisch.

**Oum Kalthoum Ben Hassine :**

Les futurs programmes en commun devraient prendre la forme de partenariats et éviter le format de relations dominantes. En tant que biologiste, je recommande de se pencher sur les menaces sur la Méditerranée, les biotechnologies, la biologie moléculaire et marine. En tant que femme, sur le rôle incontournable des femmes dans le processus de développement (60 % d'analphabètes dans certains pays).

**Jean-Patrick Connerade :**

La question des visas pour les scientifiques est fondamentale. Je parle en tant que président de l'association Euroscience qui est associée à des discussions à Bruxelles sur ce sujet.

**Michel Spiro :**

L'IN2P3 est disposé à porter certains sujets qui viennent d'être évoqués (sciences de la vie, rôle des femmes) au niveau du CNRS.

**Annick Suzor-Weiner, Rajaa Cherkaoui :**

Lorsque des programmes de coopération existent entre des universités, il existe une possibilité d'obtenir des visas multiples, de longue durée, valables pour tous les pays de la zone Schengen.

**Annick Suzor-Weiner :**

Il existe des financements européens qui sont très peu utilisés et qui permettraient d'obtenir des fonds de l'ordre de 350 000€

**Philippe Brossier :**

2005 est l'année internationale de la physique, dont un des objectifs est de sensibiliser le public à cette science. On pourrait rechercher le concours du CEA et de la SFP.

**François Bertin :**

Dans le cadre de ma mission au bureau du CNRS à Tunis, je me suis intéressé aux problèmes de structuration et évaluation de la recherche. Il est important d'aller vers la constitution de centres d'excellence, et SESAME fournit à cet égard un précieux modèle.

**Azzeddine Elmidaoui :**

Les organismes de recherche doivent disposer d'une masse critique ; le Maroc a choisi de constituer des pôles d'excellence pour sa recherche universitaire (RUPHE).

**X :**

Mettre sur pied un système Erasmus Méditerranée.

**Abdeslam Hoummeda :**

Outre l'Internet haut débit, qui est pour nous un grand

progrès, il nous faut perfectionner les structures du système de recherche. La coopération organique avec les pays européens (GDRI) est une très bonne opportunité.

**Azzeddine Elmidaoui :**

La procédure d'obtention des visas - par exemple pour la présente conférence - est beaucoup trop lourde.

**X :**

Rapports avec la société civile. Contacts avec terrain, femmes, enseignement.

**John Ellis :**

Le World Summit sur la société de l'information, qui s'est tenu à Genève en novembre 2003, doit tenir sa prochaine session à Tunis en 2005. Nous pourrions songer à en profiter pour notre prochaine rencontre. Autres possibilités : le Maroc ou l'Égypte.

**Najib El Hatimi :**

Il faut créer des centres de recherche avec un gros équipement, sur le modèle du CERN et de SESAME. Pourquoi pas un centre euro-méditerranéen axé sur le développement durable ?

J'aimerais vous transmettre les priorités définies par le Maroc :

- lutter contre la pauvreté,
- comment arriver à l'autosuffisance alimentaire et un habitat salubre,
- gestion et exploitation des ressources naturelles,
- lutter contre la fracture numérique,
- assurer la compétitivité des entreprises face aux défis par des accords d'association et libre échange (Union européenne et Etats-Unis).

**Guy Wormser :**

Il faut mettre l'accent sur la diffusion scientifique. Qui est au courant de ce qu'est SESAME ?

**Michel Spiro :**

Il faut créer des unités de recherche mixtes Nord-Sud. Groupements de recherche.

**Jean-Patrick Connerade :**

Il faudrait impliquer l'ICTP de Trieste dans les prochaines sessions

**Robert Klapisch, Annick Suzor-Weiner :**

Toutes les suggestions émises jusqu'à présent sont bien notées. Elles ne sont nullement contradictoires. Le format vers lequel nous nous orientons est : assistance restreinte (100 à 200 personnes), se concentrer sur cinq-sept sujets, avec une rotation et un programme à définir sur trois ans. Les lieux devront être alternés et seront définis suite à un appel d'offres.