

Ecole Nationale
Supérieure des Mines

RESSORTS

SAINT-ETIENNE

NUMÉRO 3 • PRINTEMPS 2004

Trimestriel édité par l'ENSM-SE à l'intention de ses partenaires académiques et industriels

Le génie des procédés et ses applications



*Pétrole et gaz - Nucléaire - Piles à combustible - Filière
hydrogène-Biomédical - Matériaux de construction*

ZOOM GÉNIE DES PROCÉDÉS

Puisque tout se transforme...	3
A Saint-Etienne, le progrès passe par SPIN	4
Les activités de formation	4

EXPERTISE

Pétrole : « A la croisée des chemins »	6
Quand les gaz seront solides	8
Questions de cours	9
Un partenaire à part : l'IFP	9
Nucléaire : tout au long de la filière	10
Piles à combustible : l'énergie propre	11
La filière hydrogène	12
Un matériau neuf : le bois	13



TÉMOIGNAGE

Ingénieur pharmacien et vice-versa	14
La santé aussi...	15
Événements de l'année	16
Questions de cours	16

RESSORTS

Une publication de
l'École Nationale Supérieure
des Mines de Saint-Étienne
www.emse.fr

Directeur de la publication:
Robert Germinet

Conception, rédaction
et réalisation: ADH
www.adh-presse.com

Ont collaboré à ce numéro :
Michel Cournil, Jean-Michel Herri,
Christophe Pijolat, Michèle Pijolat,
Gérard Thomas.

Numéro CPPAP : en cours

La « multiscience »
de tous nos vœux

Si le mot « chimie » fait peur à l'opinion, les termes de « génie des procédés » présentent un autre inconvénient, celui d'être abscons. Surmontant ces difficultés de vocabulaire, le citoyen consommateur doit pourtant mesurer les immenses services que lui rend au quotidien cette science, ou plutôt cette « multiscience ».



Jean-Claude Charpentier

Directeur de l'École Supérieure de
Chimie Physique Electronique de Lyon et
président de l'European Federation of
Chemical Engineering.

S'il est en effet devenu un client roi qui exige une valeur d'usage ciblée et adaptée à ses besoins précis (un aliment, un produit cosmétique ou pharmaceutique, etc.), qui se reconnaît le droit de changer d'avis quand il le veut, qui commande au producteur désormais incapable d'imposer comme jadis ses propres choix, c'est bien grâce aux formidables progrès de la méthodologie et des concepts de l'ancien génie chimique, devenu génie des procédés.

Toute l'industrie converge vers lui. Ayant accumulé les connaissances de la chimie, de la biologie, de la physique, de la méca-

nique des solides et des fluides, s'appuyant sur les mathématiques appliquées et les contrôles informatisés, le génie des procédés se met à chaque instant au service du consommateur. Veut-il un revêtement de chaussée plus sûr ? Une qualité d'acier plus spécifique ? La crème de soin dont sa peau a exactement besoin ? Un dessert allégé pour éviter de grossir ? En amont, il faudra toujours mettre au point les transformations physico-chimiques et biologiques nécessaires pour adapter exactement matériaux et sources d'énergie à ses vœux. Sitôt émis ou presque, puisque toutes ces réponses sont fournies sous le règne du « juste à temps » et du « premier sur le marché ».

Mieux : après avoir optimisé coûts et rendements, le génie des procédés s'est mis au service des nouvelles priorités sociétales que l'industrie a fait siennes, la qualité et la sécurité. Zéro défaut, zéro pollution et, autant qu'il soit possible de l'envisager, zéro accident : c'est encore au génie des procédés qu'incombe la poursuite de cet idéal. Sans lui, aucune protection possible de l'environnement. Et bientôt, grâce aux avancées spectaculaires du couple ingénieur-médecin, la santé même ne pourra s'imaginer sans lui.

S'appuyant sur une approche déterministe, le génie des procédés modélise et trouve des lois d'extrapolation, dimensionne les réacteurs pour passer de la paillasse au stade industriel, de la molécule au produit fini ; et même au déchet ultime, puisqu'il suit ce produit du berceau au tombeau. En ce sens, il explore des « boîtes noires » où s'accumulent les phénomènes de transferts de matières et de chaleur, réactions et séparations. Il simplifie la complexité. Est-il mission plus exaltante pour un ingénieur ?

Puisque tout se transforme...

Issu de la chimie, le génie des procédés s'intéresse à tout ce qui concourt aux transformations de matières premières et ressources énergétiques en produits adaptés aux besoins de l'utilisateur. Un champ de recherche au carrefour de plusieurs disciplines, et qui ne cesse de s'étendre à des applications nouvelles.

Parmi les sciences de l'ingénieur, il n'en est sans doute pas d'aussi vaste, ni surtout d'aussi ouverte sur des domaines nombreux et diversifiés que celles regroupées sous le terme « génie des procédés ». Est-ce bien une science, d'ailleurs ? Une discipline ? Ne faudrait-il pas plutôt parler d'une fédération d'approches ? Il peut se définir comme l'étude de ce qui concourt à toute transformation de matières premières ou de ressources énergétiques en un produit adapté aux besoins de l'utilisateur. « *Un champ d'applications très large et pluridisciplinaire, où tout l'art de l'ingénieur et du chercheur consiste précisément à savoir mettre en œuvre cette pluridisciplinarité* », résume Michel Cournil, qui dirige au sein de l'École des Mines de Saint-Étienne le centre SPIN (Sciences des Processus Industriels et Naturels).

Le génie des procédés – le GP, comme on dit couramment – est un héritier de la chimie, en tout cas en France, car en Allemagne par exemple, il a plutôt pris son essor à partir de la mécanique. Chez nous, il est le fruit d'une double évolution observée dans les années soixante-dix, lorsque se constituait cette approche intégrée des procédés chimiques en même temps que son rayonnement s'étendait à d'autres secteurs, dont le secteur énergétique ; on peut dire aujourd'hui que le génie des procédés l'englobe entièrement. Il s'agit donc d'une discipline jeune, même si le génie chimique, lui, est ancien.

Le rôle de la modélisation

L'approche est presque toujours globale, diverse. Les différents centres, comme SPIN à Saint-Étienne, ne



Champ offshore en eaux profondes du gisement Girassol, au large de l'Angola.

© ZYLBERMAN LAURENT/GRAPHIX-IMAGES

sont donc pas des spécialistes en élaboration d'un produit – c'est plutôt le rôle de laboratoires de chimie qui se consacrent par exemple à tel ou tel catalyseur –, mais des experts en processus. Comment élaborer, transformer, caractériser un produit : voilà l'objet quotidien des recherches en génie des procédés. Lequel ne connaît guère de standards : chacun a sa propre « recette », en tout cas ses propres centres d'intérêt, fruits la plupart du temps de données historiques locales. C'est pourquoi les différentes Écoles des Mines, pour ne parler que d'elles, se concurrencent peu. L'École des Mines de Saint-Étienne, par exemple, se consacre essentiellement au génie des procédés des

matériaux solides, tandis que d'autres laboratoires ou écoles travaillent sur les milieux liquides, les émulsions, la chimie organique (polymères), etc. Historiquement, le génie des procédés s'est d'abord trouvé distingué à Nancy et Toulouse ; puis sont apparues l'université technologique de Compiègne et d'autres unités dispersées, à Lyon, Grenoble, Bordeaux et Marseille notamment, sans oublier les Écoles des Mines.

Malgré la diversité des thèmes de recherches, les connaissances scientifiques de base restent les mêmes : elles relèvent de la chimie, de la physique et de la mécanique des fluides, le tout s'appuyant sur une

compétence en mathématiques appliquées. La modélisation y joue en effet un rôle majeur pour mesurer, et donc prévoir, le déroulement de phénomènes comme la corrosion de matériaux, la diffusion de produits polluants dans l'environnement ou même les réactions de défenses immunitaires d'un organisme face à une agression virale. On comprend que dans certains cas, comme celui du stockage de déchets radioactifs de très longue durée, l'expérimentation rencontre des limites ; c'est alors à la modélisation et au calcul de prendre le relais.

Au cœur du développement durable

Comme toute activité de l'ingénieur, le génie des procédés n'existe que par la demande industrielle. Celle-ci a longtemps été dominée par les seules exigences économiques et financières : la recherche du rendement maximum, du moindre coût. Depuis une vingtaine d'années, et c'est une autre évolution marquante du GP, se sont ajoutées d'autres problématiques industrielles et sociétales devenues prioritaires : la qualité bien sûr, mais aussi la sécurité, la protection de l'environnement, l'impact sur la santé. Le génie des procédés se trouve donc désormais au cœur de ce qu'il est convenu d'appeler le développement durable, dont il a très tôt intégré les exigences. Il y concourt notamment par les économies d'énergie, la réduction des émissions de gaz à effet de serre et la prévention des accidents industriels.

Pour ces raisons, le génie des procédés joue un rôle essentiel dans toutes les industries sensibles et potentiellement dangereuses, notamment la chimie, le pétrole, le gaz et le nucléaire. Mais ses compétences s'étendent depuis peu à de nouveaux domaines tels que la microélectronique et le secteur médical. « Il ne fait pas de doute qu'elles vont continuer à se développer, en particulier dans le domaine de la santé, assure Michel Cournil. Le génie des procédés sera une activité de plus en plus ouverte... » Cette extension à des domaines sans cesse plus nombreux se traduit par un croisement de cultures toujours plus fécond qui en est à la fois la cause et la conséquence. Ce qui, pour les étudiants, les chercheurs et les ingénieurs, fait du génie des procédés une activité particulièrement passionnante. ■

A Saint-Etienne,

A travers le centre Sciences des de l'Ecole des Mines.

Avec ses 75 collaborateurs dont 27 enseignants-chercheurs et 25 doctorants, ses 4 départements scientifiques, ses 9 thèmes de recherche, avec aussi ses 4 400 m² situés dans deux bâtiments, dont un hall de génie chimique de 400 m², SPIN (Sciences des Processus Industriels et Naturels) offre à l'Ecole des Mines de Saint-Étienne des moyens de premier ordre pour faire progresser le génie des procédés. Ce dernier représente d'ailleurs 30% des activités de l'Ecole.

Les trois quarts des chercheurs de SPIN appartiennent à une unité mixte de recherche du CNRS ou associée (« Laboratoire des procédés en milieux granulaires », UMR 5148, et « Transferts lithosphériques », UMR 6425). Les partenariats sont nombreux aussi au sein du GEM, le Groupe des Ecoles des Mines, qui travaillent toutes, à un titre ou un autre, sur le génie des procédés.

En fait, il n'existe pas de partenariat global, mais sur pratiquement tous les sujets sont associés de un à trois autres laboratoires, français ou étrangers, notamment en Allemagne, en Espagne, en Italie, aux Etats-Unis, au Canada, au Maroc, au Brésil, en Chine. « Nos recherches sont toujours extrêmement ouvertes, commente Michel Cournil, qui dirige SPIN depuis 2001. Nous pouvons rarement tout faire au sein du Centre : au mieux jusqu'à 80 ou 90% de la recherche. Il y a toujours une partie qui déborde de nos compétences, preuve que nous avons bien affaire à des activités toujours pluridisciplinaires. »

Rayonnement

Le Centre n'en dispose pas moins de toutes les compétences et du matériel nécessaire pour étudier la réponse à un problème industriel depuis l'atome jusqu'au stade du prototype. Il possède notamment des réacteurs hétérogènes, les techniques les plus en pointe pour la caractérisation des solides et bien

sûr les moyens informatiques nécessaires. Plus de la moitié du budget de SPIN est couvert par des contrats de recherche. En 2002, ils représentaient 1,1 million d'euros, dont 600 000 € de contrats industriels directs.

La filière énergétique représente les deux tiers des contrats industriels, avec des clients aussi prestigieux que Total, le CEA, la COGEMA, l'Institut Français du Pétrole, Gaz de France ; dans d'autres secteurs, Pechiney, Renault, Arcelor, Lafarge ou Beghin-Say profitent également des compétences de l'Ecole.

Quelques actions de recherche marquantes concernent les hydrates de gaz, la sécurité industrielle, par exemple une perte de confinement des réservoirs de

suite p.6

Les activités



Côté enseignement, le Centre SPIN essaie de couvrir tous les thèmes de base du génie des procédés et leurs applications. Il intervient sur de nombreux sujets en première année du cycle de formation des ingénieurs civils des mines, en particulier en thermodynamique. En deuxième année, sur les sciences et techniques de l'ingénieur, axe

le progrès passe par SPIN

Processus Industriels et Naturels, le génie des procédés représente une part importante des activités. Les grands groupes industriels le savent et ne se privent pas d'utiliser ses compétences.



Une partie des collaborateurs de SPIN.

DR

de formation

procédés, et dans le module énergétique. En troisième année enfin, dans les « profils » procédés et énergétique, qui concernent 20 à 30 élèves.

Un Master Recherche de génie des procédés, cohabilité avec l'Université Jean Monnet de Saint-Etienne, comprend des cours qui approfondissent les principaux aspects de la discipline, une série de conférences et séminaires, et se prolonge par un stage de laboratoire en milieu universitaire ou industriel, en France ou à l'étranger.

L'ensemble de ces formations représentent un total de 4 000 heures d'enseignement.

A domaine pluridisciplinaire, débouchés variés. Les jeunes ingénieurs qui ont choisi cette option en trouvent sans peine dans à peu près tous les secteurs industriels -de l'énergie aux transports en passant par la pharmacie, l'électronique, l'agroalimentaire et d'autres encore- et peuvent y exercer le métier d'ingénieur sous tous ses aspects : R&D, conception, conduite de projet, production, qualité, sécurité, maintenance et même activités commerciales. ■

Une thématique diverse et cohérente

En matière de recherche, la stratégie de SPIN se décrit de la manière suivante :

1 thématique unique : le génie des procédés en milieux granulaires

3 compétences de base :

- **la dynamique des processus à l'état solide** (thermodynamique et cinétique à l'échelle du domaine élémentaire de la transformation)
- **la dynamique des systèmes divisés** (morphologie, mécanique, transferts et réactions en milieux divisés : empilements granulaires, suspensions, aérosols, milieux poreux, etc.)
- **l'instrumentation et les capteurs** (instrumentation, capteurs, analyse d'images et de signaux).

4 domaines d'application industriels et sociétaux :

- **l'énergie** (le secteur du nucléaire, le secteur gaz-pétrole, la filière hydrogène, etc.)
- **les matériaux innovants** (composites à base de bois, matériaux multi-échelle, matériaux pour l'électronique, etc.)
- **le développement durable** (valorisation des déchets industriels, pollution des sols, dégradation naturelle de matériaux, thermohydraulique et sécurité, réduction du CO₂, etc.)
- **l'ingénierie et la santé** (biomatériaux, images et signaux biomédicaux, biomodélisation, impact des nanopoudres sur la santé, etc.)

gaz liquéfiés, les capteurs pour l'automobile et l'aéronautique, la chaîne du combustible nucléaire et la sécurité des réacteurs, les effets de la pollution sur les bâtiments et un matériau d'une grande nouveauté... le bois.

L'autorité de SPIN dans le génie des procédés se mesure aussi à son rayonnement dans la communauté scientifique. En 2002, 9 doctorats et 7 DEA ont été soutenus au sein du Centre. Parallèlement, ses enseignants-chercheurs ont publié 36 articles dans des revues à comité de lecture et sont intervenus dans 94 colloques, dont 46 avec actes.

Ils participent activement aux sociétés savantes qui réunissent les spécialistes à l'échelle nationale, européenne et mondiale. La Société Française de Génie des Procédés (SFGP) édite une revue, *Procédique*, et tient un congrès francophone tous les deux ans. Le dernier a réuni à Saint-Nazaire en septembre 2003 près de 600 participants ; il a permis de recueillir 350 contributions orales et/ou écrites. C'est Saint-Étienne qui accueillera le congrès en 2007, organisé conjointement par les écoles du GEM.

D'ici là, SPIN est chargé d'organiser, conjointement avec les associations française et internationale spécialisées, l'AFCAT* et l'ICTAC**, les 35^{èmes} Journées de Calorimétrie et d'Analyse Thermique qui se tiennent à Saint Etienne les 11, 12 et 13 mai. Et c'est encore le Centre qui aura la responsabilité, les 24 et 25 novembre 2004 à Saint-Étienne, de « Cristal 3 », journées consacrées à la cristallisation et la précipitation industrielle. Le comité scientifique présidé par Michel Cournil, qui réunit industriels et universitaires, a retenu quatre thèmes : les mécanismes fondamentaux de ces deux phénomènes, l'élaboration et le comportement des cristaux, leur caractérisation, enfin la conception, la modélisation et le contrôle des procédés. Ce colloque doit faire le point sur les connaissances actuelles et favoriser les échanges entre chercheurs, équipementiers et utilisateurs. ■

* Association française de calorimétrie et d'analyse thermique
 ** International Confederation for Thermal Analysis and Calorimetry

Pétrole : « A

A la fois obstacles aux forages et ressources potentielles
 Et pour

Très impliqué dans l'industrie pétrolière, le centre SPIN intervient essentiellement au niveau de ce que l'on appelle le domaine « amont », c'est-à-dire du réservoir naturel, le gisement, jusqu'à la mise en production au puits et au transport par pipe-lines. Il ne s'intéresse pas directement au domaine « aval » (raffinage, pétrochimie). Du moins côté recherche, car dans l'enseignement il intervient aussi sur ce domaine.

Ces recherches de SPIN sur la production d'hydrocarbures s'appuient sur un constat : au fur et à mesure de l'amenuisement des réserves, les conditions d'exploitation seront de plus en plus difficiles, onéreuses et risquées. En effet, une partie importante des réserves, et la majorité des découvertes à faire, se situent maintenant dans des gisements sous-marins de plus en plus profonds ; on fore jusqu'à 1 000 mètres, mais des études sont en cours pour descendre jusqu'à 3 000 mètres. Ce qui ne reste évidemment pas sans conséquence sur le prix de revient : aujourd'hui déjà, le développement technique d'une plate-forme de forage coûte aussi cher que celui d'une navette spatiale. Handicap supplémentaire, les pétroles disponibles sont aussi de plus en plus lourds, c'est-à-dire visqueux et chargés en impuretés.

Cette accessibilité réduite provoque des difficultés d'exploitation qu'il serait ruineux de surmonter en envoyant à chaque fois quelqu'un sur place. C'est donc en amont qu'il faut mener la recherche pour prévoir ce qu'il est susceptible de se passer et comment l'on pourrait alors remédier aux problèmes. A partir de 300 mètres de fond, l'eau est à environ 4°C, guère plus de 10°C dans les mers chaudes, et la pression très forte. Dans ces conditions, un mélange de pétrole, de gaz (méthane) et d'eau forme des composés solides appelés hydrates de gaz qui peuvent obstruer un conduit du puits. Anticiper ce genre de pro-

blèmes fait appel à des compétences qui relèvent à la fois de la chimie, de la physique et de la mécanique des fluides, le tout appuyé sur les mathématiques appliquées.

Bulle de gaz et raz-de-marée

Pour ce faire, SPIN dispose à Saint-Étienne de plusieurs modèles réduits (de quelques centimètres à plusieurs mètres) qui simulent les conditions d'un pipe-line sous-marin. Les chercheurs peuvent dès lors proposer des modélisations pour décrire la formation des bouchons, les prévenir grâce à des additifs spécifiques (par exemple des glycols, assez proches de ce que l'on met dans un radiateur de voiture), ou encore proposer des procédures de débouchage quand ils se sont tout de même formés.

Connaître la formation des hydrates de méthane est d'autant plus nécessaire qu'ils présentent de graves risques. Les hydrocarbures se trouvent dans des réservoirs géologiques naturels, d'où on les fait jaillir pour les récupérer. Mais ils subissent également des fuites naturelles ; à l'échelle des temps géologiques, une partie du méthane quitte ainsi le sédiment pour migrer vers la surface. Tant qu'ils restent à faible température, ces composés demeurent stables. Mais, précisément, le forage provoque un échauffement qui peut les déstabiliser et faire remonter à la surface une énorme bulle de gaz susceptible - cela s'est déjà vu - d'ébranler la plate-forme pétrolière.

En dehors même de l'exploitation, le réchauffement de la planète n'est pas à cet égard indifférent. Avec une élévation générale de la température provoquée par l'effet de serre, les hydrates de méthane les moins profonds se retrouveraient dans une eau insuffisamment froide pour rester stables. On peut alors imaginer un véritable scénario catastrophe, la libération de ce méthane, gaz à effet de serre quinze fois supérieur à

la croisée des chemins »

tielles, les hydrates de gaz sont au cœur des préoccupations de l'industrie pétrolière. SPIN, un thème d'études privilégié.



Vue de la plate-forme du champ de Yanga au Congo.

© HUNEAU A.

celui du gaz carbonique, élevant à son tour la température terrestre, et ainsi de suite. Ce phénomène a-t-il déjà commencé ? Certains le pensent. Toujours est-il que la terre porte les traces de tels événements : au large de la Norvège existent des cratères provenant de la déstabilisation soudaine des hydrates et du sédiment qui les portait. Cet événement a provoqué un raz-de-marée, et s'il se reproduisait aujourd'hui il imposerait un risque important aux pays proches, comme les Pays-Bas.

Une ressource gigantesque

Si, pour toutes ces raisons, les producteurs de pétrole considèrent les hydrates de gaz comme un inconvénient, ils commencent aussi à les voir comme une ressource,

et même une ressource gigantesque. « *On estime que l'énergie fossile piégée dans ces structures est supérieure en quantité à celle de toutes les énergies fossiles conventionnelles – pétrole, charbon et gaz naturel – cumulées*, explique Jean-Michel Herri, maître-assistant, chef de projet hydrates de gaz du Centre. *Or l'épuisement du pétrole n'est pas si éloigné : les plus optimistes le voient vers 2070, les autres vers 2030. Depuis cinq ans, la communauté scientifique s'interroge donc sur la possibilité d'exploiter les hydrates de méthane. Nous sommes à la croisée des chemins.* »

De nombreux programmes internationaux sont en cours, d'une part pour localiser les réserves avec davantage de précision, d'autre part pour essayer de produire cette nouvelle énergie. L'École y prend une part active puisque SPIN est

l'un des tout premiers centres mondiaux sur la thématique des hydrates. La France, d'une manière générale, est très active sur ce sujet grâce au dynamisme de Total, qui relève des défis technologiques constants avec la mise en production de champs pétroliers ultra-profonds. L'Institut Français du Pétrole est un partenaire privilégié ; il faut noter l'implication d'autres organismes spécialisés en sciences de la terre comme le Collège de France ou l'IFREMER.

« Une collectivité bien organisée »

Les moyens de SPIN lui permettent d'abord de reproduire la formation puis la décomposition des hydrates de méthane dans des sédiments par 3 000 mètres de fond, pour évaluer ensuite les vitesses de transformation. Il peut enfin modéliser, soit la production de méthane à partir de gisements massifs, soit la maturation lente de ces gisements au regard de réchauffements locaux ou planétaires.

Pour le centre SPIN, le contexte pétrolier n'est pas le seul domaine d'application des hydrates de gaz. Sir Humphrey Davy, qui les a découverts en 1810 lors de ses travaux sur les gaz de mines, serait peut-être surpris de les voir maintenant trouver des applications dans le domaine de la séparation de gaz, du transport du gaz sous forme solide, ou encore de la climatisation.

Entre SPIN et ses partenaires, quelque 450 chercheurs qui « planchent » sur ces sujets à travers le monde, les contacts sont nombreux, notamment à travers un congrès triennal, l'International Conference on Gas Hydrates. « *C'est une collectivité bien organisée*, explique Jean-Michel Herri, *et l'industrie pétrolière aime partager l'information, ne serait-ce que pour réduire ses coûts...* » ■

Quand les gaz s

Et si l'on transformait les rejets industriels en hydrates de gaz pour les séquestrer, pu



Le centre SPIN possède un appareillage permettant de simuler la cristallisation des hydrates de méthane dans les sédiments sous-marins. DR

Exploiter les hydrates de méthane résoudrait certes la question des ressources fossiles accessibles, mais pas celle du réchauffement de la planète par les émissions de dioxyde de carbone (CO₂), bien au contraire. Cependant, il se trouve qu'une partie des solutions envisagées pour un problème sont transposables à l'autre. Puisque la combinaison d'une haute pression et d'une basse température permet de solidifier du méthane sous forme d'hydrates, n'en irait-il pas de même des gaz rejetés par l'industrie ?

Dans le cadre d'un projet européen, la piste est actuellement

explorée pour la sidérurgie. Le principe : compléter les hauts-fourneaux avec des installations capables de séparer le CO₂. On commencerait par le comprimer en le combinant à de l'eau pour le solidifier sous forme d'hydrates très riches en dioxyde de carbone, comparables aux hydrates de méthane.

D'une pierre deux coups

Ainsi solidifiés, donc facilement transportables, ces rejets seraient ensuite retransformés en gaz pour être injectés dans les sédiments gorgés d'eau qui occupent le sous-sol des continents à peu près par-

tout, sauf sous les chaînes de montagnes. Là, à 1 000 mètres de profondeur, le CO₂ injecté se dissoudrait dans l'eau puis réagirait avec la roche pour former des carbonates. Les géochimistes de SPIN s'intéressent particulièrement à cette étape qui doit finir par une stabilisation définitive du CO₂ injecté. En procédant de cette façon apparemment complexe, on ne ferait d'ailleurs que reproduire en l'accélérant un processus naturel, puisqu'une partie du CO₂ présent à la surface est en permanence intégré aux sédiments et mis à l'écart de l'atmosphère.

La capacité des sédiments situés en profondeur à accepter une charge supplémentaire en CO₂ et à la convertir en minéraux ne fait aucun doute sur le long terme, mais les effets à moyen terme de l'injection de CO₂ doivent encore faire l'objet d'évaluations délicates sur lesquelles portent les efforts de recherche actuels, en partenariat avec Total et l'Institut Français du Pétrole.

Mieux : tant qu'à injecter le CO₂ dans le sous-sol, pourquoi ne pas le faire dans les champs pétrolifères en fin d'exploitation, où il « pousserait » vers la surface les hydrocarbures qui restent à extraire ? C'est une technique déjà mise en œuvre dans certains champs canadiens, qui permet de faire d'une pierre deux coups.

L'une et l'autre solutions, avec leurs étapes successives, supposent bien sûr d'énormes installations industrielles. Mais l'enjeu n'est rien moins que le plus grave défi lancé au développement durable de la planète. « *Nos recherches se situent tantôt en recherche et développement, tantôt en R&D*, fait remarquer Jean-Michel Herri, chef de projet hydrates de gaz. *Certaines de nos études sont d'ailleurs initiées par l'Ecole sur fonds propres et autofinancées. Mais toujours, nous gardons le souci de l'application.* »

seront solides...

... mais les stabiliser sous terre ? Un scénario qui ne paraît pas impossible aux chercheurs.

Comme on le voit, cette propriété qu'a l'eau de se combiner avec certains gaz pour former des hydrates solides permet de les stocker et de les transporter. Or aujourd'hui, la seule façon de transporter le méthane est soit de construire un réseau de pipe-lines, soit de le liquéfier pour l'emporter sur des méthaniers. Ces technologies nécessitant des investissements très lourds, elles ne sont applicables qu'à des gisements importants et exploitables sur plusieurs dizaines d'années. Avec la technique de l'hydrate, de nombreux petits gisements, actuellement négligés, deviendraient rentables.

C'est pourquoi l'Ecole développe une voie de recherche avec Gaz de France, qui consiste à condenser le méthane sous forme d'hydrate pour réduire son volume, puis à le stabiliser à faible pression pour pouvoir le transporter, mais à une température beaucoup plus « fraîche » qu'actuellement dans les méthaniers : -20°C au lieu de $-161,5^{\circ}\text{C}$. D'où un gain énergétique très important et des investissements moins lourds. ■



Boucle pilote permettant au centre SPIN de simuler les conditions de formation d'hydrates de gaz dans une canalisation pétrolière en mer profonde. DR

Un partenaire à part : l'IFP

Parmi les partenaires de l'Ecole nationale supérieure des Mines de Saint-Étienne, il en est un dont le statut est unique en France : l'Institut Français du Pétrole. L'IFP est une sorte de fondation à but non lucratif dont les ressources proviennent pour les deux tiers de l'Etat. Le tiers restant provient pour partie de travaux réalisés pour les compagnies pétrolières ou dans le cadre de programmes nationaux et européens. Il résulte principalement de l'industrialisation de ses innovations technologiques – l'IFP possède pas moins de 13 500 brevets, dont 1 144 déposés au cours de la seule année 2003 – via l'activité de ses filiales directes et de ses participations dans des entreprises parapétrolières, ce qui fait de l'IFP un véritable groupe de dimension internationale.

Centre indépendant de recherche et développement industriel, de formation et d'information, l'IFP couvre les domaines du pétrole, du gaz naturel et de l'automobile tout au long de la chaîne des hydrocarbures : exploration, production, raffinage, pétrochimie, moteurs et utilisation des produits pétroliers. Outre ses 1 860 sala-

riés, dont 80 % d'ingénieurs et de techniciens spécialisés, plus de 130 thésards y mènent en permanence des recherches.

François Kalaydjian fut l'un d'eux, de 1985 à 1988. Diplômé de l'Ecole des Mines de Saint-Étienne, titulaire d'un DEA de Chimie-Physique à Jussieu, son sujet de thèse touchait à la modélisation de certains écoulements polyphasiques en milieu poreux. Sitôt la thèse soutenue, l'IFP l'embauche comme ingénieur de recherche au sein de la division gisements.

Après avoir été chef de projet, il en deviendra le directeur en 1997. Depuis deux ans, il est directeur adjoint du centre de résultats exploration-gisements. Doté d'un budget annuel de 60 millions d'euros, c'est un des quatre centres techniques où sont définis les programmes de recherche et leur industrialisation, les autres centres étant forage-production, raffinage-pétrochimie et moteurs-énergie.

Il s'intéresse en particulier aux nouvelles techniques d'exploration et d'exploitation des gisements d'hydrocarbures permettant un accès durable aux ressources pétrolières de la planète.

Nucléaire : tout au long de

Fabrication du combustible, production, stockage des déchets : à ces trois étapes, SPIN pour améliorer la sûreté des installations.

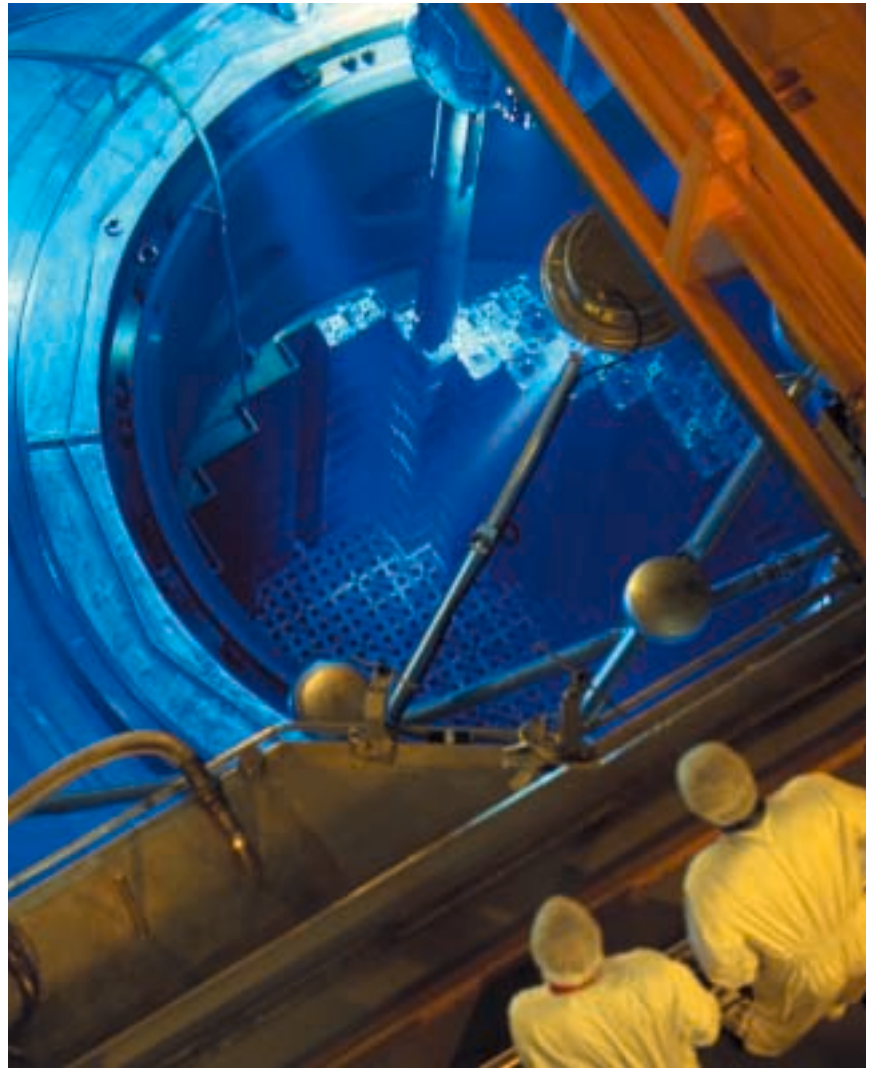
Sans être constitué de spécialistes du nucléaire, le Centre SPIN, par ses compétences en chimie et en modélisation, intervient en de nombreuses occasions dans cette filière.

Il mène par exemple des recherches sur le procédé de fabrication du combustible. On sait qu'elle passe par de nombreuses étapes, notamment celle de l'hexafluorure d'uranium (UF_6), qui nécessite préalablement une réduction de l'oxyde d'uranium ($UO_3 \rightarrow UO_2$). A la demande de la Comurhex, filiale de la COGEMA et leader mondial de la conversion du concentré minier uranifère en hexafluorure d'uranium, SPIN a travaillé sur la modélisation de cette réduction. Elle s'opère à Malvézi, près de Narbonne, dans des fours dits « à lit coulant vertical » : dans la partie haute du four est introduite une poudre de trioxyde d'uranium UO_3 , qui va être transformée en UO_2 par un mélange gazeux réducteur d'hydrogène et d'ammoniac vers 700-800°C ; la poudre qui continue à descendre est transformée dans la partie basse du four en UF_4 au contact du fluorure d'hydrogène gazeux.

Un mystère éclairci

Des expériences ont été menées à l'Ecole dans des conditions comparables, mais sur de toutes petites quantités (quelques milligrammes), pour étudier les réactions et avoir ainsi accès aux lois de vitesse mathématiques en fonction des différents paramètres (forme des grains, pression, température, etc.) Deux thèses ont été soutenues sur le sujet et une troisième se termine, sans compter quelques stages de DEA et contrats.

Le combustible, sous une forme communément appelée « crayons », est placé dans des gaines en alliage de zirconium avant d'être plongé dans l'eau pressurisée. Combien de



Chargement du réacteur dans la centrale nucléaire de Civaux 1.

©Framatome ANP

temps, en fonction de diverses conditions, ces gaines peuvent-elles subir ce traitement avant de se corroder ? L'industriel, Framatome, tout comme le CEA ou EDF, maîtrisent ces données grâce à de nombreuses années de recherche basées sur des observations régulières : on extrait un échantillon de ces gaines, on le pèse, et l'augmentation de poids observée correspond à l'oxydation ; dès lors que la vitesse de ce phénomène est connue, la durée de vie du matériau l'est aussi.

Du moins en principe, car, précisément, les ingénieurs de Framatome étaient intrigués par les variations de la vitesse de corrosion au cours du temps : ils observaient un ralentissement, suivi d'une accélération. Framatome a demandé à l'Ecole une étude sur les mécanismes de cette période d'accélération. La thèse de physico-chimie qui a été soutenue sur ce sujet en janvier 2003, s'appuyant sur une méthodologie originale de cinétique hétérogène basée sur la

la filière

Piles à combustible : l'énergie propre

apporte son concours

méthode des « décrochements », a pu démontrer que les données qui définissaient la vitesse initiale changeaient ensuite complètement, et les lois de vitesse avec. Décrivant les mécanismes complets et fournissant une modélisation détaillée, elle a pour l'essentiel éclairci le mystère.

Une expertise reconnue

Enfin, SPIN intervient tout à la fin du cycle nucléaire, lorsque le retraitement a donné naissance à des déchets ultimes. On sait qu'alors l'une des solutions consiste à les entreposer dans des conteneurs pour une longue durée. Mais trois cents ans par exemple, c'est peu par rapport au temps pendant lequel ces déchets restent radioactifs. L'industrie nucléaire a donc besoin de comprendre les mécanismes des réactions qui vont se produire avec des cinétiques très lentes en s'appuyant sur des lois de vitesse prédictives fiables. Mais comment conduire des expériences sur des phénomènes aussi lents ? Des travaux sont en cours à l'Ecole, qui consistent à mesurer le phénomène en l'accélérant par une température supérieure lors de l'expérience, à charge pour les chercheurs d'extrapoler ensuite les résultats pour en déduire la vitesse des réactions à température ambiante.

« Le CEA, Framatome et la Cogema sont de plus en plus confrontés à des problèmes de cinétique dans des milieux hétérogènes complexes, fait remarquer Michèle Pijolat, professeur à l'Ecole des Mines de Saint-Étienne. Or, au sein de cette communauté de gens qui se connaissent bien, l'expertise de SPIN est reconnue dans ce domaine de la cinétique et des mécanismes réactionnels. » De fait, les projets en cours dans le centre sont actuellement nombreux. ■

A grande ou petite échelle, reposant sur l'une ou l'autre des technologies actuellement étudiées, elles sont de toute façon promises à un bel avenir. L'Ecole participe à leur mise au point.

Produire du courant électrique sans émettre de polluant ? C'est évidemment le vœu de tous les adeptes du développement durable. Le centre SPIN est très investi dans les recherches qui poursuivent ce but à travers la pile à combustible (*Fuel Cell*). Elle consiste à produire de l'électricité à partir d'une réaction chimique de décomposition de gaz à la surface d'électrodes encadrant un matériau conducteur ionique.

Certaines de ces piles, d'un type appelé PEM (*Proton Exchange Membran*) sont déjà en cours de commercialisation. Le principe : une décomposition d'hydrogène à la surface d'une des électrodes (l'anode) libère des protons qui traversent une membrane de polymère, puis se combinent avec de l'oxygène pour former de la vapeur d'eau. C'est donc une réaction électrochimique inverse de l'électrolyse de l'eau qui va générer un courant électrique. Le principe peut être développé à différents niveaux : petits générateurs électriques pour alimenter une maison individuelle, cogénérateurs (Gaz de France travaille sur cette idée), voire véhicules électriques, comme solution alternative aux batteries. Les recherches portent également sur des micropiles à combustible qui pourraient être insérées dans des ordinateurs ou téléphones portables.

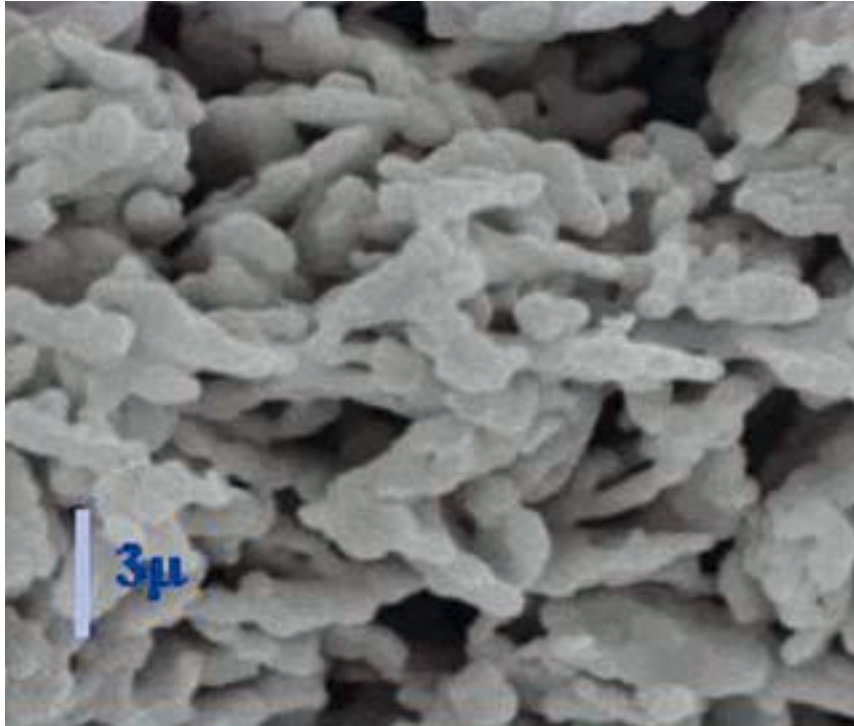
Cette technologie présente cependant des inconvénients : elle nécessite un catalyseur, le platine, qui est onéreux et s'empoisonne ; d'autre part, le polymère de la membrane se dégrade à la chaleur. D'où une autre piste, les piles de type SOFC (*Solid Oxyde Fuel Cell*). Ces piles à combus-

tible de nouvelle génération peuvent fonctionner avec d'autres catalyseurs moins coûteux que le platine et ne sont pas sensibles aux phénomènes d'empoisonnement. Le processus est inverse par rapport au PEM : c'est l'oxygène qui se décompose, du côté de la cathode, et les ions oxygénés créés, après avoir traversé la membrane, se combinent avec de l'hydrogène pour former de l'eau.

Dans tous les cas, il faut disposer d'hydrogène, qu'il soit produit sur place ou non. C'est pourquoi aux recherches sur les piles à combustible est intimement lié cet autre domaine qu'on appelle la « filière hydrogène » (lire p.12).

Deux thèses

Pour sa part, SPIN travaille exclusivement sur la technologie SOFC. Les piles de ce type peuvent fonctionner avec une anode en nickel, une membrane en oxyde de zirconium dopé (YSZ), le conducteur ionique de l'oxygène par excellence, et une cathode en LSM (manganite de lanthane dopée au strontium). On sait faire fonctionner ces matériaux à 800°C, mais la recherche menée à l'Ecole vise à réaliser la même réaction à une température plus basse, de l'ordre de 600°C. Pour cela, il faut en particulier rendre les matériaux plus conducteurs, donc les fabriquer en couches minces, de quelques microns à quelques centaines de microns, grâce à la technologie planaire utilisée en microélectronique. A cette réserve près qu'en microélectronique les couches sont encore cent fois plus minces ; c'est pourquoi les couches utilisées actuellement dans les piles



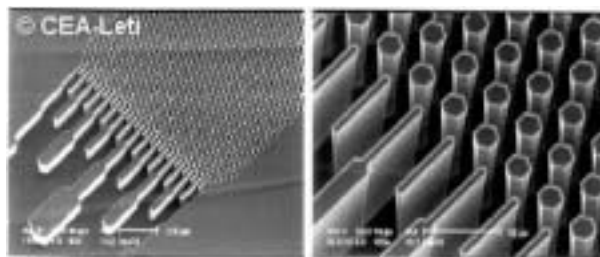
Matériau pour cathode de pile à combustible SOFC : coupe d'une couche épaisse de LSM (manganite de lanthane dopée au strontium) déposée par méthode sérigraphique.

SOFC sont en fait dites... « épaisses ».

Deux thèses ont démarré. L'une, à propos de ces matériaux en couches épaisses, est menée au sein du département MICC (Microsystèmes, instrumentation et capteurs chimiques) de SPIN. Elle consiste à réaliser des dispositifs complets de piles SOFC planaires et à les tester sur des bancs gazeux. La difficulté consiste en effet à parfaitement isoler les compartiments pour éviter le contact direct entre l'hydrogène et l'oxygène pouvant être explosif, cette opération étant particulièrement délicate compte tenu de la température élevée (de 600 à 700°C). La tension maximum d'une cellule élémentaire étant de l'ordre du volt, il faudra mettre en série ces cellules élémentaires pour atteindre les performances d'une batterie de 12 ou 24 volts. En fait, les technologies utilisées pour le développement de ces piles SOFC et les mécanismes réactionnels mis en jeu sont très

La « filière hydrogène »

Pour disposer de l'hydrogène nécessaire aux piles à combustible, deux moyens sont envisageables : soit le produire à façon juste à côté (à partir d'un carburant, hydrocarbure ou méthanol), soit le transporter. D'où, pour cette seconde solution, des recherches sur le stockage. Sur ce thème de recherches appelé « filière hydrogène », que le GEM a déclaré prioritaire, un projet, avec le CENERG de l'Ecole des Mines de Paris (Sophia-Antipolis) comme coordinateur, se met en place au niveau des sept Ecoles des Mines fédérées par le GEM. L'ensemble des écoles sont concernées, au niveau de la production d'hydrogène à partir de bio-gaz, de sa purification, de son utilisation dans le système pile à combustible, sur les aspects sécuritaires et ACV (analyse de cycle de vie). La récupération de l'hydrogène à partir de bio-gaz issu d'une fermentation et les systèmes de co-génération d'énergie constituent des points clés dans cette filière.



Détail d'éléments d'un microréacteur destiné à la microproduction d'hydrogène.

La participation du centre SPIN au projet se situe à deux niveaux. Le département MICC travaille à la sécurité des dispositifs : des capteurs capables de détecter d'éventuelles fuites d'hydrogène et d'arrêter la réaction le cas échéant. On sait en effet que lorsque la proportion d'hydrogène dans l'air dépasse 4% il y a un risque d'explosion. Par ailleurs, une autre équipe de SPIN, Physicochimie des matériaux multicomposants (PCMM), travaille sur le stockage de l'hydrogène en liaison avec

une PME de la région PACA. L'idée consiste à utiliser des matériaux solides dotés d'un grand pouvoir de dissolution de l'hydrogène, qu'ils restitueraient ensuite. Une solution avec d'autres matériaux que les hydrures métalliques ou les nanotubes de carbone est en cours de validation.

Côté production d'hydrogène, une thèse vient de démarrer à Saint-Étienne sur la possibilité de le faire produire par un microréacteur dans du silicium par catalyse de produits organiques. Le LETI (Laboratoire d'Electronique, de Technologie et d'Instrumentation) de Grenoble pour la technologie et l'Ecole Supérieure Chimie Physique Electronique (CPE) de Lyon pour la partie catalyse y sont associés. ■

proches de ceux étudiés dans le cadre des capteurs de gaz de type potentiométriques. « Depuis vingt ans, mon équipe étudie les propriétés électriques de solides pour en faire des détecteurs de gaz, explique Christophe Pijolat, responsable du département et adjoint au directeur de la recherche de l'École. Elle avait donc les compétences nécessaires et maîtrisait la technologie pour reprendre cette recherche sur les piles à combustible SOFC. »

La seconde thèse, menée dans un autre département de SPIN appelé ProcESS (Procédés et Evolution des Systèmes avec Solides), est consacrée à la modélisation et la compréhension des réactions gaz/solides. Elle s'intéresse plus précisément à la cathode en LSM et cherche à en optimiser l'interface entre la cathode et le conducteur ionique. Cette thèse est co-dirigée par le LEPMI de Grenoble.

« Bien impliqués »

A noter : une autre voie de recherche en cours au département MICC consiste à fabriquer des piles à combustible avec les mêmes matériaux, mais en monocellule, donc sans nécessité de séparations étanches, la production du courant électrique étant réalisée à partir d'un mélange d'hydrocarbure et d'oxygène (dans un ratio évidemment non explosif). Le rendement des réactions catalytiques est relativement plus faible (quelque dix fois moindre pour l'instant), mais le dispositif est beaucoup plus facile à produire industriellement. « C'est un concept innovant, qui a d'abord soulevé un certain scepticisme, mais qui vient de donner lieu ces deux dernières années à quelques publications », rapporte Christophe Pijolat. Les Canadiens et les Japonais s'y intéressent, ces derniers paraissant avoir récemment bien amélioré le rendement.

« Nous n'avons pas actuellement de projet avec des industriels car nos recherches se situent plus en amont, ajoute-t-il. Mais nous faisons partie d'un groupement de recherches du CNRS qui réunit une vingtaine de laboratoires. Nous sommes donc bien impliqués dans cette communauté. C'est un choix stratégique majeur car, dans tous les cas, les piles à combustibles vont être incontournables dans les années à venir. » ■

Un matériau neuf : le bois



Le bois est porté à plus de 200°C sous atmosphère inerte et à pression contrôlée.

SEFCCO/SEFWOOD

Au sein de SPIN, des chercheurs travaillent sur la conception de matériaux de construction qui répondent à des besoins nouveaux - ou, pour mieux dire, nouvellement formulés - liés à des questions de confort, comme l'isolation phonique. Le Centre a travaillé sur des ciments et une autre équipe sur le bois dit « rétifé ». Rétifié signifie durci selon un traitement thermique particulier appelé « réтификаtion » dans lequel certaines chaînes moléculaires subissent un réarrangement (le nom vient du latin *rete*, filet). Un brevet a été déposé.

Comme le résultat est un bois hydrophobe et imputrescible, il peut non seulement être utilisé comme tel, avec des qualités de résistance bien supérieures au bois

traditionnel, mais aussi entrer dans la fabrication de matériaux de construction. L'idée était en effet d'élaborer un composite de bois et de ciment ou de plâtre, mais le bois naturel se révélait impropre à cette combinaison car trop sensible à l'humidité. Le bois rétifé ne présente pas cet inconvénient.

Encore faut-il par la suite trouver le meilleur dosage. Des études sont donc menées à la fois sur la tenue en cas d'exposition aux intempéries et sur le processus de fabrication (temps de prise, etc.) Dans ces recherches, l'équipe est aidée par le département Mécanique des Matériaux du centre Sciences des Matériaux et des Structures pour l'évaluation des caractéristiques mécaniques.

Ingénieur pharmacien et vice versa

Fort de son double diplôme acquis à Lyon et Saint-Étienne, Julien prépare chez Pierre Fabre à Barcelone la mise en place d'une nouvelle ligne de production d'un médicament injectable, qui permettra de traiter un certain type de cancer. Chef de projet industriel, il est grâce à son parcours original l'interlocuteur de tous.

Avec un père pharmacien et une mère responsable de production, Julien Ghysels ne pouvait manquer d'être tenté par un double diplôme d'ingénieur pharmacien. « *Baignant dans ces deux cultures* », comme il le dit lui-même, il a commencé par suivre ses études de pharmacie à Lyon avant d'entrer parallèlement à l'École des Mines de Saint-Étienne. Au total six années de formation, les stages de fin d'études de l'un et l'autre cursus étant confondus. Une trentaine d'élèves acquièrent ainsi chaque année ces deux diplômes, dont une bonne moitié « font » pharmacie à Lyon, faculté jumelée avec différentes écoles d'ingénieurs de choix, en France et à l'étranger.

Un kilo de produit pour 7 000 flacons

A l'École des Mines, il choisit bien entendu l'option de troisième année consacrée au génie des procédés. Originaire du sud-ouest, ce que sa pointe d'accent indique mieux que son nom, Julien fait son stage de fin d'études chez Pierre Fabre à Pau, où il se consacre aux produits injectables et médicaments stériles. Sans attendre qu'il reçoive son diplôme, en septembre 2002, ce laboratoire lui propose un poste à Barcelone, où il se trouve aujourd'hui encore, en qualité de chef de projet industriel.

« *Toute la recherche et la production se trouvent en France*, explique-t-il, *sauf ce centre barcelonais de recherche de galénique, c'est-à-dire de mise en forme médicamenteuse, spécialisé en microencapsulation. C'est ici que je prépare pour 2006 la sortie d'un nouveau médicament injectable au principe actif très coûteux, d'abord pour l'Espagne puis*



Julien Ghysels, ingénieur-pharmacien : une double légitimité.

DR

rapidement pour l'Europe entière. » Les lots pilotes sont au point, les autorisations en cours, reste donc à définir et mettre en place le procédé industriel et la ligne de production pour fournir le moment venu la quantité nécessaire à toute l'Europe. Une quantité minimale au demeurant, puisque un kilo de ce produit, qui libérera un principe actif pendant trois mois, permettra de réaliser environ 7 000 flacons unitaires.

Julien fait donc le lien entre l'ingénierie et la recherche-développement. Outre les dix-sept personnes qui travaillent avec lui, il peut s'appuyer sur l'ingénierie Pierre Fabre à Castres.

« *De plus, la plupart des sites de fabrication du groupe Pierre Fabre se sont démenés pour nous aider dans le transfert d'échelle – le "scale up", comme nous disons – du procédé de fabrication en mettant à notre disposition du matériel type industriel et des ressources humaines*, explique-t-il. *C'est le gros avantage de Pierre Fabre, un laboratoi-*

re à taille humaine où tout le monde se sent impliqué par le projet de la filiale espagnole... »

Un profil très recherché

A l'en croire, le procédé pharmaceutique lui-même est très complexe. Il passe par plusieurs phases – émulsion, évaporation, séparation, tamisage – qu'il faut toutes rendre automatiques et industrialisables. Essentiellement du génie des procédés consacré aux liquides, donc. Or, l'École n'est-elle pas plutôt en pointe sur les solides ? « *Dans le domaine de la recherche, sans doute, mais côté formation les élèves abordent un très large éventail de sujets rattachés aux procédés*, assure-t-il. *Le programme est dense et l'École, généraliste. Mes études à Saint-Étienne me servent énormément, car on y apprend notamment à s'adapter et à réfléchir ; si la base scientifique est indispensable, nous devons ensuite continuer à travailler pour passer de la théorie à la pratique... »*

Quant à sa situation au carrefour de deux métiers, Julien la vit très bien. « *Les ingénieurs me considèrent surtout comme un pharmacien, et vice versa* », remarque-t-il amusé, même s'il avoue sentir autour de lui « *une petite rivalité* » entre les deux métiers. « *Les pharmaciens jouissent d'une sorte de monopole*, précise-t-il, *mais il est vrai qu'ils ont prouvé leurs compétences, notamment en termes d'assurance qualité et même*

en production pure et dure. » Au sein de l'équipe projet, Julien Ghysels bénéficie d'une double légitimité.

Et l'avenir ? « *Pour l'instant je me consacre au monde de l'industrie pharmaceutique car la dynamique qu'elle génère et la richesse de ses métiers permettent une émulation permanente et un challenge journalier*, répond-il. *Je ne me fais pas de soucis pour évoluer dans ce secteur car notre profil y est très*

recherché. Et si un jour je décide de souffler un peu, grâce à mon vrai double diplôme j'ai la possibilité de m'installer comme pharmacien d'officine. Mais pour l'instant j'ai choisi l'industrie et je ne le regrette absolument pas. » D'autant, précise-t-il, que Barcelone est une ville très agréable, avec un riche patrimoine culturel à découvrir, ce qui évidemment ne gâte rien... ■

La santé aussi...

Le centre SPIN est devenu un partenaire actif du milieu médical, auquel il apporte notamment ses compétences dans le domaine de la modélisation.

Le génie des procédés a sa « nouvelle frontière » : l'ingénierie biomédicale et du vivant, les microsystèmes chimiques, la biomodélisation. Autant de sujets qui ouvrent des perspectives nouvelles à cette discipline en mettant à profit ses compétences dans la chimie et la modélisation. Elles apparaissent naturellement, au fil des questions que lui soumet le corps médical et sont parfois le fruit, sinon du hasard, du moins de rapprochements inattendus.

C'est ainsi que l'équipe « matériaux de construction », travaillant sur les poudres pour céramiques, a été amenée à s'intéresser aux ressemblances entre les propriétés de certaines de ces céramiques et celles des os humains. Le contact a été établi avec le Laboratoire de Biologie et de Biochimie des Tissus Osseux (LBBTO) de la faculté de Médecine de Saint-Étienne (unité INSERM) pour définir des sujets communs. Cette collaboration a permis de caractériser les consti-

tuants (ions carbonate) et les mécanismes intervenant dans la reconstitution osseuse par un biomatériau, en l'occurrence l'hydroxyapatite. Pourvu que la compatibilité soit suffisante avec les tissus humains, ces substances d'origine minérale pourront être utilisées comme substituts osseux, par exemple dans le traitement de cancers ou de l'ostéoporose. Une thèse est en cours à ce sujet.

SIDA, cancers et allergies

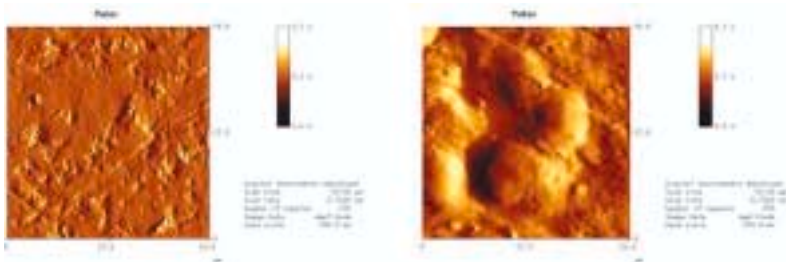
Plus inattendu, SPIN travaille aussi sur une modélisation des réponses immunitaires des organismes, c'est-à-dire sur l'interaction entre lymphocytes T et virus. De telles recherches s'appuient sur des modélisations très complexes, qui n'entrent évidemment pas dans la compétence du corps médical, mais qui ne sont pas d'une nature fondamentalement différente de celles menées sur les réactions chimiques

en milieu naturel. Le Centre est donc tout à fait qualifié en raison de ses connaissances, non seulement en chimie, mais aussi dans d'autres aspects du génie des procédés comme les phénomènes de transfert (diffusion d'un produit, par exemple polluant, dans un milieu). Une thèse est en cours sur la modélisation des réponses immunitaires de l'organisme à partir d'un traitement anti-SIDA. Ces recherches peuvent se révéler d'un apport extrêmement précieux pour la connaissance des cancers et des allergies.

SPIN travaille à la mise au point de biocapteurs miniaturisés pour des applications médicales comme le dosage du glucose. Ils sont basés sur l'emploi de polymères conducteurs. Il étudie aussi des biocapteurs à cellules entières (micro-algues) pour la mesure de toxicité globale et pour le dosage des pesticides.

Enfin, la compétence du Centre dans le domaine des poudres en fait un partenaire utile de l'industrie pharmaceutique : il mène des études sur la compression, l'enrobage et la dissolution des médicaments pour optimiser leur effet thérapeutique.

Du fait de toutes ces recherches conduites en collaboration avec le milieu médical ou biomédical, SPIN est très investi dans le développement du futur Centre Ingénierie et Santé. Alors que huit ou neuf thèses sont soutenues en moyenne chaque année, pas moins de cinq le seront l'an prochain sur des sujets préfigurant le CIS. ■



Sur un support d'hydroxyapatite vierge (à gauche), on dépose et on fait naître des cellules osseuses (cultures ostéoblastes) ; à droite, le résultat après l'expérience, qui a réussi de façon satisfaisante. Photo prise à l'AFM (Atomic Force Microscopy) à l'École des Mines de Saint-Étienne.

DR

Les événements de l'année à l'Ecole nationale supérieure des mines de Saint-Etienne

Sciences des matériaux et des structures

Les technologies micro et nano en lien avec le biomédical

• 6 mai
Saint-Etienne, Espace Fauriel

Sciences des procédés industriels et naturels

35èmes journées de calorimétrie et d'analyse thermique – Journées de l'AFCAT

• 11-13 mai
Saint-Etienne, Espace Fauriel

Sciences des matériaux et des structures

Osons le chrome ! – 4^{ème} conférence internationale sur le chromage

• 24-27 mai
Saint-Etienne, Espace Fauriel

Sciences des procédés industriels et naturels

CRISTAL 3 – Congrès sur la cristallisation industrielle et la précipitation

• 24-25 novembre
Saint-Etienne, Espace Fauriel

Sciences des matériaux et des structures

Imagerie 3D en science des matériaux

• Automne 2004

Pour mémoire :

Génie industriel et informatique

INCOM – 12th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing

• Juin 2006

Sciences des procédés industriels et naturels

Congrès de la Société Française de Génie des Procédés (SFGP)

• 2007

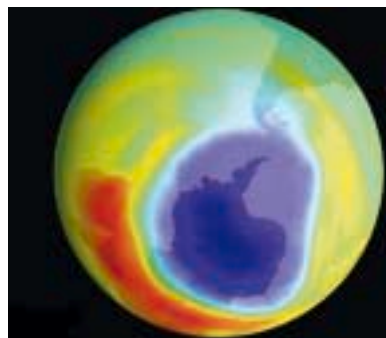


Questions de cours

Vous pensez être incollable sur le pétrole, les gaz ou les métaux ? En marge de notre dossier sur le génie des procédés, voici de quoi rafraîchir vos connaissances...

• Atmosphère... Atmosphère !

• Ce n'est pas le dioxyde de carbone (CO₂) qui possède l'**effet de serre** le plus important. A masse égale relâchée dans l'atmosphère, le méthane a un pouvoir d'absorption du rayonnement 56 fois supérieur, l'ozone 1 200 fois et les CFC (jusque récemment gaz propulseurs des aérosols, heureusement interdits désormais) entre 4 000 et 8 000 fois.



Le trou dans la couche d'ozone, au dessus de l'Antarctique : déjà la taille de l'Australie.

• **L'ozone** est bénéfique ou maléfique, selon qu'il intervient par ses propriétés physiques ou chimiques : en haute altitude, la fameuse « couche d'ozone » protège la basse atmosphère de l'action nocive, voire mortelle, des rayons UV de la lumière solaire ; mais au niveau du sol, c'est un gaz irritant, facteur important de pollution urbaine.

• Quel est le troisième gaz par ordre d'importance dans l'atmosphère ? L'**argon**, qui n'en représente pourtant que 1%. Quel est le plus lourd ? Le **radon**, qui est radioactif et 8 fois plus dense que l'air.

• La décomposition des hydrates de **méthane** est une source pré-occupante de production de ce gaz à effet de serre dans l'atmosphère, mais ils ne sont pas seuls en cause : les flatulences des ruminants seraient responsables de 15% de la teneur de l'atmosphère en méthane.

• On a peu de pétrole, mais...

Le pétrole provient de la dégradation de microorganismes et végétaux piégés dans des sédiments. Son processus de formation dure des millions d'années. De nos jours encore, du pétrole continue à se former, mais tellement lentement au regard de la consommation humaine !

• Etymologie élémentaire

Le nom des éléments du tableau périodique de Mendéleïev témoigne quelquefois des conditions de découverte ou des propriétés de ces éléments.

• **L'antimoine** (Sb) : la légende prétend que le moine alchimiste Basile Valentin utilisa de la poudre de minéraux contenant de l'antimoine comme purgatif, mais le résultat fut un nombre très élevé de décès dans le monastère ; d'où le nom d'« anti-moine »... Mais plus vraisemblablement l'origine serait à chercher dans la langue arabe.

• **L'argon** (Ar) : du grec argos, inactif, paresseux ; le nom témoigne du caractère inerte de ce gaz qui ne subit pas de transformation chimique.

• **Le cobalt** (Co) : de l'allemand Kobold (lutin) ; la production malaisée de ce métal était attribuée aux mauvais esprits qui, disait-on, sabotaient le travail des mineurs en ensorcelant le minerai.

• **Le gallium** (Ga) : du latin gallus, coq, en l'honneur de son découvreur Lecoq de Boisbaudran.

• **Le polonium** (Po) : en l'honneur de la Pologne, patrie de Marie Curie, qui découvrit cet élément.

• **Le titane** (Ti) : ce métal particulièrement résistant doit son nom aux Titans de la mythologie grecque.