

On pensait que les couches passives, en raison de leur extrême minceur, devaient être amorphes, sans ordre atomique à grande distance. Toutefois les études les plus récentes ont montré que les films peuvent être cristallisés. Ainsi les observations au microscope à effet tunnel, où l'on balaye la surface des échantillons avec une pointe très petite, qui échange des électrons avec l'échantillon par l'effet tunnel, ont apporté des informations essentielles sur la croissance des couches d'oxydes sur des substrats monocristallins.

CRISTAUX PROTECTEURS

La figure, par exemple, est celle de la structure atomique de la couche passive formée sur une électrode de nickel monocristallin. La périodicité observée indique que cette couche était le plan cristallographique le plus compact de l'oxyde de nickel. Dans de telles images, on observe des défauts structuraux : marches monoatomiques, crans, lacunes, et joints... La croissance de l'oxyde s'effectue selon une direction inclinée de huit degrés par rapport au plan cristallographique, ce qui conduit à un système de terrasses et de marches, et à l'existence de fluctuations de l'épaisseur du film. Ce type de croissance minimise les contraintes entre les réseaux de l'oxyde et du métal.

Ce cas n'est pas général. Pour le chrome, par exemple, la couche passive n'est pas constituée de grands cristaux, comme dans le nickel ; les très nombreux «nanocristaux» formés sont reliés par de l'hydroxyde de chrome, qui forme un liant, minimisant les défauts interfaciaux qui pourraient affaiblir la couche protectrice. Cette structure nanocristalline est sans doute la clef des propriétés exceptionnelles du chrome, connu pour son excellente résistance à la corrosion et utilisé, à ce titre, comme additif dans de nombreux alliages.

Comment l'industrie métallurgique utilisera-t-elle ces analyses ? Un succès a été obtenu dans le cas des aciers inoxydables ferritiques : la couche passive qui se forme quand ces alliages sont plongés dans un milieu qui contient des ions chlorures (l'eau de mer, par exemple) est de qualité bien inférieure à celle qui apparaît quand les mêmes alliages sont d'abord placés en milieu oxydant contrôlé, c'est-à-dire au contact de l'air ou de l'eau. On peut aussi faire vieillir les aciers ou alliages inoxydables dans ces milieux, ce qui augmente la concentration en ions chrome dans les couches passives, avant de les employer en milieu chloruré.

Philippe MARCUS
CNRS, École nationale supérieure
de chimie de Paris

La caulerpe

Cette algue aurait des effets bénéfiques, en assainissant les fonds de la Méditerranée.

Aurait-on trop vite dénigré *Caulerpa taxifolia* ? Depuis quelques années cette algue unicellulaire géante colonise le littoral Nord-Ouest de la Méditerranée et de l'Adriatique, où elle prolifère par endroits, au détriment d'autres espèces végétales. D'après les résultats d'une étude publiée dans la revue *Nature* par les chercheurs de l'Observatoire océanologique européen, cette algue serait un agent antipollution.

À la différence des autres algues, la caulerpe a des rhizoïdes, l'équivalent des racines des plantes supérieures. Ces rhizoïdes soutirent des substances nutritives aux fonds marins et l'algue prospère indépendamment des nutriments dissous dans l'eau de mer.

La surface des rhizoïdes est couverte de bactéries, et d'autres prolifèrent dans son volume interne. Certaines ressemblent aux bactéries symbiotiques qui assurent la fixation de l'azote dans les légumineuses (la luzerne, le haricot, par exemple). Jean Jaubert et ses collègues de l'Institut océanographique de Monaco ont observé que les pseudo-racines de la caulerpe absorbent du phosphore minéral et des composés organiques, notamment de l'azote et du carbone, et des acides aminés dissous. Ces substances, abondantes dans les zones où prolifère l'algue, proviennent des rejets industriels ou domestiques ; elles s'accumulent dans

les sédiments et dans certaines roches poreuses. Cette faculté d'assimiler des substances nutritives inutilisées par les autres algues expliquerait l'abondance de la caulerpe et la disparition d'une grande partie de la flore, devenue inadaptée. *Caulerpa taxifolia* comblerait les vides laissés par d'autres végétaux éliminés ou fragilisés par la pollution, tels les herbiers de posidonies.

Pourquoi cette algue prolifère-t-elle aujourd'hui ? Les algues du genre *Caulerpa* prospèrent dans les eaux chaudes habitées par des coraux et pauvres en nutriments ; leurs rhizoïdes et leur structure unicellulaire les avantagent par rapport aux autres algues car ils facilitent les échanges nutritifs. Plusieurs espèces de caulerpes, dont *Caulerpa taxifolia*, vivent dans la mer Rouge et ont sans doute migré vers la Méditerranée occidentale par le détroit de Suez. Le réchauffement climatique accélérerait leur expansion.

Ce n'est pas la première incursion des caulerpes dans le bassin méditerranéen : avant la crise climatique de la fin du Miocène, il y a sept millions d'années, elles faisaient partie de la flore commune et y prospéraient.

Comme de nombreuses plantes aquatiques, les caulerpes produisent des toxines, notamment la caulerpénine, à laquelle la faune ne semble pas sensible. Le nombre et les espèces de poissons vivant dans les prairies de caulerpes n'ont guère varié : Ils ne les «broutent» pas, mais se nourrissent des produits de leur dégradation.

Ainsi, grâce à leur aptitude à se développer sur des substrats imprégnés de matières organiques en décomposition, qui ne conviennent pas aux autres végétaux, les caulerpes assainiraient les fonds méditerranéens.

Marie-Thérèse LANDOUSY



Poulpe vivant au milieu de caulerpes.

Superphénix demain ?

Le surrégénérateur devenu réacteur de recherche devrait étudier l'élimination des déchets.

Dans les années 1970, la construction d'un surrégénérateur, *Superphénix*, a été lancée sur le site de Creys-Malville, dans l'Isère. En 1994, après huit ans d'un fonctionnement ponctué d'incidents et d'arrêts, le gouvernement français en a autorisé le redémarrage dans un but exclusif de recherche. Une commission d'experts a examiné les objectifs proposés : outre une attention soutenue à la sécurité, elle préconise l'étude prioritaire de la destruction des déchets que sont les actinides mineurs (américium, neptunium, curium).

Lorsque la décision de construire le surrégénérateur *Superphénix* a été prise, ses promoteurs pensaient qu'il serait le premier d'une longue série. Les surrégénérateurs, ou réacteurs à neutrons rapides, auraient remplacé à terme les centrales nucléaires à eau pressurisée, qui constituent le parc français actuel. L'État français (et *Électricité de France*) souhaitait qu'à moyen terme la production d'énergie électrique soit indépendante du pétrole, dont l'approvisionnement et les cours semblaient incertains. En outre, les économistes prévoyaient une telle augmentation de la consommation d'énergie que les centrales nucléaires à eau pressurisée seraient vite insuffisantes, et que l'uranium qu'elles utilisaient deviendrait, pensait-on, comme le pétrole à l'époque, une ressource rare.

Avec des surrégénérateurs, la source d'énergie paraissait quasi inépuisable. Dans *Superphénix*, l'énergie est produite par la fission du plutonium 239, et non d'uranium 235. On introduit en outre de l'uranium 238, l'isotope le plus abondant, non fissile, dans le cœur du réacteur où il est transformé en plutonium : le surrégénérateur produit plus de plutonium qu'il n'en consomme. Du plutonium était disponible pour démarrer le cycle : c'est un déchet produit par les centrales à eau pressurisée.

Une vingtaine d'années plus tard, le constat s'impose : les surrégénérateurs ne remplaceront pas de sitôt les autres types de centrales. Les experts les plus optimistes fixent au milieu du siècle prochain la construction en série de ces nouveaux réacteurs. La consommation d'énergie a en effet augmenté moins vite que prévu. En France, le programme de construction de centrales nucléaires a même été ralenti. Le traitement du plutonium est complexe et coûteux : son utilisation ne deviendrait rentable que si les cours des autres matières premières augmentaient considérablement. Comme les réserves de pétrole et de gaz naturel ont été réévaluées à la hausse et que les cours restent bas depuis 1990, les autres sources d'énergie ne se sont pas taries. L'uranium est aussi abondant et bon marché.



Superphénix, à Creys-Malville : projet inutile ?

En outre, les ingénieurs ne maîtrisent pas encore la technique nécessaire pour faire fonctionner un surrégénérateur tel que *Superphénix* : depuis l'obtention de la pleine puissance en décembre 1986, l'installation a été arrêtée pendant une durée cumulée de plus de six ans, pour des incidents mettant en cause la sécurité. L'utilisation de sodium liquide, qui réagit violemment avec l'air et l'eau, comme fluide caloporteur, est à l'origine de la plupart des difficultés rencontrées.

LE PROGRAMME DE RECHERCHE

En juillet 1994, *Superphénix* n'a obtenu l'autorisation de redémarrer que pour réaliser un programme de recherche. Celui-ci comprend trois objectifs : démontrer la capacité d'un réacteur à neutrons rapides à produire de l'électricité à un niveau industriel, évaluer le fonctionnement de ce type de réacteur en situation de sous-génération, où il consomme du plutonium, et étudier ses possibilités de destruction des déchets de grande durée de vie.

Le gouvernement a nommé, en octobre 1995, une commission scientifique, présidée par Raimond Castaing, pour évaluer la crédibilité de ce programme de recherche. Elle a rendu son rapport en juin 1996. Celui-ci insiste sur l'importance de la recherche fondamentale : les études réalisées avec *Superphénix* auraient pour objectif l'acquisition de connaissances de portée générale, applicables éventuellement dans d'autres types de réacteurs. *Superphénix* ne devrait pas avoir de successeur avant une cinquantaine d'années : même si l'on construit un jour des surrégénérateurs au plutonium, ils seront très différents. Dans cette optique, la sûreté de fonctionnement est prioritaire sur la production d'énergie : l'analyse des incidents et les éventuels arrêts d'exploitation priment sur la recherche de puissance ou de durée de fonctionnement qui prouveraient la capacité du réacteur à fonctionner industriellement.

Hélas, *Superphénix* n'est pas construit comme un réacteur de recherche : son utilisation dans ce but est malaisée. La commission propose donc de n'utiliser *Superphénix* que pour les expériences impossibles à réaliser dans d'autres installations. La construction d'un nouveau réacteur de recherche, qui remplacerait *Phénix*, en fonctionnement depuis 1973 à Marcoule, lui semble souhaitable.

Le deuxième et le troisième volets du programme de recherche portent sur l'utilisation des surrégénérateurs pour l'élimination des déchets radioactifs. La commission Castaing les a évalués en référence à la loi de 1991 sur le traitement et le stockage des déchets