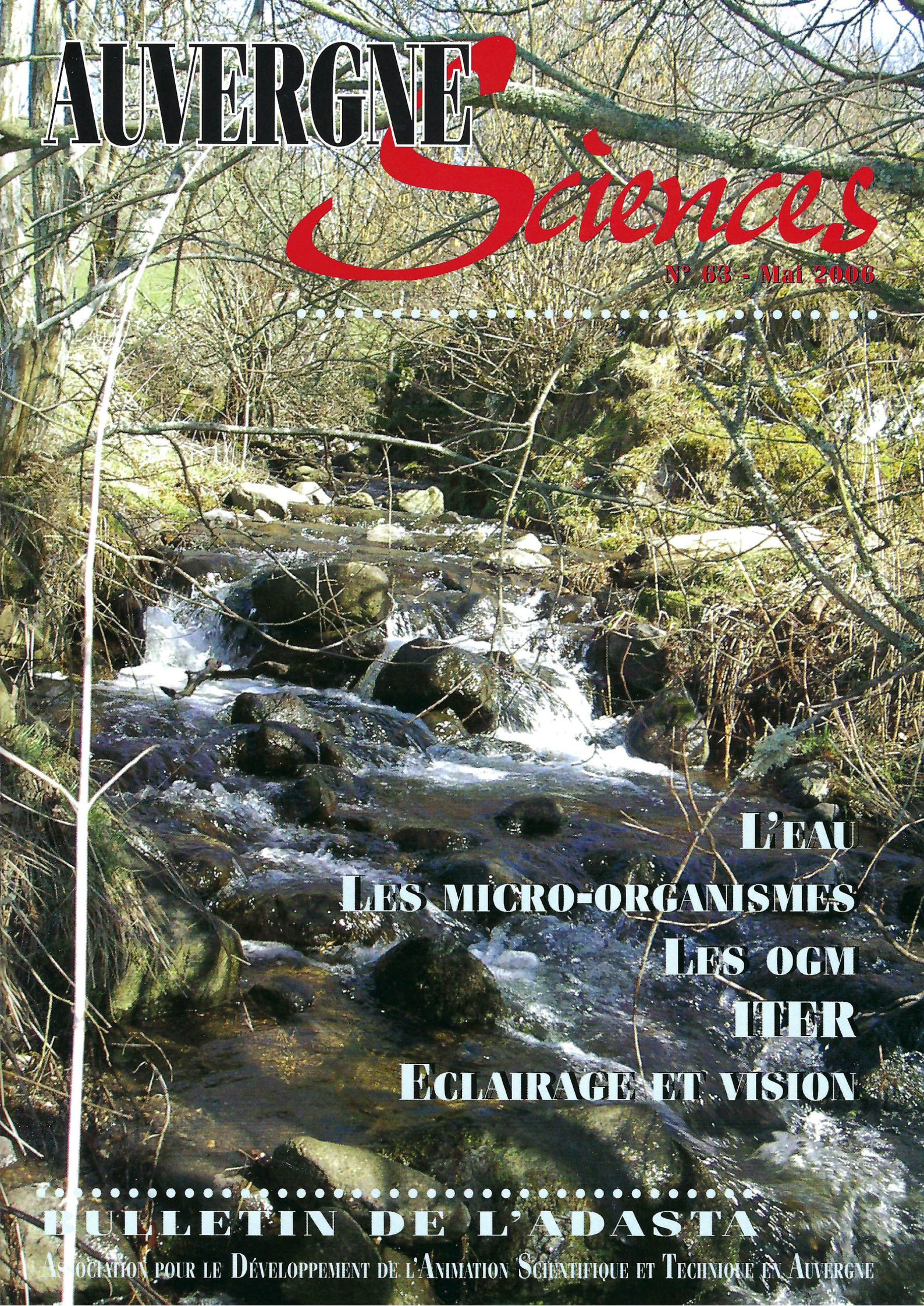
AUVERGNE Sciences

N° 63 - Mai 2006



L'EAU

LES MICRO-ORGANISMES

LES OGM

ITER

ECLAIRAGE ET VISION

BULLETIN DE L'ADASTA

ASSOCIATION POUR LE DÉVELOPPEMENT DE L'ANIMATION SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE EN AUVERGNE

éditorial



Créée au printemps 1986 par une équipe de scientifiques, l'ADASTA a pour objectif de diffuser et promouvoir la culture scientifique et technique dans la région auvergne, notamment auprès des jeunes. J'ai eu le privilège et l'honneur de préparer avec Roland Jouanisson et quelques personnes les statuts de l'association il y a 20 ans.

Si au cours de cette période le contrat pour le développement scientifique et technique a bien été rempli, compte tenu de l'évolution des sciences, il fut plus difficile chaque année de trouver un équilibre budgétaire, difficulté que l'on retrouve dans la plupart des associations.

L'ADASTA poursuit en 2006 ses activités. La journée du 4 octobre aura pour thème :

20 ans d'ADASTA
Roland Jouanisson et l'aventure de la culture scientifique et technique
au coeur de l'ADASTA,
Regards sur l'oeuvre d'un pionnier

Un évènement dont le programme sera communiqué prochainement.

Les internautes trouveront un nouveau logo et une arborescence du site Internet de l'association .La refonte du site qui reste sous la responsabilité de Bernard Ragout, fut réalisée par trois étudiants préparant le Diplôme Universitaire et Technologique en Services et Réseaux de Communication sous la responsabilité de leurs professeurs. J'étais membre du jury le 15 avril à Vichy pour la soutenance de leur projet.

L'ADASTA poursuit des partenariats avec :

- ***la Maison de l'Innovation** située 23 place Delille pour l'exposition «**1, 2, 3... Soleil !**». du 15 février au 30 novembre 2006*
  le 7 juin les jeunes pousses présentent au public le cadran solaire
  de juin à octobre l'équipe d'astronomie présente le planétarium avec sa nouvelle bulle gonflable
- ***le Rectorat de Clermont** qui fait de l'eau une priorité académique pour 2006 « **Eauvergne-Eaumonde** »*

Les membres de la commission ADASTA chargés d'étudier ce sujet fourniront des documents scientifiques sur l'eau à l'attention du public soit par courrier postal soit par Internet (blandine.coront-ducluzeau@ac-clermont.fr (rectorat) ou adasta@wanadoo.fr)
Ces thèmes seront complétés comme les années précédentes par la Fête de la Science (9 au 15 octobre) et le Forum des A
Associations (14 et 15 octobre).

Bonne lecture à tous.

Le Président
Jean-Claude CAPELANI

Merci à nos sponsors

AUVERGNE CONSEIL RÉGIONAL D'AUVERGNE
cea
CONSEIL GENERAL DU PUY-DE-DOME
ministere jeunesse education recherche
ministere delegue recherche et nouvelles technologies
MICHELIN
VILLE DE CLERMONT FERRAND
IMPRIMERIE PORÇU
EDF Electricité de France

Comité de rédaction de la Revue Auvergne-Sciences
Président : *Paul Avan*
Rédacteur en chef : *Philippe Choisel*
Membres : *Jocelyne Allée, Nathalie Andréoletti (membre correspondant Côte d'Or), Georges Anton, Vincent Barra, Jean-Claude Capelani, Jean Chandezon, Luc Dettwiller, Paul-Louis Hennequin, Michel Naranjo, Annie Ville*

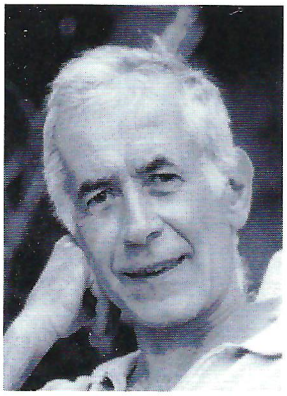
Photo de couverture : *crédit - Jean-Claude Capélani*
Impression : *Imprimerie Porçu - Cournon d'Auvergne*

sommaire

Découverte d'une circulation d'eau à MOULET-MARCENAT 3
Méthode de polarisation spontanée en hydrogéologie des terrains volcaniques 6
Les Micro-Organismes 9
Les enjeux des plantes OGM 11
ITER 14
Eclairage et vision 28
Infos 35

© Toute reproduction partielle ou totale interdite. Les articles publiés sont de la responsabilité exclusive de leurs auteurs

Dossier



Découverte d'une circulation d'eau souterraine à Moulet-Marcenat (63)

par Maurice AUBERT,

Professeur émérite de l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand, membre de l'ADASTA

Suite à la conférence du 12/04/06 à l'ADASTA avec Mme Celle-Jeanton, Maître de conférence et M. Bertrand, Doctorant sur le thème « L'eau en Auvergne : Développement et Perspectives »

L'EAU SOUTERRAINE DANS LA CHAINE DES PUYS

Traversant aisément les formations volcaniques perméables qui constituent la Chaîne des Puys, les eaux pluviales retrouvent sous ces produits les anciens talwegs creusés dans le socle cristallin relativement imperméable. Il s'ensuit une importante circulation d'eau souterraine selon le réseau hydrographique prévolcanique. Cependant le relief volcanique qui s'est rajouté au relief du socle préexistant crée une barrière montagneuse de 30 km de long et de 100 m de haut environ, ce qui augmente notablement les précipitations venant des vents d'ouest. Alors qu'il pleut en moyenne 600 mm par an en Limagne, la pluviométrie atteint 1000 mm sur le plateau à 800 m d'altitude, 1800 mm au sommet du Puy de Dôme. La circulation souterraine limite l'évaporation et la vitesse d'écoulement, de telle sorte que les sources émergeant sous les coulées peuvent être très puissantes et surtout constantes.

Du fait de la forte subsidence de la Limagne depuis l'oligocène (jusqu'à 3 km de dénivelé entre le plateau cristallin et le fond de la Limagne), le réseau hydrographique sur le côté est de la Chaîne des Puys a la particularité de former des talwegs très encaissés où l'eau circule dans une section dont la largeur et l'épaisseur sont de l'ordre du décamètre alors que la profondeur peut dépasser une centaine de mètres. D'où la difficulté de détecter le parcours de ces circulations souterraines.

En ce qui concerne le bassin versant de Volvic, la ressource a été découverte il y a 80 ans environ par un puits vertical creusé à 80 m de profondeur au lieu-dit le Goulet de Volvic. Un véritable cours d'eau souterrain circule dans les fissures d'une coulée basaltique, le socle granitique étant à un niveau plus profond encore. Une galerie à faible pente remontante fut creusée pour retrouver cet écoulement qui jaillit d'une crevasse avec un débit de l'ordre de 350 l/s après un creusement de 685 m de long. L'eau recueillie, faiblement minéralisée, est d'excellente qualité.

Une étude hydrogéologique approfondie réalisée en 1988 à l'occasion du projet autoroutier Clermont-Périgueux apportait une configuration plus précise du réseau hydrographique en amont du Goulet de Volvic, essentiellement le long de la D 941 et autour de la Nugère. Une période de relatif déficit pluviométrique débute l'année suivante et une partie de la commune de Volvic connaît des problèmes sérieux d'alimentation en eau. Le SMUERR (Syndicat Mixte des Utilisateurs de l'Eau de la Région Riomoise) décide alors de faire appel à une méthode de prospection géophysique que je venais de mettre au point, la méthode PS, pour implanter un nouveau forage de production.

LA METHODE PS

Cette appellation abrégée signifie la mesure et l'interprétation des potentiels électriques spontanés mesurables dans le sol. On parle aussi de potentiels de polarisation spontanée pour rappeler l'origine de ces potentiels (en anglais SP de Self-Potential). La méthode PS est connue en exploration minière et pétrolière, mais n'était pratiquement pas utilisée en recherche hydrogéologique.

Ces potentiels PS sont créés par électrofiltration, phénomène déjà analysé au XIXème siècle en particulier par Helmholtz, qui a montré que la circulation d'un fluide à travers un milieu poreux saturé crée une différence de potentiel entre l'amont et l'aval de la circulation proportionnelle à la différence de pression hydraulique. En terrain volcanique, l'eau météorique s'infiltre dans le terrain poreux non saturé constitué par les coulées et les scories jusqu'au socle imperméable, ou le niveau piézométrique quand il existe. Dans ce type de terrain à forte résistivité électrique (plusieurs milliers d'ohm.mètres), tout se passe comme si le léchage des grains par les gouttes d'eau développait une polarisation électrique verticale dans le sens du flux descendant (potentiels négatifs à la surface du sol, positifs à la base de la circulation). Les données d'une trentaine de forages ayant atteint le socle ont permis d'établir une relation linéaire entre

les variations de potentiels et les variations d'épaisseur du terrain non saturé. Sous certaines conditions non développées ici, on peut donc définir une surface appelée SPS qui est l'enveloppe du socle et du niveau piézométrique. Il s'ensuit que les talwegs SPS sont les talwegs du relief prévolcanique où circulent les eaux souterraines, les lignes de crête SPS sont les lignes de partage des eaux comme l'indique la carte SPS de la figure 1.

Quand la surface topographique est horizontale, les profils ou la carte PS indiquent directement ces talwegs et ces lignes de crête comme c'est le cas figure 3.

La mesure des potentiels PS consiste à relier deux électrodes impolarisables, l'une fixe appelée base où le potentiel est nul par convention, et l'autre mobile à un voltmètre de haute résistance interne au moyen d'un câble de faible section. On réalise ainsi des profils de mesures à une vitesse de l'ordre du kilomètre à l'heure. Tous ces profils reliés à une même base servent à établir une carte des potentiels PS qui est ensuite transformée en carte SPS où apparaîtront les talwegs et les lignes de crête.

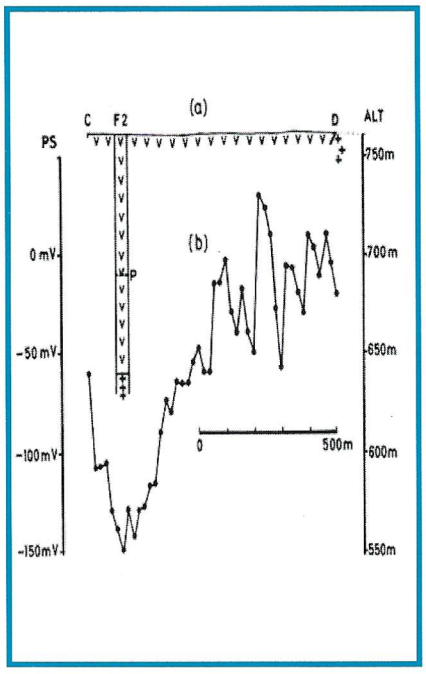


Figure 3 *- Coupe CD passant par le forage F2. (a) : nature des affleurements en surface et le long du forage (mêmes figurés que sur la figure 2) ; P indique le niveau piézométrique. (b) : profil PS. Le relief étant plat, F2 est implanté au minimum PS qui est aussi le minimum SPS.*

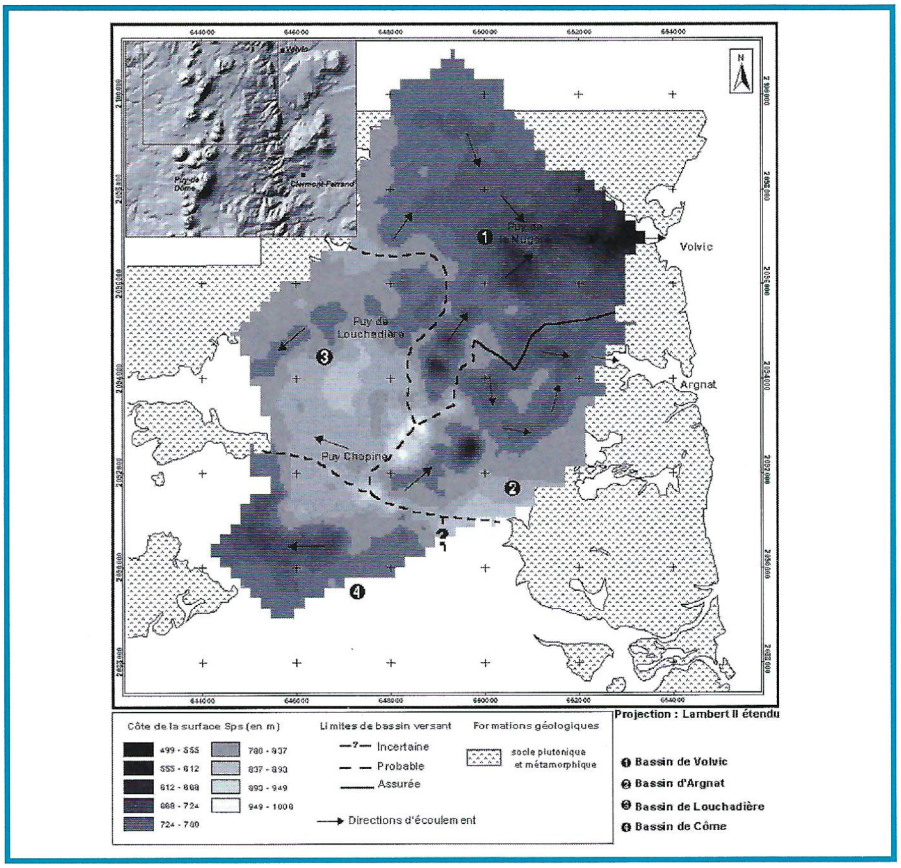


Figure 1*- Limites des bassins versants sous la pile des formations volcaniques et axes de circulation des eaux souterraines à partir de l'analyse de la surface SPS.*

RESULTATS DES DONNEES PS SUR LA PARTIE NORD DE LA CHAINE DES PUYS

La partie nord de la Chaîne des Puys bénéficie actuellement d'une excellente couverture géophysique par la méthode PS, à partir d'une quinzaine de campagnes de prospection effectuées sur une période de 12 ans (1987-1999). Toutes ces mesures ont pu être réalisées grâce aux contrats passés avec des organismes publics ou privés et à la participation de nombreux étudiants dans le cadre de travaux de thèse. L'analyse couplée au sein d'un système d'information géographique (SIG) de l'ensemble des données altimétriques, PS et des forages disponibles dans la partie nord de la Chaîne des Puys a permis d'établir une carte d'isopotentielles de la zone d'étude et de modéliser la surface géophysique SPS. L'analyse de cette discontinuité géophysique conduit à définir des axes de drainages préférentiels des eaux souterraines (de quelques dizaines de m de large au maximum) et des lignes de partage des eaux de ce secteur, qui déterminent quatre bassins versants principaux : Volvic et Argnat à l'est, Louchadière et Côme à l'ouest (fig.1).

EXEMPLE DU FORAGE DE MOULET-MARCENAT

Les villages du haut de la commune de Volvic (fig.2) souffraient d'un manque de ressources depuis plusieurs années et surtout à partir de la période de sécheresse de 1989. Une première campagne de mesures (profil AB, fig.2) suivi d'un forage de reconnaissance F1 au lieu-dit les Goulots, situé dans le périmètre de protection du Goulet de Volvic, avait permis dans un premier temps de découvrir l'existence d'une importante circulation vers 150 m de profondeur. Ce résultat conduisait à émettre l'hypothèse, nouvelle à l'époque, qu'une partie des eaux du Goulet de Volvic transitait sous le massif de la Nugère dans un talweg encaissé où le socle est à 170 m de profondeur. Mais il fallait pour implanter un forage de production trouver un site à l'extérieur du périmètre de protection (fig.2).

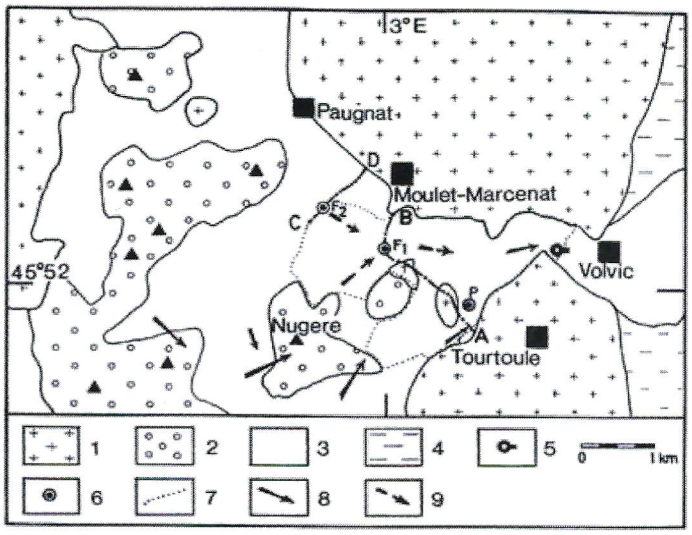


Figure 2 *- Situation de l'étude hydrogéologique de Moulet-Marcenat. (1) : socle ; (2) : scories ; (3) : coulées ; (4) : sédimentaire ; (5) : captage du Goulet de Volvic ; (6) : forages ; (7) : périmètre de protection ; (8) : circulation d'eau souterraine reconnue par forages ; (9) : circulation supposée d'après les mesures PS (Aubert et al., 1991).*

A la suite d'une campagne de mesures autour de ce périmètre (profil CD, fig.2 et fig.3), un autre site favorable est découvert sur le territoire de Moulet-Marcenat (fig.2), et donne lieu à un premier forage de reconnaissance F2 où une circulation d'eau est trouvée après des difficultés d'éboulement à 80 m de profondeur. Le socle est à la profondeur 115 m. Une prospection plus détaillée du site a abouti à proposer l'implantation d'un second forage à 50m au sud du premier, du coté le plus abrupt du talweg. Lors d'autres expériences, on avait remarqué en effet que pour un talweg à pentes dissymétriques, le minimum PS est déporté vers la pente la plus faible par rapport au talweg. Dans les nouvelles prospections, cet écart est aujourd'hui analysé en tenant compte de la dissymétrie du profil PS.

Le niveau d'eau est mesuré à 72 m mais la circulation la plus importante doit se situer entre 100 et 110 m dans les scories grossières. Ce forage s'éboule. Après deux tentatives pour le réaléser, il est décidé d'en faire un autre à 10 m du premier qui sera le forage d'exploitation.

Le débit mesuré à 82 m est fort et inattendu, de l'ordre de 70 l/s en théorie. Ce débit indiquerait la présence d'une importante circulation venant du nord-ouest qui a été confirmée par la suite (fig.1 et 2). Cet exemple illustre bien, d'une part le degré de précision spatiale nécessaire pour arriver à capter l'essentiel de la ressource, d'autre part que la méthode PS ne produit pas forcément en première analyse un résultat « clef en main ». Depuis 1991, l'eau est pompée à 80 m de profondeur environ avec un débit limité volontairement à 10 litres par seconde ; sa qualité est parfaite.

Il s'agit donc à notre connaissance du premier forage de production implanté selon cette nouvelle méthode. Ce résultat, obtenu après une dizaine d'années d'études sur le sujet, doit beaucoup au soutien constant de Camille Bertrand, président du SMUERR, à qui je rends hommage.

REFERENCES

[1] Aubert M. et al., 1991. Application de la méthode de polarisation spontanée à la découverte des circulations d'eau souterraine en terrain volcanique. C.R.Acad.Sc.Paris, série II, 312, n° 3 , 325-330.

[2] Aubert M., 2003. La méthode de polarisation spontanée en hydrogéologie des terrains volcaniques. Revue des Sciences de l'Eau, vol.16, n° 2, 219-235.

INSCRIPTION SUR UNE PLAQUE SITUÉE À L'ENTRÉE DU FORAGE

Le forage de Moulet-Marcenat est le premier ouvrage d'exploitation d'eau souteraine implanté grâce à la polarisation spontanée, nouvelle méthode de prospection géophysique mise au point par Maurice AUBERT, physicien à l'Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand.

L'eau est puisée à 80 mètres de profondeur dans une ancienne vallée comblée par des coulées volcaniques dont le fond atteint 115 mètres.

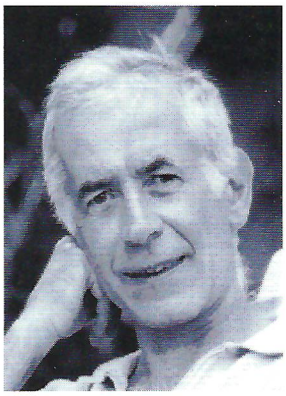
Il a été mis en service en 1991.



Moulet – Marcenat : débit

Dossier

La méthode de polarisation spontanée en hydrogéologie des terrains volcaniques



par Maurice AUBERT,

Professeur émérite de l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand, membre de l'ADASTA

Suite à la conférence du 12/04/06 à l'ADASTA avec Mme Celle-Jeanton, Maître de conférence et M. Bertrand, Doctorant sur le thème « L'eau en Auvergne : Développement et Perspectives »

GENERATION DES POTENTIELS PS

D'un point de vue hydrogéologique, les formations volcaniques se caractérisent par leurs aspects hétérogènes et non tabulaires, ce qui nécessite pour leur exploration géophysique des données à haute densité acquises avec des méthodes légères. C'est le cas de la méthode PS (de polarisation spontanée) récemment appliquée à la prospection des circulations d'eau souterraine en terrain volcanique et des limites des bassins versants. La méthode consiste à mesurer les différences de potentiels électriques naturels existant dans le sous-sol. A l'exception des zones minéralisées où d'importants phénomènes électrochimiques sont en jeu, les potentiels PS sont essentiellement dus aux transferts hydriques souterrains s'effectuant dans des terrains poreux ou microfissurés (potentiel d'électrofiltration) et dans une moindre mesure aux variations de concentration en solutés du sol (potentiel de diffusion). Quand un fluide percole à travers un milieu granulaire saturé, il apparaît une différence de potentiel ¢V entre l'aval et l'amont de cette circulation. Dans un milieu saturé et sous certaines conditions,

$$(1) \quad \Delta V = C_S \Delta P$$

où ΔP est la différence de pression contrôlant l'écoulement et C_s une constante de couplage (en V / Pa) qui inclut les caractéristiques physico-chimiques du fluide et un potentiel dit de double couche rendant compte de la répartition des charges électriques à l'interface entre le milieu solide et le fluide. Un des paramètres influençant le plus le potentiel d'électrofiltration est la résistivité électrique du fluide.

La modélisation des signaux PS dus à l'électrofiltration est encore un sujet de controverse à propos de la source des potentiels attribuée essentiellement, soit à la circulation de l'eau dans la zone saturée, soit à la percolation de l'eau s'infiltrant dans la zone vadose. Dans les deux cas, on explique la polarisation du terrain en admettant que l'eau infiltrée dans un terrain poreux de forte résistivité électrique est déjà partiellement ionisée. La circulation de l'eau dans les canalicules séparant les grains de silicate développe une différenciation ionique par le fait que les ions négatifs sont retenus à la surface des grains alors que les ions positifs sont entrainés vers l'aval de la circulation. La polarisation est donc dirigée dans le même sens que le courant. D'un point de vue théorique, rien ne s'oppose à considérer que les deux sources interviennent simultanément, mais l'une peut devenir selon le cas prépondérante par rapport à l'autre. En ce qui concerne la prospection hydrogéologique en milieu volcanique, la modélisation basée sur l'infiltration dans la zone vadose explique l'ensemble des données disponibles et c'est donc celle que nous exposerons sans pour autant rejeter l'autre hypothèse. Nous avons développé deux modèles, l'un appelé modèle empirique SPS, l'autre appelé modèle polarisé.

LE MODELE EMPIRIQUE SPS

Si le milieu non saturé n'est pas tabulaire, il apparaît à la surface du sol des différences de potentiel entre stations à l'aplomb desquelles l'épaisseur de ce milieu n'est pas identique. Plus précisément, la comparaison des données PS et des données de forage acquises dans la recherche des écoulements souterrains en domaine volcanique a mis en évidence une corrélation linéaire entre l'amplitude V de l'anomalie négative mesurée en une station et l'épaisseur E du milieu non saturé à son aplomb. Pour un terrain homogène et de résistivité plus élevée que le substratum, on définit une surface SPS par l'équation suivante :

$$(2) \quad H(x,y) = h(x,y) - V(x,y) / K - E°$$

où H est l'altitude de la surface SPS, h l'altitude de la station de mesure, E° l'épaisseur du terrain non saturé à l'aplomb de la station de référence où le potentiel est nul par convention, K le coefficient de proportionnalité entre V et E exprimé en mV/m (Fig.1).

La valeur de K varie selon la nature du terrain, allant d'après notre expérience de -1mV/m pour des terrains anciens altérés à – 7 mV/m pour des terrains récents. Dans ce modèle, SPS est la surface équipotentielle zéro, les autres équipotentielles se

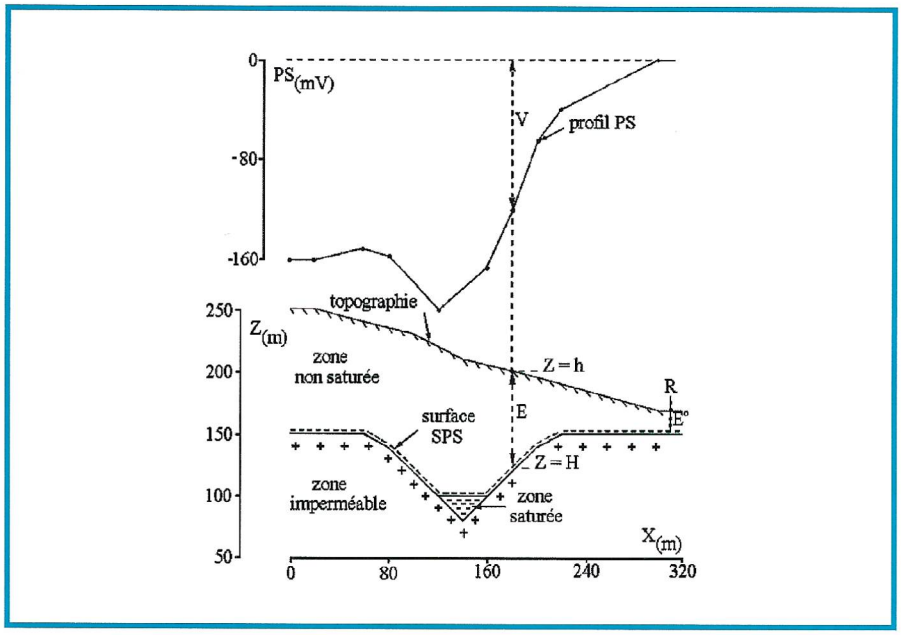


Figure 1 *: Définition de la surface SPS du modèle empirique.*

déduisant de SPS par translation. Les lignes de potentiel minimum sont situées à l'aplomb des lignes de plus grande épaisseur du recouvrement volcanique (talwegs) tandis que les lignes de potentiels maximum correspondent aux lignes de partage des eaux. Ces lignes sont en général peu modifiées par une variation de K, alors que leurs côtes dépendent directement de E°. Ce modèle est appelé empirique car il ne repose sur aucun processus physique particulier.

LE MODELE POLARISE

Ce modèle repose sur l'hypothèse que le milieu non saturé est polarisé électriquement. Les potentiels mesurés en surface sont dus aux distributions de charges électriques résultant de cette polarisation, charges négatives à la surface du sol, positives à l'interface entre le milieu non saturé et le milieu saturé (fig.2a). L'amplitude V de l'anomalie PS en un point M à la surface du sol est égale à :

$$(3) \quad V_{(M)} = - P \nabla_M \int_v 1/r \, dv$$

où r est la distance du point de mesure M au point intégral Q dans le volume v du milieu non saturé, P la polarisation verticale. La figure 2a montre un exemple théorique de volume non saturé, la figure 2b l'anomalie PS créée par ce volume selon l'équation (3). La courbe en pointillés de la figure 2a est l'interface appelée aussi SPS calculée par inversion des valeurs PS. Outre qu'il repose sur un processus physique, ce modèle polarisé appliqué par exemple à une structure à pentes dissymétriques rend compte du décalage qu'il y a entre le minimum PS et le talweg, soit ici 24 m pour une profondeur de 61 m. Ce décalage est rencontré dans les cas réels alors qu'il n'est pas pris en compte dans le modèle empirique SPS. Pour autant, la supériorité du modèle polarisé sur le modèle empirique n'est pas toujours assurée dans les exemples pratiques. En effet le calcul de l'interface SPS par inversion des valeurs PS fait intervenir pour chaque point de SPS l'ensemble des valeurs PS mesurées, ce qui d'une part alourdit les calculs, d'autre part et surtout crée des valeurs bruitées dues au bruit des mesures PS. Ce bruit est lui-même attribuable aux hétérogénéités du sous-sol, plus ou moins marquées selon les cas. On pourra dans la plupart des cas préférer le modèle empirique au modèle polarisé dont il constitue une première approximation souvent largement suffisante.

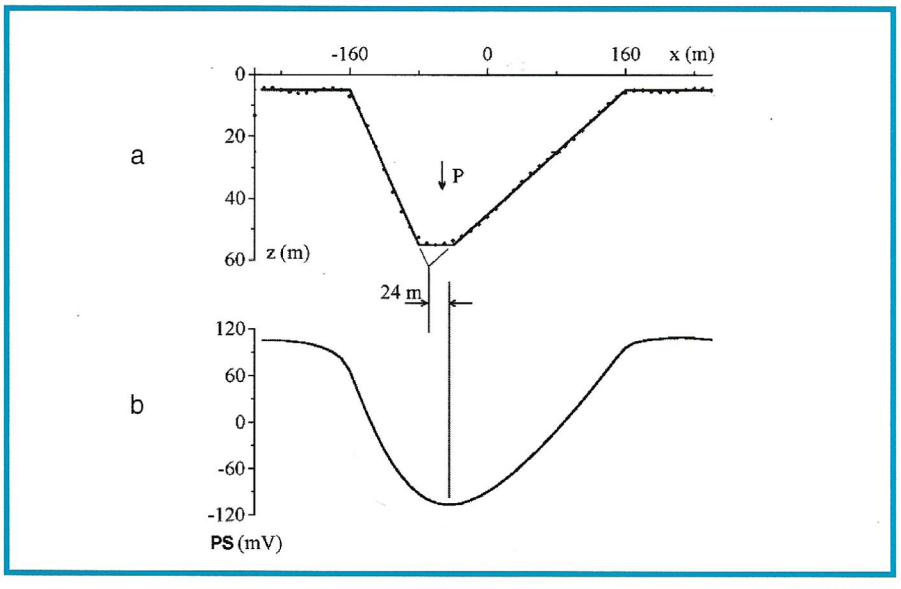


Figure 2 *: modèle polarisé (a) créant l'anomalie PS (b).*

EXEMPLE DE DETECTION D'UNE CIRCULATION D'EAU SOUTERRAINE

En règle générale, la résistivité électrique des formations volcaniques est largement supérieure à celle du socle et du milieu saturé, de telle sorte que la surface SPS définie plus haut est bien la base du terrain non saturé. L'exemple suivant illustre la précision de la méthode sur un cas où la localisation d'un talweg était déjà connue. Il s'agit de la paléo-vallée dissymétrique comblée par une coulée volcanique issue du puy de Louchadière, dont l'épaisseur est d'environ 70 mètres au niveau de la coupe (fig. 3) et qui a été reconnue par 7 forages et une galerie d'exploitation. L'eau circule en abondance, 100 l/s en moyenne, au contact observable du socle et de la base de la coulée. Une carte PS a été établie au toit de la coulée avec une densité de mesure égale à 850 points / km2 . La carte SPS de la figure 4 est

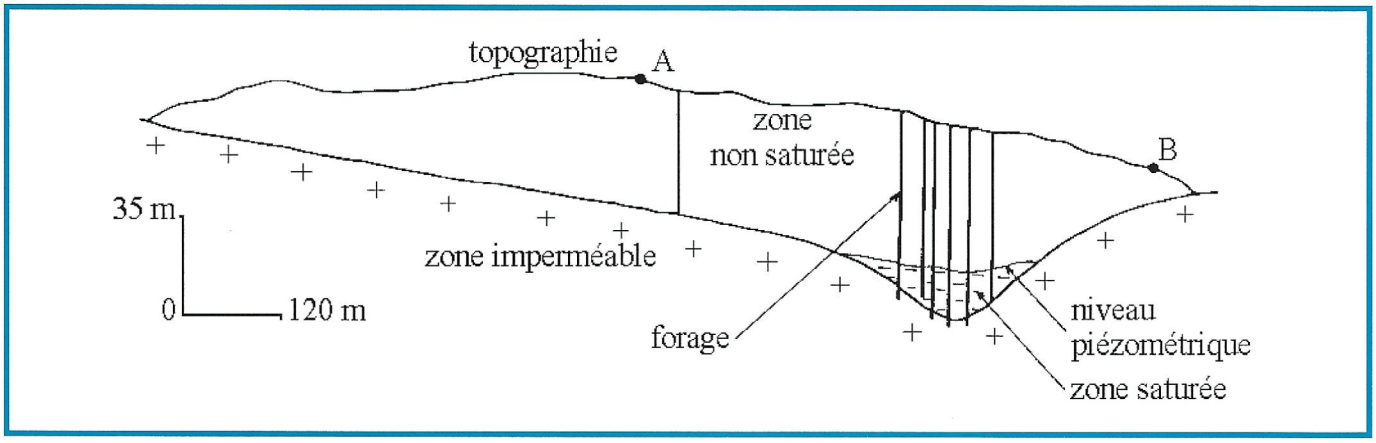


Figure 3 *: Coupe AB à travers la coulée volcanique du Puy de Louchadière*

calculée à partir de la carte PS en adoptant pour les coefficients E° et K des valeurs telles que la coupe SPS AB corresponde au mieux au sens des moindres carrés aux données des forages (E° = 0, K = -1.7 mV/m).
La ligne des minima SPS correspond alors à 7 m près au talweg de la vallée tel qu'il est connu au niveau de la galerie. Cette précision serait suffisante pour faire un forage de reconnaissance de la localisation du talweg. La figure 3 montre que les 6 forages près du talweg pratiqués à l'époque de cette découverte dans les années 1950 sans reconnaissance géophysique préalable se sont étendus sur une largeur de 120 m environ, sans compter le 7ème situé à 350 m du talweg. On mesure sur cet exemple l'intérêt d'une méthode de détection donnant une information dans le plan horizontal avec un pas de mesure de l'ordre de 5 m.

HETEROGENEITES NATURELLES ET ANTHROPIQUES

La distribution des potentiels PS peut être affectée par de nombreuses hétérogénéités naturelles ou artificielles. Citons les effets électrochimiques ou de pile de concentration : changement de végétation, de composition ou de porosité du sol, présence de conduites souterraines, de captages ou de cables enterrés. Les anomalies PS dues à ces objets se reconnaissent par leur extension et leur signe en général négatif du à l'effet de la tranchée dans laquelle ils sont disposés et qui agit comme structure drainante.La méthode PS est du reste une méthode possible de détection de ces objets enterrés en complément d'autres méthodes.

PERTINENCE DE LA METHODE

Cette méthode légère et rapide permet d'obtenir une grande densité de données, même en terrain accidenté, d'où une précision en plan toujours très satisfaisante comme dans l'exemple cité plus haut. Par contre la précision selon la verticale dépend du choix des coefficients K et E° qui doit être validé si possible sur au moins deux stations. On observe toutefois que la localisation des lignes de minimums et maximums SPS est peu affectée par le choix de ces paramètres.
Comme l'indiquent les éléments théoriques exposés plus haut, la méthode PS n'indique que les variations d'épaisseur de la base du terrain non saturé. Elle est donc inopérante dans les cas d'une nappe plane sur socle plan ou d'une nappe perchée plane masquant une nappe plus profonde, ou d'un terrain superficiel plus conducteur que le terrain sousjacent. La profondeur d'investigation de la méthode n'est limitée que par la condition d'homogénéité du premier terrain et nous pouvons citer un exemple de prospection PS où la profondeur du toit de la couche drainante reconnue par forage atteint 150 m.

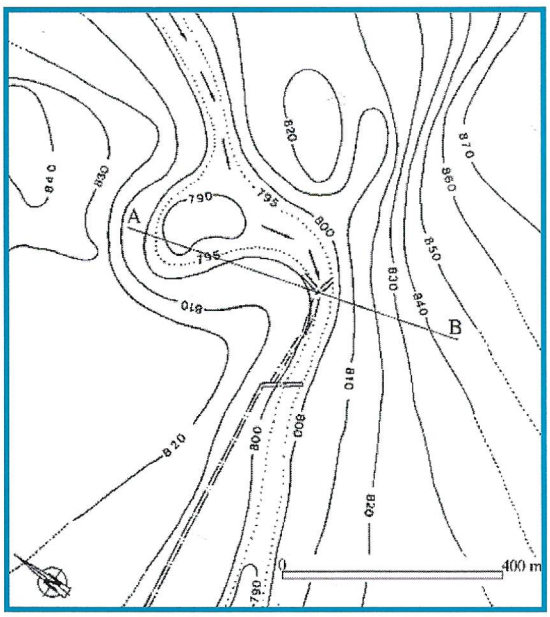


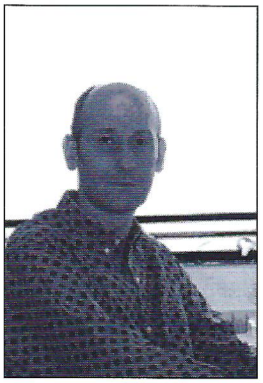
Figure 4 *: Carte SPS de la coulée du Puy de Louchadière. AB : coupe de la figure 3. Galerie d'amenée de l'eau en tireté double ligne.Talweg SPS selon les lignes cotées 795 m en pointillé.*

REFERENCES

Aubert M. et Q. Yéné Atangana, 1996. Self-Potential method in Hydrogeological Exploration of Volcanic Areas. Ground-Water, 34, n°6, 1010-1016.

Aubert M., 2003. La méthode de polarisation spontanée en hydrogéologie des terrains volcaniques. Revue des Sciences de l'Eau, vol.16, n°2, 219-235.

Dossier



Diversité et rôles des organismes non visibles à l'œil nu : les micro-organismes

par Pierre PEYRET,

Professeur de Microbiologie à l'Université d'Auvergne, responsable d'une équipe de recherche CNRS. Equipe de Génomique Intégrée des Interactions Microbiennes UMR, CNRS 6023. Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand

(Suite à sa conférence du 8 mars 2006 à l'ADASTA)

Il y a plus de trois siècles, Antonie van Leeuwenhoek mettait au point le « premier microscope ». Cette invention allait permettre de montrer l'importance des organismes non visibles à l'oeil nu : les micro-organismes. Deux siècles après, dans les années 1870, Ferdinand Cohn, Louis Pasteur et Robert Koch ouvraient l'ère d'une discipline nouvelle : la microbiologie. Leurs importantes découvertes (de la théorie de la génération spontanée au principe de la stérilisation, en passant par le concept d'espèce bactérienne, jusqu'à la mise au point des techniques d'isolement des micro-organismes) sont les bases de la microbiologie moderne. La microbiologie est donc une discipline complexe car elle participe à l'étude d'organismes très variés comme les procaryotes (bactéries), les protistes qui sont des organismes unicellulaires eucaryotes (présence d'un noyau vrai dans lequel se trouvent les chromosomes), des champignons microscopiques mais également des entités simples comme les virus. Ainsi, parmi cette immense diversité d'organismes seule une petite fraction est pathogène. La grande majorité des micro-organismes participe au développement de la vie dans tous les environnements. Grâce à de nouvelles techniques culturales et aux développements des approches de biologie moléculaire, la diversité microbienne est mieux appréhendée. Celle-ci peut être définie selon plusieurs critères tels que la complexité des communautés (nombre d'espèces différentes et abondance relative) et leurs rôles dans le fonctionnement des écosystèmes (complexité métabolique). Quel que soit le critère pris en compte, il est aujourd'hui établi que la biodiversité des écosystèmes est considérable et que très peu d'espèces sont à ce jour connues et cultivées.

Les micro-organismes sont donc présents dans tous les écosystèmes même les plus extrêmes. Les océans semblent dominés par le groupe bactérien des *Archaea* qui représente une large fraction du picoplancton marin. Ils jouent aussi un rôle essentiel dans les flux de matière et d'énergie des écosystèmes aquatiques pélagiques. En effet, les relations trophiques entre les micro-organismes forment un véritable réseau à l'intérieur duquel la boucle microbienne (bactéries, picoeucaryotes, virus) permet le transfert d'une partie de la production picoplanctonique vers les niveaux trophiques supérieurs.

Dans les glaces des océans polaires des phylotypes proches de genres bactériens hétérotrophes sont identifiés et répertoriés comme des genres ou espèces nouveaux. D'autres écosystèmes ont été étudiés, comme les milieux hypersalins, qui abritent des *Archaea* halophiles ou des environnements aux pH extrêmes. Par exemple, dans des milieux très acides, comme dans des eaux riches en métal issu de la dissolution chimique de roches riches en sulfures, il y a dominance de genres bactériens tels que Acidophilium et Acidothiobacillus.

Le sol est également un réservoir très riche en diversité microbienne. En effet, Torsvik et al., en 1998, estiment qu'un sol comprend en moyenne entre 3 500 et 8 800 équivalents génomes, ce qui correspondrait approximativement à 10 000 espèces différentes. Les protéobactéries y sont majoritaires.

Même dans les couches profondes du sol composées de schistes, une activité microbienne existe. Dans ces milieux inexplorés, cette activité est mise en évidence par migration de la matière organique de ces couches profondes vers les interfaces supérieures formées de grès et schistes

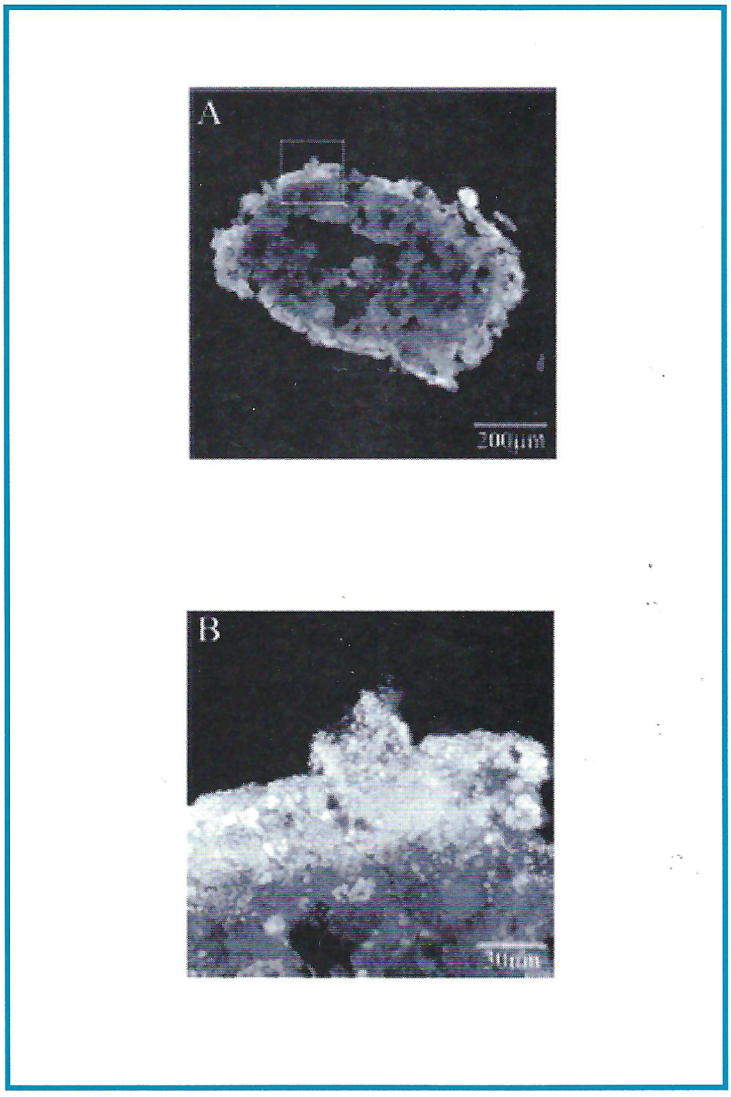
où les pores sont de diamètre supérieur et où l'activité microbienne est intense. Les micro-organismes présents dans ces couches fermentent la matière organique, produisent de l'acétone et réduisent les sulfates. Dans ces couches profondes du sol, tout comme dans les profondeurs aquatiques, l'absence d'oxygène favorise le développement de micro-organismes à métabolisme anaérobie. C'est pourquoi des micro-organismes méthanogènes (producteurs de méthane) sont retrouvés dans ces environnements.

La présence de ces micro-organismes dans tous les environnements témoigne de leur rôle essentiel dans les grands cycles biogéochimiques (cycle du carbone, de l'azote, du fer, du manganèse, de l'arsenic, réduction des sulfates et des phosphates...). Dans le sol, le bon déroulement de ces cycles est le garant de la santé du sol. Par exemple, le sol est l'écosystème majeur de stockage du carbone et une modification de la quantité de carbone dans le sol aurait un effet sur la balance globale du carbone, indiquant un changement climatique. Cet exemple montre donc l'intérêt d'étudier les micro-organismes notamment en tant qu'indicateur de la santé des différents environnements. Des récents travaux montrent que les substances humiques présentes dans les sols, les sédiments et l'eau pourraient jouer un rôle important en tant que donneurs d'électrons dans la respiration aérobie ou anaérobie. Des procaryotes *Archaea* et *Bacteria* effectuent les différentes réactions impliquées dans le cycle de l'azote, telles que les réactions d'assimilation des nitrates et de fixation de l'azote moléculaire (N2) ou encore les réactions de respiration des nitrates (nitrification) et dénitrification. Certaines espèces bactériennes (comme les Rhizobium) ont créé des symbioses avec des plantes (légumineuses) permettant à ces dernières d'utiliser l'azote atmosphérique fixé par les bactéries.

L'identification, l'isolement et la caractérisation des capacités métaboliques de nouveaux micro-organismes contribuent à la compréhension de leur rôle dans l'environnement et aux fonctionnements des écosystèmes.

Les micro-organismes doivent constamment s'adapter aux changements des conditions environnementales et possèdent de ce fait des capacités métaboliques très variées. Ces capacités sont largement utilisées en biotechnologie (production d'antibiotiques, de vaccins, de vitamines, de protéines, d'acides...) et dans l'industrie agroalimentaire (produits laitiers fermentés, yaourt, fromages, maturation de produits carnés, panification, boissons fermentées, vin, bière...). Cependant, beaucoup de micro-organismes présents dans la nature sont encore inconnus et la fraction est encore plus faible pour les micro-organismes cultivés. Les communautés microbiennes représentent d'immenses réservoirs inexplorés de composés naturels, ressources potentielles de nouvelles enzymes, nouveaux métabolites, nouveaux antibiotiques et nouvelles biomolécules à intérêt biotechnologique.

Pour ces différentes raisons, il est aujourd'hui essentiel d'étudier la biodiversité des écosystèmes tant au point de vue de sa structure que de ses capacités métaboliques.



Détection de bactéries oxydant l'ammonium avec des sondes d'acides nucléiques fluorescentes.

Dossier

Mieux comprendre les enjeux des plantes OGM

par Jean-Claude GUILLON,

Directeur Stratégie et Communication de LIMAGRAIN

Article publié en partenariat avec l'URISA (Union Régionale des Ingénieurs et Scientifiques d'Auvergne)

(Suite à la conférence donnée à l'ADASTA le 23 novembre 2005 par Jean-Claude GUILLON)

Depuis près de 10 000 ans, l'homme n'a cessé de modifier le monde du vivant. Il a en permanence fait évoluer les plantes pour améliorer leurs caractéristiques. Au début de manière empirique : les agriculteurs ont sélectionné les plus beaux épis, les plus beaux grains pour les re-semer. Puis de manière scientifique : les sélectionneurs ont pris le relais, appliquant de nouvelles méthodes, comme la sélection généalogique, issue de la découverte de l'hérédité au milieu du 19ème siècle. **Aujourd'hui, la génomique permet, via l'analyse des génomes, le repérage des gènes et la découverte de leurs fonctions.**

Pour Limagrain, groupe coopératif agricole, qui a su se hisser au rang de 4ème semencier mondial, l'enjeu est considérable. En effet, ces nouvelles connaissances vont décupler la capacité d'innovation des sélectionneurs. L'ampleur des investissements de recherche est telle que des **partenariats sont nécessaires.** C'est que Limagrain a décidé de s'associer avec des partenaires du monde agricole pour créer **Biogemma, société de biotechnologies végétales au service des filières agricoles.** C'est pourquoi, Biogemma s'est engagée aux cotés de la recherche publique fran-çaise (INRA, CNRS, CIRAD, IRD) pour constituer **GénoPlante, consortium national de recherche en génomique végétale.**

Pour la planète, l'enjeu est simplement vital, car élargissant le champ des possibilités, les biotechnologies végétales offrent de nouveaux moyens pour relever les immenses défis du 21ème siècle.

Les plantes génétiquement modifiées (PGM) ne sont qu'une nouvelle étape dans cette longue histoire. Apparues en laboratoire depuis une vingtaine d'années, les « PGM », plus connues sous le terme générique « OGM », s'inscrivent dans la continuité du travail de création des variétés. Elles sont le fruit d'une technique, la transgénèse, qui consiste à introduire un gène supplémentaire dans le génome d'une plante. La transgénèse est avant tout un outil de recherche, un outil indispensable pour découvrir la fonction des gènes des organismes des organismes vivants. Quand la sélection classique ne permet pas d'obtenir les résultats attendus, **les OGM apportent de nouvelles solutions, plus précises et plus rapides. L'utilisation des OGM a pour objectif de créer des variétés végétales répondant mieux à une demande de plus en plus exigeante :**

- de disponibilité, de qualités, de sûreté et de diversité alimentaires
- de plantes plus résistantes aux agressions des insectes, aux maladies et aux virus, donc moins consommatrices de produits de protection (insecticides, fongicides, etc...)
- de plantes utilisant mieux l'eau, optimisant le recours aux engrais,
- de plantes aptes à fournir des matières premières renouvelables.

Dans le monde, le développement des variétés transgéniques connaît un essor considérable. Plus de 90 millions d'hectares de variété OGM ont été cultivées en 2005, par 8,5 millions d'agriculteurs. En Europe, la culture est encore confidentielle. Pourtant, c'est en Belgique que la première plante transgénique – un tabac – a été mise au point en 1983. Mais les premières cultures commerciales ont eu lieu

Les cultures transgéniques en 2005 : 90 millions d'ha

Plus de la moitié de la surface cultivée se trouve aux Etas-Unis.

Le soja est la principale plante transgénique cultivée dans le monde (55 millions d'ha, essentiellement pour alimenter les animaux d'élevage) suivie par le maïs, le coton et le colza.

aux Etats-Unis, puis au Canada, en Amérique du sud. Aujourd'hui les cultures de variétés OGM ont gagné la Chine, l'Inde, l'Afrique de Sud, etc...Accueillis comme un formidable progrès dans ces grands pays, les OGM ont été contestés en Europe. **L'Union européenne est restée en marge de cette dynamique internationale**, privant son agriculture des bénéfices des variétés OGM et courant le risque de décourager ses chercheurs. Paradoxalement, l'Europe importe des quantités croissantes de soja ou de maïs OGM, mais aussi d'huile et de volailles issus de plantes OGM...

En Europe, la polémique fait rage. Les plantes OGM sont accusées de tous les maux. Elles seraient dangereuses pour la santé et pour l'environnement. Les variétés OGM seraient évaluées de manière sommaire. En France, les essais de recherche sont régulièrement détruits, minant la compétitivité de la recherche nationale. Une loi sur les OGM est bien en cours de débat au Parlement national, mais dans un climat délétère : les OGM sont devenus le symbole d'un choix de société. Certains opposants prétendent combattre le risque de constitution de monopoles ; d'autres sont nostalgiques d'une forme d'agriculture bucolique. **Difficile pour le profane de se repérer dans le maquis des invectives, où les contre-vérités sont légions.**

QUELQUES POINTS DE REPERE

Les OGM ne présentent pas de risques particuliers pour la santé.

C'est la conclusion d'une étude de 16 années menée par l'Union Européenne (1985-2001) qui a mobilisé 400 laboratoires de recherche. « La recherche menée sur les plantes génétiquement modifiées et les produits dérivés n'a pas mis en évidence de risques nouveaux pour la santé humaine ou pour l'environnement par rapport aux incertitudes habituelles associées aux technologies conventionnelles de sélection végétale (1). »

Dans de nombreux cas, les OGM peuvent améliorer la sécurité sanitaire des aliments.

Ils permettent notamment de diminuer les risques liés aux mycotoxines, ces toxines qui s'accumulent dans des tissus végétaux, suite à des attaques de champignons parasites. Elles peuvent constituer un risque pour la santé publique si leurs teneurs sont excessives. Autre exemple, le coton OGM cultivé en Chine permet de diminuer les risques d'empoisonnement des paysans qui, dans le cadre de leurs cultures traditionnelles, utilisent massivement des insecticides. Une étude réalisée en 1999 conclut que 22,2 % des agriculteurs cultivant du coton non-OGM ont subi des problèmes d'empoisonnement contre 4,7 % seulement des agriculteurs cultivant du coton OGM (2).

Les OGM peuvent diminuer les risques liés aux mycotoxines.

En protégeant les plantes des attaques d'insectes ravageurs, les OGM permettent de diminuer l'exposition du consommateur tant aux insecticides qu'aux mycotoxines (3). Enfin, les OGM peuvent accroître la qualité de l'alimentation en présentant de nouveaux bénéfices pour la santé. A ce propos, l'AFSSA écrit : « on voit ainsi apparaître des variétés de riz et de soja hypoallergéniques, des protéagineux renfermant une plus grande quantité d'acides aminés indispensables, des oléagineux dont la composition en acides gras est en passe d'être modifiée afin d'obtenir des huiles de table de meilleure qualité ou des « alicaments » permettant d'envisager des formes de vaccination orale (3) ».

A PROPOS DES ESSAIS AU CHAMP

Il est strictement impossible de faire de la recherche sans essais au champ. Dans le processus de création d'une nouvelle variété, qui commence au laboratoire et se poursuit en serre et dure une dizaine d'années pour un OGM, les essais au champ sont l'ultime étape. Leur objectif : valider les résultats obtenus en laboratoire puis en serre. Ils vont permettre d'étudier le comportement des variétés expérimentales dans des conditions réelles de culture. C'est au champ en effet que la plante sera cultivée : le vent, le soleil, la pluie, les insectes et les champignons parasites, tout cet environnement agit sur la plante et modifie ses réactions.

La réalisation des essais en plein champ est donc le seul moyen de faire un bilan des avantages et des inconvénients de nouvelles variétés OGM, d'évaluer leur impact éventuel sur l'environnement et la santé, tout en s'assurant de leur intérêt agronomique. Ainsi, c'est précisément les essais au champ qui vont permettre d'aider à décider s'il est opportun ou non d'autoriser la culture de certains OGM.

Les essais au champ sont très rigoureusement encadrés par un dispositif réglementaire qui respecte le principe de précaution.

Ils sont autorisés par le ministère de l'Agriculture, avec l'accord du ministère de l'écologie. La décision des pouvoirs publics est prise après avis favorable de la Commission du Génie Biomoléculaire, constituée notamment d'experts scientifiques indépendants, qui estime que l'essai est sans risque pour la santé et l'environnement. Très détaillé, le processus d'autorisation est totalement transparent : toutes les informations (dossier de demande, avis d'expertise, etc...) sont disponibles sur le site Internet du ministère de l'Agriculture. Sur le terrain, les essais sont strictement contrôlés par les services de l'Etat.

Pour limiter la fécondation par du

pollen de la plante OGM des plantes voisines de la même espèce, ces expériences sont conduites dans des conditions très strictes : respect de distances d'isolement avec d'autres champs de la même espèce ou castration des plantes.

« Ces essais en plein champ, réalisés dans des conditions qui ne font courir aucun risque, permettraient de valider des années de travaux menés en laboratoire (...). On brûle ces cultures sans justification scientifique ni technologique alors que, depuis 10 000 ans, les hommes se sont toujours livrés à des croisements de plantes. Pourquoi si ces pratiques sont mieux dirigées, plus intelligentes et plus utiles, deviendraient-elles tout à coup plus dangereuses ?"

Pierre-Gilles de Gennes, Prix Nobel, interrogé par le journal Capital, suite aux destructions des essais en 2003.

DES ESSAIS DETRUITS

En France, en 2003, 2004, et 2005, 50 % des essais réalisés au champ ont été détruits. Cette évolution est préoccupante car nous prenons du retard. Les risques : bloquer la connaissance et compromettre notre capacité future d'innovation. En 1998, on comptait en France près de 1 000 parcelles d'essais au champ. En 2005, mois de 50 essais ont été mis en place, dont la moitié a été détruite par des activistes anti-OGM.

BIOGEMMA : LA CULTURE DU PROGRES PARTAGEE ET DU DIALOGUE

Pour Biogemma, les biotechnologies végétales, et en particulier la transgénèse, sont un outil de recherche indispensable pour étudier la fonction des gènes des plantes cultivées. Biogemma consacre la moitié de son budget de recherche à cette approche fondamentale. Biogemma inscrit sa recherche dans une démarche de responsabilité, de progrès maîtrisé et partagé. Elle milite pour le respect de la biodiversité et pour le libre accès aux ressources génétiques. A ce titre, elle s'oppose à la brevetabilité des variétés. Sa position est claire. Elle tient en une formule : protéger sans confisquer.

Pour informer les élus locaux, les riverains et les agriculteurs sur l'importance des essais au champ, Biogemma se met à la disposition de chacune des communes où ils sont réalisés. Le responsable des essais rencontre personnellement chacun des maires en lui remettant un dossier d'information. Il lui propose d'organiser une réunion d'information avec le Conseil municipal et la population pour débattre des objectifs et des conditions de réalisation de ces essais.

LES PROGRAMMES DE BIOGEMMA

En décrivant, en explorant, en enrichissant la diversité génétique des plantes de grandes cultures (maïs, blé, colza, pois, tournesol), en utilisant tout le potentiel des sciences de la vie (analyse du génome, génétique, transgénèse, amélioration des plantes), Biogemma ouvre aux agronomes de nouvelles voies de création végétale qui répondent aux grands défis de l'agriculture :

- la réduction des traitements chimiques,
- l'économie des ressources en eau et plus généralement l'optimisation des intrants,
- la compétitivité des productions,
- la qualité et la sécurité sanitaire des aliments.

---

(1)- Cette étude est disponible sur Internet : ***http://europa.eu.int/comm/research/quality-of-life/gmo/***

(2)- Etude réalisée par le CCAP (CENTER for Chinese Agricultural Policy), le CAAS (Chinese Academy of Agricultural Sciences) et the Rutgers University aux Etats-Unis

(3)- Etude de l'Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments (AFSSA) juillet 2004

Pour renseignements complémentaires contacter l'ADASTA :
- 04 73 92 12 24
- adasta@wanadoo.fr

Maïs

7000 ans d'histoire, une évolution spectaculaire
L'ancêtre du maïs, la téosinte, était cultivé 5000 ans avant notre ère, sur les hauts plateaux du Mexique. A cette époque, l'épi mesurait 2,5 cm et produisait une dizaine de grains. Grâce au travail de l'homme, il dépasse désormais les 30 cm et plusieurs centaines de grains. Aujourd'hui, on compte plusieurs milliers de variétés de maïs, appartenant à une dizaine de types différents. Après le blé et le riz, le maïs est la 3ème céréale cultivée dans le monde.
Biogemma met actuellement au point un maïs plus économe en eau.

Dossier

I. T. E. R.

(International Thermonuclear Experimental Reactor)

Article publié en partenariat avec la S.F.E.N. (Société Française d'Energie Nucléaire), suite à la conférence de Philippe MAGAUD, (direction des sciences de la matière - CEA), à l'I.F.M.A. (Institut Français de Mécanique Avancée) en janvier 2006.

Maîtriser sur Terre la fusion des noyaux légers tels que le deutérium et le tritium à des fins de production d'énergie ouvrirait la voie à des ressources quasiment illimitées.

C'est l'objectif des recherches engagées par les grandes nations industrielles et, en particulier, par l'Union européenne.

L'état de développement de ces recherches doit permettre à la communauté "fusion" de relever aujourd'hui le défi de la construction du dispositif expérimental devant démontrer la faisabilité scientifique et technologique de l'énergie de fusion : ITER. Non producteur d'électricité, ITER servira de base à l'étape suivante : un démonstrateur de réacteur électrogène.

La fusion par confinement magnétique

Les grands principes de la fusion

Pour obtenir une réaction de fusion, il faut rapprocher avec suffisamment de force deux noyaux qui chargés tous deux positivement ont une tendance naturelle à se repousser (encadré D, Les réactions de fusion nucléaire p.47).Une certaine énergie est donc indispensable pour franchir cette barrière naturelle et arriver dans la zone, très proche du noyau, où se manifestent les forces nucléaires capables de l'emporter.
La fusion exige donc de hautes températures du milieu réactant, typiquement plus de 100 millions de degrés (10 keV), qui permettent d'optimiser la quantité de réactions produites. À de telles températures, les électrons sont détachés des noyaux et la matière entre alors dans son quatrième état, l'état "plasma". Le plasma existe dans l'univers sous des formes très diverses et avec des caractéristiques en température et densité très variables.

La réaction de fusion la plus accessible en pratique est la réaction impliquant le deutérium (D) et le tritium (T), deux isotopes de l'hydrogène, sur laquelle se concentrent les recherches sur la fusion contsrôlée à des fins énergétiques.

Les conditions nécessaires aux réactions de fusion.

En plus de températures élevées, d'autres conditions sont nécessaires pour espérer utiliser la fusion comme source d'énergie. Le plasma chaud subit des pertes thermiques diverses, par rayonnement mais aussi par convection et par conduction.On définit généralement un temps synthétisant l'ensemble de ces pertes appelé temps de confinement de l'énergie (τ):c'est le temps que met le plasma à se vider de sa chaleur si l'on coupe brutalement les sources d'énergie qui l'alimentent.
D'une certaine façon, τ caractérise la qualité de l'isolation thermique du plasma.
Pour que la fusion soit rentable sur le plan énergétique, il faut que l'énergie produite par les réactions de fusion excède largement ces pertes. Cette condition impose une limite inférieure au produit densité (n) temps de confinement de l'énergie, donnée par le critère dit de Lawson :



Les installations du réacteur expérimental ITER telles qu'elles se présenteraient sur le site de Cadarache (Bouches-du-Rhône) proposé par l'Union européenne. Au premier plan, l'installation existante construite autour de Tore Supra.

$n \cdot \tau > f(Q)$ où Q est le rapport entre la puissance de fusion produite et la puissance extérieure fournie au plasma pour le chauffer. Le facteur Q est souvent appelé facteur d'amplification de l'énergie. Deux valeurs typiques de Q sont l'unité et l'infini. Si Q = 1, la puissance générée par le plasma est égale à la puissance qui lui est couplée de l'extérieur. Cet état connu sous le nom de breakeven est approché dans les machines expérimentales actuelles les plus performantes. L'égalité Q = signifie que la puissance extérieure apportée au plasma est nulle. Le plasma s'auto-entretient ; on dit qu'il est en ignition.
Pour un plasma de deutérium et de tritium, la fonction f(Q) vaut environ 1 pour Q = 1 et tend rapidement vers 5 pour les valeurs élevées de Q. Dans ces conditions et pour une température de 10 keV, le critère de Lawson s'écrit : $n \cdot \tau$ 1020 (m-3·s).

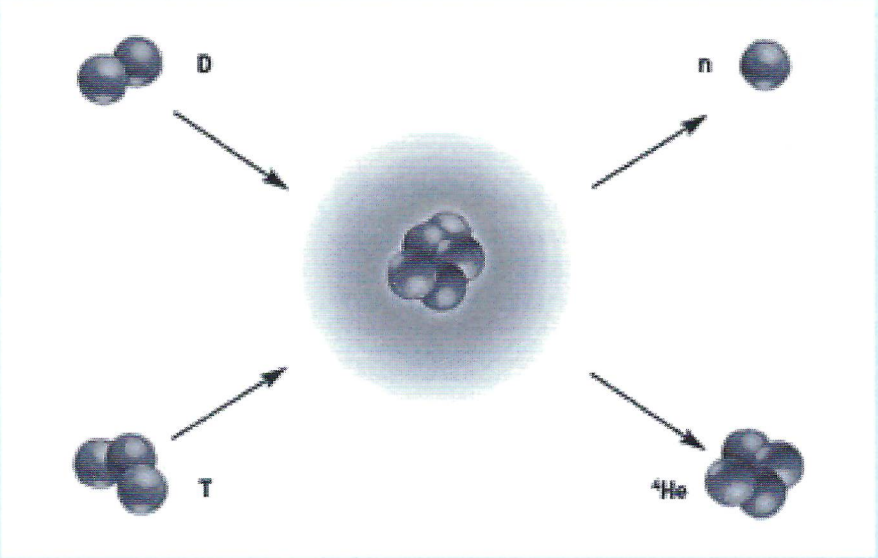
Fusion dans les étoiles... fusion sur Terre

Dans le Soleil et les étoiles, les conditions nécessaires à la fusion en termes de température, densité et temps de confinement sont maintenues grâce à la gravité, solution qu'il est impossible d'utiliser sur Terre. La pression exercée par la gravitation peut y être remplacée par la pression exercée par des champs magnétiques intenses.

Des boîtes magnétiques pour contenir le plasma

Le plasma est un fluide électriquement conducteur, mais neutre globalement, et dans lequel les ions et les électrons se meuvent presque indépendamment les uns des autres. Plongés dans un champ magnétique, ils vont suivre des trajectoires en forme d'hélices qui s'enroulent autour des lignes de champ et y restent "piégés". C'est le principe du confinement magnétique.
Les géométries droites (ou cylindriques) d'abord étudiées présentent l'inconvénient de laisser échapper le plasma aux extrémités. Pour éviter cela, le cylindre est refermé sur lui-même afin d'obtenir une configuration torique. Cependant, dans une telle configuration, la courbure (et donc la force centrifuge) et l'inhomogénéité du champ magnétique (plus élevé sur la face intérieure du tore que sur la face extérieure) sont la cause d'une dérive des particules chargées. Ions et électrons ont tendance à se séparer, les uns vers le haut et les autres vers le bas, et ils finissent par sortir du piège magnétique. Pour compenser

Les réactions de fusion nucléaire



Pour obtenir la fusion de deux noyaux atomiques légers, il faut les rapprocher tout près l'un de l'autre alors qu'ils se repoussent naturellement, portant tous deux une charge électrique positive.
Si l'on veut récupérer l'énergie libérée par cette fusion, il faut donc d'abord fournir celle nécessaire pour franchir cette barrière et permettre à chaque noyau d'arriver dans la zone, très proche de l'autre, où se manifestent les forces nucléaires capables de vaincre cette répulsion électrostatique ou barrière coulombienne. Une fois ce résultat obtenu, les réactions les plus énergétiques sont celles qui aboutissent au noyau fusionné dont l'énergie de liaison est la plus élevée. C'est en l'occurrence le cas de l'isotope ^{4}He de l'hélium, qui possède quatre nucléons (deux protons p et deux neutrons n).
Parmi les réactions de fusion qui produisent de l'énergie en même temps qu'elles génèrent, d'une part, un nouveau noyau, noyau d'hélium (He) ou de tritium (T), et d'autre part un nucléon, quatre sont a priori particulièrement intéressantes*. Les deux premières sont séduisantes parce qu'elles n'impliquent que du deutérium (D); l'isotope de l'hydrogène le plus abondant sur Terre. Leur maîtrise peut constituer le but ultime de la fusion contrôlée, mais elles sont, de loin, les plus difficiles à réaliser.

D + D → ^{3}He + n + 3,27 MeV
D + D → T + p + 4,04 MeV

Les deux suivantes, formant le noyau très stable de l'hélium 4, sont particulièrement énergétiques:

D + T → ^{4}He + n + 17,58 MeV
D + ^{3}He → ^{4}He + p + 18,34 MeV

La réaction de fusion la plus facile à réaliser, car présentant la section efficace la plus élevée, est celle impliquant un noyau de deutérium (D) et un noyau de tritium (T), fusion qui donne un noyau d'hélium et un neutron dont l'énergie est respectivement de 3,5 MeV et de 14,1 MeV. C'est donc sur elle, appelée D-T, que se concentrent les recherches sur la fusion contrôlée, aussi bien pour la fusion à confinement inertiel que pour la fusion à confinement magnétique.
La production du tritium nécessaire est assurée par une cinquième réaction mettant en jeu le lithium et... les neutrons de la réaction D-T.

^{6}Li + n → ^{4}He + T + 4,78 MeV
^{7}Li + n → ^{4}He + T + n - 2,47 MeV

Les combustibles primaires, c'est-à-dire les véritables matières premières d'un réacteur, sont donc le deutérium et le lithium (Li).

**Ces réactions sont dites thermonucléaires parce que seule une température de l'ordre d'une centaine de millions de degrés, en même temps que d'autres conditions de densité et de temps de confinement (cf. texte principal), permet de les obtenir.*
Voir en p. 8 le tableau des principales réactions nucléaires qui ont lieu dans le Soleil.

cet effet de dérive, les lignes de champ sont rendues hélicoïdales *(figure 1 voir page suivante)*. Les particules passent alors successivement en haut puis en bas de la configuration magnétique : l'effet de dérive, qui est toujours dans le même sens, est alors en moyenne compensé. Ceci est réalisé en ajoutant au champ torique (dit "toroïdal") initial un autre champ magnétique qui lui est perpendiculaire (le champ "poloïdal"). Dans un "tokamak", machine de conception russe, le champ magnétique poloïdal est créé par un courant axial circulant dans le plasma lui-même, qui devient le secondaire d'un transformateur (les plasmas ainsi créés sont dits "inductifs"). Le tokamak est donc au départ un dispositif impulsionnel. Il peut devenir continu en générant le courant axial de façon "non inductive" par des ondes ou des faisceaux de particules qui transfèrent leur impulsion aux électrons du plasma. Dans un "stellarator", la configuration magnétique repose entièrement sur des courants circulant dans des bobines externes. Cette configuration, naturellement continue mais plus complexe sur le plan des principes et de la géométrie, n'est pas au même niveau de développement que la configuration tokamak. Ses qualités intrinsèques motivent toutefois la poursuite des efforts dans ce domaine.
Le plasma se comporte comme un gaz et exerce vers l'extérieur une pression (cinétique) dont la valeur augmente avec la température et la densité. Si l'on veut confiner le plasma, cette pression doit être équilibrée par une pression vers l'intérieur. C'est le rôle de la pression (magnétique) exercée par le champ magnétique. Dans la pratique, on montre que pour éviter l'apparition d'instabilités hydrodynamiques, la pression cinétique doit être très inférieure (d'un facteur 10) à la pression magnétique. On voit donc ici apparaître une limite sur la densité. Avec des

valeurs usuelles pour la température (10-20 keV) et le champ magnétique (5-10 teslas), cette densité limite est de l'ordre de 10^{20} m^{-3}. Ceci fixe aussi la valeur du temps de confinement que doit viser la fusion magnétique : de l'ordre de quelques secondes (critère de Lawson).

Comment chauffer le plasma?

D'emblée, le plasma n'a jamais la température requise pour les réactions de fusion. Outre le chauffage par le courant qui circule dans le tokamak (chauffage ohmique), deux méthodes sont possibles pour chauffer un plasma:

- le chauffage par injection de particules neutres de haute énergie consiste à créer et accélérer un faisceau d'ions, en dehors de l'enceinte de confinement. Ce faisceau est ensuite neutralisé avant de pénétrer dans le plasma où les particules sont à nouveau ionisées et confinées par le champ magnétique. Les collisions redistribuent l'énergie et la température du plasma augmente;

- dans le chauffage par ondes électromagnétiques à des fréquences caractéristiques du milieu, l'énergie des ondes est transmise au plasma par des antennes qui tapissent une partie de l'enceinte de confinement. Le choix de la fréquence permet de définir l'espèce de particules (ions ou électrons) qui sera chauffée et la région où se fera l'absorption de l'onde et donc le chauffage.

En plus de chauffer le plasma, ces méthodes permettent de générer du courant de façon permanente et donc d'envisager un fonctionnement continu du tokamak en mode "non inductif".
Dans un réacteur, la température du plasma pourrait être amenée au niveau adéquat par une combinaison de ces méthodes. Lorsque les réactions de fusion seront en nombre important, l'énergie portée par les noyaux d'hélium qui restent confinés dans le plasma deviendra alors la méthode de chauffage dominante (Q > 5).

Le principe du réacteur

Le principe du réacteur est présenté en figure 2. Le mélange combustible deutérium-tritium est injecté (en 1) dans une chambre où grâce au système de confinement et de chauffage, il passe à l'état de plasma et brûle de façon continue (2). Le plasma produit des cendres (atomes d'hélium) et de l'énergie sous forme de rayonnement ou de particules chargées (3), qui abandonnent leur énergie dans la "première paroi", premier élément matériel rencontré au-delà du plasma. L'énergie qui apparaît sous forme d'énergie cinétique des neutrons est, quant à elle, convertie en chaleur dans la couverture (4), élément situé après la première paroi, à l'intérieur de la chambre à vide. Cette chambre est le composant qui clôt l'espace où a lieu la réaction de fusion. Première paroi, couverture et chambre à vide sont bien évidemment refroidies par un système d'extraction de la chaleur. Cette chaleur est utilisée pour produire de la vapeur et alimenter un ensemble turbine et alternateur (5) qui génère finalement l'électricité.
La couverture remplit plusieurs fonctions. Son premier rôle consiste à récupérer l'énergie que les neutrons abandonnent en échauffant les matériaux. Un fluide caloporteur circule dans la structure et évacue la chaleur produite vers les équipements classiques que sont le générateur de vapeur, la turbine et l'alternateur. Son deuxième rôle est de régénérer le tritium nécessaire à la réaction de fusion. Le tritium n'existe en fait qu'en très petite quantité dans la nature. Il sera donc produit in situ par bombardement neutronique sur un autre corps, le lithium,présent dans la couverture, via les réactions suivantes :

$$n + {}^{6}Li \rightarrow T + {}^{4}He + 4{,}78\ MeV$$

$$n + {}^{7}Li \rightarrow T + {}^{4}He + n - 2{,}47\ MeV$$

On a évidemment intérêt à privilégier la première réaction, qui dégage de l'énergie. Ainsi la couverture est, elle aussi, le siège de réactions produc-

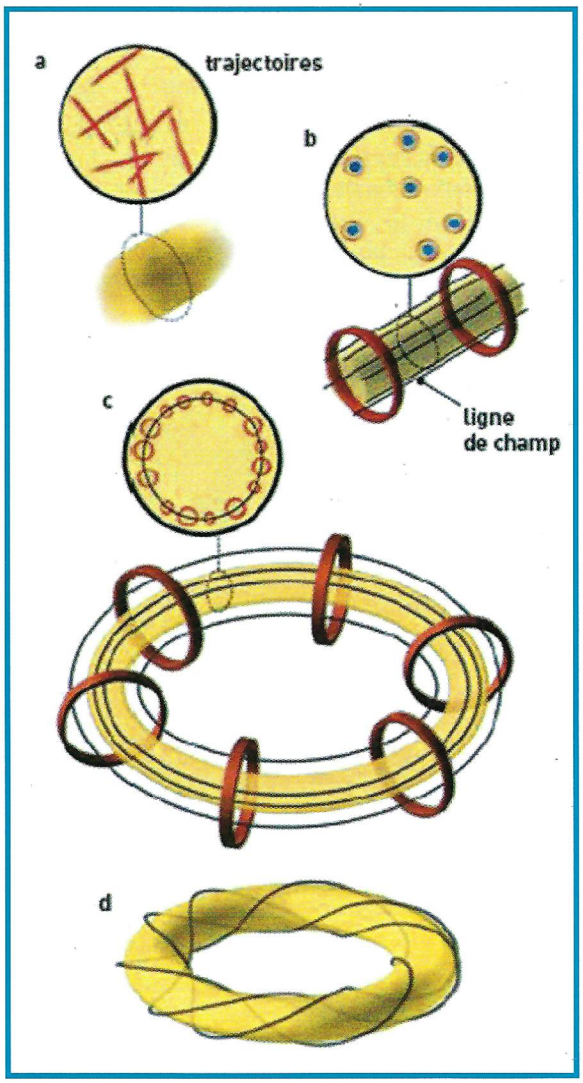


Figure 1. *Principe du confinement magnétique. Dans un plasma à l'état libre (a), les particules ont une trajectoire aléatoire et vont s'échapper. Si ce plasma baigne dans un champ magnétique rectiligne (b), les particules s'enroulent autour des lignes de champ et ne peuvent plus atteindre les parois latérales. Afin d'éviter les pertes aux extrémités, la boîte est refermée en tore (c). Pour minimiser encore les fuites de particules, les lignes de champ doivent être hélicoïdales (d).*

trices d'énergie, intervenant pour 20% dans le bilan du réacteur. Le lithium peut être sous forme solide (céramique) ou liquide (alliage métallique), suivant le concept de couverture. La couverture doit, enfin, jouer un rôle de protection en réduisant considérablement l'énergie et le flux neutronique afin d'abriter les composants suivants (chambre à vide, système magnétique...).
Pour atteindre un rendement global de l'ordre de 35%, un réacteur devra pouvoir réaliser des facteurs d'amplification de l'énergie Q supérieurs à 25-30. Ceci impose que les réacteurs de fusion seront, nécessairement, des unités de grande taille, typiquement capables de produire 1000 MW électriques, soit l'ordre de grandeur de la capacité d'un réacteur de fission.

Les avantages de la fusion

L'énergie de fusion présente un certain nombre d'avantages importants. Ses combustibles sont abondants et géographiquement également répartis. Le deutérium peut être extrait de façon économique de l'eau de mer (à raison de 33 g par m³). Les ressources en deutérium représentent plus de 10 milliards d'années de consommation annuelle mondiale ! Le tritium est fabriqué in situ à partir du lithium, que l'on trouve dans l'écorce terrestre. Les ressources en lithium sont estimées à 2 000 ans, limite repoussée à plusieurs millions d'années si l'élément est tiré de l'eau de mer.
La fusion présente des avantages en terme de sûreté. Les conditions d'entretien de la réaction de fusion permettent l'utilisation d'un plasma très peu dense (quelques grammes de combustible dans un volume supérieur à 1 000 m³). La quantité de combustible présente dans la chambre de combustion pendant la réaction est donc toujours très faible. Toute perturbation non contrôlée de ce milieu entraîne son refroidissement rapide et l'arrêt des réactions de fusion. L'emballement de la réaction est par conséquent intrinsèquement impossible.
L'énergie de fusion, comme les énergies renouvelables et la fission, ne produit en fonctionnement ni gaz à effet de serre ni de pollution atmosphérique. Aucun des combustibles de base, le deutérium et le lithium, pas plus que le produit de la réaction, l'hélium (un gaz rare), n'est radioactif ou toxique. Le tritium sera entièrement produit sur site. C'est un élément radioactif qui se décompose en hélium par émission d'un rayon bêta peu énergétique (5,7 keV) et avec une période relativement courte (12,3 ans). Sa radiotoxicité est faible. Une conception adéquate du réacteur devra permettre de prendre en compte la perméation importante du tritium à travers les matériaux. Comme dans toute installation soumise à un flux de particules de haute énergie (réacteur à fission, accélérateur), les matériaux constituant la structure du réacteur seront activés. Sur le plan de l'impact environnemental, le choix pour ces éléments de matériaux à temps de décroissance rapide devrait permettre de minimiser les quantités de déchets radioactifs. Une centaine d'années après l'arrêt définitif du réacteur, la majorité (voire la totalité) de ces matériaux devrait pouvoir être, soit considérée comme déchet de très faible activité, soit recyclée dans la filière nucléaire.

L'évolution des recherches

Les premières expériences de confinement avec des champs magnétiques sont initiées aux États-Unis dès 1938. L'année 1958 marque la déclassification des recherches. Plusieurs configurations magnétiques sont étudiées : décharges[1] toroïdales, machines à miroir...
Afin de se donner les moyens de relever les défis scientifiques et technologiques posés par la maîtrise de l'énergie de fusion, des collaborations s'organisent à l'échelle internationale. Au niveau européen, ces recherches sont coordonnées par le traité Euratom dès 1957. Cette organisation complètement intégrée,

[1] Décharge : terme désignant la présence d'un plasma dans l'enceinte de confinement.

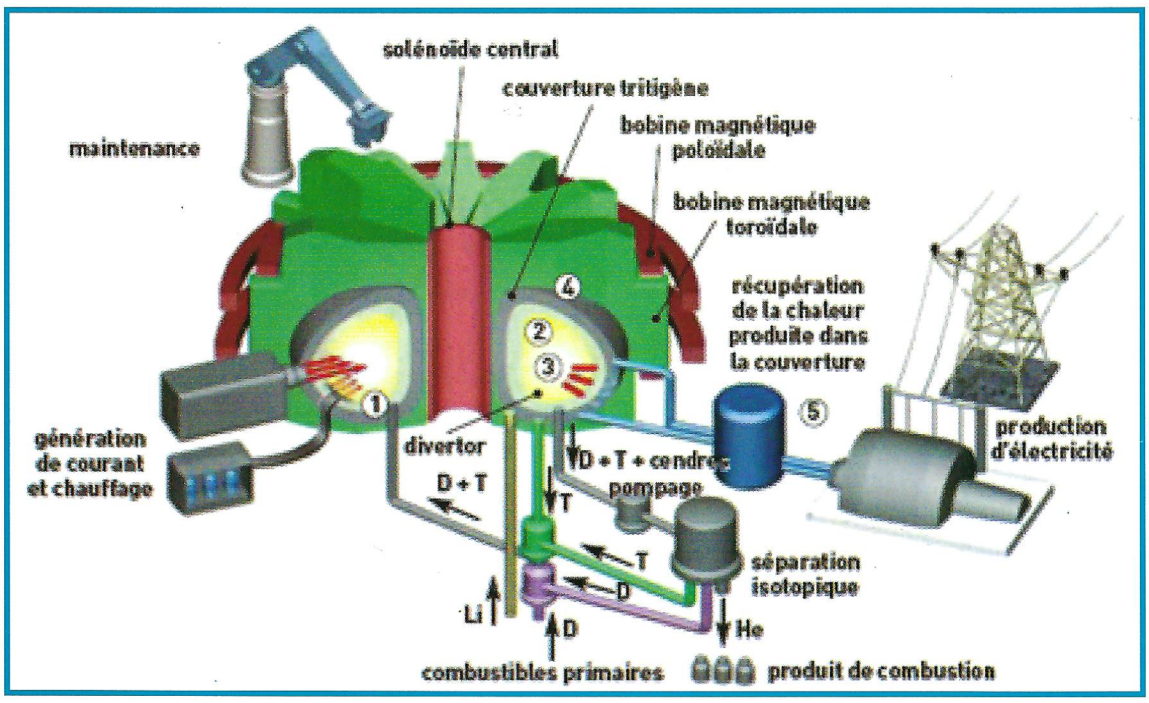


Figure 2.
Schéma de principe d'un réacteur à fusion électrogène

toujours en vigueur, a beaucoup contribué à la position dominante de l'Europe sur le sujet.

En 1968, les scientifiques russes de l'Institut Kurchatov annoncent des performances largement supérieures aux autres expériences avec une configuration magnétique bien particulière : le tokamak, qui va rapidement supplanter les autres configurations. Dès lors, de nombreux tokamaks de taille encore modeste sont construits en France, en Allemagne, en Angleterre et en Italie, mais aussi aux États-Unis, en Union soviétique et au Japon. C'est sur ces dispositifs que sont développés les diagnostics ainsi que les moyens de chauffage du plasma qui permettent de progresser rapidement sur la physique des tokamaks.

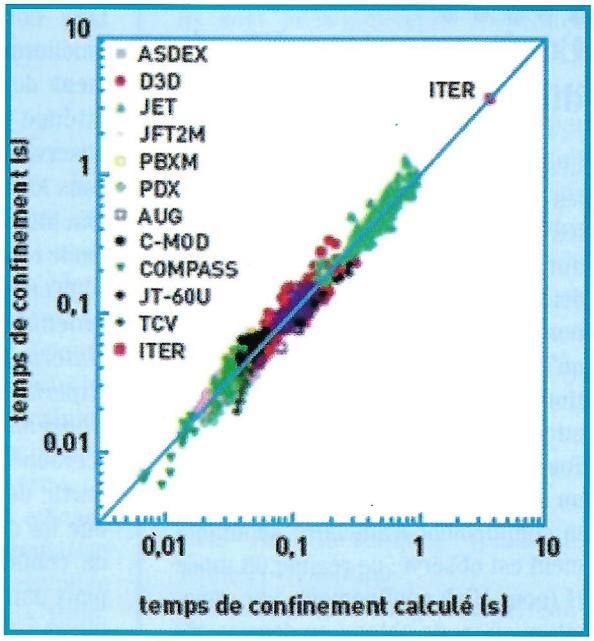
Les projets de construction de la plupart des grands tokamaks modernes (JET en Europe, JT60 au Japon, TFTR aux États-Unis) sont lancés vers la fin des années 1970. La France, après avoir fait entrer l'Europe dans l'ère des tokamaks avec la machine TFR de Fontenay-aux-Roses (machine la plus performante au monde de 1973 à 1976), prépare dès les années 1980 la technologie et la physique du fonctionnement continu pour les réacteurs à fusion, avec la construction d'un grand tokamak à aimant toroïdal supraconducteur, Tore Supra, qui entre en service en 1988.

Le JET, Joint European Torus, est actuellement le tokamak le plus puissant pour l'étude de la fusion thermonucléaire contrôlée.

Tore Supra, particulièrement adapté aux décharges longues, préfigure ITER, notamment par ses composants supraconducteurs et ses parois activement refroidies



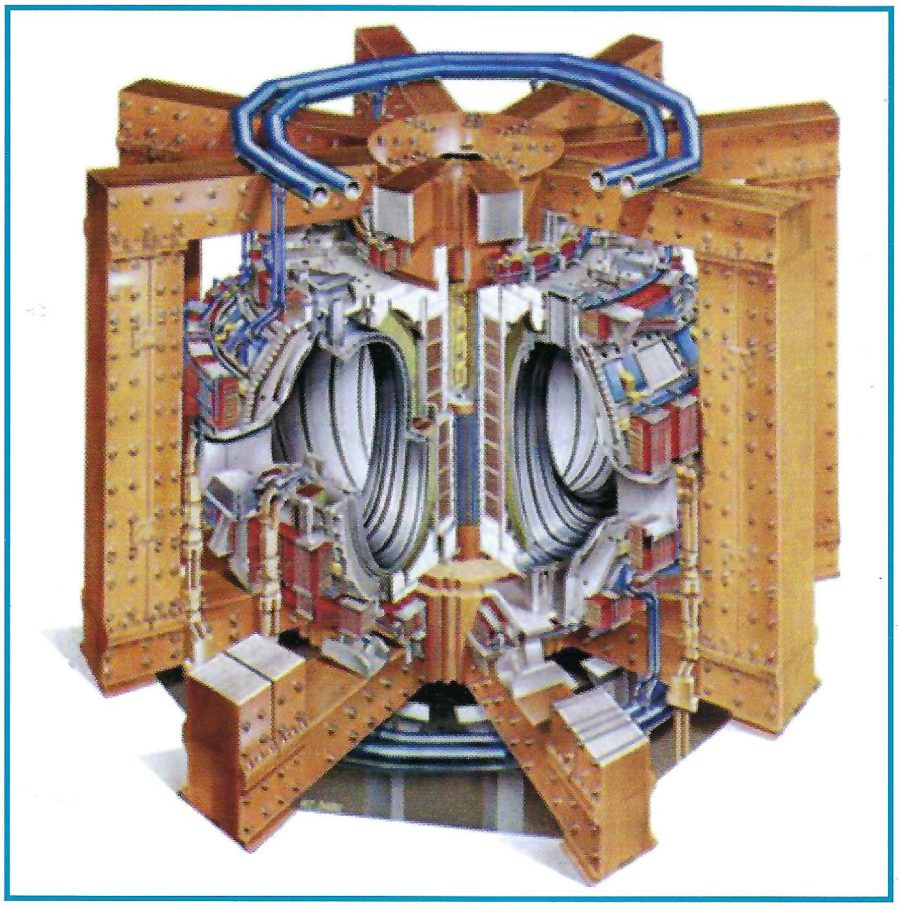
Figure 3. *Loi d'échelle sur le confinement (comparaison calcul/expérience). L'analyse des résultats expérimentaux obtenus sur différentes installations permet de déterminer une loi d'échelle empirique exprimant le temps de confinement à partir des principaux paramètres de la machine et du plasma. Cette loi d'échelle, qui couvre deux ordres de grandeur de variation des paramètres, est d'une importance primordiale pour extrapoler les performances actuelles à celles d'une machine de prochaine génération.*



Des principes de base démontrés

Depuis le début de l'ère des tokamaks,à la fin des années 1960,des progrès considérables ont été accomplis dans la compréhension des phénomènes physiques et le développement des technologies mises en œuvre dans la construction des outils expérimentaux.

Ces résultats ont été obtenus sur les nombreuses installations, de tailles très diverses, conçues et exploitées dans les années 1970 à 1990. Tous les grands problèmes posés par l'énergie de fusion ont été abordés et, pour la plupart d'entre eux, des solutions ont été proposées.



Confinement amélioré du plasma

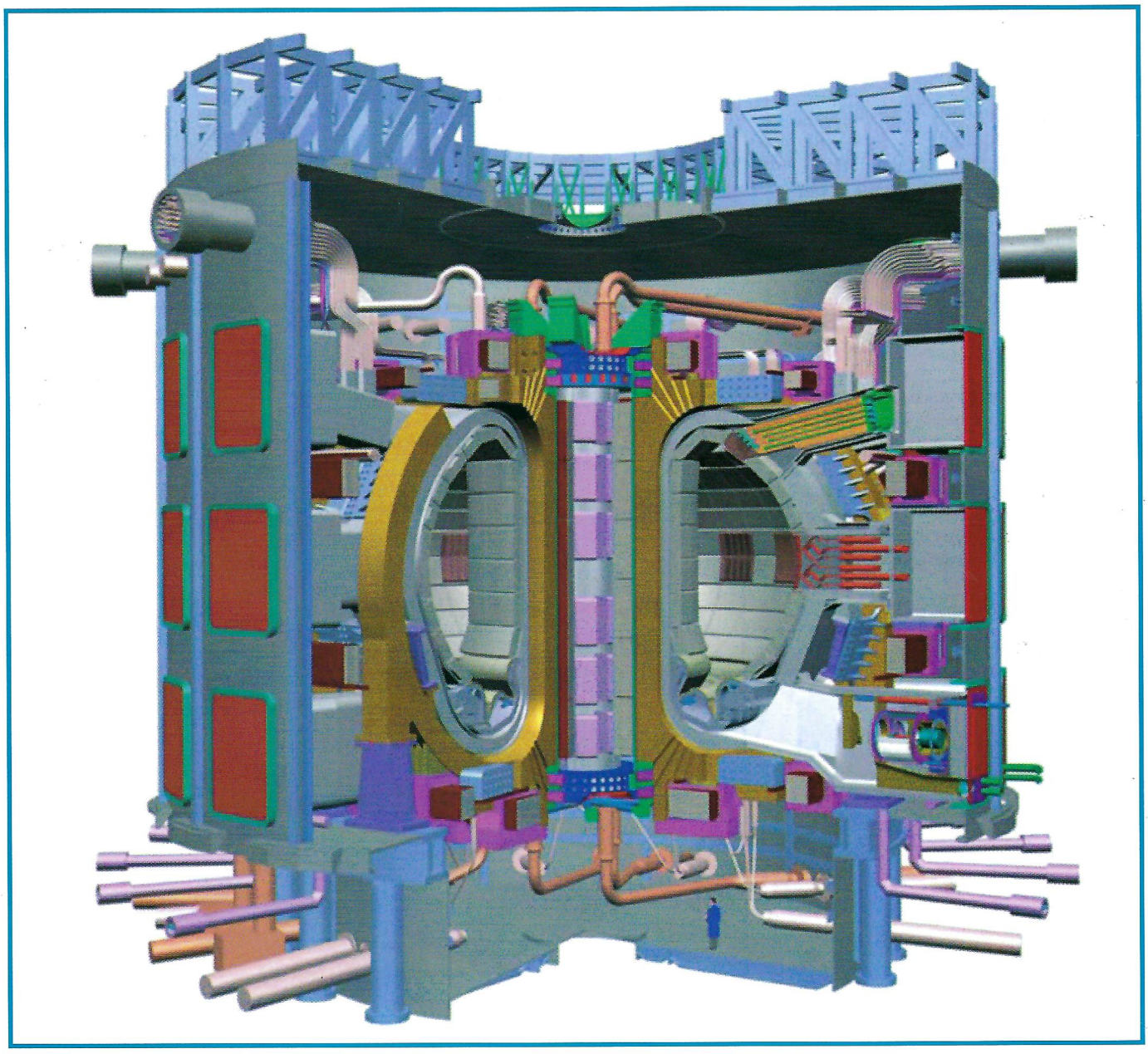
Les nombreuses études expérimentales sur le confinement menées dans les machines à travers le monde ont notamment mis clairement en évidence que le confinement s'améliorait avec la taille de la machine et qu'il se dégradait avec l'augmentation de la puissance de chauffage additionnelle couplée au plasma. Toutefois, sous certaines conditions, un seuil en puissance à partir duquel le confinement s'améliore spontanément est observé: ce régime,dit mode H (pour High confinement, par opposition au mode obtenu en dessous du seuil en puissance, dit mode L, pour Low confinement), constitue une amélioration du temps de confinement de presque un facteur 2 qui atténue l'effet de dégradation observé par ailleurs. La découverte dans les années 80 du mode H, sur la machine ASDEX, est capitale.Ce mode reste aujourd'hui le scénario de référence pour la machine de prochaine génération, ITER *(International Thermonuclear Experimental Reactor)*.

L'ensemble des résultats est regroupé dans une base de données à partir de laquelle a été déterminée une loi d'échelle exprimant le temps de confinement à partir des principaux paramètres de la machine et du plasma *(figure 3)*. Bien qu'empirique, cette méthode est d'une importance primordiale pour extrapoler les performances en confinement actuelles à celles d'une machine de prochaine génération, proche des conditions d'un réacteur. La figure souligne l'importance de la machine européenne JET (Joint European Torus), qui est actuellement la plus grande installation expérimentale de fusion avec la machine japonaise JT-60U.

Le JET : décharges performantes et technologies associées

Conçu dans les années 1970, JET représentait à l'époque un saut considérable puisque la plus grande

Dessin d'artiste du projet ITER



machine européenne était alors TFR (Tokamak de Fontenay-aux-Roses), d'un volume plasma moyen de $1m^3$, soit environ 100 fois moins que celui de JET. Le JET est toujours actuellement le plus grand tokamak au monde. Son système magnétique, composé de 32 bobines en cuivre entourant l'enceinte de confinement, produit un champ de 3,4 teslas (T) au centre du plasma.Le JET est aussi équipé des technologies nécessaires à la gestion du tritium (stockage, injection dans l'enceinte de confinement, séparation des hydrogènes des gaz extraits, séparation isotopique) et à la télé-manipulation de ses composants internes.

Les objectifs du JET sont essentiellement tournés vers la réalisation de décharges performantes et la qualification des scénarios de confinement retenus pour la machine de prochaine génération. Les aspects liés au chauffage du plasma par les particules alpha sont aussi abordés. Les 16 MW de puissance de fusion obtenus pendant environ une seconde,en 1997, avec un facteur d'amplification de la puissance Q d'environ 0,65 très proche des conditions du breakeven (Q = 1) restent le résultat le plus spectaculaire. La possibilité unique de réaliser des plasmas D-T sur JET s'accompagne évidemment de la maîtrise des technologies associées : la gestion du cycle du tritium et les moyens de télémanipulation. Ce dernier système a permis de remplacer chaque tuile de la première paroi. L'opération a été menée en 1998 sur le divertor (composant gérant l'extraction en continu des cendres de la réaction), qui a été totalement remplacé par télé-manipulation.

Tore Supra : temps longs, supraconduction et refroidissement actif

Parallèlement aux recherches du JET sur les plasmas performants, la problématique des plasmas de longue durée (plusieurs minutes) est aussi étudiée au sein de l'Union européenne sur le tokamak Tore Supra,implanté sur le site CEA de Cadarache (Bouches-du-Rhône).

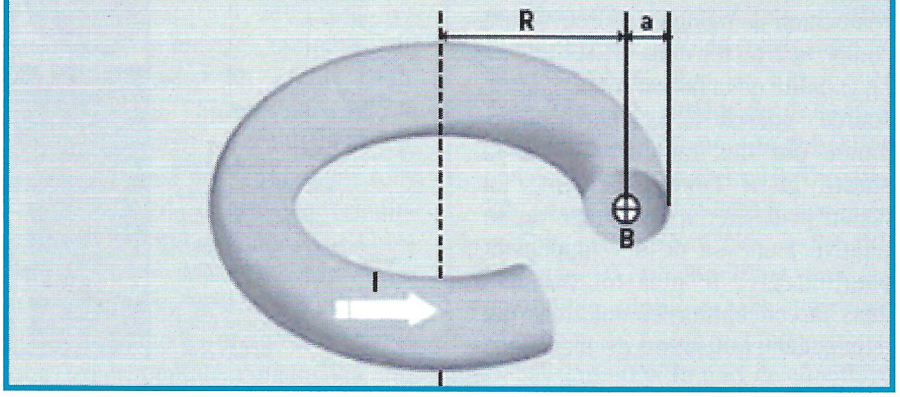
Bien qu'ayant un volume de plasma cinq fois inférieur à celui du JET, Tore Supra n'en est pas moins le plus grand tokamak à aimants supraconducteurs au monde. Cette caractéristique, associée à la présence de composants face au plasma activement refroidis par circulation d'eau, permet l'étude des plasmas en régime quasi permanent. Tore Supra est équipé de 18 bobines toroïdales supraconductrices. Le matériau supraconducteur adopté est l'alliage niobium-titane refroidi dans un bain d'hélium superfluide (1,8 K ; 1 bar) dont les remarquables propriétés de transfert thermique assurent un refroidissement efficace du supraconducteur sans circulation de fluide. Ces aimants sont exploités sans problème majeur depuis 1989, démontrant du même coup la viabilité de la technologie supraconductrice dans la configuration d'un dispositif de fusion contrôlée.

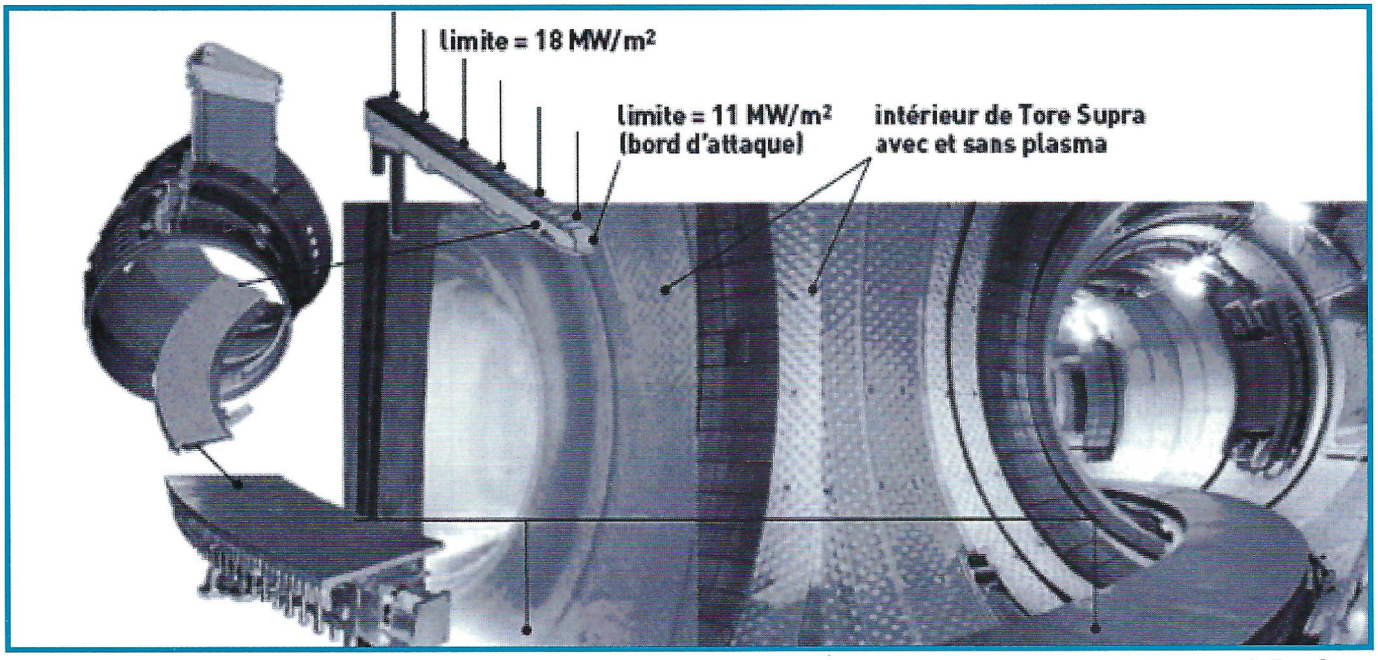
Les composants face au plasma sont activement refroidis, deuxième caractéristique unique de Tore Supra. Ils sont principalement constitués d'un limiteur pompé toroïdal (LPT), capable d'extraire en permanence 15 MW de puissance transférée par les particules du plasma, soit 3 MW/m^2 en moyenne et au moins $10MW/m^2$ en crête en continu (des valeurs très proches de celles du réacteur). Ce limiteur, placé en partie basse de la machine, est constitué d'une structure porteuse en acier inoxydable sur laquelle sont fixées des aiguilles en composite de fibre de carbone (CFC) et cuivre durci (CuCrZr) capables de supporter de forts flux thermiques (plusieurs MW/m2) en continu.

Ces technologies ont permis de réaliser des décharges de plusieurs minutes. La décharge record de décembre 2003, d'une durée de 6 minutes et demie, soutenue par une puissance de 3 MW, a permis d'extraire plus de 1000 mégajoules d'énergie thermique.

Tableau. Caractéristiques des principales machines de fusion de Type Tokamak

machine	pays	petit rayon a(m)	grand rayon R(m)	courant plasma I (MA)	champ magnétique B (T)
ITER	international	2	6,2	15	5,3
JET	Union européenne	1	2,96	7	3,5
JT-60U	Japon	0,85	3,2	4,5	4,4
TFTR (fermée)	USA	0,85	2,5	2,7	5,6
Tore Supra	France	0,8	2,4	2	4,2
T-15	Russie	0,7	2,4	2	4
DIII-D	USA	0,67	1,67	3	2,1
ASDEX-U	Allemagne	0,5	1,67	1,4	3,5
TEXTOR-94	Allemagne	0,46	1,75	0,8	2,6
FT-U	Italie	0,31	0,92	1,2	7,5
TCV	Suisse	0,24	0,875	1,2	1,43
C-MOD	USA	0,22	0,67	1,5	8,07
MAST	GB	0,5	0,7	2	0,63
NSTX	USA	0,67	0,85	1	0,6





Les composants internes de Tora Supra.

Des technologies spécifiques pour le réacteur

Les technologies plus spécifiques au réacteur sont aussi étudiées. Les couvertures tritigènes font l'objet d'études spécifiques, tant au niveau conceptuel qu'expérimental (procédés de fabrication, réalisation de maquettes...). Il a été, par exemple, démontré que la production autosuffisante de tritium était réalisable, et ce, selon divers concepts. L'Europe en étudie deux qui diffèrent selon les matériaux tritigènes et le fluide caloporteur employés.

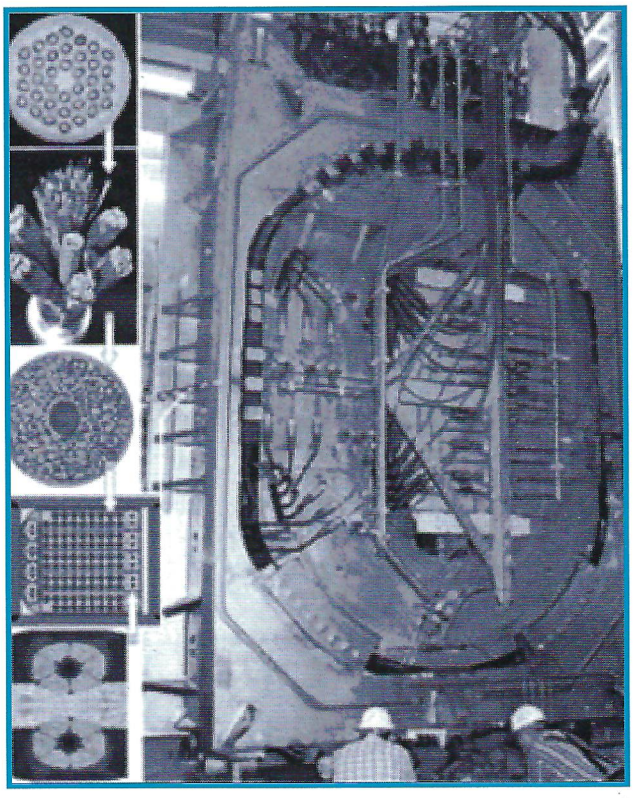
Le premier utilise un matériau liquide sous forme d'alliage de plomb (LiPb) refroidi à l'eau sous pression; le second, des céramiques et de l'hélium comme réfrigérant.

Plusieurs céramiques font l'objet d'études (Li_4SiO_4, Li_2TiO_3), incluant leur méthode de fabrication, qui en sont à un stade de préindustrialisation. Ces études déboucheront sur la réalisation de modules de couverture complets à tester dans ITER.

La viabilité de la fusion comme future source d'énergie sera en partie déterminée par des facteurs liés à la sûreté et à l'environnement. La fusion peut tirer ici avantage de sa relative jeunesse de développement pour intégrer le plus tôt possible dans la conception les solutions qui impliquent l'utilisation de matériaux de structure dits à basse activation. Ces derniers, qui ont l'avantage de présenter une décroissance rapide de leur activation, sont particulièrement développés en Europe qui a axé ses études sur les aciers martensitiques[2]. Une nuance particulière (Eurofer) a été sélectionnée et a déjà donné lieu à des coulées significatives (quelques tonnes) permettant la fabrication d'échantillons soumis à de nombreux tests (comportement sous irradiation, corrosion, soudage...).

Le développement de ces matériaux et la validation de leurs performances sous des flux de neutrons typiques de la fusion (neutrons de 14MeV) sont d'une importance majeure pour le futur réacteur. Ces matériaux constituent un élément déterminant pour l'efficacité thermique et la durée de vie des composants internes et, par corollaire, ils déterminent en grande partie le rendement global et la disponibilité du réacteur. Une validation complète suppose la

(2) Acier martensitique (du nom du physicien Martens) : acier au carbone à basse teneur en nickel et/ou en manganèse issu de la trempe d'un acier, traitement qui déforme le réseau à structure cubique centrée de façon homogène. Les aciers de ce type constituent le groupe le plus important des aciers inoxydables.



Conception et tests d'éléments supraconducteurs (de haut en bas, le brin, le câble et sa coupe, et une connexion) pour ITER.

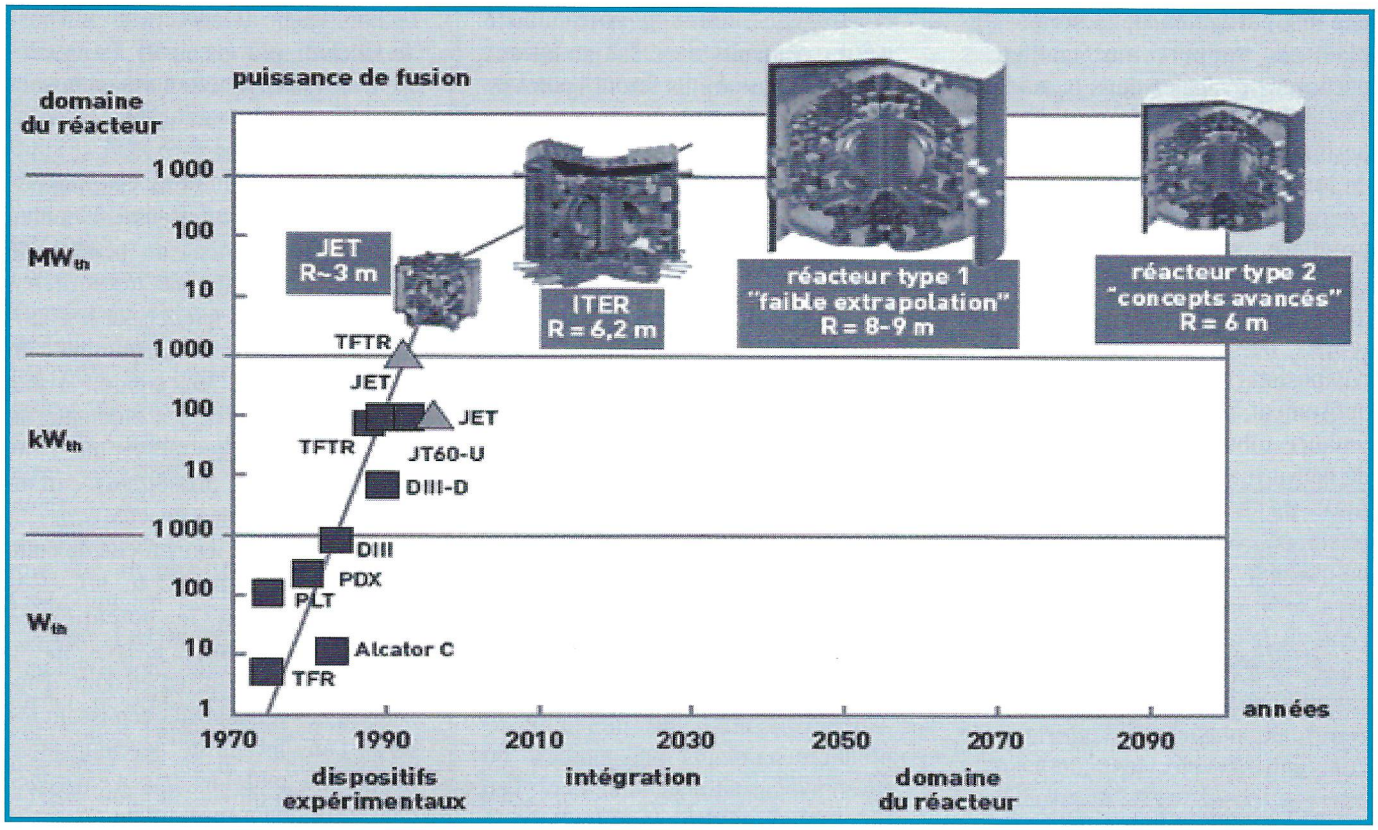


Figure 4.
Le chemin vers le réacteur : l'objectif devrait être atteint dans la seconde moitié du siècle

disponibilité d'une source de neutrons de 14MeV dont le développement fait l'objet du programme international IFMIF (International Fusion Material Irradiation Facility).

ITER, la prochaine étape

Les exemples précédents illustrent les progrès considérables réalisés en physique, en technologie, ou encore sur l'image que l'on peut se faire aujourd'hui d'un réacteur de fusion électrogène. Ces résultats ont été obtenus sur plusieurs installations expérimentales "spécialisées" : la physique des plasmas performants sur des temps courts (quelques secondes) sur JET, la problématique des décharges longues (quelques minutes) sur Tore Supra, sans oublier les nombreuses avancées, en particulier sur les principes d'amélioration du confinement, obtenues sur l'ensemble des machines exploitées par la communauté européenne et internationale (tableau). Des réponses à la majorité des interrogations suscitées par les études sont apportées, mais de façon encore indépendante. La prochaine étape doit constituer l'intégration de tous ces résultats au sein d'une même installation : c'est l'un des objectifs du projet international ITER.

Les origines du projet

Au cours des années 1980, le succès des expérimentations comme celles menées sur le JET, associé aux progrès dans la compréhension du comportement du plasma réalisés dans des installations plus modestes, a amené la communauté scientifique à étudier une installation expérimentale de "prochaine étape"dédiée à l'étude des plasmas proches de ceux d'un réacteur de fusion. Lors du Sommet de Genève en novembre 1985, le président Gorbatchev propose aux présidents Reagan et Mitterrand de construire la prochaine génération de tokamak sur la base d'une collaboration intégrant les quatre partenaires majeurs du programme fusion. En octobre 1986, les États-Unis, l'Europe ainsi que le Japon répondent favorablement : le projet ITER est né. Il regroupe sous les auspices de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) les États-Unis, le Japon, l'Union soviétique et l'Europe associée au Canada. ITER est donc la première installation expérimentale conçue via une collaboration scientifique à l'échelle planétaire. Une première version du projet incluant la réalisation de maquettes à grande échelle des principaux composants est présentée en 1998. Les États-Unis se retirent alors du projet. Les partenaires restants orientent leurs efforts vers la conception d'une installation conservant l'essentiel des objectifs scientifiques tout en ayant un coût réduit. La phase d'ingénierie détaillée de cette nouvelle version s'est achevée en juillet 2001.

Les objectifs d'ITER

L'objectif essentiel du programme ITER est de démontrer la faisabilité scientifique et technologique de l'énergie de fusion par confinement magnétique. La machine pourra produire 500 MW de puissance de fusion pendant plus de 400 s avec l'assistance de 50MW de puissance de chauffage, soit une amplification de l'énergie d'un facteur 10 (Q = 10). Elle permettra donc l'étude des plasmas en combustion, c'est-à-dire des plasmas où le chauffage par les particules alpha créées lors des réactions de fusion est majoritaire. Dépassant 60%, la part de chauffage

due aux particules alpha sera sextuplée par rapport aux meilleures décharges réalisées dans la machine JET. ITER réalisera la synthèse des performances de Tore Supra (plasma de longue durée) et du JET (plasma énergétique). ITER sera aussi la première machine intégrant la plupart des technologies essentielles au réacteur : aimants supraconducteurs de très grande taille, composants face au plasma refroidis activement, gestion du tritium, maintenance robotisée, tests de modules de couvertures tritigènes.

Avec un grand rayon de 6,2 m (distance axe de la machine – centre du plasma), le volume plasma d'ITER sera environ huit fois supérieur à celui du JET. Le système cryomagnétique, entièrement supraconducteur, est conçu pour délivrer 5,3 T au centre du plasma. À l'intérieur de l'enceinte à vide, les composants internes (cassettes de divertor, limiteurs, modules de couverture...) pourront être entièrement remplacés par maintenance robotisée. Les principaux composants d'ITER ont fait l'objet d'études très détaillées allant jusqu'à la réalisation de maquettes à l'échelle 1, comme pour l'enceinte à vide ou la manipulation du divertor. Les différents câbles supraconducteurs et connexions supraconductrices ont été testés avec succès en 2000 et 2001 sous la forme de bobines modèles (câble à échelle 1, bobine échelle 1/3) permettant également de valider les différentes étapes de la fabrication dans l'industrie.

Le coût du projet est évalué à environ 4,7 milliards d'euros à partager entre les partenaires. Après huit années de construction, la mise en route se fera de façon progressive avec d'abord une phase de plasmas d'hydrogène, qui permettra de tester la machine et de valider les scénarios de confinement pour les phases en deutérium et deutérium-tritium. La durée d'exploitation est évaluée à une vingtaine d'années. ITER est une expérience scientifique et technologique destinée à démontrer la faisabilité de cette nouvelle option de production d'énergie. Tous les composants essentiels à un réacteur seront présents, à l'exception de ceux dédiés à la production du tritium et à la génération d'électricité. Ces éléments spécifiques du réacteur électrogène auront la particularité d'être construits avec des matériaux basse activation : ils feront l'objet de tests à petite échelle (module de couverture) dans ITER.

L'après-ITER : quelles extrapolations pour le réacteur ?

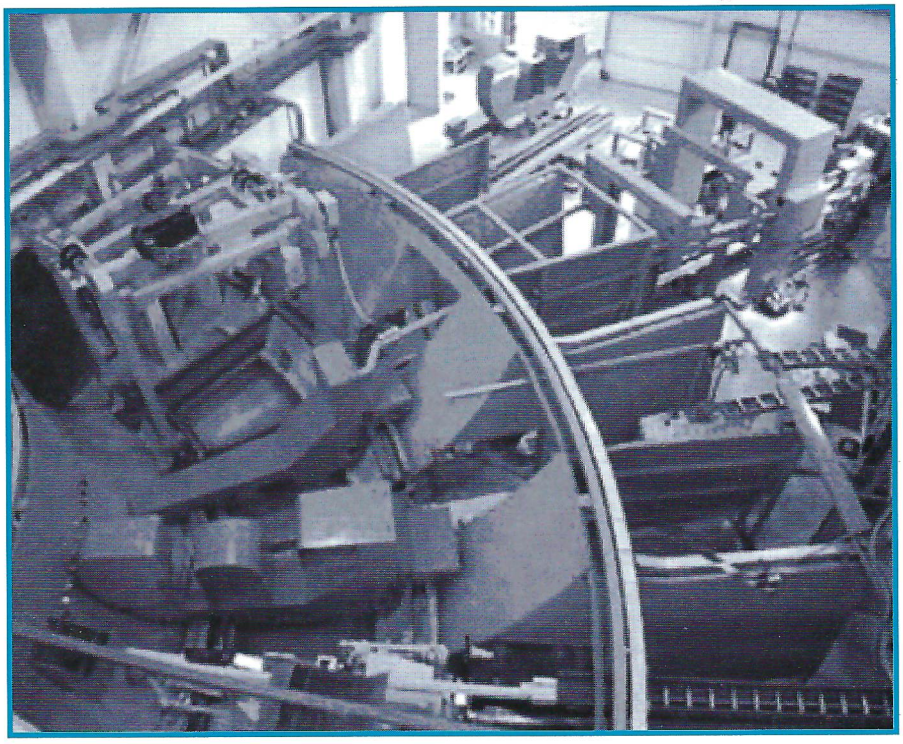
Les options retenues pour le fonctionnement d'un réacteur reposent sur des extrapolations plus ou moins fortes des options retenues pour ITER *(figure 4 voir page précédente)*. Les réacteurs avec des extrapolations modérées ne nécessitent pas de sauts technologiques. Ils impliquent cependant un contrôle de la puissance transmise aux éléments de première paroi par une maîtrise du rayonnement du plasma de bord. Les rendements globaux sont les mêmes que ceux rencontrés dans les réacteurs nucléaires classiques (30 – 40 %). La taille se situe autour des 9 m de grand rayon.

Les réacteurs avancés supposent des extrapolations fortes par rapport aux connaissances actuelles, tout en restant crédibles. Leur développement serait en général accompagné des mêmes extrapolations au niveau technologique (structure en carbure de silicium, par exemple). La topologie et les paramètres du plasma sont choisis afin de minimiser la puissance recirculante.

Les instabilités sont supposées complètement maîtrisées, de même que le rayonnement du plasma de bord où un "manteau" radiatif est établi, sans conséquence sur le confinement et les performances du plasma central. Ceci conduit à des flux de chaleur sur les éléments de première paroi plus faibles que ceux des concepts précédents (d'un facteur deux, moins de 10MW/m²) et une taille de réacteur proche de celle d'ITER (typiquement 6 m). Ces concepts offrent le potentiel de pouvoir fonctionner à très haute température (1000 °C) et donc d'accéder à des rendements dépassant les 60%. Leur niveau de développement ne permet toutefois pas d'envisager leur utilisation à court terme.

La construction d'un réacteur électrogène (démonstrateur ou prototype) nécessitera des programmes d'accompagnement ayant une vocation plus orientée "réacteur". Sont notamment déjà en cours ceux concernant le développement de matériaux basse activation et des couvertures tritigènes. Ils sont complétés par des études plus globa-

Installation d'essai du remplacement robotisé des éléments du divertor d'ITER à Brasimone (Italie). Un prototype à l'échelle 1 du robot de montage des éléments de la protection interne de la chambre à vide a par ailleurs été réalisé au Japon.



les sur les aspects socio-économiques. Il peut paraître prématuré d'évoquer les coûts de production du kilowattheure d'une source d'énergie qui est encore à plusieurs dizaines d'années de sa commercialisation. Ce type d'étude a pourtant plusieurs intérêts.

Le premier est de mettre en évidence l'impact de telle variable physique ou de telle hypothèse technologique sur les coûts. Ces résultats qui fixent les ordres de grandeurs relatifs et les sens de variation, ont une influence directe sur la stratégie de développement.

Le deuxième intérêt est de vérifier que le dispositif proposé peut correspondre aux exigences du marché. Les modèles économiques employés sont dans le prolongement direct de ceux employés pour la conception, l'optimisation et le calcul des coûts des machines actuelles ou d'ITER. Sous beaucoup d'aspects, ce dernier est voisin du réacteur. Les coûts de construction ont été directement déterminés par les industriels en Europe, au Japon, en Russie et aux États-Unis. On dispose ainsi d'une base d'évaluation solide.Les incertitudes qui restent, certes importantes, portent plus sur la disponibilité du réacteur que sur le coût direct de ses composants.

Les études montrent que, contrairement à ce qui a été parfois avancé, les coûts de l'énergie de fusion ne sont pas de nature à hypothéquer son avenir. En intégrant les impacts environnementaux et des hypothèses conservatrices pour la physique et les options technologiques, le coût du kilowattheure fusion se situe entre 1,5 et 2 fois le coût du kilowattheure nucléaire "fission", entre celui de l'éolien et celui du solaire.

Préparer l'avenir énergétique

Les recherches civiles sur la fusion ont véritablement démarré à la fin des années 1950 avec un effort important de coopération internationale. Les progrès ne se sont depuis jamais démentis. Le bilan énergétique du plasma, mesuré par le produit de la densité, de la température et du temps de confinement de l'énergie, a été multiplié par 1000 ! Plusieurs mégawatts de puissance fusion ont déjà été produits et des décharges de plusieurs minutes réalisées. Les bases scientifiques sont aujourd'hui suffisamment solides pour envisager la construction d'un appareil validant la faisabilité de l'énergie de fusion : ITER. L'insertion dans l'offre énergétique pourrait avoir lieu dans la seconde partie du siècle, à une époque où l'épuisement des ressources classiques et les conséquences climatiques de notre consommation se feront sentir de façon forte. La fusion présente des avantages qui peuvent contribuer à une production d'énergie respectueuse de notre environnement.

Il est très certainement du devoir de la génération actuelle de préparer la base de connaissances permettant aux décideurs de demain d'envisager sereinement toutes les solutions énergétiques possibles.

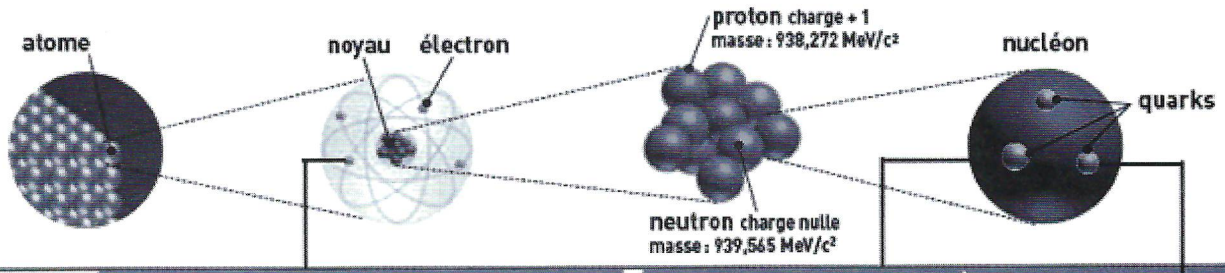
Particules élémentaires et interactions fondamentales

Les neutrinos sont les plus furtives des particules du modèle standard de la physique des particules, cadre théorique qui décrit toutes les particules élémentaires connues et les interactions fondamentales auxquelles elles participent (tableau page suivante). Les constituants élémentaires de la matière, les fermions, se partagent en deux grandes catégories, les leptons qui ne répondent pas à l'interaction forte, et les quarks qui subissent toutes les interactions. Les six quarks forment trois paires (bas/haut, étrange/charmé et beauté/top). Dans la catégorie des leptons, les leptons chargés (électron e-, muon μ, tau τ) participent à l'interaction électromagnétique et à l'interaction faible et les leptons neutres (neutrino électronique νe-, neutrino muonique $\nu\mu$, neutrino tauique $\nu\tau$) ne sont assujettis qu'à l'interaction faible.

Au sein du modèle standard, les neutrinos sont de masse nulle mais des expériences ont prouvé qu'ils en possèdent une, très faible, dont la valeur exacte reste inconnue à ce jour. La participation des constituants élémentaires aux interactions fondamentales est conditionnée par leurs nombres quantiques, ou charges d'interaction (charge électrique, charge de couleur(1)...). À chaque constituant de la matière est associée son antiparticule, particule de même masse et de charges opposées. La force gravitationnelle, qui n'est pas incluse dans le modèle standard, s'exerce sur tous les fermions proportionnellement à leur masse.

Le tableau des constituants élémentaires de la matière montre une autre classification, indépendante de leur participation aux interactions fondamentales, en trois générations ou familles. D'une famille à l'autre, les quarks et les leptons chargés de mêmes charges ne diffèrent que par leurs masses. L'électron, le quark haut et le quark bas, qui appartiennent à la première famille, sont les particules massives les plus légères. Stables, elles sont les constituants de la matière ordinaire. Par exemple, le proton contient deux quarks haut et un quark bas ; le neutron deux quarks bas et un quark haut. Les particules des deux autres familles sont instables et se désintègrent rapidement en particules stables de première génération.

(1) Charge de couleur : nombre quantique qui détermine la participation aux interactions fortes. La charge de couleur peut prendre trois valeurs : "rouge", "verte" ou "bleue", ces couleurs n'ayant rien à voir avec les couleurs visibles. Chaque quark porte l'une des trois charges de couleur et chaque antiquark l'une des trois charges d'anticouleur. Les gluons sont dotés de charges doubles couleur-anticouleur



		leptons peuvent se déplacer librement		quarks prisonniers de particules plus grandes, ils ne sont pas observés individuellement	
Fermions La matière ordinaire est composée de particules de ce groupe.	première famille	**électron** responsable de l'électricité et des réactions chimiques sa charge est - 1 masse : 0,511 MeV/c²	**neutrino électronique** sans charge électrique et interagissant très rarement avec le milieu environnant	**bas** sa charge électrique est - 1/3 le proton en contient un, le neutron deux masse : 5 – 8,5 MeV/c²	**haut** sa charge électrique est +2/3 le proton en contient deux, le neutron un masse : 1,5 – 4,5 MeV/c²
Pour la plupart, ces particules étaient présentes juste après le big bang. Aujourd'hui, on ne les trouve que dans les rayons cosmiques et auprès des accélérateurs.	deuxième famille	**muon** un compagnon plus massif de l'électron masse : 105,658 MeV/c²	**neutrino muonique** propriétés similaires à celles du neutrino électronique	**étrange** un compagnon plus lourd du "bas" masse : 80 – 155 MeV/c²	**charmé** un compagnon plus lourd du "haut" masse : 1 000 – 1 400 MeV/c²
	troisième famille	**tau** encore plus lourd masse : 1 777 MeV/c²	**neutrino tauique** propriétés similaires à celles du neutrino électronique	**beauté** encore plus lourd masse : 4 000 – 4 500 MeV/c²	**top** le plus lourd de la famille (observé en 1995) masse : 174 300 ± 5 100 MeV/c²
Bosons vecteurs Particules fondamentales qui assurent la transmission des forces de la nature.		**photon** grain élémentaire de la lumière, porteur de la force électromagnétique	**gluon** porteur de la force forte entre quarks	**W±, Z⁰** porteurs de la force faible, responsables de certaines formes de désintégration radioactive	

Boson de Higgs ? responsable de la "brisure de symétrie électrofaible"

Tableau des constituants élémentaires

(huit combinaisons possibles).
C'est la raison pour laquelle toute la matière stable de l'Univers est faite des constituants de la première famille.
D'après la mécanique quantique, pour qu'il y ait interaction, il faut qu'au moins une particule élémentaire, un boson, soit émise, absorbée ou échangée.
Le photon est le vecteur de l'interaction électromagnétique, les bosons W^+, W^- et Z^0 sont les médiateurs de l'interaction faible et les gluons les messagers de l'interaction forte.
Les quarks et les leptons chargés échangent des photons mais conservent leur charge électrique après l'échange, le photon n'ayant pas de charge électrique. Comme la masse du photon est nulle, la portée de l'interaction électromagnétique est infinie.
Dépourvus de charge électrique, les neutrinos sont les seuls fermions élémentaires à ne pas être sensibles à l'interaction électromagnétique.
Dans la théorie électrofaible (unification des interactions faible et électromagnétique), l'interaction faible présente deux aspects : l'interaction faible par courants chargés où les vecteurs de l'interaction sont W^+ et W^-, et l'interaction faible par courant neutre où le médiateur de l'interaction est Z^0. Ces deux formes de l'interaction faible agissent entre tous les fermions élémentaires (quarks, leptons chargés et neutrinos). La masse de ces bosons étant très élevée (80400 MeV/c2 pour $W^\pm$ et 91 180 MeV/c2 pour Z^0), la portée de l'interaction faible est infime, de l'ordre de 10-18 m. Les bosons $W^\pm$ possédant une charge électrique non nulle, les fermions qui les échangent changent de charge électrique et également de nature (saveur). Par contre, le boson Z^0 étant dépourvu de charge électrique, les fermions ne changent pas de nature. En fait, l'interaction faible par courant neutre est assez similaire à l'échange d'un photon. En règle générale, si deux fermions peuvent échanger un photon, ils sont aussi capables d'échanger un Z^0. De son côté, un neutrino a la faculté d'échanger un Z^0 avec une autre particule, mais pas un photon.
Seuls les quarks qui possèdent une charge de couleur échangent des gluons, lesquels portent eux-mêmes une charge de couleur. Ainsi, lors d'un échange de gluon entre quarks, ces derniers échangent leurs couleurs respectives. La masse des gluons est nulle, mais étant dotés d'une charge de couleur ils peuvent interagir. La portée de l'interaction forte est donc très courte, de l'ordre de 10-15 m.
Le graviton, vecteur de l'interaction gravitationnelle, n'a pas encore été observé.
La théorie prédit l'existence d'un autre mécanisme d'interaction fondamentale, responsable de la masse des particules élémentaires, dont le messager est le boson de Higgs qui reste à découvrir. Le champ de Higgs permet, selon cette théorie, de donner une masse aux fermions élémentaires interagissant avec lui.

Tableau interactions fondamentales

interaction fondamentale	messager	actions
gravitationnelle	graviton ?	fait s'attirer deux masses entre elles et est responsable de la chute des corps
électromagnétique	photon	est responsable de l'attraction entre électrons et noyaux atomiques, et donc de la cohésion des atomes et des molécules
faible	W^+, W^-, Z^0	à la base de la fusion thermonucléaire dans le Soleil, elle assure sa longévité. La radioactivité β^- et β^+ et les réactions impliquant le neutrino sont des interactions faibles
forte	gluons	assure la cohésion du noyau atomique

Dossier

Eclairage et vision pour l'amélioration des conditions de travail



par Bernard SANSELME,

Contrôleur de Sécurité (Centre Interrégional de Mesures Physiques)

Pourquoi et comment optimiser l'éclairage d'un poste de travail (Sujet traité lors de sa conférence à l'ADASTA en avril 2004)

La vue est la source privilégiée d'information du cerveau, on estime à 80% les informations extérieures qui passent par nos yeux dans notre vie de tous les jours, par rapport à l'ensemble de nos sens. Pour bien comprendre ce qui est nécessaire en terme d'éclairage, nous allons voir ensemble ce qui est nécessaire en terme de vision, l'éclairage n'étant qu'un outil, nécessaire à la vision. Cet exposé orienté sur les postes de travail est applicable dans toutes situations de vision. Lorsque la lumière, venant d'une source, vient éclairer un objet ponctuel de petite taille, cet objet renvoie la lumière dans différentes directions. Pour faire le parallèle avec notre oeil, nous allons voir ce qui se passe à l'intérieur d'une boite dans laquelle nous aurons percé un trou de très petite taille.

Comme la lumière se déplace en ligne droite dans un milieu transparent homogène, la lumière venant de l'objet, passant par le trou de la boîte, va arriver dans le fond de la boîte en un endroit unique : On dira que l'image du point, dans la boîte, est nette (fig. 1 et fig.2).

Si l'objet n'est plus ponctuel, mais linéaire, comme cette flèche (fig.3), chacune des pointes de la flèche

Figure 1

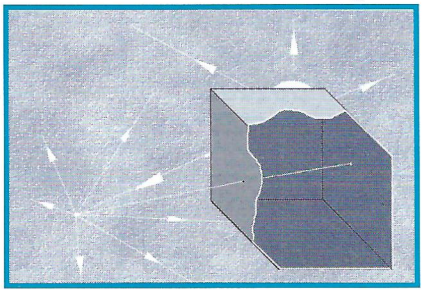


Figure 2

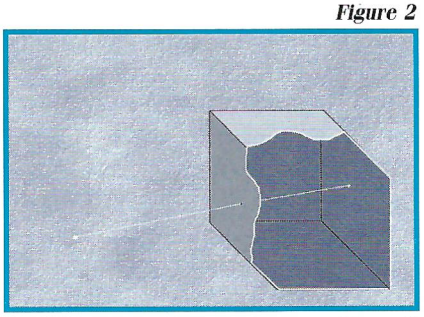
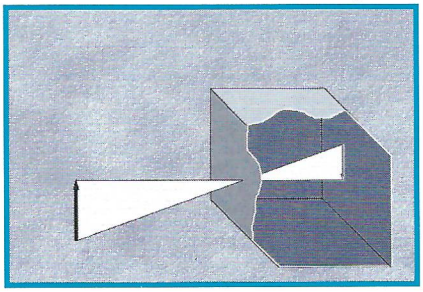


Figure 3



envoie sa lumière, entre autres, dans le trou de la boîte, et chaque point de l'objet aura une image unique dans le fond de la boîte. La flèche aura son image reconstituée, nette et à l'envers, dans le fond de la boite. Si l'objet est plus éloigné, l'image de la flèche sera plus petite mais toujours nette sur le fond de la boîte. Si l'objet est plus proche, l'image sera plus grande mais toujours nette au fond de la boîte.

Nota : pour notre œil, l'image est à l'envers, notre cerveau la considère à l'endroit.

Maintenant, reprenons notre objet ponctuel.. Mais cette fois-ci, pour permettre à plus de lumière de rentrer, élargissons le trou (fig.4). La lumière venant de l'objet et passant par le trou n'arrive plus dans le fond de la boîte en un point unique, mais sur une surface. L'objet a donc une image floue.

Je reprends la flèche. Chacun des points de cette flèche a son image floue : je dirai que l'image de la flèche est floue (fig. 5). Pour remédier à ce problème, on utilise une lentille correctrice fig. 6) qui a comme propriété de rediriger les rayons lumineux vers un point unique. (La boîte a besoin de lunettes.)

On utilise cette propriété qu'à la lumière, de changer de direction lorsque la densité du milieu transparent change et en fonction de l'angle

Figure 4

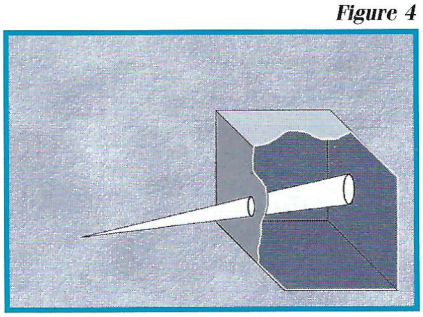


Figure 5

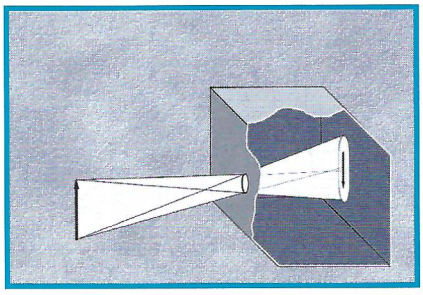
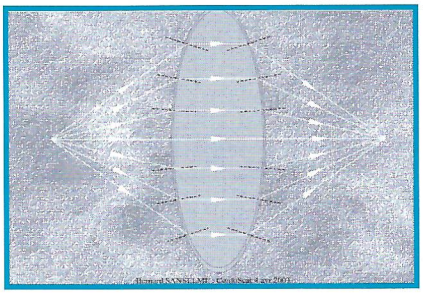
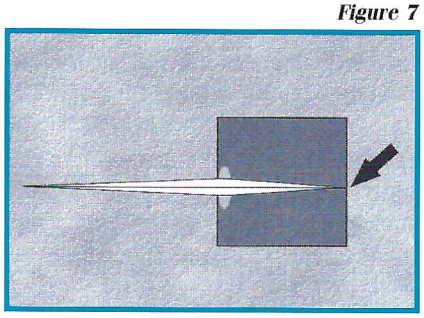


Figure 6



qu'elle forme avec la surface. Et de même à la sortie de la lentille.
Dans la boîte, derrière l'ouverture, je place la lentille de manière à obtenir de nouveau une image nette (fig.7). Pour l'image de la flèche, l'application de la même solution provoque le

Figure 7



même effet : la netteté de mon objet (fig.8). Mais si l'objet est plus loin, l'image au fond de la boîte est floue. Si l'objet est plus près, l'image au fond de la boîte est floue aussi.

Figure 8

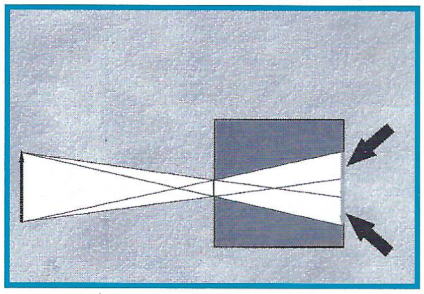
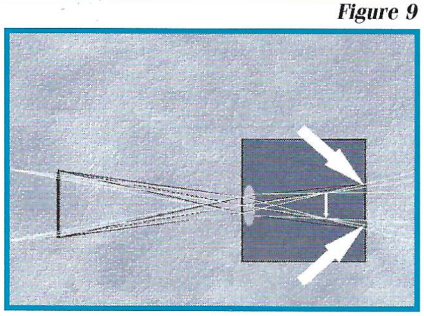


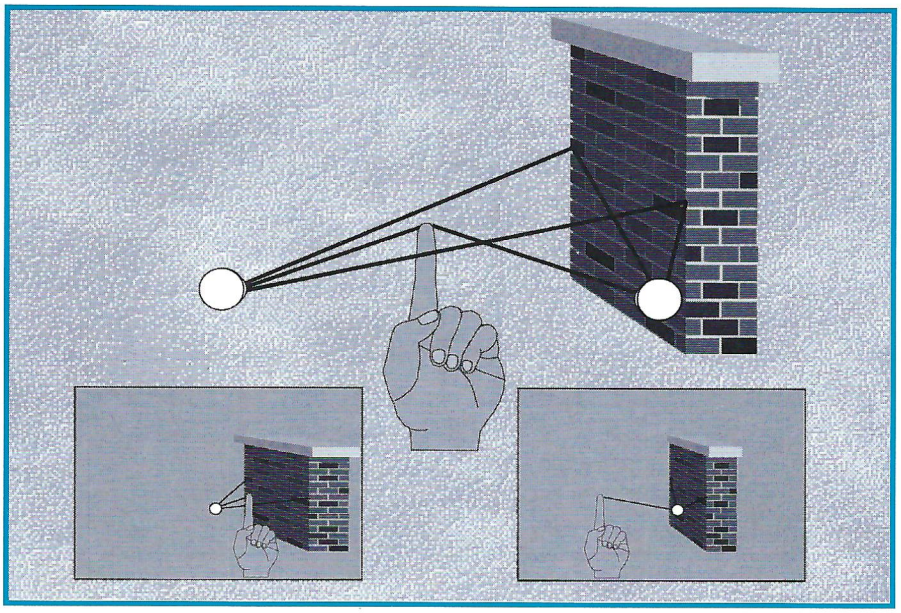
Figure 9



Mais compte tenu, entre autres, que les cellules de l'oeil ont une certaine dimension, il sera possible d'accepter un certain flou que notre œil considérera comme net. Je vais pouvoir accepter une certaine tolérance, un certain flou, et accepter l'image comme nette entre une distance minimum et une distance maximum. Cette tolérance sera appelée "profondeur de champ". Cette profondeur de champ sera d'autant plus importante que la dimension du trou sera faible. La mise au point au fond de la boîte sera d'autant plus facile que le trou sera petit. Moins il y aura de lumière, plus l'ouverture sera grande et plus la mise au point de l'image sera difficile.

Vision du relief :

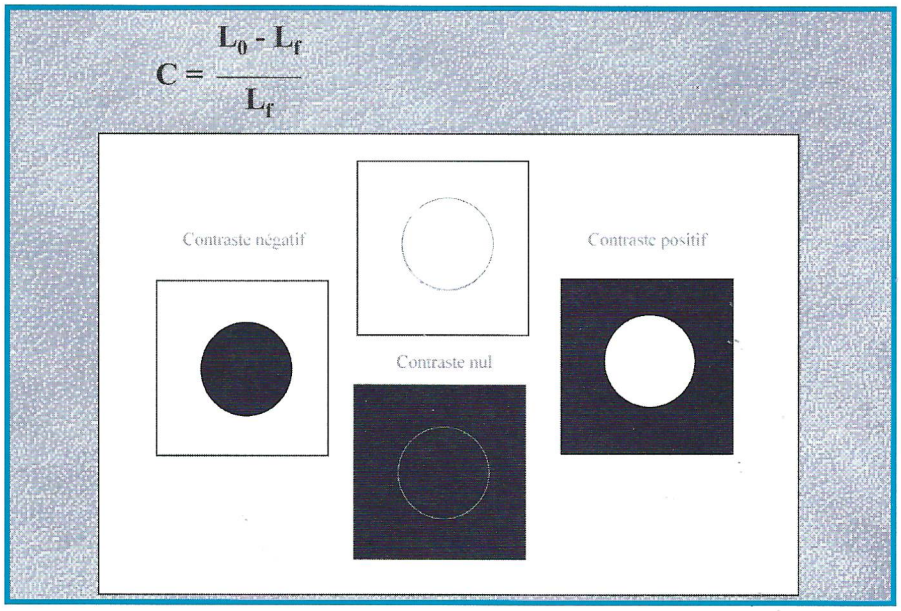
Figure 10



L'oeil de gauche voit le mur sous un certain angle et le doigt devant le mur.
L'oeil de droite voit le mur sous un autre angle et le doigt à gauche du mur.
C'est l'analyse des différences entre ces deux images qui permet au cerveau de calculer les distances et donc le relief... Avec un seul oeil la distance est estimée avec la puissance de mise au point, méthode qui manque de précision, ou en recréant une deuxième image en déplaçant la tête.

Vision du contraste :

Figure 11



Un objet noir sur fond blanc (contraste négatif) permet une bonne distinction.
Un objet blanc sur fond noir (contraste positif) permet aussi une bonne distinction.
Par contre un objet blanc sur fond blanc ou un objet noir sur fond noir (contraste nul) ne permet pas la distinction. Le contraste doit être d'autant plus important que la luminance du fond est faible. Les cellules qui transforment l'énergie lumineuse en influx nerveux pour être transmis au cerveau tapissent le fond de l'oeil. Elles sont de deux types:
- Les bâtonnets : de forme cylindrique, sont très sensibles, ils fonctionnent avec peu de lumière mais ne peuvent dire que s'il y a de la lumière ou s'il n'y en a pas... On dit qu'ils ne voient que du noir ou du blanc.
- Les cônes : de forme conique, filtrent une partie de la lumière et ne sont sensibles qu'à une plage de couleurs. Ils ont besoin de plus de lumière pour fonctionner.

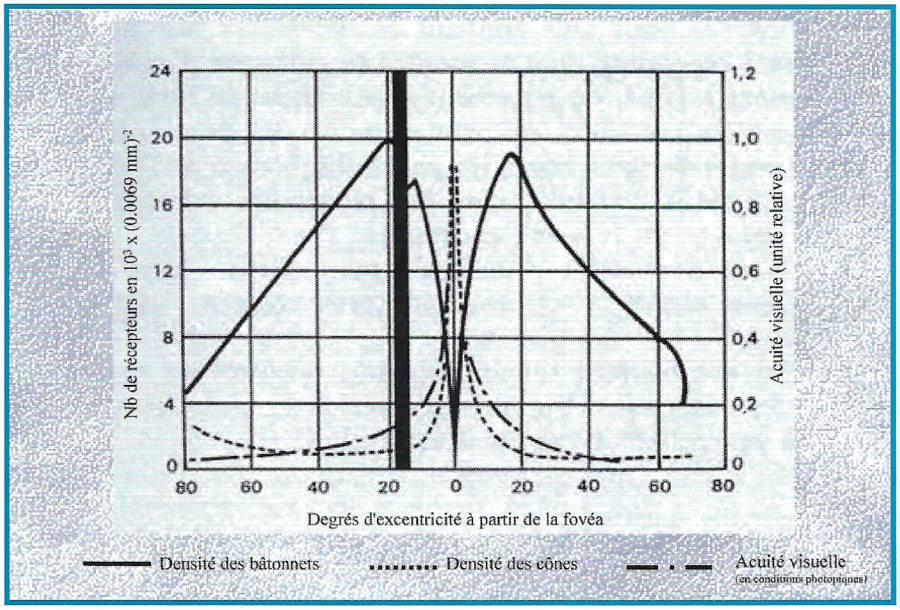


Figure 12

La répartition des cellules sur la rétine n'est pas uniforme : le schéma ci-dessous représente en développé la répartition de chaque type de cellule.

Dans l'axe de vision il n'y a que des cônes. (courbe en pointillés) c'est une vision fine, vision de jour et vision des couleurs. En s'écartant de cet axe de vision le nombre de ces cônes diminuent au profit des bâtonnets qui sont en nombre maximum sous un angle de 20°. Puis leur nombre diminue de nouveau. (courbe en trait continu) c'est la vision périphérique très sensible aux mouvements et très importante en vision nocturne.

Nota : le gros trait noir symbolise la position du nerf optique, lieu entièrement dépourvu de cellule sensible (tache aveugle).

Après un éblouissement, le sujet était placé dans le noir et on mesurait le temps nécessaire pour détecter une lumière de très faible intensité.

Lorsque l'intensité lumineuse était relativement importante, le temps de détection était très faible. Le temps de détection était de plus en plus long lorsque l'intensité lumineuse était de plus en plus faible.

Pour les valeurs représentées par des points noirs (valeurs supérieures au point de discontinuité de la courbe) le sujet pouvait affirmer que la lampe qu'il avait détectée était bleue. Pour les valeurs représentées par des ronds, le sujet détectait la lumière, mais était incapable de dire de quelle couleur elle était. Ceci montre bien la différence entre les courbes de sensibilité des cônes (les points) et celle des bâtonnets (les ronds).

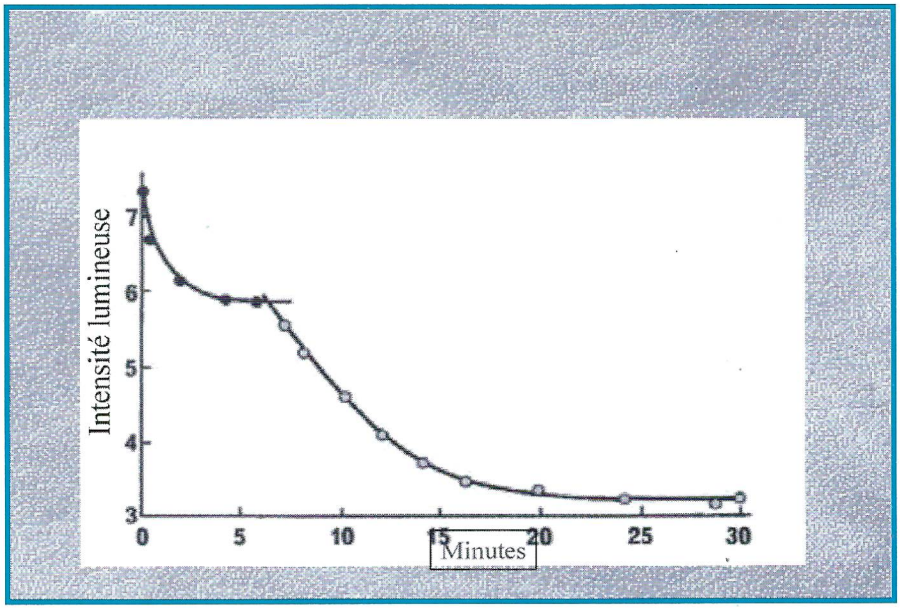


Figure 13

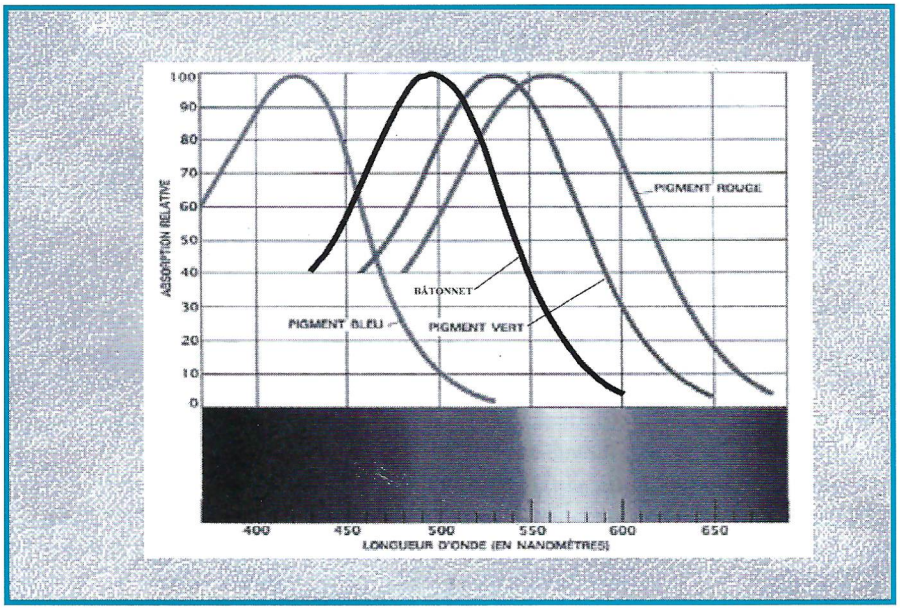


Figure 14

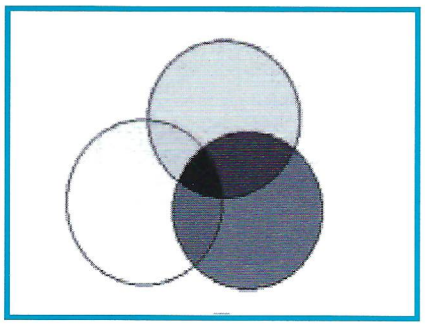
Notre oeil distingue les couleurs à l'aide de trois sortes de capteurs spécialisés chacun dans une plage de couleur (rouge, vert et bleu) et interprète l'ensemble du spectre visible par combinaison entre ces trois capteurs (fig. 14). On notera que ces derniers demandent une quantité de lumière relativement importante pour pouvoir fonctionner. Un quatrième type de capteur permet de voir avec peu de lumière mais seulement en noir et blanc (il y a de la lumière ou il n'y en a pas).

Nota : les courbes sont représentées en fonction du maximum de leur possibilité de détection de chacune d'entre elles. En particulier la courbe bleue devrait être représentée beaucoup plus basse et la noire beaucoup plus haute.

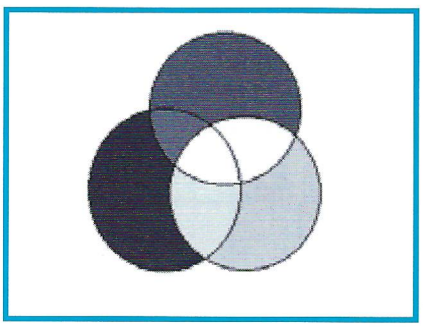
Synthèse des couleurs :

La vision des couleurs peut se faire :

- Soit par soustraction : on filtre la lumière blanche avec des matériaux qui ne laissent passer qu'une partie des couleurs de la lumière. Si on filtre toutes les couleurs il ne reste plus rien, donc du noir.
- Soit par addition : on ajoute de la lumière de couleur. L'ensemble des couleurs forme du blanc.



Synthèse soustractive



Synthèse additive

Figure 15

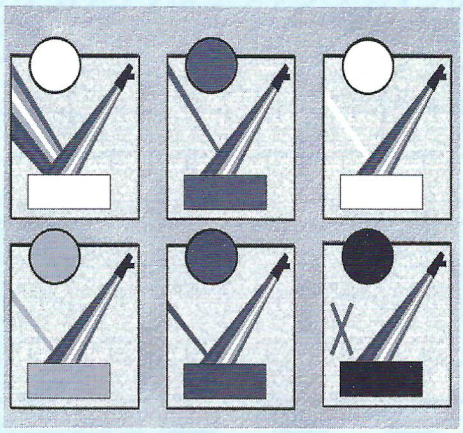


Figure 16

- J'envoie de la lumière blanche (ensemble du spectre) sur un objet blanc : l'objet me paraît blanc.
- J'envoie de la lumière blanche sur un objet rouge : l'objet me paraît rouge. Les autres couleurs sont absorbées.
- J'envoie de la lumière blanche sur un objet jaune : l'objet me paraît jaune.
- J'envoie de la lumière blanche sur un objet vert : l'objet me paraît vert.
- J'envoie de la lumière blanche sur un objet bleu : l'objet me paraît bleu.
- J'envoie de la lumière blanche sur un objet noir : l'objet me paraît noir; toute la lumière est absorbée.

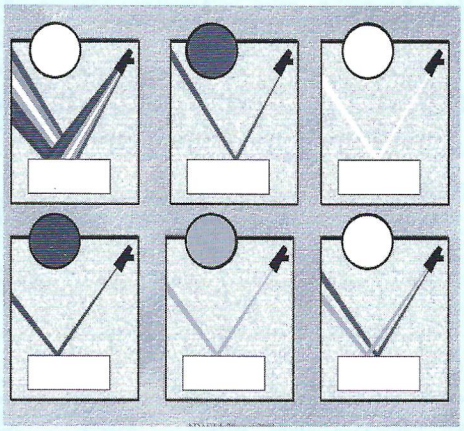


Figure 17

- J'envoie de la lumière blanche (ensemble du spectre) sur un objet blanc : l'objet me paraît blanc.
- J'envoie de la lumière rouge sur un objet blanc : l'objet me paraît rouge. L'objet ne peut pas renvoyer de la lumière qu'il n'a pas reçue.
- J'envoie de la lumière jaune sur un objet blanc : l'objet me paraît jaune.
- J'envoie de la lumière bleue sur un objet blanc : l'objet me paraît bleu.
- J'envoie de la lumière verte sur un objet blanc : l'objet me paraît vert.
- J'envoie à la fois de la lumière verte et de la lumière rouge sur un objet blanc : l'objet me paraît jaune (le vert et le rouge se composent pour me donner la sensation de jaune).

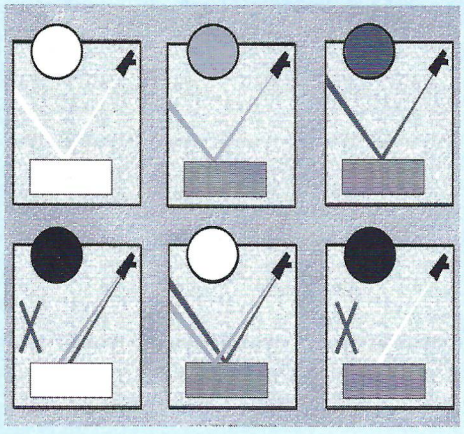


Figure 18

- J'envoie de la lumière jaune sur un objet jaune: l'objet me paraît jaune.
- J'envoie de la lumière verte sur un objet dont la couleur est un mélange de vert et de rouge : l'objet me paraît vert.
- J'envoie de la lumière rouge sur un objet dont la couleur est un mélange de vert et de rouge : l'objet me paraît rouge.
- J'envoie à la fois de la lumière verte et de la lumière rouge sur un objet dont la couleur est jaune : l'objet me paraît noir. (Il n'y a ni vert ni rouge dans la couleur de l'objet)
- J'envoie à la fois de la lumière verte et de la lumière rouge sur un objet dont la couleur est un mélange de vert et de rouge : l'objet me paraît jaune.
- J'envoie de la lumière jaune sur un objet dont la couleur est un mélange de vert et de rouge: l'objet me paraît noir (le jaune est absorbé.

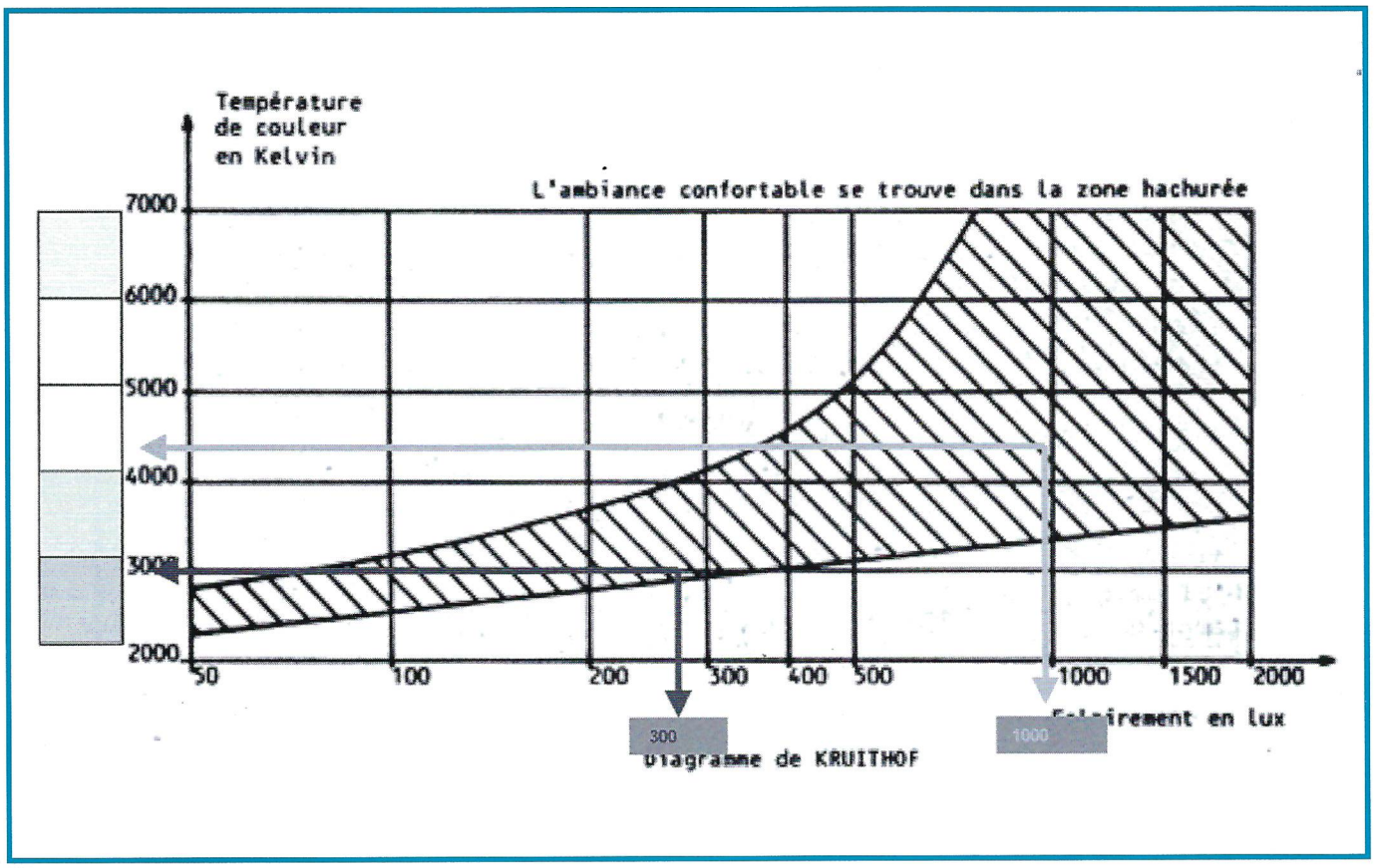


Figure 19 *: Diagramme de Kruithof*

Les études menées dans nos pays tempérés montrent qu'il est préférable de s'éclairer avec une lumière plutôt rose lorsque l'éclairage est faible et avec une lumière plutôt bleutée avec un éclairage intense. Un éclairage intense dans les roses est oppressant, un éclairage bleuté faible est blafard.

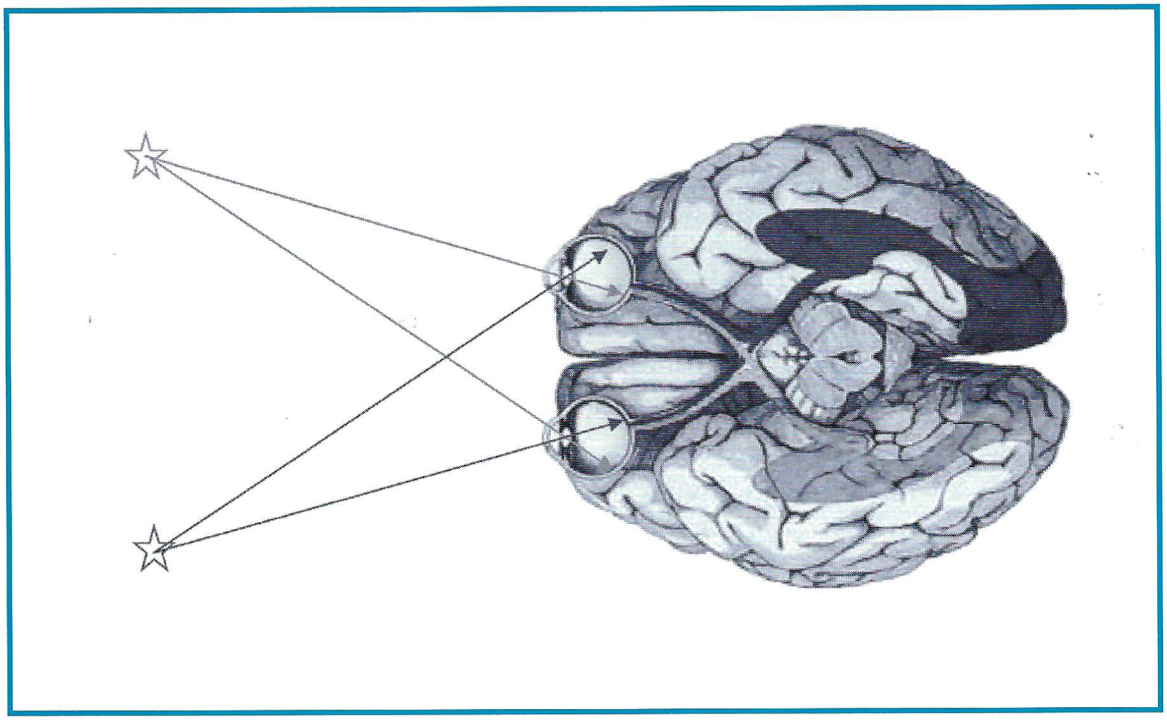
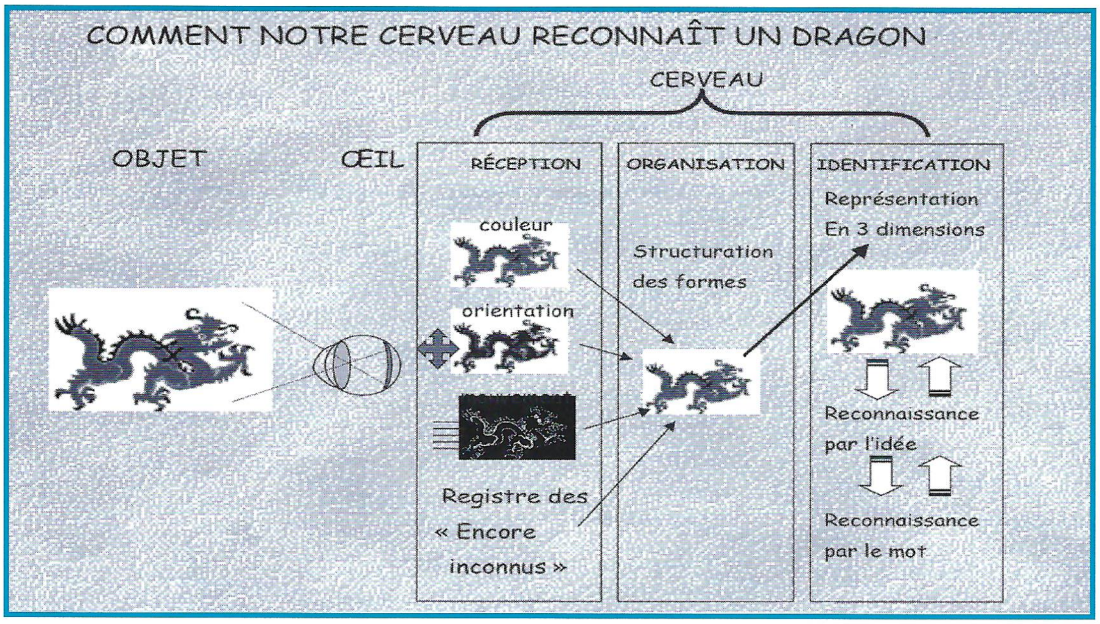


Figure 20

Les informations sont donc captées par cet ensemble très complexe qu'est l'oeil, puis transmises au cerveau qui les analyse et les interprète. Mais, nos yeux ne sont qu'une interface, ils sont les capteurs qui transforment la lumière en influx nerveux transmis au cerveau. Les informations vont être analysées dans des zones bien déterminées.



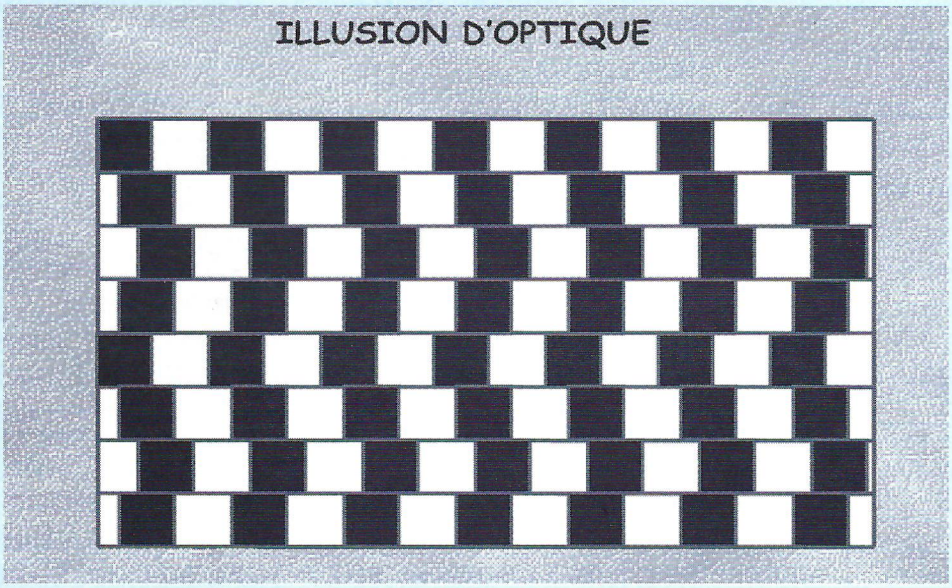


Figure 21

L'analyse de ce que voient nos yeux et très complexe. Si le traitement qu'effectue le cerveau garde encore certains secrets, on sait aujourd'hui que l'analyse de la vision se décompose entre la couleur, l'orientation et le mouvement. L'analogie des formes, de la couleur, etc, avec les données que nous avons emmagasinées depuis notre naissance, permet d'identifier ce qui nous entoure. Cependant, il faut se méfier des pièges de l'interprétation, par exemple les lignes horizontales de cette image sont droites et parallèles (fig. 21).
Et les conflits lors de l'interprétation engendrent des phénomènes curieux (fig. 22).

Le test consiste à compter les points noirs

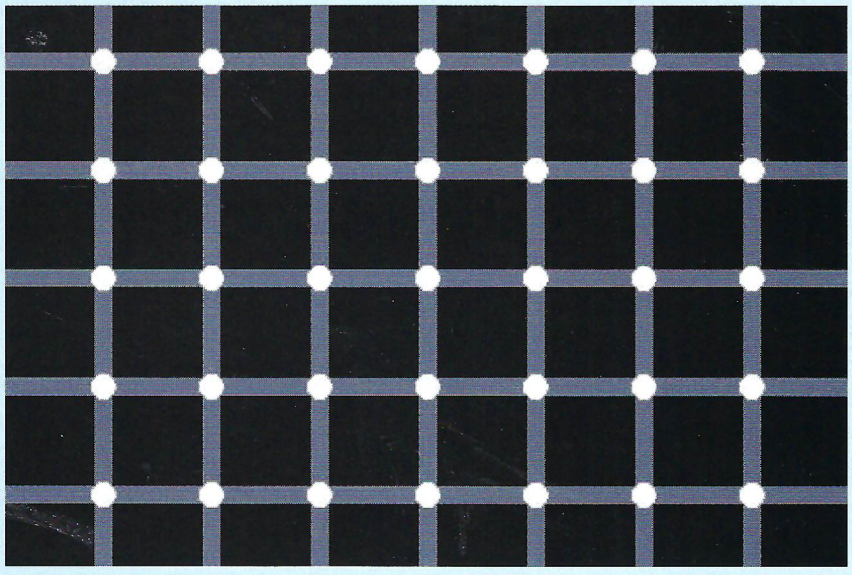


Figure 22

DES NOUVELLES DES « JEUNES POUSSES »



Les Jeunes Pousses se "fondent" dans les explications de Mme Hélène de BAYNAST

Cette session des Jeunes Pousses (septembre 2005 à juin 2006) a permis aux enfants de continuer les activités dans les domaines de la Physique, de la Chimie, de la Biologie, etc...

• Ils ont débuté la session fin septembre par un sujet lié à l'éclipse de soleil du 3 octobre, avec quelques expériences relatives.

• Les 12 et 14 octobre dans le cadre de la Fête de la Science ils ont présenté au « Centre-Jaude » de Clermont-Ferrand les CD Rom interactifs et effectué devant le public diverses expériences.

• En novembre ils ont eu une séance sur les différentes formes de l'énergie,

• En décembre sur le sucre et les édulcorants,

• En janvier 2006 ils ont visité l'exposition "Oklahoma Terre du Peuple Rouge"et l'expo des tapis et arts textiles, et en une deuxième séance en même temps ludique et scientifique la galette des rois et l'initiation à la stéréophoto numérique,

• En février et mars les enfants ont eu deux séances au CUST de Clermont-Ferrand (Centre Universitaire des Sciences et Techniques) où ils ont pu rencontrer des élèves ingénieurs et sous la conduite d'ingénieurs réaliser un moule souple de fonderie et couler une pièce de métal (en forme d'enclume).

• Début avril ils ont visité l'exposition à la Maison de l'Innovation de Clermont-Ferrand, dans le cadre de la manifestation « 1,2,3...Soleil ! »,

• En mai ils auront une séance sur la chimie de la cuisine et enfin en juin, toujours à la Maison de L'innovation de Clermont-Ferrand ils présenteront diverses expériences en public et réaliseront un cadran solaire.

Comme tous les ans un voyage a été organisé pour le groupe. Ils ont visité le site du château de Guédelon à Treigny (Yonne) où se construit un château féodal à la manière du XIIIe siècle. Ils ont pu voir les différents corps de métier travailler avec les outils d'époque et apprendre comment on mesurait alors (exemple la corde à 13 noeuds). Un article sur ce voyage paraîtra dans la prochaine revue.



Le coulage

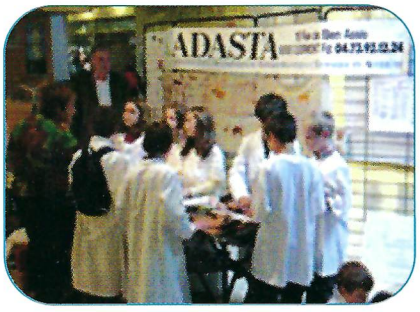


La présentation de la pièce brute



Le meulage





La Fête de la Science

Crédit photos : Jean-Pierre GARCIA - Adasta