

la fabrication de pesons de fuseau et de figurines en céramique, ainsi que des battoirs à écorce pour la fabrication du papier.

Au total, les habitants des provinces aztèques étaient donc relativement prospères et entreprenants. Malgré un déclin économique après leur intégration dans l'Empire aztèque, la population ordinaire des villes et des campagnes achetait, sur les marchés, diverses marchandises importées. Les textes historiques ne mentionnent pas que l'État aztèque avait la haute main sur les activités commerciales qui se déroulaient sur les marchés ; l'archéologie semble confirmer cette non-ingérence dans les échanges ordinaires. Les marchés reliaient les habitants, même des plus petits villages, au vaste réseau de l'économie non encadrée du Mexique central. Le pouvoir des nobles, qui paraissent avoir possédé une majorité des terres et qui monopolisaient les charges politiques, s'exerçait surtout par la perception du tribut. Ce pouvoir n'aurait toutefois pas constitué une charge insupportable et ne se serait guère exercé sur l'artisanat ni sur le commerce.

Michael SMITH est professeur d'anthropologie à l'Université de l'État de New York.

Jacques SOUSTELLE, *Les Aztèques*, «Que sais-je?», n° 1391, PUF, 1970.

Patricia RIEFF ANAWALT et Frances F. BERDAN, *Le Codex Mendoza*, in *Pour la Science*, août 1992.

M.E. SMITH, *Archaeological Research at Aztec-Period Rural Sites in Morelos, Mexico, vol. 1 : Excavations and Architecture*, University of Pittsburgh Memoirs in Latin American Archaeology, n° 4, 1992.

Economies and Politics in the Aztec Realm, sous la direction de Mary G. Hodge et Michael E. Smith, Institute for Mesoamerican Studies, State University of New York at Albany, 1994.

Codex Azcatitlan, Bibliothèque nationale de France - Société des américanistes, 1995.

Michel GRAULICH, *Montezuma, ou l'apogée et la chute de l'empire aztèque*, Éditions Fayard, 1995.

Michael E. SMITH, *The Aztecs*, Blackwell Publishers, 1996.

Dorothy HOSLER et Andrew MACFARLANE, *Copper Sources, Metal Production and Metals Trade in Late Postclassic Mesoamerica*, in *Science*, vol. 273, pp. 1819-1824, 27 septembre 1996.

Le laser *Mégajoules*

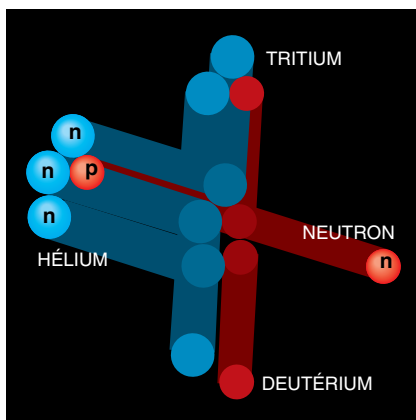
JACQUES COUTANT

Ce laser, en construction près de Bordeaux, devrait faire progresser la physique des plasmas thermonucléaires et provoquer la fusion nucléaire contrôlée du deutérium et du tritium.

En 1960, l'Américain Theodore Maiman utilise le principe de l'émission stimulée, prédit théoriquement par Albert Einstein, et celui du pompage optique, mis au point par le physicien français Alfred Kastler, pour réaliser le premier laser. Seulement trois ans plus tard, les physiciens du Commissariat à l'énergie atomique, à Limeil-Valenton, utilisent un laser à rubis fabriqué par la *Compagnie générale d'électricité* pour étudier l'interaction des lasers de forte puissance avec la matière. Le vif intérêt pour ce nouvel outil s'explique aisément : les lasers à impulsions sont des sources très intenses de lumière monochromatique (une seule longueur d'onde) et cohérente (les oscillations du champ électromagnétique qui constitue la lumière restent en phase pendant un grand nombre de périodes) ; on peut donc les focaliser dans des volumes très petits, de sorte que si les énergies transportées par le faisceau sont limitées, elles portent la matière à des températures et à des pressions inégalées.

Les premiers travaux, tant théoriques qu'expérimentaux, sont consacrés à l'étude de phénomènes tels que l'absorption simultanée de plusieurs photons (ou «grains de lumière»), conduisant à l'ionisation de la matière et à la création de plasma, sorte de gaz composé d'ions et d'électrons dissociés des atomes ; on explore également les mécanismes de l'absorption et du transport de l'énergie dans ce plasma.

Puis, à mesure que progresse la puissance des lasers, les caractéristiques des plasmas produits se rapprochent du domaine où les réactions thermonucléaires deviennent importantes, ce qui permet de mieux connaître les phénomènes physiques liés à la fusion par confinement iner-



tiel, laquelle est à la base des engins thermonucléaires (bombes H) et pourrait aussi être utilisée dans de futurs réacteurs producteurs d'électricité.

Les connaissances acquises en 30 ans, les progrès théoriques et les avancées de la simulation numérique, à l'aide de superordinateurs, permettent aujourd'hui de définir les caractéristiques de l'installation nécessaire pour l'obtention de la fusion par confinement inertiel en laboratoire : c'est le laser *Mégajoules*, dont la construction a été décidée par le gouvernement au début 1995. Le laser devrait effectuer ses premiers tirs au Centre d'études scientifiques et technique d'Aquitaine, près de Bordeaux, dans les premières années du siècle prochain.

La fusion par confinement inertiel

La fusion nucléaire de deux noyaux atomiques légers formant un noyau plus lourd s'accompagne d'un dégagement d'énergie considérable. Pour que cette fusion se fasse, il faut surmonter la répulsion coulombienne, qui s'exerce entre les deux noyaux positivement chargés, ce qui nécessite que

les noyaux soient animés d'une vitesse relative importante. On obtient de telles vitesses dans l'état de plasma chaud. La réaction la plus facile à obtenir est celle qui fait intervenir deux isotopes de l'hydrogène : le deutérium, composé d'un proton et d'un neutron) et le tritium, composé d'un proton et de deux neutrons ; la fusion forme un noyau d'hélium (deux protons, deux neutrons) et un neutron, qui emportent chacun une énergie considérable.

Les physiciens cherchent à obtenir, en laboratoire, des conditions où le milieu fusible produit un nombre suffisant de réactions nucléaires, de sorte que l'énergie dégagée soit supérieure à celle qui a été initialement dépensée. Ces conditions nécessaires sont théoriquement décrites par le critère de Lawson (du nom de son inventeur, le physicien américain Christopher Lawson) : le produit de la densité du plasma par le temps pendant lequel son énergie reste confinée doit être supérieur à un seuil ; en outre, la température doit être supérieure à 100 millions de degrés.

Historiquement, la première voie étudiée, depuis plus de 40 ans, est celle du «confinement magnétique», où l'on cherche à maintenir confiné pendant un temps assez long (de l'ordre de la seconde) un plasma peu dense, à l'aide de champs magnétiques. La seconde voie est celle du confinement inertiel : en un temps extrêmement bref, un apport externe d'énergie porte une faible quantité de matière fusible à l'état de plasma, la chauffe et la comprime, de sorte qu'elle devient le siège d'un nombre notable de réactions nucléaires. La masse de matière fusible serait au plus de quelques dizaines de microgrammes, limitée par la puissance maximale des lasers imaginables et par la résistance des chambres de

confinement : l'énergie dégagée serait de quelques dizaines de mégajoules (de quoi chauffer et évaporer quelques litres d'eau).

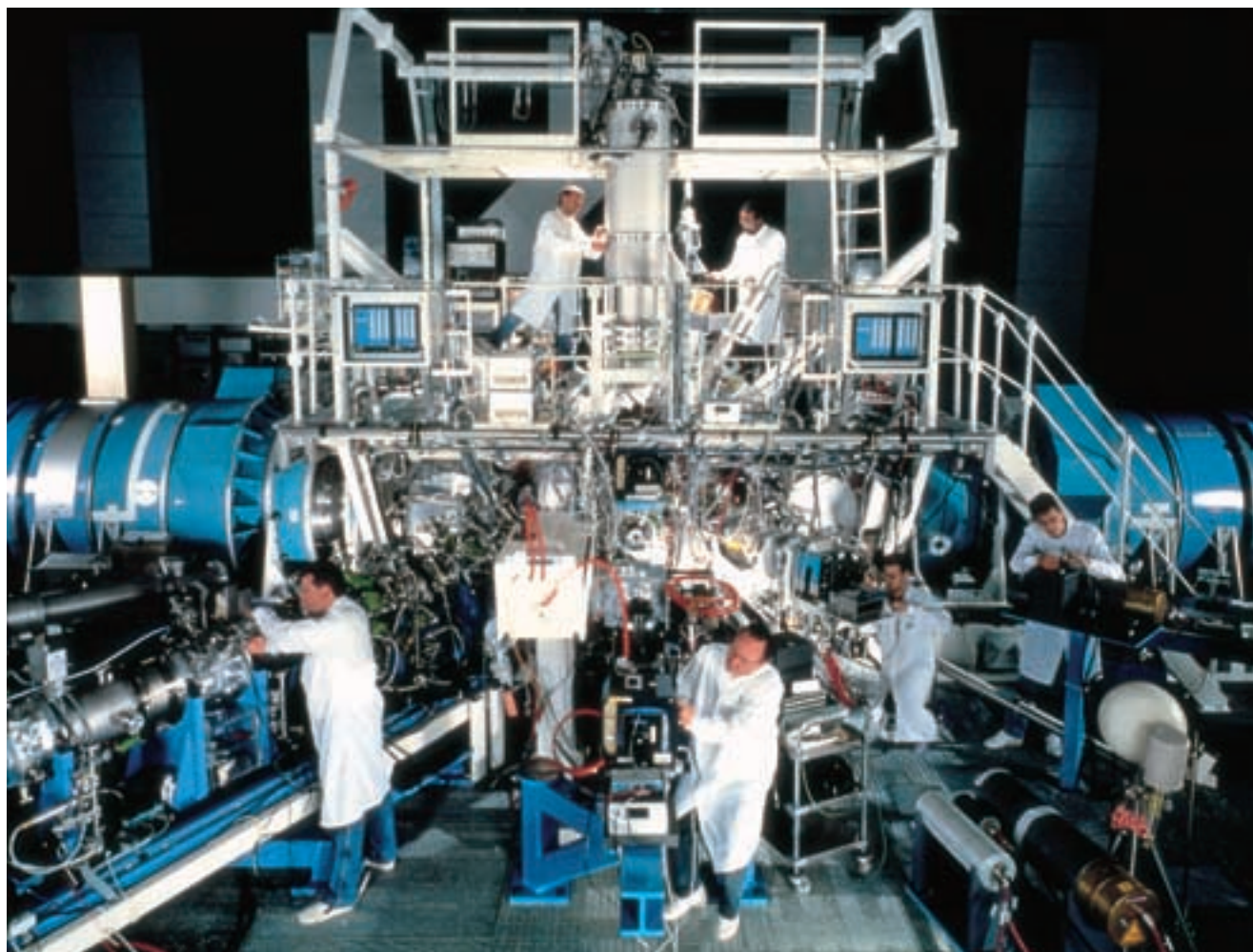
En pratique, le milieu fusible serait un mélange, en proportions égales, de deutérium et de tritium, que l'on emprisonnerait dans une petite capsule sphérique en verre ou en plastique de quelques centaines de micromètres de diamètre et de quelques micromètres d'épaisseur. Dans les expériences effectuées avec les installations existantes, comme le laser *Phébus*, du Centre CEA de Limeil-Valenton, le deutérium et le tritium sont mélangés sous forme gazeuse à une pression de quelques dizaines d'atmosphères. Toutefois, dans les expériences avec le laser *Mégajoules*, le mélange devra être sous forme d'une mince couche solidifiée (par refroidissement, à la température de -250°C) sur la face interne de la capsule et en équilibre avec le gaz de la partie centrale. Le laser éclairera, directement ou

indirectement, comme on le verra plus loin, la surface extérieure de la capsule, de sorte qu'il formera un plasma : les photons seront absorbés par le plasma, et leur énergie sera communiquée aux électrons. Cette absorption sera d'autant plus intense que la densité sera élevée, mais elle sera limitée à une valeur de densité maximale, la densité critique, pour laquelle la fréquence plasma (la fréquence naturelle d'oscillation des électrons) est égale à la fréquence de l'onde électromagnétique : à cette densité, la lumière est réfléchie, de la même façon que les ondes radio sont réfléchies vers la Terre quand elles rencontrent l'ionosphère (au-dessus de l'atmosphère terrestre). La densité critique est inversement proportionnelle au carré de la longueur d'onde du laser, et elle est environ égale à un centième de la densité du solide, pour une longueur d'onde de un micromètre, qui est celle du laser le plus utilisé, le laser à verre dopé au néodyme.

La lutte contre les instabilités

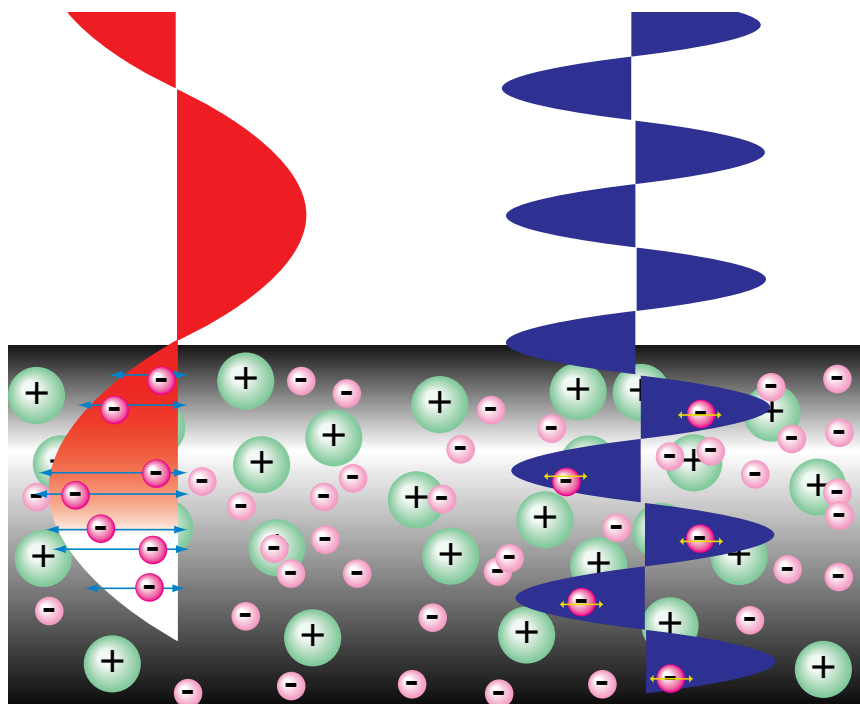
Si la théorie du confinement inertiel est simple, les écueils abondent. Notamment, lorsque la lumière devient très intense, des mécanismes d'instabilités peuvent se déclencher, en raison de couplages entre l'onde électromagnétique incidente et des ondes qui se propagent dans le plasma (ondes de pression, onde plasma ou ondes électromagnétiques). Ces instabilités sont nuisibles, car elles peuvent réduire gravement l'absorption de lumière et créer des particules rapides, qui, venant préchauffer le milieu fusible avant qu'il soit comprimé, s'opposent à cette compression.

Comme ces couplages augmentent avec la longueur d'onde de la lumière, les expériences actuelles n'utilisent pas directement les lasers les plus puissants, qui émettent à une longueur d'onde de un micromètre (dans le



1. LE LASER PHÉBUS, au Centre CEA de Limeil-Valenton, préfigure le laser *Mégajoules*, où l'on cherchera à obtenir la fusion nucléaire. À gauche et à droite, en bas, les deux faisceaux laser qui conver-

gent vers la chambre d'expériences sont à l'intérieur des cylindres bleus. Le cylindre supérieur permet de descendre la cible au centre de la chambre, lors des expériences.



2. LES PLASMAS, comme les métaux, réfléchissent la lumière quand la fréquence de cette dernière est inférieure à la «fréquence plasma». Quand une onde de fréquence faible (à gauche) arrive à la surface d'un plasma, le champ électrique associé à l'onde met en mouvement les électrons à la fréquence de l'onde ; or une charge qui oscille émet une onde à la fréquence de l'oscillation : la lumière est réfléchi. En revanche, quand la fréquence est supérieure à la fréquence plasma (cette fréquence croît avec la densité du plasma), les électrons ne peuvent plus suivre la sollicitation électrique, et l'onde est transmise.

proche infrarouge) : à l'aide de cristaux optiquement actifs, on transforme d'abord leur rayonnement en longueur d'onde de 0,5 micromètre (dans le vert) ou de 0,35 micromètre (dans le proche ultraviolet).

La vaporisation de la partie externe de la capsule a deux effets simultanés. D'une part, la couronne de plasma ainsi formée absorbe l'énergie lumineuse et la transmet vers l'intérieur par conduction thermique. D'autre part, le mélange fusible à l'intérieur de cette capsule est comprimé : comme la matière qui est expulsée de la couronne emporte une quantité de mouvement centrifuge, le reste est projeté vers le centre, avec une quantité de mouvement inverse. Ainsi l'accélération centripète comprime la capsule et chauffe le milieu fusible. Plus cette compression est régulière, meilleure est la performance finale atteinte : le produit de la densité par la température est maximal. D'où la nécessité d'éviter le préchauffage par des particules rapides.

Si la capsule avait une forme initiale parfaitement sphérique, si le laser l'éclairait de façon parfaitement uniforme, la compression maintiendrait la symétrie initiale de la matière. Pour

les théoriciens, cette symétrie est importante, parce qu'elle simplifie l'étude des phénomènes, en les ramenant à une seule dimension.

En réalité, toutefois, la capsule présente de légers défauts de surface et d'épaisseur, et l'éclairement du laser est hétérogène. En outre, les défauts initiaux s'amplifient pendant la compression, d'autant que la capsule est le siège de diverses instabilités hydrodynamiques qui font croître les défauts de façon exponentielle et peuvent conduire à la destruction de l'enveloppe et au mélange du milieu fusible avec le matériau de la capsule.

La plus connue de ces instabilités est celle de Rayleigh-Taylor, qui apparaît lorsque la densité et la pression varient en sens inverse. Cette instabilité apparaît notamment quand on dépose de l'eau sur de l'huile : la pression augmente du haut vers le bas, tandis que la densité varie en sens inverse ; l'instabilité provoque la remontée de l'huile et la chute de l'eau. Les diverses instabilités sont étudiées théoriquement et expérimentalement depuis des années, à l'aide de lasers, mais aussi avec d'autres moyens, tels les canons à gaz ou les explosifs ; les essais nucléaires,

également, ont apporté nombre de renseignements.

Pour chaque type d'instabilité, il existe un seuil de défaut au-dessous duquel elle ne se déclenche pas, une vitesse de croissance et un niveau de saturation. Bien que plusieurs questions ouvertes subsistent, le développement des instabilités est bien compris et, dans de nombreuses expériences, l'accord entre les résultats des mesures et ceux des prévisions théoriques est très satisfaisant. On a ainsi calculé le niveau maximal de défauts initiaux tolérables, tant en ce qui concerne la fabrication de la capsule qu'en ce qui concerne l'éclairement.

Attaque directe ou indirecte ?

Comment éclairer uniformément ? D'une part, on doit utiliser un grand nombre de faisceaux, dont la superposition sur la capsule doit être ajustée avec soin ; d'autre part, à l'intérieur de chaque tache focale, l'éclairement ne doit pas présenter de variations brusques qui seraient dues à des interférences ; enfin, à chaque instant, la puissance de tous les faisceaux laser doit varier exactement de la même façon, afin qu'aucun d'entre eux ne pousse localement plus ou moins que les autres, déclenchant des instabilités hydrodynamiques.

Heureusement la poussée se «lisse» naturellement : l'absorption de la lumière est limitée à la densité critique, inférieure à la densité du bord extérieur de la capsule avant l'ablation. Il existe donc une couche de plasma qui transmet la poussée, mais en la lissant un peu, à la manière d'un oreiller.

Par ailleurs, pour éviter les points chauds dus aux interférences, lesquelles résultent de la cohérence de la lumière laser, de nombreux procédés ont été mis au point. Parmi ces méthodes de «lissage optique», celle qui a été inventée et expérimentée avec succès à Limeil-Valenton consiste à utiliser un laser dont l'émission n'est pas parfaitement monochromatique, de sorte que sa durée de cohérence soit faible.

Cette lumière est envoyée dans une fibre optique de large diamètre : la différence de parcours est grande entre les rayons qui se propagent selon l'axe de la fibre, et les rayons qui subissent de nombreuses ré-

flexions contre les parois. Ainsi, les diverses ondes ne sont plus cohérentes à la sortie de la fibre, et elles n'interfèrent pas.

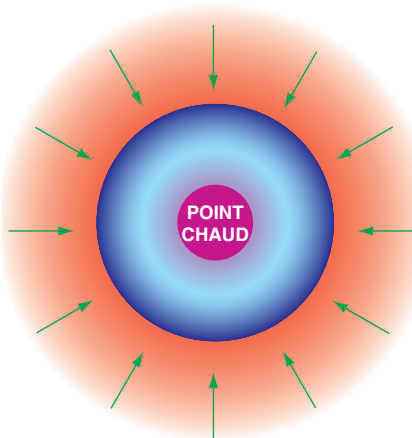
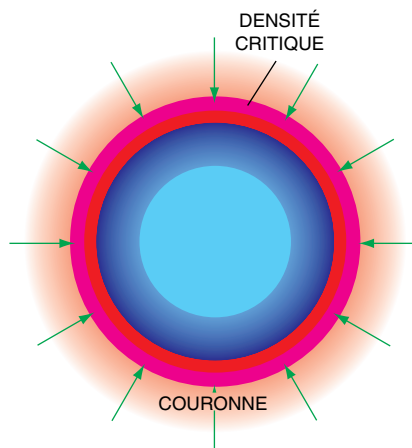
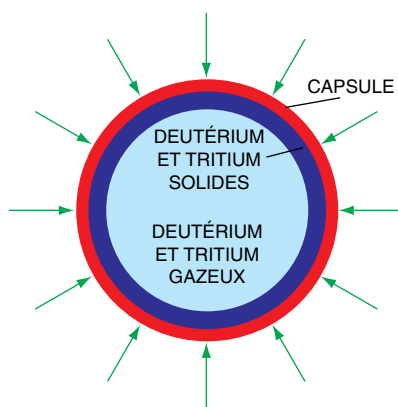
Les simulations sur ordinateur montrent que, pour atteindre un gain suffisant, l'éclairement ne doit pas varier de plus de un pour cent d'un point à un autre de la capsule. C'est une condition redoutable, même si des progrès importants ont été récemment effectués à l'Université de Rochester, avec l'installation *Omega-Upgrade*, qui focalise 60 faisceaux sur une cible.

Aussi, une autre façon d'irradier les cibles a été imaginée et étudiée abondamment, depuis longtemps. Dans cette méthode d'«attaque indirecte», on focalise les faisceaux laser sur la face interne d'une enceinte en matériau de numéro atomique élevé, généralement de l'or. Sous l'action du rayonnement, cette paroi est chauffée, et elle émet un rayonnement X intense, qui est confiné à l'intérieur de l'enceinte. Cette dernière constitue alors une sorte de four pour la capsule qui s'y trouve placée.

Le rôle du four est double : il thermalise le rayonnement, qui devient proche d'un rayonnement de corps noir, et il l'homogénéise par réflexions multiples. Ainsi obtient-on une homogénéité d'éclairement plus facilement qu'en attaque directe, pourvu que la zone interne irradiée soit judicieusement positionnée, que la forme et les dimensions de l'enceinte soient optimisées, et que soit minimisé le défaut introduit par les trous de l'enceinte, indispensables pour laisser passer les faisceaux, mais qui laissent fuir une partie des rayons X.

L'attaque indirecte a été beaucoup étudiée ces dernières années au Laboratoire Lawrence Livermore avec le laser *Nova*, au Japon avec le laser *Gekko 12*, et à Limeil-Valenton avec le laser *Phébus*. Les physiciens ont étudié la conversion du rayonnement laser en rayonnement X, les températures de rayonnement atteintes en cavité et l'homogénéité d'irradiation de la capsule, en fonction des paramètres géométriques et des conditions d'éclairement.

L'avantage incontestable de l'attaque indirecte a toutefois un prix : en introduisant une étape supplémentaire, la conversion X, qui n'a pas un rendement de 100 pour cent, elle nécessite des énergies de laser



3. LES CIBLES qui seront utilisées dans le laser *Mégajoules* seront composées d'une capsule en verre ou en matière plastique (en rouge, sur l'image supérieure), sur la paroi interne de laquelle on condensera un mélange de deutérium et de tritium, fortement refroidis (en bleu) ; le centre de la capsule contiendra le deutérium et le tritium gazeux. Quand on éclairera cette cible à l'aide d'un laser, on vaporisera la capsule (au centre), ce qui, par réaction, projetera le deutérium et le tritium condensés vers le centre. Si l'augmentation de puissance lumineuse et l'épaisseur de la couche condensée sont appropriées, on obtiendra finalement, au centre de la capsule, une zone où la densité et la température permettent la fusion nucléaire (en bas).

supérieures à celles qui seraient théoriquement nécessaires en attaque directe ; toutefois, dans cette dernière méthode, les instabilités hydrodynamiques forcent à utiliser des énergies qui sont finalement égales à celles de l'attaque indirecte.

La fusion au secours de la fusion

Jusqu'ici, nous avons implicitement supposé que, pendant la compression, le milieu fusible restait homogène, avec des densités et des températures uniformes, jusqu'à ce que les réactions de fusion deviennent prépondérantes. Toutefois, dans cette hypothèse, le calcul de l'énergie du laser nécessaire pour atteindre un gain de quelques unités conduit à des valeurs qui ne paraissent pas réalisables.

Pour contourner la difficulté, les physiciens ont imaginé d'utiliser les réactions de fusion elles-mêmes pour faciliter la combustion. Dans la technique du point chaud central, on provoque d'abord les réactions thermonucléaires au centre de la cible, afin qu'elles se propagent ensuite au reste du combustible, resté relativement froid pendant la compression.

Pour réaliser le point chaud, le centre de la cible doit être gazeux : avec moins de particules à chauffer, on obtient plus facilement la fusion d'un petit nombre de noyaux atomiques qui libèrent des particules alpha (des noyaux d'hélium) et des neutrons énergétiques. Puis le milieu «froid» autour du point chaud doit être suffisamment dense pour que les particules alpha résultant de la fusion du point chaud soient absorbées et déposent leur énergie.

Les simulations sur ordinateur montrent que cette méthode devrait procurer un taux de combustion global de 30 pour cent, correspondant à un gain suffisant (le quotient de l'énergie récupérée par l'énergie apportée), tout en minimisant l'énergie totale à investir dans le milieu.

Pour atteindre ce taux de combustion, la poussée exercée sur la capsule doit croître selon une loi parfaitement déterminée, pendant les quelque 15 à 20 nanosecondes que dure la compression, que la poussée soit transmise directement par les faisceaux laser ou qu'elle soit transmise indirectement par le rayonnement X dans l'enceinte.

Pourquoi un laser Mégajoules

Les lasers les plus puissants à ce jour sont encore très loin de pouvoir créer un point chaud dans le mélange deutérium-tritium ; ils ne permettent donc ni d'en valider le principe, ni d'étudier la propagation d'une onde de combustion thermonucléaire. En revanche, ils ont fait considérablement progresser la connaissance des instabilités hydrodynamiques, de la conversion X, des mouvements de matière sous l'action du rayonnement, etc.

Le laser Mégajoules devrait avoir une énergie suffisante pour déclencher une combustion thermonucléaire dans le milieu fusible. Chauffé et comprimé, ce dernier devrait produire en brûlant une énergie dix fois supérieure à celle qui sera apportée par les faisceaux laser.

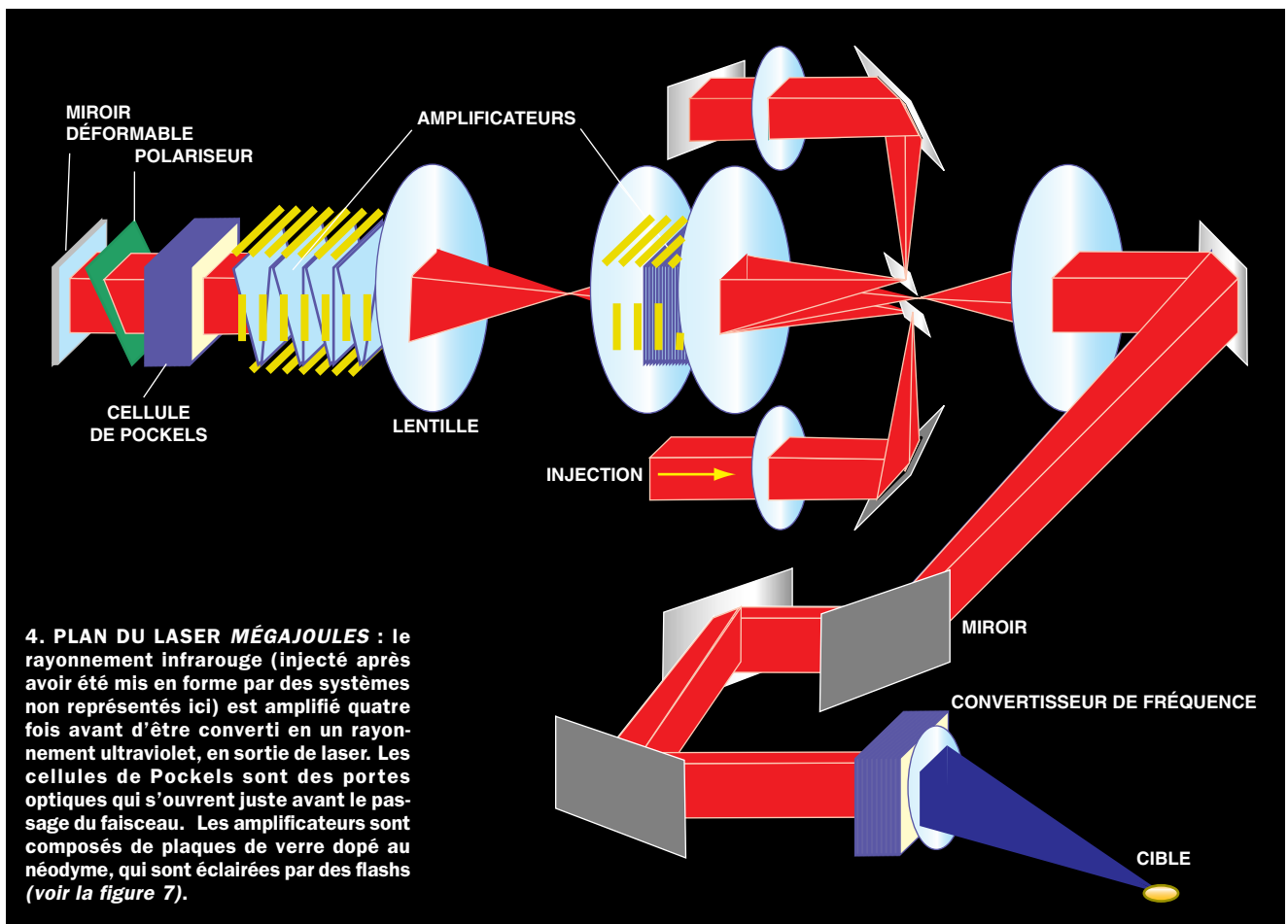
Ce laser fait, depuis longtemps, l'objet d'une collaboration entre le laboratoire de Limeil-Valenton, en France, et le laboratoire Lawrence Livermore, aux États-Unis. Dès la publication des résultats de l'expérience française qui avait obtenu une émission de

neutrons par interaction d'un faisceau laser avec du deutérium solidifié, en 1969, les Américains achetèrent auprès de fabricants français les éléments de leur première installation laser. En contrepartie, les physiciens de Limeil-Valenton purent utiliser, pour la construction du laser *Phébus*, des techniques mises au point à Livermore, pour le laser *Nova*, construit à la même époque. Depuis, la collaboration a été fortement intensifiée autour de la technique des lasers de puissance et des expériences non classifiées. Plusieurs publications internationales sur le «laser X» ont été faites en commun. Un nouvel accord, passé en 1994, couvre les études nécessaires à la préparation du projet français de laser *Mégajoules* et du projet américain *National Ignition Facility* («appareil national d'ignition»). Il est signé pour une durée de dix ans et concerne les études de composants, chaque laboratoire conservant la possibilité de recourir aux industriels de son choix pour les fabrications finales.

Le projet est ambitieux : il s'agit de construire une installation qui pro-

duira assez d'énergie pour obtenir, en attaque indirecte, l'ignition du mélange deutérium-tritium, avec création d'un point chaud et combustion thermonucléaire auto-entretenu. Les modélisations confirmées par les simulations numériques, montrent qu'au voisinage de l'ignition, le gain augmente très rapidement, pour devenir supérieur à un.

À l'aide des outils numériques, une cible de référence théoriquement capable d'atteindre l'ignition a été dimensionnée ; sa sensibilité aux variations des paramètres a été étudiée, et l'on en a déduit les caractéristiques du laser nécessaire. Ce dernier doit être très puissant, pour créer une température suffisante dans l'enceinte, mais ses impulsions doivent être courtes, afin que le plasma créé dans l'enceinte, autour de la capsule, n'atteigne pas la densité critique (quand cette densité est atteinte, les faisceaux laser sont réfléchis) ; enfin la répartition de l'éclairement de la cavité doit être tel que la cible soit attaquée de façon aussi homogène que possible, afin d'éviter le développement des instabilités hydrodynamiques.



La cible sera placée dans une enceinte cylindrique en or ; les faisceaux laser qui pénétreront par deux trous situés sur l'axe seront répartis sur trois nappes, assurant ainsi (d'après les calculs) la meilleure symétrie pour l'irradiation de la capsule. Cette dernière sera une coquille sphérique creuse de matériau plastique, sur la paroi interne de laquelle sera solidifiée une couche du mélange deutérium-tritium. Au centre, ce mélange sera sous forme gazeuse.

La mise en condition de fusion thermonucléaire du combustible suppose des vitesses d'implosion supérieures à 300 000 mètres par seconde, ce qui conduit à des températures radiatives de l'ordre de trois millions de degrés. La pression d'ablation engendrée par une telle température est supérieure à 100 millions d'atmosphères. C'est pour éviter que l'application brusque d'une telle pression ne crée un choc violent générateur de désordre que la puissance du laser augmentera progressivement. Lorsque le choc initial parviendra au centre, dans le mélange fusible gazeux, ce dernier sera chauffé et un point chaud n'apparaîtra qu'au centre de la capsule. Ainsi sera minimisée l'énergie du laser nécessaire : 1,8 mégajoule à la longueur d'onde de 0,35 micromètre.

Les éléments d'un laser Mégajoules

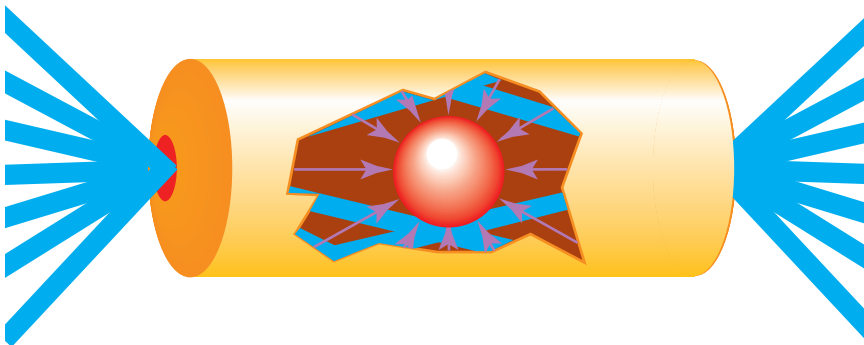
Divers types de lasers ont été employés pour les études de confinement inertiel, mais seul le laser à verre dopé au néodyme a atteint une maturité technique suffisante pour qu'on puisse l'envisager dans le projet *Mégajoules* (ainsi que dans le projet américain). Toutefois, ce laser émet une onde lumineuse à une longueur d'onde de 1,05 micromètre, trop longue pour atteindre les performances visées. On a donc décidé de transformer son rayonnement en un rayonnement de fréquence trois fois supérieure. Le rendement de la conversion ne dépassant pas 50 à 60 pour cent sur la durée totale de l'impulsion, c'est une énergie de 4 mégajoules qu'il faut obtenir, soit 200 fois l'énergie du laser *Phébus*. Si le laser *Mégajoules* était construit sur le même principe que le laser *Phébus*, il serait un monstre d'un coût rédhibitoire : les laséristes du CEA et du laboratoire Lawrence Livermore ont donc cherché une nouvelle architecture.

Le laser *Phébus*, est construit, comme ses prédécesseurs, suivant le concept de l'amplification en ligne : un laser classique engendre une impulsion de base, qui est ensuite mise en forme (spatiale et temporelle) par des dispositifs électro-optiques. À ce stade, l'énergie de l'impulsion est inférieure à quelques microjoules. Pour l'amplifier d'un facteur 100 millions à 1 000 millions, on l'envoie dans une

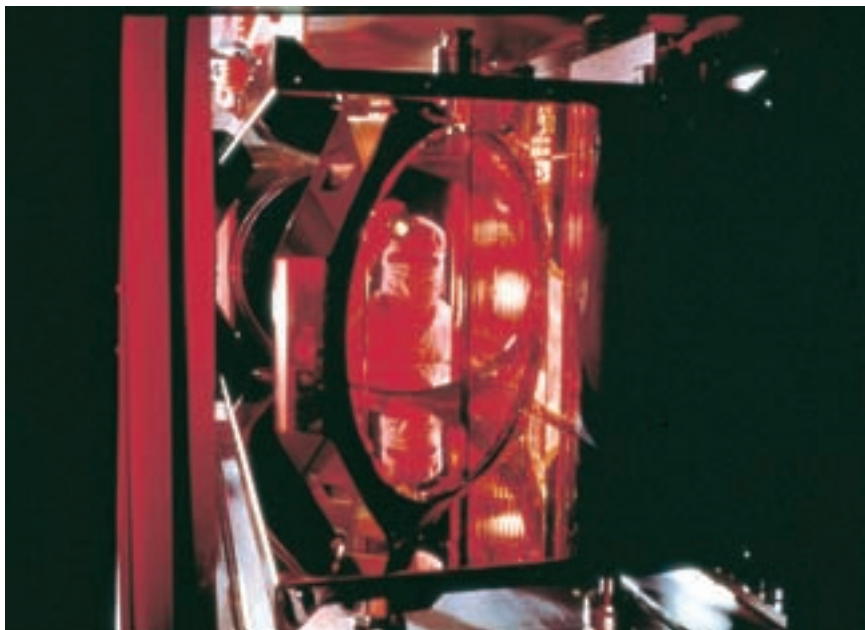
succession d'amplificateurs de diamètres croissants (de 1 à 46 centimètres pour le laser *Phébus*), afin de conserver des densités d'énergie qui n'endommagent pas les matériaux optiques. Les plus fragiles sont les couches minces, déposées sur le verre par évaporation sous vide ou par traitement physico-chimique, afin de le rendre réfléchissant ou, au contraire, parfaitement transparent.



5. LA CHAMBRE D'EXPÉRIENCES du système *Phébus*, vu par dessous, à l'intérieur. Le disque central est le fond du système de descente de la cible. Les tubes qui convergent vers le point où la cible est descendue sont des systèmes de mesures : appareils photographiques à sténopé (où l'optique est réduite à un trou), spectrophotomètres, capteurs pour les mesures de température, de pression et d'énergie...



6. LE LASER MÉGAJOULES obtiendra la fusion d'un mélange de deutérium et de tritium par une attaque indirecte : la cible est un cylindre en or, où se trouve la capsule d'implosion. Les 240 lasers du système *Mégajoules* viendront chauffer l'or, qui réémettra des rayons X de façon isotrope (flèches violettes).



7. ÉLÉMENT D'AMPLIFICATION du laser Phébus. Des flashes disposés autour des plaques de verre excitent les atomes de néodyme (pompage optique) ; lors du passage du faisceau laser, le retour des atomes excités à l'état fondamental amplifie le faisceau (émission stimulée).

On augmente encore l'énergie en multipliant le nombre de faisceaux qui amplifient tous la même impulsion initiale (deux sur le laser *Phébus*, dix sur le laser *Nova*). Entre les amplificateurs, des systèmes optiques augmentent le diamètre du faisceau tout en le gardant parallèle ; des diaphragmes éliminent les déformations de la surface d'onde introduites par les inévitables hétérogénéités des milieux traversés.

De surcroît, des dispositifs électro-optiques ou magnéto-optiques empêchent la petite quantité de lumière réfléchiée sur la cible ou sur certaines surfaces optiques d'être réamplifiée en retour. Une telle structure, qui a fait ses preuves, a l'inconvénient de comporter un nombre élevé de composants différents et d'avoir un faible rendement : moins de un pour 1 000 dans le laser *Phébus*.

Le laser *Mégajoules*, lui, comportera 240 faisceaux de section carrée, constante sur toute la longueur de la section d'amplification. Ces faisceaux seront regroupés par huit, dans 30 cylindres convergeant vers la chambre ; ce regroupement des faisceaux, qui a déjà été testé dans des maquettes, permet de réaliser des boîtes de lumière plus efficaces, où la lumière des lampes flash qui excitent les atomes de néodyme sera mieux utilisée, augmentant ainsi l'un des facteurs de rendement total.

Deuxièmement, chaque faisceau délivrera une énergie de près de 20 kilojoules, à une longueur d'onde de 1,05 micromètre, contre 10 kilojoules pour *Phébus*, à surface égale. L'impulsion sera plus longue, et les couches minces, réalisées par un procédé sol-gel (on dépose sur le verre un gel qui contient les atomes optiquement actifs, puis on évapore le solvant), résisteront mieux aux densités d'énergie élevées.

Troisièmement, au lieu de passer une seule fois dans plusieurs amplificateurs successifs, chaque faisceau passera quatre fois dans le même. C'est la première fois que cette technique du multipassage est employée, dans un ensemble aussi important. Le rendement est augmenté, en raison d'une meilleure récupération de l'énergie, lorsque les atomes de néodyme excités reviennent dans leur état fondamental.

Globalement le rendement du laser *Mégajoules* devrait être 10 à 20 fois supérieur à celui de *Phébus*, avec une conception qui réduit le nombre de types de composants ; chacun d'eux pourra donc être produit en série, à un coût unitaire réduit.

La chambre d'expérience sera une enceinte où l'on aura fait le vide ; y sera disposée, au centre exact, la cible, sur laquelle seront focalisés les 240 faisceaux du laser. C'est la chambre qui supportera l'ensemble des moyens de mesure, qui diagnostiqueront son

fonctionnement, et c'est elle qui contiendra tous les effets de la fusion thermonucléaire (effets thermiques ou effets mécaniques, telle l'onde de choc qui provient de l'implosion). Pour *Phébus*, la chambre est une sphère d'aluminium de 2,3 mètres de diamètre, avec des parois de 12 centimètres d'épaisseur ; pour le laser *Mégajoules*, une telle chambre serait insuffisante. Les physiciens du CEA étudient, avec le concours d'industriels, une chambre sensiblement sphérique de dix mètres de diamètre, avec un diamètre intérieur assez grand pour éviter la vaporisation de la surface interne sous l'action des rayons X dégagés par la fusion. L'épaisseur de sa paroi atteindra un mètre : 80 centimètres d'un matériau absorbant de neutrons seront compris entre deux couches d'aluminium, de 10 centimètres d'épaisseur chacune. La masse totale sera supérieure à 600 tonnes !

Depuis plus de 20 ans, des équipes ont inlassablement perfectionné la fabrication des cibles et la mise au point des méthodes de diagnostic du plasma. Leur tâche est difficile, en raison de la petitesse de la cible à réaliser (entre 0,1 et 1 millimètre) et de la grande précision à obtenir : pour éviter le développement d'instabilités hydrodynamiques, par exemple, la rugosité de la surface de la capsule doit être inférieure à quelques centièmes de micromètres. La nouveauté, pour le laser *Mégajoules*, est surtout que la cible devra être maintenue à une température de -250 °C jusqu'à l'instant de l'expérience. Naturellement le dispositif de maintien en froid et de positionnement de la cible dans la chambre devra être rétracté juste avant la mise en fonctionnement du laser.

La multiplication des moyens de mesure, qui permettent un diagnostic précis de l'expérience, est une autre clé de succès. Elle est plus importante qu'avec le laser *Phébus*, parce que la fréquence des expériences sera limitée : on devra attendre la décroissance de la radioactivité induite dans la chambre avant de préparer l'installation pour un nouveau tir. Les mesures calorimétriques permettront d'établir un bilan de l'énergie, et l'on explorera les émissions du plasma dans toute la gamme X, ainsi que l'émission de neutrons, pour sonder la matière comprimée. Pour obtenir une triple résolution spectrale, spatiale et tem-

porelle, avec une toute petite cible et des émissions qui durent quelques nanosecondes, des systèmes spécialement conçus s'imposent. L'acquisition des données devra être automatique, comme elle l'est déjà pour *Phébus* ; leur transposition au laser *Mégajoules* posera surtout le problème du «durcissement» des systèmes à toutes les sources de bruit dues aux rayonnements intenses provoqués par les réactions de fusion.

Le laser *Mégajoules* constitue un élément clé du programme de simulation destiné à maintenir une capacité de dissuasion nucléaire, après l'arrêt définitif des essais, décidé en 1996. Après le laser *Phébus*, en exploitation depuis dix ans, il provoquera des réactions de fusion, en concentrant dans un temps très bref une forte quantité d'énergie sur une microcible. Les dimensions millimétriques de cette dernière ne sont en rien comparables à celles d'un engin nucléaire, mais les valeurs obtenues par certains paramètres (température et densité) sont dans la gamme intéressante pour la compréhension des phénomènes caractéristiques du domaine thermonucléaire. Le laser *Mégajoules* fera aussi progresser l'ensemble de la physique des plasmas denses, présents aussi bien dans l'espace que dans des futures centrales de production d'énergie civile. Sa construction est échelonnée dans le temps : la première étape est la construction de la ligne d'intégration laser, entreprise dès 1996.

Jacques COUTANT a dirigé, de 1986 à 1995, le Département Laser et physique du plasma, au Centre CEA de Limeil-Valenton.

La fusion thermonucléaire inertielle par laser (5 volumes), édité sous la direction de Robert Dautray et de Jean-Paul Watteau, Collection CEA, Éditions Eyrolles, 1993.

Energy from inertial fusion, document édité par l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique, Vienne, 1995

Les déchets nucléaires, sous la direction de René Turlay. Dossier scientifique de la Société française de physique, 1997.

Nuclear Fusion by Inertial Confinement, sous la direction de G. Velarde, Y. Ronen et J. Martinez-Val. CRC Press, 1993.

Chocs, revue scientifique et technique de la Direction des applications militaires, n°13, avril 1995.



Les avancées scientifiques

Avec
l'École Polytechnique,
une mise en commun
des expériences,
source de réflexions,
riche d'échanges
et de rencontres

Décembre

Modélisation numérique des écoulements fluides non newtoniens	3, 4, 5
Migration vers l'objet et réutilisation des composants logiciels	10
Caractérisation des matériaux par ellipsométrie	11, 12
Approche probabiliste de la fatigue : ponts métalliques et mixtes	18, 19
Analyse quantitative, non destructive par la RMN	19

Janvier- Février

Recherche amont dans le secteur de la Défense	8, 9
Principes et application des réseaux neuronaux	12, 13
Robotique et apprentissage	14, 15
Les lasers mégajoules	15
Thérapie génique et maladies du sang	16
Applications industrielles des lasers de puissance	20
Pour les systèmes multicapteurs, la fusion de données	26, 27 jan. et 2, 3 fév.
Microscopie et analyse à l'échelle nanométrique	29, 30

Mars

Modélisation numérique des écoulements fluides	4, 5, 6
Les entrepôts de données : pourquoi, comment, avec quelles données?	5
Les gels : formation, structure et propriétés	10
Calcul des pièces métalliques à la fatigue	11, 12, 13
Calcul formel : possibilités et applications	12
Transformée en ondelettes : ses applications	16, 17
Génération et mise en forme des solides divisés	18, 19, 20
Modélisation en acoustique et électromagnétisme	23, 24, 25
L'électronique de demain	25, 26, 27
Internet, Intranet, commerce électronique : qu'en est-il de la sécurité?	31

Le Collège propose des séminaires conçus pour des ingénieurs et scientifiques sur tout l'environnement des sciences et des techniques, de la R&D, par exemple : la mémoire d'entreprise, le transfert de technologie, l'intelligence économique, la veille technologique, les estimations paramétriques des projets, le commerce électronique, la négociation, l'animation et la cohésion des équipes techniques...

Le Collège conçoit, propose et organise également des séminaires et des cycles de conférences pour répondre à une demande d'entreprises.

**Catalogue disponible
sur demande**

Collège de Polytechnique

CNIT - BP 230

2, place de la Défense

92503 PARIS LA DÉFENSE

Tél : 01 46 92 21 49 - Fax : 01 46 92 21 60

e.mail : collegex@poly.polytechnique.fr

Ecole polytechnique [http : // www.polytechnique.fr](http://www.polytechnique.fr)

Mercure, la planète oubliée

ROBERT NELSON

Malgré sa proximité, ce monde étrange nous est presque inconnu.

