

# La physique atomique et les progrès de la fusion

*La prochaine étape exige un nouvel effort des physiciens atomiques*

par R.K. Janev

Les fondements scientifiques et technologiques des réacteurs à fusion relèvent de plusieurs grandes disciplines scientifiques.

La physique des plasmas et les technologies associées (dont les bobinages supraconducteurs) s'attaquent aux problèmes que posent la constitution et le confinement du plasma à haute température, sa stabilité, le chauffage à la température thermonucléaire voulue et sa durée. Parmi les problèmes de physique et de technologie de la fusion qui sont encore à résoudre, mentionnons la réalisation d'un tokamak fonctionnant pratiquement en continu par excitation non inductive, l'isolation thermique dans les conditions extrêmes du chauffage extérieur du plasma et les valeurs élevées du rapport pression cinétique/pression magnétique dans le plasma (appelé facteur bêta).

La physique nucléaire intervient non seulement au niveau des réactions fondamentales productrices d'énergie, mais aussi sur le plan du cycle du combustible thermonucléaire (chimie nucléaire) et de la sûreté du réacteur à fusion.

La science et la technologie des matériaux jouent un rôle capital, car la première paroi de la chambre du réacteur à fusion doit pouvoir supporter des contraintes extrêmes (de l'ordre de plusieurs MW/m<sup>2</sup>) et un flux thermique très intense, sans contaminer à l'excès le plasma par les impuretés de numéro atomique élevé qui résultent de ses interactions avec le plasma. Ces fortes contraintes ne s'appliquent pas seulement aux matériaux de la première enceinte, mais aussi à tous les autres composants en contact avec le plasma, tels que les limiteurs, les plaques cibles des déflecteurs magnétiques et les antennes de chauffage haute fréquence du plasma.

La physique atomique apporte elle aussi une contribution essentielle à la recherche sur la fusion, intervenant dans des domaines aussi importants que le bilan énergétique, le chauffage, la régulation de l'ignition et de la combustion, et le diagnostic des plasmas.

Ces quatre spécialités scientifiques et technologiques n'occupent pas à elles seules le champ complexe de la recherche sur la fusion, mais elles en constituent actuellement l'essentiel. La conception et l'exploitation

des grands dispositifs à fusion impliquent aussi tout un arsenal technique; de plus, il serait impossible de mener des expériences bien réglées sur ces machines sans l'aide des superordinateurs.

Le secret du réacteur à fusion est la réactivité ( $n\tau_E T$ ). Pour le moment, les expériences ne permettent d'obtenir que le dixième environ de la valeur  $3 \times 10^{21} \text{ m}^{-3} \text{ s keV}$  nécessaire au fonctionnement d'un réacteur. Les plus grands tokamaks (JET, TFTR, JT-60, DIII-D), qui actuellement ne fonctionnent qu'à l'hydrogène ou au deutérium, se sont néanmoins prêtés à diverses expériences qui ont permis d'atteindre, quoique séparément, des niveaux intéressants de température ( $T \sim 20\text{--}30 \text{ keV}$ ), d'isolation thermique ( $n\tau_E \sim 2 \times 10^{20} \text{ m}^{-3} \text{ s}$ ) ou de facteur bêta ( $\beta \approx 6\%$ ).

Les études de conception pour le réacteur expérimental thermonucléaire international (ITER) menées sous l'égide de l'AIEA sont dominées par le souci de combler cette lacune et de réaliser l'ignition du plasma et la combustion thermonucléaire de longue durée\*.

## Contribution de la physique atomique à l'étude et à la technologie de la fusion

Pour juger de l'importance de l'apport de la physique atomique à l'étude de la fusion, il faut savoir qu'aux températures nécessaires à la combustion thermonucléaire (15–20 keV) les phénomènes atomiques se déroulent à des rythmes de huit à dix ordres de grandeur plus rapides que celui des réactions thermonucléaires deutérium-tritium (D-T). Comme la plupart de ces phénomènes sont endothermiques, ils tendent à consommer l'énergie du plasma bien avant que la réaction de fusion ne se déclenche. Même dans un plasma de deutérium-tritium pur, le rayonnement de freinage produit par les collisions entre les électrons et les ions de plasma dissipe plus d'énergie que n'en créent les réactions D-T lorsque les températures se situent en-dessous de  $\sim 4 \text{ keV}$ . Ce seul mécanisme de refroidissement du plasma par rayonnement empêche l'ignition de ce dernier aux températures inférieures à 5 keV. Les atomes lourds, même s'ils ne sont présents

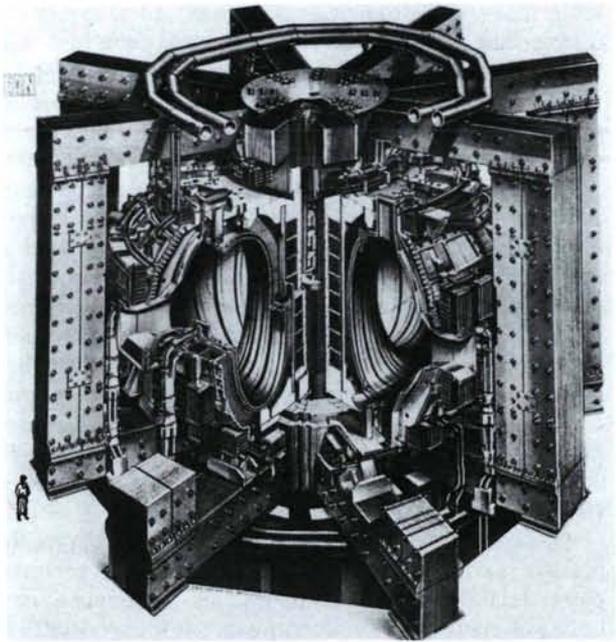
M. Janev est membre de la Division des sciences physiques et chimiques de l'AIEA.

\* Projet coopératif auquel participent la Communauté économique européenne, les Etats-Unis, le Japon et l'URSS.

qu'à l'état de traces dans le plasma, peuvent rayonner d'énormes quantités d'énergie (principalement sous forme de rayonnement de freinage et d'émissions par raies). C'est ainsi que les concentrations d'ions de fer supérieures à 1% de la densité du plasma empêchent l'ignition d'un plasma D-T quelle que soit la température. Cette concentration critique n'est que de 0,1% pour le tungstène. Les effets négatifs des atomes lourds, qui constituent les impuretés d'un plasma d'hydrogène, ont été constatés dès le début des travaux sur la fusion. La présence d'impuretés dans un plasma confiné est néanmoins inévitable du fait de l'interaction de celui-ci avec les parois de l'enveloppe de confinement. Il faut donc maintenir les concentrations d'impuretés dans des limites acceptables pour atteindre les hautes températures nécessaires à l'ignition du plasma.

Pour réduire au minimum le contact entre les parois et le plasma et prévenir ainsi la contamination de ce dernier par les impuretés, il faut prévoir un limiteur matériel ou magnétique à la périphérie du plasma. L'écoulement de la couche extérieure du plasma est alors dirigé vers des régions bien déterminées qui, dans le cas d'une déflexion magnétique, peuvent se situer même à l'extérieur de la chambre du plasma. Ce flux dirigé emporte les impuretés qui apparaissent au niveau des parois (ainsi que les particules de plasma qui diffusent vers ces parois) vers les volumes collecteurs spécialement prévus d'où elles sont extraites par pompage. Outre leur double fonction d'écran, les déflecteurs et limiteurs contribuent de plusieurs façons à améliorer le système de confinement: allègement sensible de la charge thermique supportée par la première paroi, recyclage des isotopes de l'hydrogène dans le système et constitution d'une couche de refroidissement par rayonnement à la périphérie du plasma de sorte que celui-ci reste froid à proximité de la paroi et ne peut donc lui enlever des quantités significatives de matière.

L'optimisation des fonctions positives des limiteurs et des déflecteurs dépend dans une large mesure de



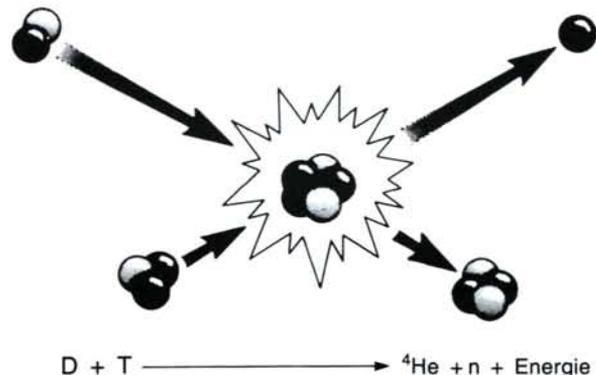
Représentation du Joint European Torus (JET) sous les auspices de la Communauté économique européenne.

l'ajustement de la teneur du plasma périphérique en particules, et donc de la composition des matériaux constitutifs de la première paroi des limiteurs et déflecteurs eux-mêmes. La physique atomique intervient dans cette optimisation au niveau des processus très variés de collision atomique en phase gazeuse et des processus non moins variés d'interactions particule-surface. Les particules qui participent à ces phénomènes périphériques sont les constituants fondamentaux du plasma (électrons et noyaux d'isotopes de l'hydrogène), les impuretés sous forme d'atomes et d'ions arrachés à la paroi (dans une large gamme de charges) et des

### La recherche sur la fusion

Le principe de la fusion repose sur la réaction  $D(T, ^4\text{He})n$ , laquelle dépend du deutérium (D) présent dans la nature. Le réacteur à fusion doit produire lui-même le tritium (T) dont il a besoin dans le manteau qui entoure la chambre de combustion, où ont lieu les réactions  $n(^6\text{Li}, ^4\text{He})T$  et  $n(^7\text{Li}, n, ^4\text{He})T$ . Le lithium est, lui aussi, suffisamment abondant dans la nature. Pour réaliser techniquement la fusion, il faut confiner un plasma D-T à haute température ( $\geq 10^8 \text{ K} = 10 \text{ keV}$ ) en le maintenant suffisamment isolé des parois de la chambre pour que les réactions de fusion puissent avoir lieu à une échelle suffisante pour déclencher l'ignition du combustible thermonucléaire. Au cours des quarante dernières années, l'objectif principal de la recherche sur la fusion a consisté à établir les fondements scientifiques et techniques de l'ignition du plasma et de la combustion thermonucléaire contrôlée. Actuellement, le confinement magnétique de plasma de faible densité ( $\sim 10^{20} \text{ m}^{-3}$ ), à haute température (10-20 keV) est le concept de base sur lequel travaillent les chercheurs; il implique un isolement thermique du plasma de l'ordre de la seconde, ou

davantage, dans une configuration magnétique toroïdale connue sous le nom de tokamak, qui a déjà permis d'obtenir des paramètres de plasma correspondant aux conditions qui doivent régner dans un réacteur.



molécules d'hydrogène, d'oxydes métalliques et d'hydrocarbures que l'on rencontre dans cette région du fait des basses températures à proximité de la paroi (5-50 eV). Les phénomènes de collision inélastique entre ces différents constituants sont si nombreux et complexes que l'on ne peut en prévoir les effets combinés sur la transformation de l'énergie et le transport des particules dans le plasma que si l'on dispose d'une abondante information sur les caractéristiques de leurs collisions. On connaît néanmoins expérimentalement l'effet global de ces processus: ils transforment l'énergie du plasma en rayonnement, provoquant ainsi un refroidissement qui protège les parois des flux thermiques intenses qui proviennent du centre du plasma. L'optimisation de ce phénomène de refroidissement périphérique exige une large base de données sur les collisions atomiques et moléculaires et les processus radiatifs.

Les collisions des constituants du plasma avec les matériaux constitutifs des surfaces exposées (la première paroi du réacteur, les limiteurs, les déflecteurs, etc.) ont un effet encore plus déterminant sur les propriétés du plasma périphérique et, par son intermédiaire, sur les paramètres de l'ensemble du plasma. Ces phénomènes peuvent engendrer de grandes quantités d'impuretés et sont directement ou indirectement responsables de l'érosion de la première paroi et des autres surfaces matérielles exposées au plasma. Ils sont de nature très complexe et on ne les connaît qu'imparfaitement (en particulier en ce qui concerne les matières intéressant la fusion).

Les multiples processus atomiques en phase gazeuse et en surface qui se produisent à la périphérie du plasma influent directement non seulement sur le bilan d'énergie du plasma et sur son confinement, mais aussi sur la technologie du réacteur. Ces phénomènes — ainsi que les interactions nucléaires avec les matériaux de l'enveloppe — sont la cause de l'érosion de la première paroi du réacteur et, par conséquent, orientent de manière décisive le choix des matériaux à utiliser.

La physique atomique contribue aussi largement à l'étude du chauffage des plasmas. Lorsqu'un plasma est confiné magnétiquement, il faut disposer d'une source extérieure d'énergie pour le porter aux températures de fusion. Le chauffage ohmique ne peut élever la température du plasma que jusqu'à quelques keV, c'est-à-dire bien en dessous du niveau nécessaire. Jusqu'à présent, le moyen le plus efficace de déposer de l'énergie dans le plasma à partir d'une source extérieure a consisté à injecter dans le plasma des atomes neutres d'hydrogène très énergétiques. En pénétrant dans le plasma, ces atomes neutres s'ionisent (par collision avec les particules du plasma), sont emprisonnés dans le champ magnétique et communiquent leur énergie aux électrons et aux ions du plasma par collision.

Tous les grands tokamaks en service aujourd'hui sont chauffés par injection de faisceaux de neutres énergétiques (complétée par un chauffage électromagnétique haute fréquence) et des puissances atteignant 20 MW ont pu être communiquées au plasma. L'injection de neutres peut aussi communiquer une forte impulsion au plasma et y provoquer ainsi une excitation de courant non inductif, laquelle est nécessaire au fonctionnement d'un tokamak en continu.

La technique de chauffage par injection de neutres est fondée presque exclusivement sur les résultats de la recherche en physique atomique. Son rendement dépend de l'intensité de la source d'ions, de leur passage dans un accélérateur où ils acquièrent l'énergie voulue, de leur neutralisation dans un volume gazeux et enfin de leur pénétration et de leur capture au sein du plasma. Le rôle de la physique atomique dans ces trois opérations est essentiel: l'optimisation de la source d'ions et du neutralisateur sont des problèmes techniques que l'on ne peut résoudre que si l'on connaît bien les phénomènes de collision atomique. Le dépôt de l'énergie dans le plasma suppose que l'on dispose aussi d'une information détaillée sur l'ionisation et les autres interactions entre les atomes du faisceau et les particules et impuretés du plasma. Si l'on ne dispose pas d'une base de données suffisante pour calculer le dépôt d'énergie, on risque de faire des estimations totalement erronées des paramètres du faisceau qui peuvent complètement fausser la technique de production de ce faisceau.

Enfin, nous en arrivons au troisième domaine de la recherche sur la fusion où la physique atomique s'insère en profondeur, à savoir le diagnostic du plasma. De nombreux paramètres du plasma (température, densité, énergie et moment cinétique, etc.) ainsi que leurs variations dans l'espace et dans le temps doivent être mesurés si l'on veut obtenir une image physique précise de son état, laquelle permet de diriger son comportement. La plupart des méthodes de diagnostic des plasmas exploitent les effets inhérents aux particules atomiques (ioniques) ou résultant de leurs interactions. La spectroscopie du rayonnement de freinage et de l'émission par raies des constituants renseigne abondamment sur les paramètres fondamentaux du plasma (températures et densités des électrons et des ions, ainsi que leur distribution dans l'espace et leurs variations dans le temps) et sur la composition et la distribution des impuretés. Les méthodes actives et passives de diagnostic par faisceaux atomiques permettent d'obtenir une information complémentaire ou indépendante sur la composition et les paramètres du plasma. Le diagnostic exige par ailleurs une connaissance très précise des phénomènes de collision et des caractéristiques radiatives des différents constituants.

Ces exemples mettent en lumière le rôle que la recherche en physique atomique a joué et continue de jouer dans les études sur la fusion. On peut dire qu'au stade actuel de développement du réacteur à fusion la physique atomique offre au chercheur des solutions assez satisfaisantes qu'il ne pourrait trouver sans elle (limitation des impuretés, technique de chauffage par injection de neutres, diagnostic), mais le prochain stade, c'est-à-dire l'étude technique de réacteurs expérimentaux, exige un nouvel effort de la part des physiciens atomiques.

### La physique atomique et l'étude du réacteur à fusion

Lorsqu'on a entrepris l'étude du réacteur à fusion, les physiciens atomiques ont dû entrer plus avant dans le domaine de la technologie. Il est certain que leur contribution devra s'adapter à l'évolution de la technologie de

la fusion. Aussi convient-il de considérer leur rôle dans le contexte de la conception de la prochaine génération de machines à fusion, et notamment du projet de réacteur expérimental thermonucléaire international (ITER). La physique du plasma à combustion thermonucléaire, dont l'étude exhaustive est prévue dans le programme futur de travaux sur la fusion, pose un certain nombre de problèmes aux atomistes, de même que la maîtrise de la combustion thermonucléaire.

La première difficulté que présente la conception des réacteurs à fusion expérimentaux de la prochaine génération est le choix judicieux des matériaux constitutifs de la première paroi. Ce problème présente deux aspects: l'un concerne les propriétés thermophysiques de cette paroi (stabilité métallurgique, transfert de la chaleur, dommages radio-induits) et l'autre les conditions du plasma à la périphérie et le contrôle des impuretés. Comme nous l'avons déjà vu, les conditions du plasma à sa périphérie résultent des collisions en phase gazeuse et des interactions particules-surface; elles influent considérablement sur le contenu énergétique du plasma, sur les temps de confinement et la stabilité, et sur l'action des déflecteurs. Il est donc essentiel de maîtriser ces conditions pour assurer le bon fonctionnement du réacteur. En effet, la couche extérieure du plasma est étroitement liée à sa masse réactive principale et, de ce fait, les modifications qui se produisent à la périphérie se transmettent rapidement à l'intérieur, de sorte que, si l'on domine les conditions à la périphérie, on peut maîtriser la combustion nucléaire.

Pour dominer les conditions à la périphérie, il faut disposer d'une large base de données sur les processus atomiques en phase gazeuse et sur les interactions particules-surface. Or, cette base de données est encore très insuffisante; un gros effort de recherche est donc nécessaire pour la compléter, ce à quoi s'emploient de nombreux spécialistes des processus atomiques et des interactions de surface.

Les phénomènes périphériques influent non seulement sur l'ignition et la combustion thermonucléaire, mais aussi sur le rythme d'érosion des matériaux en contact avec le plasma et donc sur leur durée utile. Aussi l'étude technologique de la première paroi doit-elle résoudre le problème de l'érosion rapide provoquée par les interactions entre le plasma et cette paroi.

Ces processus posent un autre problème spécifique: celui de l'élimination des résidus de la combustion thermonucléaire. Les particules alpha de 3,5 MeV, produites par les réactions de fusion deutérium-tritium, jouent un rôle important en ce qu'elles fournissent au plasma, après ignition, l'énergie nécessaire à l'entretien de la combustion. Après la thermalisation, la présence de particules alpha dites «froides» dans le plasma provoque une dilution du combustible thermonucléaire, de sorte qu'il faut continuellement les éliminer de la zone réactive.

Fort heureusement, ces particules alpha se diffusent vers la périphérie du plasma d'où les déflecteurs les dirigent, avec les impuretés de paroi, vers un collecteur extérieur d'où elles sont extraites par pompage. Les réactions atomiques de ces particules alpha de fusion avec les autres constituants du plasma (en particulier avec les impuretés ioniques) peuvent fortement influencer sur la thermalisation de ces particules dans la zone de

réaction et sur leur extraction. Ici encore, il faut disposer d'une large base de données pour prévoir et maîtriser l'évacuation de l'hélium.

De même, la conception et la technologie des déflecteurs magnétiques supposent une connaissance particulièrement approfondie des interactions atomiques et plasma-surface. En particulier, les plaques qui comportent ces déflecteurs doivent pouvoir supporter des flux thermiques et particulaires d'une intensité plusieurs fois supérieure à celle des flux qui parcourent la première paroi de la chambre du réacteur. Une mauvaise conception de ces plaques et du collecteur pourrait entraîner une forte érosion des matériaux dont ils sont constitués. Indépendamment du choix de matériaux appropriés, les déflecteurs doivent être conçus de manière à bénéficier de l'intense recyclage de l'hydrogène entre les plaques et le plasma qui crée un plasma froid de forte densité à proximité de ces plaques. Les contraintes dues au flux thermique et au flux de particules que les déflecteurs doivent supporter sont alors considérablement réduites, ainsi que le facteur d'érosion. Pour que le recyclage de l'hydrogène puisse conserver son haut régime à proximité des plaques, il faut assurer un très fort débit de pompage du collecteur. Le transport d'énergie et d'impulsion par le gaz neutre (accumulé dans le collecteur par le recyclage, à des densités plus fortes que celles du plasma) met en jeu une grande variété de processus atomiques et phénomènes de surface qu'il faut bien connaître si l'on veut prédire les effets de ce transport.

Tout aussi importante est la question du chauffage du plasma. La conception actuelle du projet ITER prévoit le chauffage du plasma du cœur du réacteur par de puissants faisceaux de deutérium d'une énergie de l'ordre de 1 MeV. Rappelons que le niveau exact d'énergie du faisceau est fonction de l'apport nécessaire d'énergie au plasma et de l'excitation de courant par transfert de l'impulsion. A ces hautes énergies, l'atténuation du faisceau dépend d'un spectre bien plus large de collisions (mettant en jeu des atomes excités du faisceau) que dans le cas de l'injection de neutres de 100 à 200 keV, procédé normalement utilisé dans les grands tokamaks. Les atomes excités du faisceau peuvent avoir pour effet de doubler la section efficace d'arrêt des particules injectées, ce qui impose de nouvelles contraintes à la technique d'injection de neutres. La production de faisceaux intenses de l'ordre du MeV devrait se faire à partir de sources d'ions négatifs, dont le rendement est encore insuffisant. Ici encore, la physique de ces sources est conditionnée par les collisions atomiques et moléculaires et les interactions particules-surface, et leur mise au point technique exige une large base de données sur ces processus.

#### **Le programme de physique atomique de l'AIEA pour la fusion**

A part son rôle d'encadrement de la collaboration internationale dans le domaine de la recherche sur la fusion (par exemple les activités de l'atelier INTOR et les études théoriques du projet ITER) et l'organisation tous les deux ans de la Conférence internationale sur la physique des plasmas et la recherche concernant la

fusion nucléaire contrôlée, l'AIEA a mis en œuvre des programmes qui lui sont propres en physique des plasmas, physique nucléaire, physique atomique et moléculaire, ainsi que dans les domaines de la technologie et du génie des réacteurs à fusion. Par ailleurs, l'Agence édite la revue internationale *Nuclear fusion*, *World survey of activities in controlled fusion research* (dont le premier numéro est paru en 1986; le deuxième est en préparation), et d'autres publications faisant suite aux diverses réunions et colloques scientifiques qu'elle organise dans le domaine de la recherche sur la fusion. Les programmes de l'Agence ont pour objet de permettre aux spécialistes de se rencontrer pour discuter de l'état d'avancement de leurs travaux et des problèmes courants qui se posent dans les différents domaines de la recherche et de la technologie concernant la fusion. Par l'intermédiaire de son programme de contrats de recherche et de bourses, l'Agence apporte aussi un appui direct aux programmes nationaux de recherche sur la fusion entrepris par ses Etats Membres. Les programmes de l'Agence sur la fusion relèvent d'un organe consultatif, le Conseil international de la recherche sur la fusion (CIRF).

Le programme de l'Agence relatif aux aspects de la physique atomique qui intéressent la recherche sur la fusion a commencé en 1976 par l'étude de constantes atomiques et moléculaires (A+M) pour la fusion, confiée à la section des constantes nucléaires de la Division des sciences physiques et chimiques, sous la direction du sous-comité compétent du CIRF. L'orientation à donner à ces travaux a été décidée par une réunion de groupe consultatif organisée à Culham (Royaume-Uni), en 1976, tout spécialement pour déterminer les besoins immédiats et à long terme de constantes atomiques et moléculaires pour la recherche sur la fusion. Actuellement, les principaux objectifs de l'AIEA dans ce domaine sont les suivants:

- constituer et tenir à jour une base internationale de données contenant les constantes atomiques et moléculaires évaluées et recommandées pour la recherche sur la fusion;
- coordonner et faciliter l'établissement d'une base internationale de données A+M pour la fusion (notamment en coordonnant les travaux de compilation et d'évaluation des centres nationaux de constantes atomiques et moléculaires pour la fusion);
- établir, tenir à jour et publier une bibliographie internationale sur la fusion;
- encourager et aider l'élaboration de constantes atomiques et moléculaires pour la fusion par l'intermédiaire de contrats de recherche et des programmes de recherche coordonnée de l'AIEA et d'autres formes de collaboration avec le monde de la physique atomique;

- diffuser des constantes atomiques et moléculaires à l'intention des laboratoires de recherche sur la fusion et autres utilisateurs.

Pour atteindre ces objectifs, l'Agence collabore étroitement avec le réseau international de centres de constantes atomiques, auquel nombre d'atomistes et de chercheurs apportent leur active contribution.

Le recueil de constantes atomiques et moléculaires évaluées a été sensiblement amélioré et contient désormais des valeurs recommandées de sections efficaces pour tous les processus de collision auxquels participent les constituants fondamentaux des plasmas d'hydrogène. Il existe également des séries complètes, ou presque, de constantes relatives aux collisions et aux interactions radiatives pour la plupart des impuretés présentes dans les plasmas (carbone, oxygène, fer) et, en ce qui concerne l'ionisation, pour tous les atomes et les ions qui interviennent dans la fusion. Les données sont présentées sous une forme qui facilite leur utilisation dans des programmes informatiques d'application. Leur compilation et leur évaluation sont coordonnées au sein du réseau de centres de constantes atomiques et moléculaires, tandis que leur validation et leur recommandation sont confiées à des groupes d'experts internationaux spécialement désignés à cette fin. La base de données de physique atomique pour la fusion établie par l'AIEA s'étend maintenant au domaine des interactions plasma-paroi, mais pour le moment, seules les interactions particules-surface les plus fondamentales sont relevées. On envisage toutefois d'y ajouter des données sur des phénomènes plus complexes liés aux interactions plasma-matériaux, concernant notamment les propriétés des matériaux exposés à des flux thermiques ou particuliers intenses.

Actuellement, le programme de physique atomique de l'AIEA pour la fusion cherche surtout à terminer la compilation des constantes atomiques et moléculaires nécessaire à la modélisation et au diagnostic, pour les grands tokamaks, des plasmas périphériques, du transport et du rayonnement des impuretés de numéro atomique moyen et élevé, de la pénétration des faisceaux de deutérium neutre de haute énergie (1-2 MeV) dans le plasma, tout en constituant une base de données sur les interactions fondamentales particules-surface. Cet effort est partagé entre la section des constantes nucléaires de l'AIEA et le réseau des centres de constantes atomiques et moléculaires, et de nombreux laboratoires nationaux de recherche en physique atomique et en physique des surfaces y participent. Cet esprit de collaboration internationale facilite l'établissement de la base internationale de données recommandée pour les études sur la fusion et qui groupera les constantes atomiques et moléculaires et les constantes d'interaction plasma-paroi.

