



*Actuele vragen rond kernenergie
Volume 5, april 1995*

STUDIECENTRUM VOOR KERNENERGIE
MOL BELGIË

Fusie energie

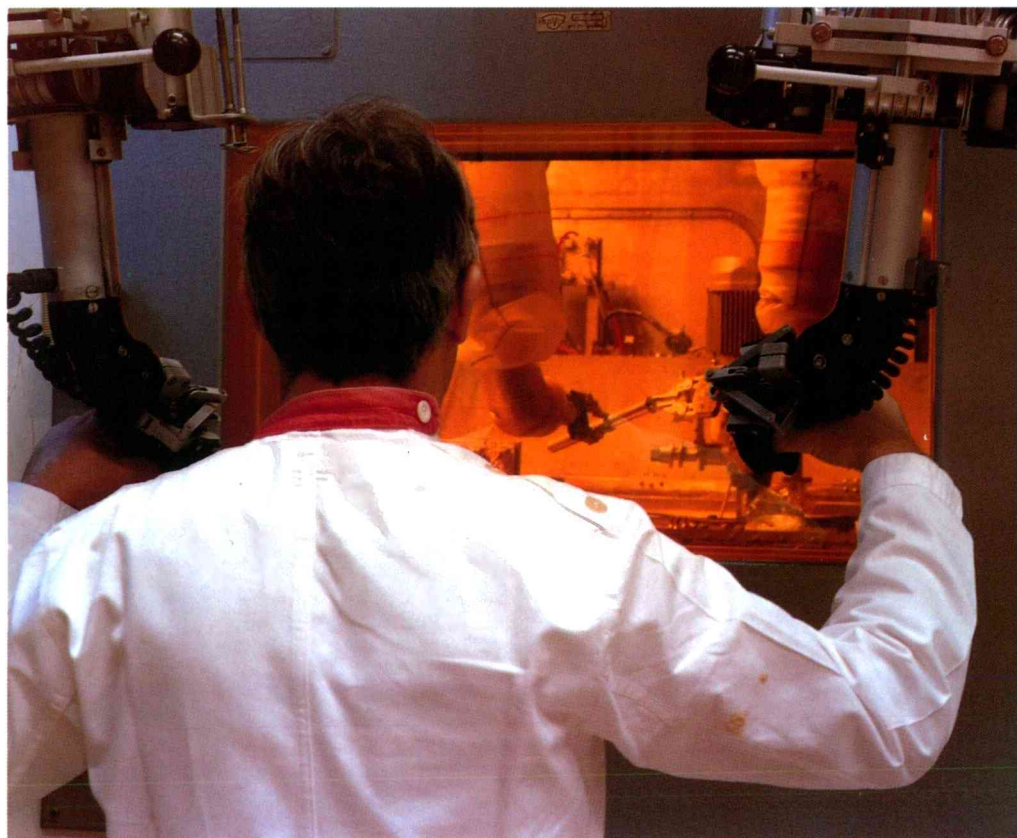


Foto op de omslag

Het gedrag van materialen onder bestraling blijft één van de problemen bij de ontwikkeling van fusiereactoren. De BR2 reactor en het Laboratorium voor Hoge- en Middelgrote Activiteit (LHMA) voor het fysische, mechanische en microstructurele onderzoek van het SCK•CEN spelen een belangrijke rol in het Europese onderzoek.

Actuele vragen rond kernenergie, volume 5
Studiecentrum voor Kernenergie, SCK•CEN

Fusie energie

José VAN DE VELDE

Pascal DEBOODT

Mathieu SNYKERS

Frans MOONS

Marc DECRÉTON

LUC VAN DEN DURPEL

Samenvatting i

Résumé ix



Nucleaire fusie 1

- 1 **Waar staan we?** 5
- 2 **De fusiereactor** 9
- 3 **Het fusieonderzoek** 23
- 4 **Rol van de industrie** 27
- 5 **Sterkte en zwakte** 31
- 6 **Aanbevelingen** 35



Bijlagen

Samenvatting

Voorwoord Fusie genoot, of zocht, de laatste jaren geregeld mediabelangstelling. Terecht vraagt men zich hierbij af: 'Wat is de draagkracht van deze berichten? Hoever staat men met het onderzoek? Wat staat de commerciële toepassing nog in de weg?'

Het SCK•CEN, dat reeds 20 jaar actief participeert in het Europese fusieprogramma, werd gevraagd door de federale minister van Economische Zaken, M. Wathelet, om een studie voor te dragen die de vooruitgang van de fusie energie beschrijft en de mogelijkheden ervan als toekomstige energievoorziening toelicht.

Dit document geeft een samenvatting van de essentiële elementen van het technische dossier. Na een algemene inleiding over fusie wordt ingegaan op het potentieel van een fusie-reactor als energiebron en de voornaamste struikelblokken op weg naar de realisatie ervan. Daarna worden de objectieven, de organisatie en de financiering van het fusieonderzoek behandeld. Hierbij wordt de specifieke rol van België toegelicht. Tenslotte worden enkele aanbevelingen geformuleerd en wordt de rol die het SCK•CEN kan spelen in dat gebeuren benadrukt.

Conclusies Of fusie het potentieel in zich heeft om beduidend bij te dragen tot de elektriciteitsproductie in de volgende eeuw is onzeker. De brandstof is virtueel onuitputtelijk en niet geografisch gebonden. Daarentegen staat dat een fusiereactor een groot investeringskapitaal vereist en grootschalig en relatief complex is in de uitbating. Omwille van deze 'inflexibiliteitsindicatoren' is het onwaarschijnlijk dat er vanuit een volgende generatie vraag zal zijn naar een fusiereactor.

Het fusieonderzoeksprogramma van de Europese Unie is een goed gestructureerd samenwerkingsproject met duidelijke objectieven. In haar programma voor de ontwikkeling van een fusiereactor beperkt Europa zich tot de toroidale magnetische opsluiting, met nadruk op de tokamak-lijn. Tot hiertoe is deze bewuste beperking succesvol geweest en heeft Europa gemaakt tot wereldleider in dit gebied dankzij JET (*Joint European Torus*), waardoor het een attractieve partner is voor internationale samenwerking in het ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*) project. Deze keuze maakt ons echter zeer kwetsbaar, mocht de tokamak-lijn in de toekomst fundamentele problemen vertonen. Tevens groeit de kritiek dat het

leeuwenaandeel van de fondsen opgeslorpt wordt door ITER, terwijl alternatieve fusieconcepten in de kou blijven.

Ontwikkelingen zoals koude fusie en bellenfusie maken ten onrechte gebruik van de fusie-paraplu. Dergelijke ontwikkelingen hebben hun waarde, echter niet binnen de fusie maar binnen de onderzoeksdisciplines waar ze thuishoren, namelijk de elektrochemie en de sonoluminescentie.

De integratie van het Belgische fusie onderzoeksprogramma in het Europese programma en doorheen het Europese programma in ITER, moet behouden worden. De toegang tot de resultaten van de partners wordt erdoor verzekerd.

De Belgische inspanning van 1,6 % (300 MBEF op 500 MECU) is aan de lage kant. In het licht van de vrij zwakke industriële *return* is het echter verdedigbaar. De huidige verdeling in België met 40 % voor respectievelijk fusietechnologie (SCK•CEN) en toegepaste plasmafysica (Koninklijke Militaire School) en zowat 10 % voor theoretische plasmafysica (Université Libre de Bruxelles) is evenwichtig. De BR2 materiaal testreactor is een voorname troef voor het SCK•CEN in de competitie voor fusieonderzoeksprogramma's.

Met de deelname van Belgatom aan het *European Fusion Engineering and Technology* (EFET) consortium is er een opening naar een grotere industriële participatie in het fusieprogramma. De Belgische *high-tech* KMO's zijn echter volstrekt afwezig. Een geconcentreerde actie vanuit overheid, onderzoeksinstituten en beroepsfederaties lijkt aangewezen om de betrokkenheid van de Belgische KMO's te vergroten.

1 Actuele situatie

Bij fusie wordt energie vrijgemaakt wanneer kernen van lichte elementen versmelten tot een zwaardere kern. De minst moeilijk te realiseren reactie is tussen twee isotopen van waterstof, nl. deuterium (^2H of D) en tritium (^3H of T).

Er zijn verschillende manieren om de reactie tot stand te brengen. De laatste decennia werd met de magnetische opsluiting en meer bepaald met de tokamak de grootste vooruitgang geboekt. De tokamak-lijn is ook de voornaamste onderzoekslijn binnen de Europese strategie naar een fusiereactor toe.

In de zestiger jaren, na declassificatie van het onderzoekswerk, werd het vlug duidelijk dat, om reactorcondities te bereiken, zeer grote machines nodig zouden zijn. Dit was en is nog steeds een stimulans voor internationale en zelfs mondiale samenwerking.

De vordering naar reactorcondities wordt meestal uitgedrukt door het fusieprodukt $n\tau T$ of het produkt van ionendichtheid n , energie opsluittijd τ en ionentemperatuur T . Sinds 1955 werd dit fusieprodukt om de 10 jaar met een factor 100 verbeterd. Recent werden in de drie grootste tokamaks plasma's gerealiseerd met parameters in de buurt van hetgeen vereist wordt voor een fusiereactor. Alhoewel er de laatste decennia enorme vooruitgang werd geboekt, is de afstand die ons van de commerciële fusiereactor scheidt niet echt korter, omwille van het lange proces van ontwikkeling, politieke besluitvorming en bouw van plasmaonderzoeksmachines. Fusie lijkt een verschuivend objectief.

2 De fusiereactor

Nucleaire fusiereactoren bestaan nog niet. Wel werden ettelijke 'reactorconceptstudies' uitgevoerd om evaluaties, projecties en vergelijkende studies met andere energiebronnen te kunnen uitvoeren.

Of fusie het potentieel in zich heeft om beduidend bij te dragen tot de elektriciteitsproductie in de volgende eeuw is onzeker. Uit de literatuur blijkt een kilowattuur-prijs van 0,029 US\$ voor fusie tegen respectievelijk 0,034 voor kolen en 0,019 voor splijtingsenergie. Kilowattuur-prijs of, meer algemeen, economische rendabiliteit is slechts één parameter in het pakket van 'maatschappelijke aanvaardbaarheid' waaraan toekomstige energiebronnen zullen getoetst worden. Fusie bezit ongetwijfeld troeven:

- de brandstof is virtueel onuitputtelijk en niet geografisch gebonden;
- het afvalprobleem wordt beperkt, gezien de afwezigheid van langlevende radioactieve splijtingsproducten;
- gasuitstoot, geassocieerd met verbranding van fossiele brandstof, wordt vermeden;
- de fusievoorwaarden zijn zo kritisch dat de minste storing tot stopzetting van de reactie leidt. Men kan dus spreken van een 'inherent veilig systeem'.

Anderzijds

- vereist een fusiereactor een groot investeringskapitaal waarvan de terugbetalingstijd voor financiers te lang en te onzeker zou kunnen zijn;
- een tokamak-fusiereactor zal 'groot' zijn (enkele gigawatt aan vermogen), hetgeen indruist tegen de tendens naar kleinschalige, flexibele eenheden;
- het geheel van complexe technologieën legt een hypotheek op een bedrijfszekere uitbating.

3 Technologie van de tokamak-reactor

In de huidige generatie machines bestudeert men het gedrag van het plasma. Ze hebben een experimenteel of labo karakter en er worden quasi geen neutronen geproduceerd. Hun technologie is dan ook niet altijd direct extrapolerbaar naar een reactor.

In een tokamak-reactor zullen materialen, systeemcomponenten en technologieën gebruikt worden aan de grens van hun huidige mogelijkheden. Fusie verricht hier echter baanbrekend ontwikkelingswerk en de tijd kan in haar voordeel spelen: wat nu nog *high-tech* is, kan binnen enkele generaties reeds gemeengoed zijn.

Zowel de industrie als specifiek opgezette onderzoeks- en ontwikkelingsprogramma's reiken oplossingen aan voor de meeste technologische problemen, o.m. grote supergeleidende magneten, grote ruimtes met hoog vacuüm, plasmaverhittingssystemen, tritiuminfrastructuur, onderhoud met afstandsbediening en complexe geometrie.

De technologische uitdagingen voor de fusiereactor zijn de eerste wand en de *divertor*, of anders gezegd de componenten die het plasma 'zien'. Mogelijke oplossingen kunnen komen vanuit de plasmafysica. Het onderzoeksprogramma van JET is dan ook grotendeels op dit probleem toegespitst. De huidige aanpak van het probleem voorziet twee stappen. De eerste stap bestaat uit de ontwikkeling van een wand, waarbij prioriteit gegeven wordt aan het bereiken van de objectieven van de plasmafysici. Daarna worden de problemen eigen aan de neutronen-omgeving in een fusiereactor aangepakt.

Een tokamak-reactor is een niet-continue machine. De gepulseerde werking brengt problemen mee van materiaalvermoeiing en mogelijke schommelingen op het elektrische distributienet. Alhoewel men deze problemen kan overkomen, drijven zij ondermeer de kostprijs en de complexiteit van de uitbating op.

Voor de beheersing van een tokamak-plasma werden onderzoeksprogramma's opgezet rond het gedrag van het helium in het plasma, het beheersen en vermijden van disrupties en de verhitting van het plasma.

4 Het fusieonderzoek

Het fusieonderzoeksprogramma van de Europese Unie is een goed gestructureerd samenwerkingsproject met duidelijke objectieven. In haar programma voor de ontwikkeling van een fusiereactor beperkt Europa zich tot de toroidale magnetische opsluiting, met nadruk op de tokamak-lijn. Tot hiertoe is deze bewuste beperking succesvol geweest en heeft Europa gemaakt tot wereldleider in dit gebied dankzij JET (*Joint European Torus*), waardoor het een attractieve partner is voor internationale samenwerking in het ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*) project. Deze keuze maakt ons echter zeer kwetsbaar, mocht de tokamak-lijn in de toekomst fundamentele problemen vertonen. Tevens groeit de kritiek dat het leeuwenaandeel van de fondsen opgeslorpt wordt door ITER, terwijl alternatieve fusieconcepten in de kou blijven.

Het lange-termijn objectief van de Europese Unie op het gebied van thermonucleaire fusie door middel van magnetische opsluiting is het gezamenlijk realiseren van veilige, omgevingschone prototype reactoren.

De noodzakelijke schaalvergroting bij de tokamak ontwikkeling en de potentiële voordelen van het delen van kosten, risico en kennis hebben het fusieonderzoek overal ter wereld gestimuleerd tot samenwerking, en heeft geleid tot de ITER-ontwerp overeenkomst die loopt tot 1998. Het ITER team is samengesteld uit wetenschappers van de vier partners: Euratom, Japan, het Gemeenebest van Onafhankelijke Staten en de Verenigde Staten.

Het onderzoekswerk in België is geïntegreerd in het Europese fusieprogramma dat deel uitmaakt van de vijfjaarlijkse kaderprogramma's voor onderzoek en technologische ontwikkeling. Deze samenwerking is geformaliseerd in een associatie contract tussen Euratom en de Belgische Staat, waarbij deze laatste optreedt voor eigen rekening, nl. het Laboratorium voor Plasmafysica van de Koninklijke Militaire School (KMS) en in naam van het SCK•CEN en de Université Libre de Bruxelles (ULB).

Het Belgische fusieonderzoek wordt als volgt verdeeld. Het Laboratorium voor Plasmafysica van de KMS legt zich toe op de verhitting van tokamak-plasma's. In de groep van de Services de physique statistique, plasmas et optique non linéaire van de ULB werkt men aan de theorie van transportverschijnselen in plasma's. Het SCK•CEN concentreert zich op de technologische aspecten van kernfusie. Zijn strategie hierbij is als volgt: 'bijdragen tot het Europese fusieprogramma in synergie met lopende onderzoeksprogramma's voornamelijk op het gebied van materialenonderzoek, waaronder ook het onderzoek naar de stralingshardheid van opto-elektronische componenten'. Uitbreiding of reoriëntatie wordt nagestreefd naar testen onder neutronenbestraling van geïntegreerde machinecomponenten, naar neutronendiagnostiek en naar scenario's rond beheer, manipulatie en stockage van radioactief afval.

Uit een evaluatie van 1994 blijkt dat ongeveer 2 000 *professionals*, waarvan 250 doctorandi, en ook zowat 2 000 man ondersteuningspersoneel werken in het Europese fusieprogramma. België vertegenwoordigt daarin 2,9%.

In het vierde kaderprogramma (1994-1998) werd 794 MECU toegewezen voor het fusieonderzoek. Jaarlijks wordt in Europa zowat 500 MECU uitgegeven aan fusieprogramma's. De nationale inspanningen zijn namelijk van dezelfde grootte orde als de bijdrage van de Commissie van de Europese Gemeenschappen. De Belgische uitgave schommelt de laatste jaren rond 300 MBEF per jaar of 1,6% van de totale Europese inspanning.

5 Rol van de industrie

Met betrekking tot de industrie stelde de *Fusion Programme Evaluation Board* in 1990 dat 'de industrie een grotere rol moest toegewezen krijgen'. Aan deze aanbeveling werd formeel gehoor gegeven door ondermeer de oprichting van een *Committee in Fusion Industry*. Verder worden in Europa ITER-ontwerptaken toegekend aan EFET (*European Fusion Engineering and Technology*), een *European Economic Interest Grouping* bestaande uit Belgatom (België), CITIF (Italië), Framatome (Frankrijk), Ibertef (Spanje), NNC (Verenigd Koninkrijk) en Siemens (Duitsland). EFET heeft als doel deel te nemen aan het ontwerp van ITER en zijn competenties ter beschikking te stellen voor het ontwerp en de bouw van andere fusie machines. Daarenboven werden, voor 15 gebieden die specifiek zijn aan fusie en noodzakelijk voor ITER, lijsten opgesteld van Europese firma's en consortia die gecontacteerd worden bij de aankoop van specifieke apparatuur en prototypes met inbegrip van de voorbereidende ontwerptaken.

De inbreng van de Belgische industrie is (te) beperkt en dit niettegenstaande in het verleden sensibiliseringsacties werden opgezet, zowel naar individuele bedrijven als naar beroepsfederaties toe. Door de deelname aan EFET groeit echter de betrokkenheid van Belgatom. Op de lijsten van de 15 technologische gebieden bevindt zich alleen Dour Metal als Belgisch bedrijf. Het werd gekwalificeerd voor het gebied 'geleiders voor supergeleidende spoelen'. Een geconcentreerde actie vanuit overheid, onderzoeksinstellingen en beroepsfederaties lijkt aangewezen om de betrokkenheid van de Belgische KMO's te vergroten.

Résumé

Avant-propos Ces dernières années, la fusion nucléaire a connu — ou même cherché — une certaine popularité médiatique. C'est à juste titre que le lecteur ou spectateur des médias se pose des questions. Quelle est la valeur de ces communications ? Où en est la recherche en matière de fusion ? Qu'est-ce qui empêche encore l'application commerciale de cette forme de production d'énergie ?

Le CEN•SCK, qui depuis 20 ans participe activement au programme de fusion européen, s'est vu confier par le Ministre fédéral des Affaires économiques, M. Wathelet, la tâche de constituer un dossier décrivant les progrès de l'énergie par fusion nucléaire et commentant son utilisation possible comme source future d'énergie.

Le présent document reprend en version condensée les éléments essentiels du dossier technique. Après une introduction générale à la fusion, le dossier examine le potentiel d'un réacteur de fusion comme source d'énergie et les principaux jalons sur la voie de la mise en pratique. Ensuite, il discute les objectifs, l'organisation et le financement de la recherche en fusion, mettant en lumière le rôle spécifique joué par la Belgique. Il termine en formulant quelques recommandations et en soulignant le rôle que le CEN•SCK peut jouer dans ce contexte.

Conclusions Il n'est pas sûr que la fusion puisse contribuer considérablement à la production d'électricité au siècle prochain. Le combustible est virtuellement inépuisable et réparti uniformément à travers le globe. Par contre, un réacteur de fusion exige un capital d'investissement important et constitue un équipement à grande échelle, relativement complexe à exploiter. A cause de ces « indicateurs d'inflexibilité », il est peu vraisemblable de rencontrer, de la part de la prochaine génération, une demande de réacteurs de fusion.

Le programme de recherche en fusion de l'Union européenne est un projet de collaboration bien structuré, avec des objectifs clairs. Dans son programme de développement d'un réacteur de fusion, l'Europe s'est limitée au confinement magnétique toroidal, en mettant l'accent sur la lignée des tokamaks. Cette limitation délibérée a jusqu'à présent été un succès : au niveau mondial, l'Europe s'est ainsi placée en tête dans ce domaine grâce au projet JET (*Joint European Torus*) et est dès lors devenue un partenaire

attrayant pour une collaboration internationale dans le projet ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*). Ce choix nous rend cependant très vulnérables, si la lignée des tokamaks révélait des problèmes fondamentaux dans le futur. De plus, le fait qu'ITER s'octroie la part du lion en matière de financement, au détriment des autres concepts, attire de plus en plus la critique.

Des développements tels que la fusion à froid et la fusion à bulles font abusivement usage du parapluie « fusion ». De tels développements ont sans aucun doute leur valeur, non pas en fusion, mais dans leurs disciplines respectives, à savoir l'électrochimie et la sonoluminescence.

L'intégration du programme de recherche belge en fusion dans le programme européen et, à travers ce dernier, dans le projet ITER, doit être conservée. L'accès aux résultats des partenaires est ainsi assuré.

L'effort belge d'1,6% (300 MBEF sur 500 MECU) est plutôt faible; il est toutefois défendable au vu du faible retour industriel. La répartition actuelle en Belgique est bien équilibrée, avec 40% pour la technologie de fusion (CEN-SCK), 40% pour la physique appliquée des plasmas (Ecole royale militaire) et environ 10% pour la physique théorique des plasmas (Université Libre de Bruxelles). Le réacteur d'essai de matériaux BR2 est un atout principal pour le CEN-SCK dans la compétition pour les programmes de recherche en fusion.

La participation de Belgatom au consortium EFET (*European Fusion Engineering and Technology*) crée une ouverture pour une plus grande participation industrielle au programme de fusion. Les PME belges de haute technologie sont en effet totalement absentes. Une action concertée des autorités, des instituts de recherche et des fédérations professionnelles semble indiquée pour augmenter l'implication des PME belges.

1 Situation actuelle

La fusion nucléaire est le processus par lequel des noyaux d'atomes légers fusionnent en un noyau plus lourd, libérant ainsi de l'énergie. La réaction la moins difficile à réaliser est celle entre deux isotopes d'hydrogène, à savoir le deutérium (noté ^2H ou D) et le tritium (noté ^3H ou T).

Il y a plusieurs manières de provoquer la réaction. Durant la dernière décennie, c'est le confinement magnétique, plus précisément au moyen du tokamak, qui a enregistré le progrès le plus marqué. La lignée des tokamaks est également l'axe de recherche principal au sein de la stratégie européenne vers un réacteur de fusion.

Dans les années soixante, après la déclassification du travail de recherche, il est rapidement apparu que de très grandes machines seraient nécessaires pour atteindre les conditions de réaction. Cette observation stimula, et stimule toujours, la coopération internationale, voire mondiale.

Les exigences à atteindre pour créer les conditions de réaction sont le plus souvent exprimées par le produit de fusion $n\tau T$, c'est-à-dire le produit de la densité ionique n , du temps de confinement énergétique τ et de la température ionique T . Depuis 1955, ce produit de fusion est amélioré par un facteur 100 tous les 10 ans. Récemment, on a créé dans les trois plus grands tokamaks des plasmas dont les paramètres avoisinent ceux exigés par un réacteur de fusion. Toutefois, et bien qu'un progrès énorme ait été enregistré dans la dernière décennie, la distance qui nous sépare d'un réacteur de fusion commercial ne s'en trouve pas véritablement réduite, à cause du long processus de développement, de prise de décision au niveau politique et de construction de machines à plasma expérimentales. La fusion semble être un objectif qui nous échappe.

2 Le réacteur de fusion

Les réacteurs de fusion n'existent pas encore. Par contre, plusieurs « études de concepts de réacteur » ont été réalisées à des fins d'évaluations, de projections et de comparaisons avec d'autres sources d'énergie.

Il n'est pas sûr que la fusion puisse contribuer considérablement à la production d'électricité au siècle prochain. La littérature suggère un prix au kilowattheure de 0,029 US\$ pour la fusion, contre respectivement 0,034 pour le charbon et 0,019 pour la fission nucléaire. Le prix au kilowattheure ou, plus généralement, la rentabilité économique n'est qu'un paramètre dans l'ensemble de l'« acceptabilité publique » par rapport auquel les sources d'énergie futures seront mesurées. La fusion possède des atouts indiscutables :

- le combustible est virtuellement inépuisable et distribué uniformément sur le globe;
- le problème des déchets est limité, vu l'absence de produits de fission radioactifs à longue demi-vie;
- le procédé évite l'émission de gaz, caractéristique de la combustion fossile;
- les conditions de fusion sont à ce point critiques que la moindre perturbation mène à l'arrêt de la réaction : on peut donc parler d'un système *intrinsèquement sûr*.

Par contre,

- un réacteur de fusion exige un capital d'investissement important, dont la rentabilisation pourrait sembler trop longue et trop incertaine aux financiers;
- un réacteur de fusion de type tokamak sera « grand » (d'une puissance de quelques gigawatts), ce qui va à l'encontre de la tendance actuelle à construire des unités flexibles, à petite échelle;
- l'ensemble des technologies complexes hypothèque une exploitation sûre.

3 Technologie du réacteur tokamak

Les machines de la génération actuelle permettent l'étude du comportement du plasma. Elles ont un caractère expérimental ou de laboratoire et ne produisent quasiment aucuns neutrons. Leur technologie n'est dès lors pas toujours directement extrapolable à celle d'un réacteur.

Un réacteur tokamak utilise les matériaux, les composantes de système et les technologies à la limite de leurs possibilités actuelles. Toutefois, la fusion effectue ici un travail pionnier de développement et le temps peut jouer en sa faveur : ce qui est aujourd'hui encore *high-tech* peut devenir monnaie courante d'ici quelques générations.

Tant l'industrie que les programmes spécifiques de recherche et développement tendent vers des solutions pour la plupart des problèmes technologiques ; parmi ces solutions se retrouvent de grands aimants supraconducteurs, de grandes cavités sous un vide poussé, des systèmes de chauffage de plasma, une infrastructure pour le tritium, un entretien commandé à distance et une géométrie complexe.

Les défis technologiques pour le réacteur de fusion sont la première paroi et le déflecteur, autrement dit les éléments qui « voient » le plasma. Les solutions possibles peuvent venir de la physique des plasmas. Le programme de recherche de JET est dès lors en grande partie focalisé sur ce problème. L'approche actuelle du problème prévoit deux étapes. La première est le développement d'une paroi qui réponde en priorité aux objectifs fixés par les physiciens des plasmas. Ensuite sont traités les problèmes propres à l'environnement neutronique au sein d'un réacteur de fusion.

Un réacteur tokamak ne travaille pas en continu. Le fonctionnement pulsé amène des problèmes de fatigue des matériaux et d'oscillations possibles sur le réseau de distribution électrique. Bien que ces problèmes puissent être surmontés, ils augmentent entre autres le prix de revient et la complexité de l'exploitation.

Pour la maîtrise du plasma du tokamak, des programmes de recherche ont été mis sur pied concernant le comportement de l'hélium dans le plasma, la maîtrise et la prévention des perturbations et le chauffage du plasma.

4 La recherche en fusion

Le programme de recherche en fusion de l'Union européenne est un projet de collaboration bien structuré, avec des objectifs clairs. Dans son programme de développement d'un réacteur de fusion, l'Europe s'est limitée au confinement magnétique toroïdal, en mettant l'accent sur la lignée des tokamaks. Cette limitation délibérée a jusqu'à présent été un succès : au niveau mondial, l'Europe s'est ainsi placée en tête dans ce domaine grâce au projet JET (*Joint European Torus*) et est dès lors devenue un partenaire attrayant pour une collaboration internationale dans le projet ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*). Ce choix nous rend cependant très vulnérables, si la lignée des tokamaks révélait des problèmes fondamentaux dans le futur. De plus, le fait qu'ITER s'octroie la part du lion en matière de financement, au détriment des autres concepts, attire de plus en plus la critique.

L'objectif à long terme de l'Union européenne dans le domaine de la fusion thermonucléaire par confinement magnétique est la réalisation communautaire de réacteurs prototypes sûrs et propres.

L'augmentation d'échelle indispensable au développement d'un tokamak et les avantages potentiels d'un partage des coûts, des risques et de la connaissance ont stimulé partout dans le monde la collaboration dans la recherche en fusion et ont mené à l'accord de développement ITER, qui court jusqu'en 1998. L'équipe ITER est composée de scientifiques des quatre parties prenantes : l'Euratom, le Japon, la Communauté des Etats indépendants et les Etats-Unis.

Le travail de recherche en Belgique est intégré dans le programme de fusion européen, lequel fait partie des programmes cadres quinquennaux pour la recherche et le développement technologique. Cette collaboration est formalisée dans un contrat d'association entre l'Euratom et l'Etat belge, par lequel ce dernier intervient pour son propre compte, à savoir via le Laboratoire pour la physique des plasmas de l'Ecole Royale Militaire (ERM), et au nom du CEN•SCK et de l'Université Libre de Bruxelles (ULB).

La recherche belge en fusion se répartit comme suit. Le Laboratoire pour la physique des plasmas de l'ERM se consacre au chauffage des plasmas du tokamak. Le groupe des Services de physique statistique, plasmas et optique non linéaire de l'ULB travaille à la théorie des principes de transport dans les plasmas. Le CEN•SCK se concentre sur les aspects technologiques de la fusion nucléaire ; sa stratégie dans ce contexte s'énonce comme suit : « contribuer au programme de fusion européen en synergie avec les programmes de recherche en cours, principalement dans le domaine de la recherche en matériaux, y compris la recherche sur la résistance aux radiations des composantes optoélectroniques ». Il poursuit une extension ou une réorientation vers les tests sous irradiation neutronique de composantes intégrées de machines, vers le diagnostic neutronique et vers les scénarios en matière de gestion, manipulation et stockage de déchets radioactifs.

Une évaluation de 1994 suggère qu'environ 2 000 professionnels, dont 250 doctorants, et aussi environ 2 000 agents des équipes de support travaillent au programme de fusion européen. La Belgique en représente 2,9%.

Le quatrième programme cadre (1994-1998) attribua 794 MECU à la recherche en fusion. Chaque année, l'Europe consacre environ 500 MECU aux programmes de fusion. Les efforts nationaux sont en effet du même ordre de grandeur que la contribution de la Commission des Communautés européennes. La dépense belge oscille ces dernières années autour des 300 MBEF par an ou 1,6% de l'effort européen total.

5 Le rôle de l'industrie

En ce qui concerne l'industrie, le *Fusion Programme Evaluation Board* a établi en 1990 que « l'industrie doit se voir attribuer un rôle plus important ». Cette recommandation fut formellement suivie via, entre autres, la mise sur pied d'un *Committee in Fusion Industry*. De plus, en Europe, certaines tâches de développement ITER sont attribuées à EFET (*European Fusion Engineering and Technology*), un groupement européen d'intérêt économique composé de Belgatom (Belgique), CITIF (Italie), Framatome (France), Ibertef (Espagne), NNC (Royaume-Uni) et Siemens (Allemagne). EFET a pour objectif de participer au développement de ITER et de mettre ses compétences à disposition pour le développement et la construction d'autres machines de fusion. Enfin, pour 15 domaines spécifiques à la fusion et indispensables pour ITER, on a établi des listes de firmes et consortiums européens qui sont contactés lors de l'achat d'appareillage et prototypes spécifiques, y compris les tâches de développement préparatoires.

L'apport de l'industrie belge est (trop) limité et ce, bien que des actions de sensibilisation aient été entreprises dans le passé, tant envers des entreprises individuelles qu'envers des fédérations professionnelles. Toutefois, à travers la participation à EFET, l'implication de Belgatom augmente. Sur la liste des 15 domaines technologiques, seule Dour Metal est une entreprise belge. Celle-ci s'est qualifiée pour le domaine « conducteurs pour bobines supraconductrices ». Une action concertée des autorités, des instituts de recherche et des fédérations professionnelles semble indiquée pour augmenter l'implication des PME belges.

Inhoud

Samenvatting i

- 1 Actuele situatie iii
- 2 De fusiereactor iv
- 3 Technologie van de tokamak-reactor v
- 4 Het fusieonderzoek vi
- 5 Rol van de industrie viii

Résumé ix

- 1 Situation actuelle xi
- 2 Le réacteur de fusion xii
- 3 Technologie du réacteur tokamak xiii
- 4 La recherche en fusion xiv
- 5 Le rôle de l'industrie xvi

Inhoud xvii

Nucleaire fusie 1

- 1 Fusiesystemen 2**
- 2 Magnetische opsluiting 3**

Hoofdstuk 1 Waar staan we? 5

- 1.1 Enkele mijlpalen 5**
- 1.2 Realisaties 6**

Hoofdstuk 2 De fusiereactor 9

- 2.1 Veiligheid 11**
 - 2.1.1 Nucleaire risico's 12
 - 2.1.2 Klassieke veiligheid 12
 - 2.1.3 Oriëntaties op termijn 13
 - 2.1.4 Besluit 13
- 2.2 Afval 13**
 - 2.2.1 Volumes ontmantelingsafval 14
 - 2.2.2 Fusiereactorafval en omgeving 14
 - 2.2.3 Hoe het afvalprobleem voor fusiereactoren verminderen? 14
 - 2.2.4 Besluit 16
- 2.3 Stand van de technologie voor de tokamak-reactor 16**
 - 2.3.1 Supergeleidende spoelen 16
 - 2.3.2 Kweekmantel, eerste wand en tritium kringloop 16
 - 2.3.3 Afstandsbediening 18
 - 2.3.4 Divertor 18
 - 2.3.5 Alternatieven 18
- 2.4 Stand van de plasmafysica van de tokamak-reactor 20**
 - 2.4.1 Gedrag van het helium in het plasma 20
 - 2.4.2 Disrupties 20
 - 2.4.3 Stationaire bedrijfsuitbating 21
 - 2.4.4 Verhitting van het plasma 21

Hoofdstuk 3 Het fusieonderzoek 23

- 3.1 Organisatie 23**
 - 3.1.1 Europese Unie 23
 - 3.1.2 ITER 24
 - 3.1.3 België 24
- 3.2 Financiering 25**
 - 3.2.1 Europese Unie 25
 - 3.2.2 ITER 26
 - 3.2.3 België 26

Hoofdstuk 4 Rol van de industrie 27

4.1 Europa 27

4.2 Spin-offs 28

4.3 België 28

Hoofdstuk 5 Sterkte en zwakte 31

5.1 Fusiereactor 31

5.1.1 Sterkte 31

5.1.2 Zwakte 31

5.2 Fusieonderzoek 32

5.2.1 Sterkte 32

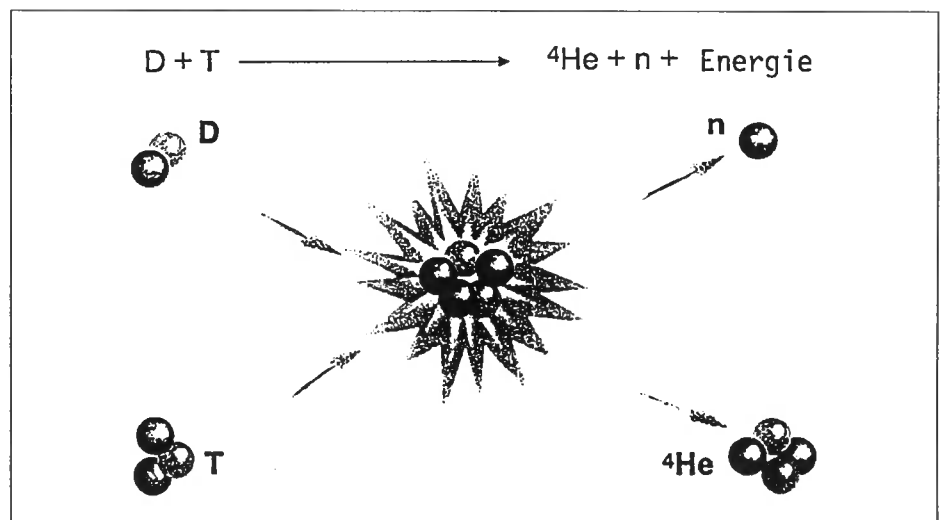
5.2.2 Zwakte 32

Hoofdstuk 6 Aanbevelingen 35**Bijlage A Referenties 37****Bijlage B Acroniemen 41**

Nucleaire fusie

Er komt energie vrij wanneer kernen van lichte elementen versmelten (*fusie*) tot een zwaardere kern (fig. 1) [1; 2; 3]. De minst moeilijk te realiseren reactie is tussen twee isotopen van waterstof, nl. deuterium (^2H of D) en tritium (^3H of T).

Vier-vijfde ($2,2 \times 10^{-12}$ joule) van de vrijkomende energie wordt meegevoerd door het neutron. Het resterende vijfde ($5,6 \times 10^{-13}$ joule) gaat naar de helium kern die ook bij deze reactie gevormd wordt. In een fusiereactor worden de neutronen vertraagd in de mantel rond de reactiezone. Door dit afremmen wordt energie in warmte omgezet waarmee stoom kan geproduceerd worden voor conventionele elektriciteitsproductie.



Figuur 1 Er komt energie vrij wanneer kernen van lichte elementen versmelten tot een zwaardere kern. Een atoom bestaat uit een kern waarrond elektronen cirkelen. De kern bevat protonen en neutronen. De massa van een atoom is kleiner dan de som van de massa van elektronen, protonen en neutronen afzonderlijk. Die verdwenen massa is energie die vrijkomt als de deeltjes samenklitten. Bedoeling van beheerste kernfusie is twee atomen kunstmatig te gaan samensmelten. Het gewicht van het samengesmolten geheel is dan minder dan van de twee oorspronkelijke atomen, en het verschil is energie waarmee de reactieproducten wegvliegen. Het afremmen daarvan levert warmte waarmee langs de stoomcyclus, elektriciteit kan geproduceerd worden [4].

1 Fusiesystemen

Om bovenstaande reactie tot stand te brengen staan een aantal wegen open: magnetische opsluiting, inertieële opsluiting en muonen katalysatie.

Magnetische opsluiting

Indien de kinetische energie of de snelheid van deuterium en tritium kernen voldoende groot is, gaan, bij voldoende dichtheid, de kernen botsen en samensmelten. Dit kan men bereiken door de brandstof, deuterium en tritium, te verhitten tot zowat 100 miljoen graden. Bij dergelijke temperaturen zijn de deuterium en tritium atomen overgegaan in een plasma, d.w.z. de negatief geladen elektronen van de atomen bewegen zich los van de positief geladen kernen of ionen. Daar een plasma een mengsel is van elektrisch geladen deeltjes kan het bijeengehouden worden door magnetische velden. Dit wordt aangeduid met magnetische opsluiting.

Inertiële opsluiting

Een klein bolletje bevroren deuterium/tritium mengsel van zowat 1 mg, wordt zo snel van alle kanten verhit en gecomprimeerd dat het gevormde zeer dichte plasma geen tijd heeft om uit te zetten en tot fusie overgaat. Men spreekt dan ook van traagheids- of inertieële opsluiting [5]. Vanuit de Europese Commissie wordt dit onderzoek slechts op passieve wijze gevolgd.

Muonen katalysatie

Bij het inschieten van muonen (deeltjes met de lading van het elektron en 206 maal de massa ervan) in een deuterium/tritium mengsel gaan de muonen in een aantal stappen de plaats innemen van elektronen. Door hun grote massa draaien muonen veel dichterbij de kern dan elektronen. Daardoor verlaagt de drempel waarbij de kernen versmelten en kan er reeds fusie bij kamertemperatuur plaatsvinden. Men noemt dit muon gekatalyseerde fusie [6; 7]. Men heeft geen warm plasma nodig en daarom spreekt men ook van koude fusie. Alhoewel men de laatste jaren een aantal veelbelovende theoretische en experimentele resultaten heeft behaald is de stap naar demonstratie op technische schaal nog niet te maken.

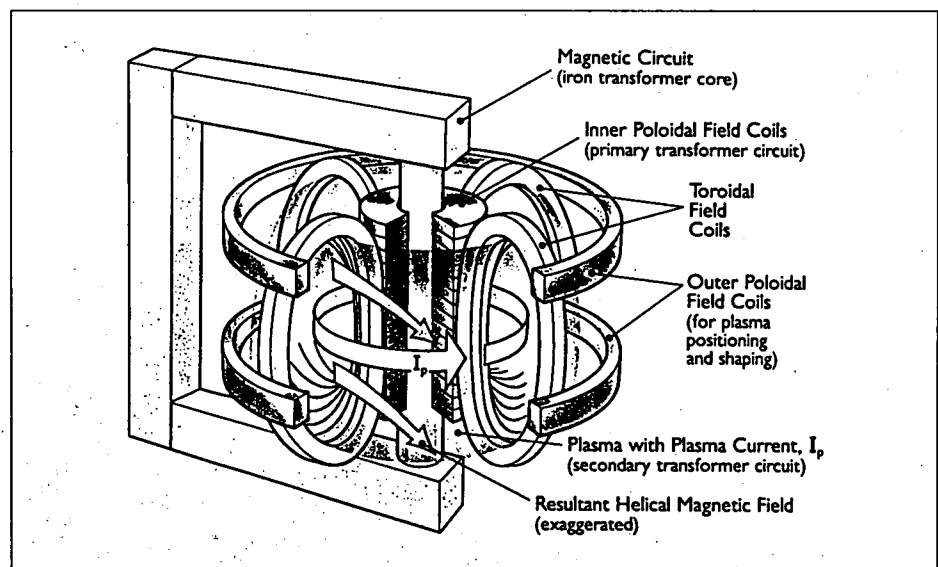
In maart 1989 kregen Pons en Fleischmann wereldbekendheid door koude fusie in een experimentele opstelling gebaseerd op elektrolyse [8]. Tussen deuterium atomen, die zich nestelen in het interatomaire rooster van een palladium elektrode en op die manier enorm gecomprimeerd worden, zouden fusiereacties plaats grijpen. Deze 'koude fusie' werd echter nooit op wetenschappelijke verifieerbare wijze aangetoond [9]. Het SCK-CEN heeft een belangrijke bijdrage geleverd tot een verklaring van de mogelijks optredende fenomenen.

Met veel minder trompetgeschal verscheen in het najaar van 1994 de bellenfusie (*bubble fusion*) in de literatuur [10; 11]. In de dertiger jaren ontdekten de Duitse fysici H. Frenzel en H. Schultes het verschijnsel van de sonoluminescentie. Wanneer geluidsgolven geabsorbeerd worden in een vloeistof met kleine bellen, kunnen de bellen in trilling komen en dan imploderen onder het uitsturen van een lichtflits. De implosie schokgolf perst het gas in de luchtbel samen tot zeer hoge drukken en temperaturen. De analogie met fenomenen van inertieële opsluiting is duidelijk en vandaar, de euforistische extrapolatie naar 'bellen-fusie'.

2 Magnetische opsluiting

De laatste decennia werd met de magnetische opsluiting en meer bepaald met de *tokamak* de grootste vooruitgang geboekt. Het is ook de voornaamste onderzoekslijn binnen de Europese strategie naar een fusiereactor toe [12].

De tokamak, acronym voor het Russische *toroidalnaya kamera magnitnaya*, is een toroïdale machine waarbij de magnetische veldconfiguratie uit drie componenten opgebouwd wordt (fig. 2). De eerste component wordt geleverd door de reeks spoelen rond de kleine omtrek van de torus. Deze spoelen produceren het toroïdale magnetische veld rond de hoofdas van de machine. De tweede component of het poloïdale veld wordt geleverd door een grote stroom in het plasma. De combinatie van beide velden geeft een helicoïdaal magnetisch veld dat het plasma weghoudt van de wanden van het reactorvat. De derde of laatste component wordt geleverd door een reeks 'hoepel'-spoelen die de plasma vorm en positie bepalen. De magnetische veldsterkten nodig in een tokamak-reactor kunnen alleen met supergeleidende spoelen verkregen worden. Daar de plasmastroom door transformatorwerking in het plasma geïnduceerd wordt vanuit de centrale spoel, die zowat om het uur moet herladen worden, zal een tokamak-reactor dan ook niet continu kunnen werken.



Figuur 2 Voornaamste magnetische velden van een tokamak.

Magnetic circuit (iron transformer core)

Inner poloidal field coils
(primary transformer circuit)

Toroidal field coils

Outer poloidal field coils
(for plasma positioning and shaping)

Plasma with plasma current, I_p
(secondary transformer circuit)

Resultant helical magnetic field
(exaggerated)

Magnetische lus (ijzer transformator juk)

Centrale spoelen voor poloïdaal veld
(transformator primaire spoel)

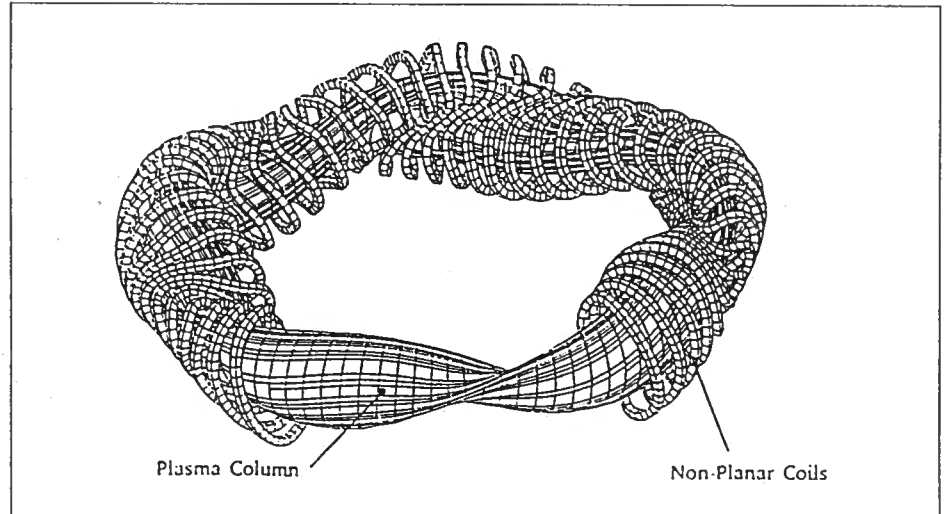
Spoelen voor toroïdaal veld

Buitenste spoelen voor poloïdaal veld of hoepelspoelen
(voor plasma vorm en positie)

Plasma met plasmastroom, I_p
(transformator secundaire spoel)

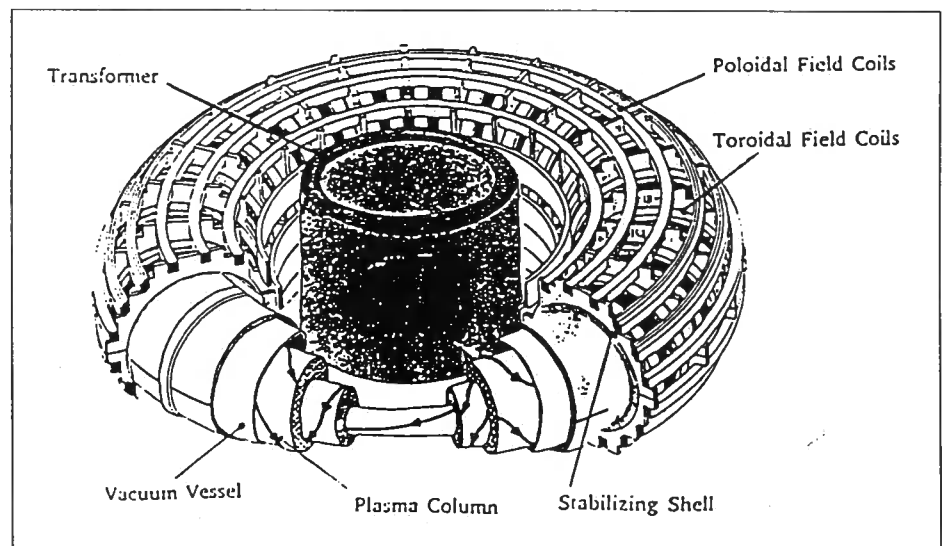
Resultierend spiraalvormig veld
(overdreven)

Bij een *stellerator* wordt de volledige magnetische veldconfiguratie verkregen door speciaal gevormde 'helix' spoelen (fig. 3). Een stellerator werkt dus zonder plasmastroom en een stellerator-reactor zou in principe dan ook continu kunnen werken. *Torsatrons*, *heliotrons* en *heliacs* zijn variaties die tot de stellerator familie behoren.



Figuur 3 Mogelijke spoelenconfiguratie voor een stellerator.

De *Reversed-Field Pinch* (RFP) lijkt op een tokamak maar is principieel verschillend omdat in de RFP het toroïdale veld van richting verandert in de nabijheid van de wand van het reactorvat. In tegenstelling met een tokamak waar het toroïdale veld domineert, zijn in het RFP concept de poloïdale en de toroïdale magnetische velden van nagenoeg dezelfde grootte orde en lager dan bij een tokamak, zodat men geen beroep moet doen op supergeleidende spoelen (fig. 4).



Figuur 4 Principe van een *reversed-field pinch*.

Transformer	Transformator	Stabilizing shell	Stabilizerende schil
Vacuum vessel	Vacuum vat	Toroidal field coils	Spoelen voor toroïdaal veld
Plasma column	Plasma bundel	Poloidal field coils	Spoelen voor poloïdaal veld

HOOFDSTUK 1

Waar staan we?

Het onderzoek op het gebied van fusie startte juist na de tweede wereldoorlog. In de beginperiode was het direct gerelateerd aan de ontwikkeling van de waterstofbom en het werd daarom geheim gehouden. Open Onderzoek en Ontwikkeling (O&O) werd slechts mogelijk vanaf de zestiger jaren. Het werd ook vlug duidelijk dat, om reactorcondities te bereiken, zeer grote machines nodig zouden zijn, die de fondsen beschikbaar in de individuele landen zouden overstijgen. Dit was een stimulant voor internationale samenwerking (tabel 1.1). Alhoewel de laatste decennia enorme vooruitgang werd geboekt, is de afstand die ons van de commerciële fusioreactor scheidt niet echt korter. Fusie lijkt een verschuivend objectief [13; 14; 15].

Tabel 1.1 Schaalvergroting bij tokamak in het fusieonderzoek.

	<i>TFTR</i>	<i>JET</i>	<i>ITER (juni 94)</i>
Land/organisatie	VS	UK/Euratom	internat.
Vorm van het plasma	circulair	elliptisch	elliptisch
Kleine straal (m)	0.85	1.25 (horiz.)	0.3 (horiz.)
Grote straal (m)	2.5 (vert.)	2.1 (vert.)	4.66 (vert.)
Toroïdaal magnetisch veld (T)	5.2	3.5	5.7
Plasmastroom (MA)	3.0	7.0	24
Pulslengte (s)	5	60	1000
Injectie van neutrale deeltjes (MW)	33	21	ter studie
Instralen van elektromagn. golven (MW)	8	47	ter studie

1.1 Enkele mijlpalen

- 1958 Conferentie voor het vreedzame gebruik van kernenergie te Genève. Het fusieonderzoek wordt niet meer geheim gehouden.
- 1958 Fusie wordt opgenomen in het Euratom verdrag als een onderzoeksthema voor de Gemeenschap.

- 1968 Op de IAEA conferentie te Novosibirsk wordt de leidende rol van de tokamaklijn erkend.
- 1975 De eerste stellerator (L2) wordt in gebruik genomen in Moskou.
- 1978 Beslissing om JET (*Joint European Torus*) te bouwen. Internationale samenwerking tussen de lidstaten van de Gemeenschap, Zweden en Zwitserland [16].
- 1988 De grootste stellerator ter wereld (Wendelstein VII-AS) wordt in gebruik genomen in Garching (Duitsland).
- 1990 In gebruik name van de T-15 supergeleidende tokamak in Rusland.
- 1991 JET realiseert als eerste een deuterium/tritium plasma en produceert 2 MW gedurende 2 s [17].
- 1992 Overeenkomst tussen de Europese Gemeenschap, Japan, de VS en het GOS voor het gezamenlijke ontwerp van een *Next Step*, de International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) [18].
- 2005 In gebruik name van de ITER machine.
- 2020 Bouw van DEMO, prototype fusiereactor.

1.2 Realisaties

Voor tokamaks wordt de vordering meestal uitgedrukt door het fusieproduct $n\tau T$ (Lawson criterium). Voor een reactor stelt men voorop

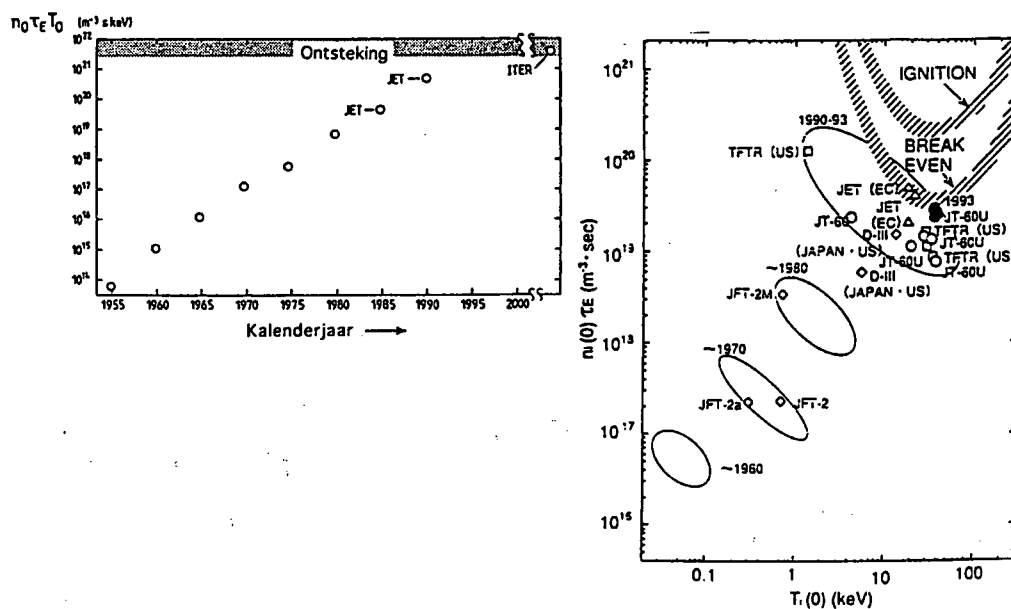
- een ionendichtheid n van 2 à $3 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$,
- een energie opsluittijd τ van 1 à 2 seconden en
- een ionentemperatuur T van 10 à 20 keV,

hetgeen resulteert in een $n\tau T$ product van minimaal $5 \times 10^{21} \text{ m}^{-3} \cdot \text{s} \cdot \text{keV}$. De temperatuur wordt uitgedrukt als de gemiddelde energie van de ionen waarbij 1 keV zowat 10 miljoen kelvin bedraagt. Sinds 1955 werd het fusieproduct om de 10 jaar met een factor 100 verbeterd (fig. 1.1).

Recent werden in de drie grootste tokamaks, JET (Europese Unie), TFTR (Verenigde Staten) en JT-60 (Japan), plasma's gerealiseerd met parameters in de buurt van hetgeen vereist wordt voor een fusiereactor.

Alhoewel de tokamak beschouwd wordt als *de* weg naar de fusiereactor, loopt er ook complementair onderzoek, voornamelijk naar het plasmagedrag, in de alternatieve machines van de magnetische opsluiting, zoals stelleratoren en *reversed-field pinch* machines.

Bij de traagheidsopsluiting werden gedurende minder dan 2 ns reeds dichtheden bereikt van meer dan 600 maal de dichtheid van de vaste stof onder normale omstandigheden, bij temperaturen van enkele miljoenen kelvin en werd tot $0,2\%$ van de ingestraalde energie als fusie-energie teruggewonnen.



Figuur 1.1 Evolutie van het fusieproduct in de afgelopen 40 jaar.

Break even: de voorwaarde waarbij het geproduceerde fusievermogen gelijk is aan het vermogen nodig om de vereiste temperatuur en dichtheid te onderhouden in het plasmavolume.

Ignition: ontsteking van een deuterium/tritium mengsel wordt bereikt als het vermogen van de alfa-deeltjes, die bij de fusiereactie geproduceerd worden, volstaat om de plasma temperatuur op peil te houden. Het alfavermogen bedraagt 20% van het totale fusievermogen.

Voor succesvolle ontsteking van de kogeltjes dient de dichtheid bij maximale compressie nog met een factor 2 à 3 te worden verhoogd. Dit vereist de constructie van nog krachtiger lasers die pulsen van 1 à 2 MJ kunnen afleveren in enkele nanoseconden en die rond de eeuwwisseling operationeel zouden kunnen zijn. Onafhankelijke metingen van dichtheid, opsluitingstijd en ionen temperatuur gaven een fusieproductwaarde van $1,7 \times 10^{20} \text{ m}^{-3} \cdot \text{s} \cdot \text{keV}$ [19].

Een recente evaluatie van het Lawson criterium voor bellen-fusie gaf een waarde van $3 \times 10^{16} \text{ m}^{-3} \cdot \text{s} \cdot \text{keV}$ [10], hetgeen wil zeggen dat het hoogst onwaarschijnlijk is hiermee fusie condities te bereiken.



HOOFDSTUK 2

De fusiereactor

Nucleaire fusiereactoren bestaan nog niet. Ettelijke 'reactorconcept' studies [5 ; 20-22] werden reeds uitgevoerd zowel voor magnetische- als voor traagheidsopsluiting en muonenfusie, om evaluaties, projecties en vergelijkende studies met andere energiebronnen te kunnen uitvoeren, o.m. omtrent de kostprijs van de 'fusie-kilowattuur'. Uit [27] blijkt een kilowattuur-prijs van 0,029 US\$ voor fusie tegenover respectievelijk 0,034 voor kolen en 0,019 voor splijtingsenergie. Het is voor iedereen duidelijk dat scenario's en extrapolaties over enkele tientallen jaren niet kunnen leiden tot een kostprijs met een relevante precisie, noch tot een objectieve vergelijking van de prijs van energieproductie-systemen. Wel is het klaar dat bij een tokamak-fusiereactor de investeringskost een voorname component zal zijn in de fusie-kilowattuur-prijs [23 ; 24].

Kilowattuur-prijs of meer algemeen, economische rendabiliteit is slechts één parameter in het pakket van 'maatschappelijke aanvaardbaarheid' waaraan toekomstige energiebronnen zullen getoetst worden. Fusie bezit ongetwijfeld troeven:

- de brandstof is virtueel onuitputtelijk en niet geografisch gebonden;
- het afvalprobleem wordt beperkt, gezien de afwezigheid van langlevende radioactieve splijtingsprodukten;
- gasuitstoot, geassocieerd met verbranding van fossiele brandstof, wordt vermeden;
- de fusievoorwaarden zijn zo kritisch dat de minste storing tot stopzetting van de reactie leidt. Men kan dus spreken van een 'inherent veilig systeem'.

De primaire grondstoffen, deuterium en lithium, en het directe reactieproduct van fusie — helium, een inert gas — zijn noch toxisch, noch radioactief. De milieuschade ten gevolge van deuterium en lithium productie is gering. Zure regen en broeikas-effect gassen, geassocieerd met de verbranding van fossiele brandstof, worden vermeden. Het afvalprobleem wordt beperkt gezien de afwezigheid van langlevende radioactieve afvalprodukten. Door het gebruik van laag-activatie materialen in de toekomst kan het afval probleem verder gereduceerd worden.

De brandstofvoorziening is nagenoeg onuitputtelijk en de fusiereactor heeft ook in ander opzicht geen overmatig beslag te leggen op schaarse grondstoffen. De voornaamste brandstof, deuterium, wordt uit water geëxtraheerd en is voor eeuwen voorradig. De eerste generatie reactoren zou ook tritium gebruiken. Tritium komt niet voor in de natuur maar wordt in de reactor gekweekt vanuit lithium. Alhoewel er zowat 1 000-maal minder lithium dan deuterium in zeewater zit, reiken de voorraden toch voor eeuwen energieproductie. De energie vrijgezet bij het smelten van het deuterium aanwezig in één kubieke kilometer zeewater komt overeen met de energie inhoud van de gekende oliereserves. En de oceanen bevatten meer dan een miljard kubieke kilometer water.

Tabel 2.1 Ruwe schattingen van het energiepotentieel van verschillende energiebronnen [3, pagina 7]. Onderstaande cijfers geven aan dat de totale wereld-energiebehoefte (zowat 10 TW in 1990) kunnen gedekt worden met koolwaterstoffen gedurende enkele decennia, met kolen gedurende enkele eeuwen en met nucleaire energie (fissie of splijting) vrijwel voor eeuwig. Van de hernieuwbare energiebronnen heeft alleen zonneënergie het potentieel om het huidige wereldgebruik te dekken. De conclusie uit onderstaande cijfers moet zijn dat alle vormen van energievoorziening moeten bekeken worden in de specifieke maatschappelijk-economische context van het gebruik ervan.

<i>Hernieuwbare energie bronnen</i>		<i>Vermogens (terawatt)</i>	
		<i>rond 2030</i>	<i>later</i>
Zonneënergie		3	100
Biomassa		3	10
Wind		1	3
Golven en getijden		0,1	1
Hydro		1,5	2,9
Geothermie		0,2	0,4
Organisch afval		0,1	0,1

<i>Aarde</i>	<i>Oorsprong</i>	<i>Energie</i>	
		<i>joule</i>	<i>terawatt·jaar</i>
Toegankelijke reserves fossiele brandstoffen	Steenkool en bruinkool ($2,35 \times 10^{12}$ ton)	$53,2 \times 10^{21}$	1 690
	Ruwe olie ($2,1 \times 10^{12}$ vaten)	$12,4 \times 10^{21}$	390
	Aardgas ($3,4 \times 10^{14}$ m ³)	$13,1 \times 10^{21}$	415
	Oliehoudend zand (3×10^{11} vaten)	$1,8 \times 10^{21}$	57
	Oliehoudend schilfersteen ($1,9 \times 10^{11}$ vaten)	$1,1 \times 10^{21}$	35
	Totaal	$81,6 \times 10^{21}$	2 590
Splijtstoffen	Uranium 235	10^{22}	300
	Uranium 238, thorium 232	$< 10^{25}$	$< 3 \times 10^5$
Grondstoffen voor fusie	Lithium in de aardkorst	2×10^{24}	6×10^4
	Lithium in de oceanen (0,17 ppm)	2×10^{28}	6×10^8
	Deuterium in de oceanen	8×10^{30}	2×10^{11}

Tabel 2.2 Bewezen reserves van verschillende energiebronnen [25]. Onderstaande recente gegevens bevestigen de trends en conclusies van tabel 2.1.

	<i>Bewezen reserves</i>	<i>Energie joule</i>	<i>terawatt·jaar</i>
1	aardolie	$5,9 \times 10^{21}$	187
2	aardgas	$5,6 \times 10^{21}$	177
3	steenkool	$2,4 \times 10^{22}$	7 619
4	uranium (directe cyclus ^{235}U)	$1,5 \times 10^{21}$	47
5	splijtingsgrondstoffen (U; Th)	$< 10^{25}$	$< 3 \times 10^5$

Vermogen potentieel van hernieuwbare energiebronnen (ter vergelijking: het wereldenergieverbruik in 1990 bedroeg circa 10 terawatt)

		<i>Terawatt</i>
6	zonneënergie	300
7	wind	3,5
8	biomassa	5
9	hydro	2,3
10	geothermie	0,3
11	andere (golven, getijden)	0,5

Ongevals simulaties tonen aan dat mogelijke verspreiding van radiologische elementen beneden de toegestane lozingsnormen blijven. Het vermijden van een ernstig ontwrichten van het maatschappelijke leven rond een fusiecentrale, d.w.z. het vermijden van een evacuatie van (een deel van) de bevolking blijft een prioriteit in het fusie ontwikkelingsprogramma van de Europese Unie.

Van een elektriciteitscentrale wordt eveneens een betrouwbare uitbating verwacht. Dit stelt grote eisen aan de verschillende hoog technologische systemen die uitgebaat worden aan de grens van hun (huidige) mogelijkheden, o.m. de reusachtige supergeleidende spoelen, de tritiumkweekmodules met de bijhorende kringloop voor tritiumrecuperatie, het onderhoud met afstandsbediende apparatuur en een hoog vacuum in een groot volume.

Het simultaan in toom houden van deze systemen zal een grote uitbatingsdiscipline en competentie vereisen. Een tokamak-reactor zal ook 'groot' zijn, enkele gigawatt vermogen. Beide laatste argumenten zijn niet echt verzoenbaar met de huidige algemene trend naar 'meer flexibiliteit'.

Het grote investeringskapitaal waarvan de terugbetalingstijd te lang en te onzeker zou kunnen zijn kan de fusiereactor economisch hypothekeren.

2.1 Veiligheid

Bij nucleaire installaties maakt men, enigzins artificieel, het onderscheid tussen nucleaire- en klassieke risico's.

2.1.1 Nucleaire risico's

Het gebruik van tritium, de stralingsvelden en de activatie van reactorcomponenten beschouwt men als de potentiële risico bronnen [34].

Gebruik van tritium

Tritium vormt de voornaamste blootstellingsbron in een fusievermogenreactor. Om het blootstellingsniveau te kwantificeren heeft men gedetailleerde reactorontwerpen en realistische verspreidingsscenario's nodig, die uiteraard nog niet voorliggen. Uit simulatie en studies besluit men echter dat mogelijke blootstellingen binnen de huidige limieten voor stralingsbescherming liggen. In vergelijking met de radioelementen die kunnen vrijkomen uit een splijtingsreactor, heeft tritium een zwakke radiotoxiciteit.

Stralingsvelden

De fusiereactie produceert neutronen. Neutronenstraling is dan ook de voornaamste bron van radioactiviteit in een fusiereactor. Ze is inherent verbonden met de fusiereactie en komt dus alleen voor tijdens de werking van de reactor. Door een verzorgd ontwerp en het opleggen van toegangsrestricties kan men mogelijke effecten in de reactorhal of in de buurt van doorgangen of penetraties beperken. Technisch zijn geloofwaardige oplossingen voorhanden om de impact van neutronen te beperken en te voldoen aan de jongste aanbevelingen van de Internationale Commissie voor Stralingsbescherming [35].

Activatie van componenten

Al de componenten rond het plasma, voornamelijk de eerste wand en de kweekmantel, zullen door de fusieneutronen geactiveerd worden. In tegenstelling tot de neutronenstraling blijft de straling ten gevolge van de geactiveerde componenten alom tegenwoordig, zowel tijdens reactorwerking als gedurende preventief en curatief onderhoud. Activatie door fusieneutronen heeft niets specifiek of eigen op zich: fusie of fisie activatie is vergelijkbaar. Alhoewel het eventuele gebruik van laag activatiematerialen het stralingsniveau behoorlijk kan reduceren, zal het toch niet volledig vermeden kunnen worden. Zelfs de technologieën aangewend bij ruimtematerialen, waarmee zeer hoge zuiverheden bereikt worden, geven onvoldoende uitzicht op materialen die binnen een redelijke termijn opnieuw kunnen gebruikt worden.

Proliferatie

De stoffen die normaal aanwezig zijn in een fusievermogenreactor zijn niet onderworpen aan de verdragsbepalingen voor de niet-verspreiding van kernwapens. Vrij recent is men echter vrijwillig overeengekomen om bewegingen van tritium en lithium-6 ook te registreren. Het is tevens mogelijk om kleine hoeveelheden nucleair splijtbaar- of kweekmateriaal op te sporen aan de toegang tot het fusiereactorgebouw. Het feit dat dergelijk materiaal niet thuishoort in een fusiereactoromgeving geeft een duidelijk zwart/wit beslissingscriterium, dit in tegenstelling tot splijtingsreactoren waar men kleine afwijkingen op grote inventarissen moet detecteren.

2.1.2 Klassieke veiligheid

Een fusiereactor uitbaten houdt een aantal potentiële conventionele risico's in, o.m. brand, ontploffing, het werken met cryogene vloeistoffen en materialen zoals beryllium, lithium en lood en fenomenen verbonden met het

werken met zeer grote magnetische veldsterkten (10 à 20 tesla). Het risico van de toxische stoffen blijkt twee à drie orden van grootte kleiner te zijn dan dat van de radioactieve stoffen. Experimenten met magneetvelden tot enige tesla's hebben tot nu toe geen eenduidig schadelijk effect aangetoond, maar over de blootstelling aan sterkere magneetvelden bestaat nog onzekerheid.

2.1.3 Oriëntaties op termijn

De lijst van hoger vermelde punten is zeker niet exhaustief. Elk van de punten maakt tevens het voorwerp uit van talrijke studies en onderzoeken waaruit oriëntaties en voorstellen tot remediëring voortvloeien. Alhoewel deze voorstellen a priori niet kunnen verworpen worden, moet in vele gevallen het bewijs van hun doeltreffendheid toch nog geleverd worden. Positief is ongetwijfeld dat de problemen onderkend zijn en dat de implicaties van de keuzes grotendeels gekend zijn en ingeschat kunnen worden. Op initiatief van de Commissie van de Europese Gemeenschappen wordt de *Safety and Environmental Assessment study on Fusion Power* (SEAFP) studie uitgevoerd. Deze studie loopt in samenwerking met de industrie. Het rapport is voorzien voor begin '95 [36].

2.1.4 Besluit

Bestaande beschouwingen rond de veiligheid van fusiereactoren zijn het resultaat van modelstudies en extrapolaties en missen noodgedwongen validatie en confrontatie met een reële situatie op industriële schaal.

Men kan echter redelijkerwijs stellen dat

- fusiereactoren potentieel inherent veiliger kunnen gemaakt worden dan fissiereactoren van de huidige generatie;
- vanuit de stralingsbescherming er geen argumenten zijn om het onderzoek stop te zetten;
- de convergentie van talrijke conventionele risico's, waarvan sommige zeer goed gekend zijn en andere minder, prioritair moet staan in het toekomstige onderzoek.

2.2 Afval

De produktie en berging van nucleair afval krijgt veel publieke en politieke aandacht [37]. Hoewel in een fusiereactor geen hoogradioactieve afvalstoffen zoals transuranen geproduceerd worden, wordt men bij fusie geconfronteerd met geactiveerde en met getritieerde componenten.

2.2.1 Volumes ontmantelingsafval

Tabel 2.3 geeft een overzicht van berekende afvalhoeveelheden voor verschillende potentiële fusiereactorconcepten. Ter vergelijking werd een PWR met en zonder splijtstofopwerking mee opgenomen.

De hoeveelheid afval die voor berging in aanmerking komt, wordt ook bepaald door de reglementering. Bovenstaande cijfers werden bekomen op basis van de reglementering in het Verenigd Koninkrijk [38]. De cijfers zijn vrij consistent indien men het type reactor in aanmerking neemt. Een *reversed-field pinch* is namelijk compacter dan een tokamak. Kwantitatieve conclusies zijn moeilijk te trekken. Wel kan men stellen dat, gebaseerd op de afvalvolumes, de kostprijs voor de berging van fusiereactorafval en voor fissiereactorafval van dezelfde grootte orde is.

Tabel 2.3 Vergelijking van berekende afvalhoeveelheden voor fusiereactorconcepten en een fissie-drukwaterreactor (PWR) in m³ per geproduceerde gigawatt elektriciteit [m³·GWe⁻¹].

Type reactor		Geproduceerd	Verpakt
Fusiereactoren	STARFIRE tokamak	1 940	10 400
	DEMO R254 tokamak	1 990	10 700
	PCSR-E tokamak	8 050	43 400
	CRFPR <i>reversed-field pinch</i>	910	4 870
	TTAN <i>reversed-field pinch</i>	1 120	6 030
	EEF-R2 tokamak	4 000	18 000
Fissiereactoren	PWR zonder splijtstofopwerking		13 000
	PWR met splijtstofopwerking		25 000

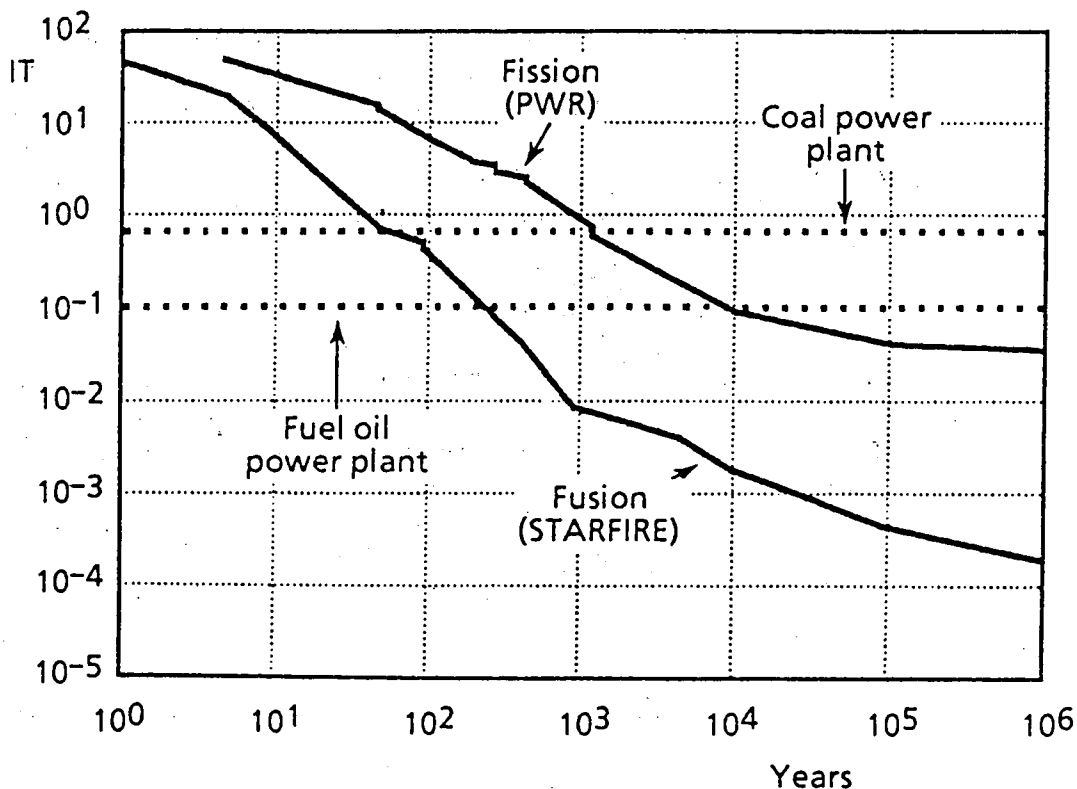
2.2.2 Fusiereactorafval en omgeving

Een hypothetisch milieueffectrapport van een fusiereactor ligt niet in het bestek van dit dossier. Om echter de trend te illustreren geeft figuur 2.1 de *Ingestion Toxic potential* (IT) per kWh in functie van de tijd na het afschakelen van stoomketels, zowel met nucleaire als met fossiele brandstof [39]. De IT is een maat voor de impact van afvalproducten op de omgeving. Het wordt gedefinieerd als het volume water nodig om de concentratie van een bepaalde nuclide in oplossing zodanig te verlagen dat het als veilig drinkwater voor menselijke consumptie beschouwd wordt.

De IT voor afval van een fusiereactor blijkt 10 à 100 maal lager te zijn dan voor een fissiereactor. Omwille van het radioactieve verval komt de IT van de nucleaire afval op lange termijn zelfs onder de IT als gevolg van de constante chemische toxiciteit van de assen van de fossiele brandstoffen.

2.2.3 Hoe het afvalprobleem voor fusiereactoren verminderen?

Theoretisch bestaan er verschillende wegen om de aard en/of de hoeveelheid afval van een fusiereactor te verminderen. Men kan inspelen op het type reactor, de brandstof, de materialen en de tritiumrecuperatie.



Figuur 2.1 De *Ingestion Toxic potential* (IT) is een maat voor de impact van afvalproducties op de omgeving. Het wordt gedefinieerd als het volume water nodig om de concentratie van een bepaald nuclide in oplossing zodanig te verlagen dat het als veilig drinkwater voor menselijke consumptie beschouwd wordt. De IT voor afval van een fusioreactor blijkt 10 à 100 maal lager te zijn dan voor een fissioreactor.

fission (PWR)	splijtings-drukwaterreactor
fusion (STARFIRE)	fusioreactorconceptstudie STARFIRE [20]
fuel oil power plant	stookolie-elektriciteitscentrale
coal power plant	steenkool-elektriciteitscentrale
years	jaren

- 1 Het is duidelijk dat compacte reactoren, d.w.z. reactoren met een grotere vermogensdichtheid zoals de *reversed-field pinch*, minder volume afval produceren. Indien we echter de huidige kennis en stand van de techniek extrapoleren, zal de eerste fusioreactor van het tokamak type zijn.
- 2 De deuterium-tritium reacties leveren neutronen met hoge energie, waardoor de materialen rond het plasma erg radioactief worden. Het tritium heeft daarbij zijn eigen problematiek. Bij de deuterium-deuterium of deuterium-helium (³He) reacties worden beide problemen sterk terug gedrongen. Deze reacties hebben echter het nadeel dat de condities van dichtheid × opsluitingstijd × temperatuur veel ongunstiger zijn.
- 3 Een ontwerp dat de gebruikte hoeveelheid materiaal terugdringt en neutronenlekken minimaliseert moet resulteren in minder afval. Het spreekt echter voor zich dat dergelijke optimalisatie altijd moet nagestreefd worden, ook zonder de prikkel van afvalbeheersing.

- [4] Het gebruik van (nog deels te ontwikkelen) lage-activatiematerialen [40] resulteert in minder sterk radioactief afval. Sporenelementen leveren echter een belangrijke bijdrage tot de activatie en het is dan ook onwaarschijnlijk dat de activatie volledig kan teruggedrongen worden. Toch moet de weg van de lage-activatiematerialen verder geëxploreerd worden omdat ook kosten van onderhoud e.d. zo kunnen gedrukt worden.

2.2.4 Besluit

Radioactief afval is inherent verbonden met een fusiereactor. Het enige reactortype dat op basis van de huidige kennis als eerste in aanmerking komt is de tokamak met deuterium/tritium als brandstof. Volgens de huidige prognoses is de afvalproblematiek minder ernstig dan voor fissiereactoren. Optimalisatie van ontwerp en gebruik van lage-activatiematerialen zijn mogelijke wegen om de afvalproblematiek te verminderen.

2.3 Stand van de technologie voor de tokamak-reactor

In de huidige generatie fusiemachines bestudeert men het gedrag van het plasma. Ze hebben een experimenteel of labo karakter en er worden quasi geen neutronen geproduceerd. Hun technologie is dan ook niet altijd direct extrapoleerbaar naar een reactor.

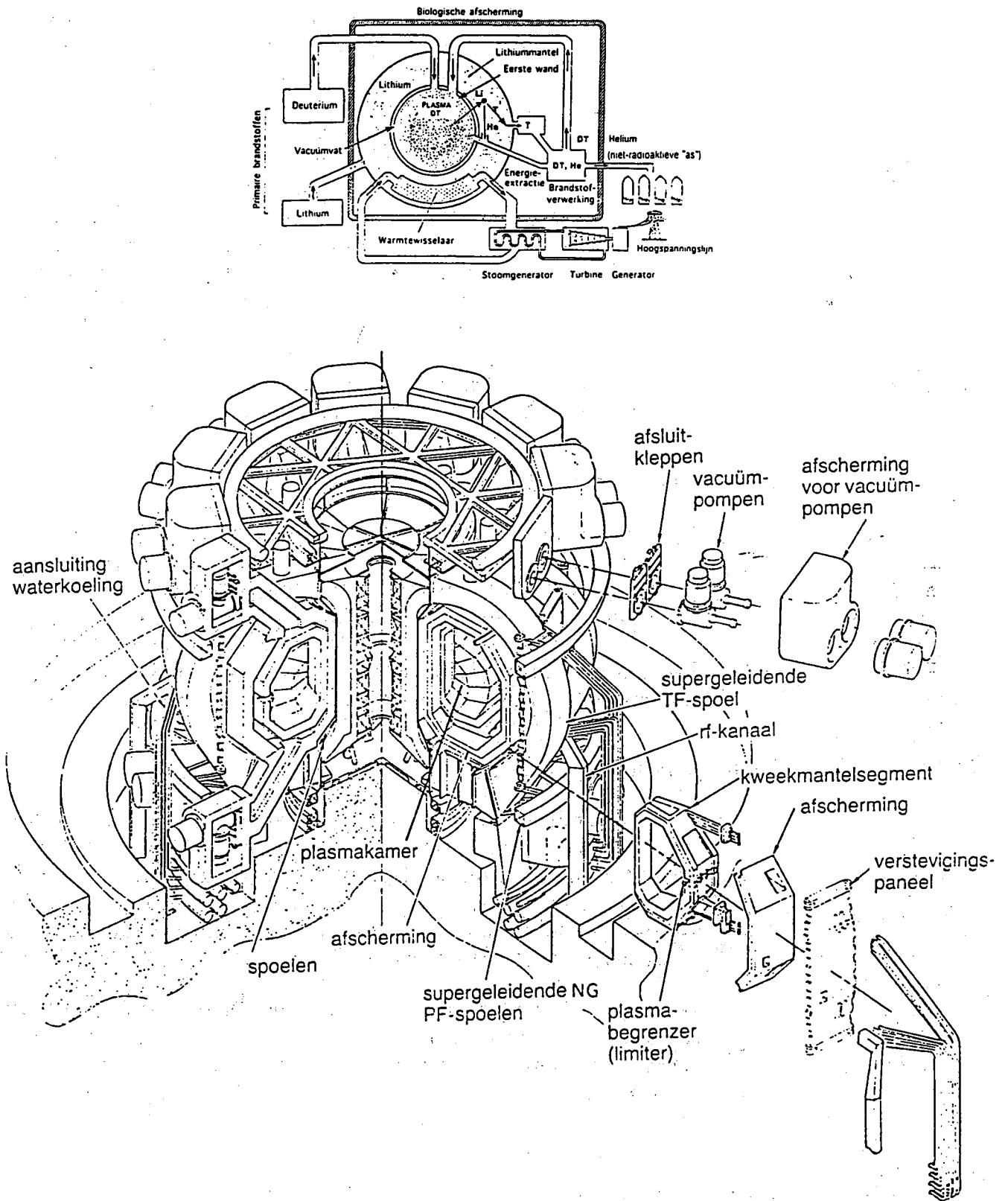
Een fusiereactor zal een zeer complex geheel worden met toepassing van hoogwaardige materialen en van geavanceerde, nog deels te ontwikkelen systeemcomponenten, o.m. grote supergeleidende magneten, kweekmantelsegmenten, tritiumsystemen, robots, enz. (fig. 2.2). Fusie verricht hier baanbrekend ontwikkelingswerk en de tijd kan in haar voordeel spelen: wat nu nog *high-tech* is kan binnen enkele generaties reeds gemeengoed zijn.

2.3.1 Supergeleidende spoelen

Als resultaat van een doelgericht Europees onderzoeksprogramma en een uitstekende samenwerking met de industrie werd de laatste jaren grote vooruitgang geboekt op het gebied van de technologie voor de bouw van de reuze supergeleidende spoelen, die voor een tokamak-fusiereactor nodig zijn [41]. Experts menen dat men de technologie voldoende beheerst om zonder prototype bouw over te gaan tot de spoelen voor ITER. De ITER spoelen zijn ook representatief voor een reactor.

2.3.2 Kweekmantel, eerste wand en tritium kringloop

In een fusiereactor worden de neutronen o.m. gebruikt om tritium te kweken uit metallisch (vloeibaar) of keramisch (vast) lithium. Voor de kweekmantelmodules met vloeibaar lithium of lithium/lood liggen de voornaamste uitdagingen in de controle en het winnen van het tritium, de magnetohydrodynamische effecten, de warmteoverdracht, de corrosie en het totale



Figuur 2.2 Een fusiereactor zal een zeer complex geheel worden, met toepassing van hoogwaardige materialen en van geavanceerde, nog deels te ontwikkelen systeemcomponenten, o.m. grote supergeleidende magneten, kweekmantelsegmenten, tritiumsystemen, hoog vacuüm, enz.

gedrag van dergelijke modules in een fusiereactoromgeving [42;43]. Voor de modules met keramisch lithium blijven vragen rond het materiaalgedrag onder neutronenbestraling, de corrosie en de werking onder niet-normale omstandigheden. De meeste van deze vragen zullen een antwoord krijgen door experimenten die specifiek daarvoor worden opgezet. De uiteindelijke test van een module kan uiteraard alleen in een fusiereactor gebeuren. De integratie met de eerste wand, de wand die 'het plasma ziet', is afhankelijk van het detail ontwerp van de reactor. De huidige aanpak van het probleem voorziet twee stappen. De eerste stap bestaat uit de ontwikkeling van een eerste wand waarbij prioriteit gegeven wordt aan het bereiken van de objectieven van de plasmafysici, nl. het beperken van de onzuiverheden in het plasma. Daarna worden de problemen eigen aan de neutronen omgeving in een fusiereactor aangepakt. JET (Europese Unie) en TFTR (Verenigde Staten) werken reeds met deuterium/tritium plasma's en beschikken over een tritiuminfrastructuur. Daarenboven werden de laatste jaren verschillende tritiumlabo's, o.m. bij KfK (Karlsruhe, Duitsland) en JRC (Ispra, Italië) in gebruik genomen, met als hoofdpoddracht fusie-tritium problemen te bestuderen.

2.3.3 Afstandsbediening

Door de activatie van de materialen zal het onderhoud van het inwendige van een fusiereactor met afstandsbediening moeten gebeuren [44]. De aanwezigheid van hoogvacuum componenten en supergeleidende spoelen maken de interventies uiterst complex. Toch zijn de ontwikkelingen op dit gebied veelbelovend. 'Afstandsbedieningsvereisten' worden reeds geïntegreerd tijdens de ontwerpfase van een reactor. Er is een sterke inbreng van de industrie en er bestaat een goed gestructureerd onderzoeksprogramma.

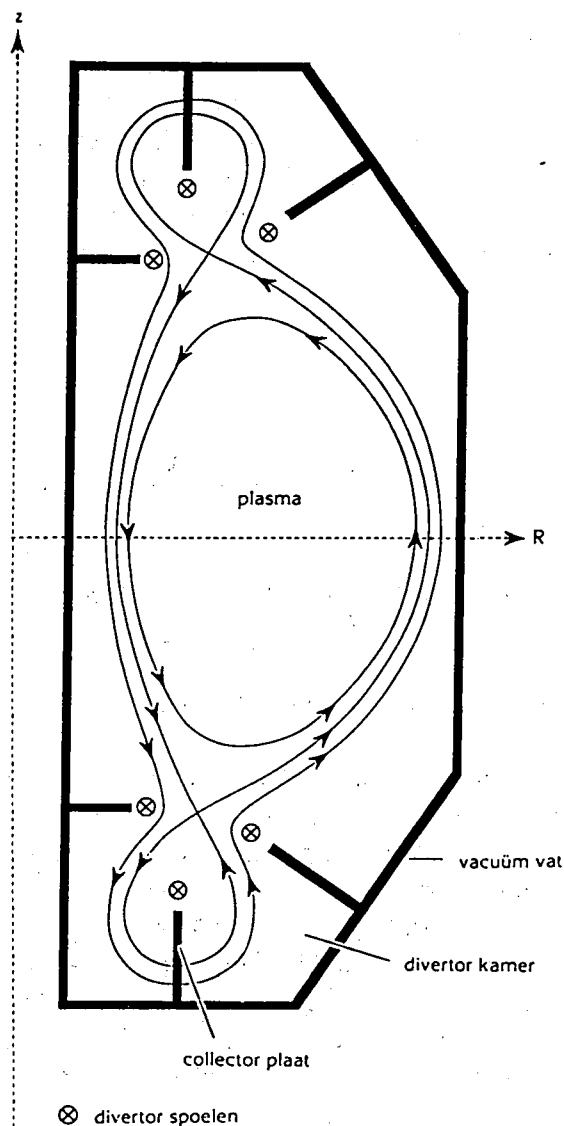
2.3.4 Divertor

Om het plasma niet te sterk te dilueren moeten de onzuiverheden, vnl. het reactieproduct helium, uit het plasma afgevoerd worden. Een divertorconfiguratie (fig. 2.3) laat toe om deeltjes af te voeren naar speciaal daartoe geëigende 'divertorplaten'. Voor een reactor met een thermisch vermogen van 3 à 6 GW kan de warmte belasting voor een conventionele divertorplaat lokaal oplopen tot zowat $100 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2}$.

Tevens is de plaat aan sterke erosie onderhevig, veroorzaakt door de hoge snelheid (energie) van de deeltjes die op de plaat neervallen. *Technologisch bestaat er (nog) geen oplossing voor dit probleem.* Mogelijke oplossingen kunnen komen van uit de plasmafysica. Het huidige onderzoeksprogramma van JET is dan ook grotendeels op dit probleem toegespitst [45].

2.3.5 Alternatieven

De technologische ontwikkeling van de *stellarator* en de *reversed-field pinch* is niet op hetzelfde peil als de tokamak. Een stellarator heeft echter wel de mogelijkheid van een *steady-state* energie productie. De productie van stellarator-reactor-spoelen daarentegen is niet vanzelfsprekend. Voor een



Figuur 2.3 Schets van de geometrie bij een 'dubbele divertor'. De stroom in de divertorspoelen zorgt voor afbuigen van de buitenste veldlijnen en de vorming van een X-punt in de veldlijnen op de zogenaamde *separatrix*. Het plasma stroomt, langs de veldlijnen op de separatrix en die juist daarbuiten, de divertorkamer binnen, waar het op de collectorplaten valt en geneutraliseerd wordt. Het enige contact van het plasma met de wand vindt zo dus plaats op ruime afstand van het tokamak-plasma zelf. Bij een goed gekozen vorm van de divertorkamer stroomt maar weinig geneutraliseerd gas terug naar de hoofdontlading en kan het efficiënt uit de divertorkamer worden weggepompt.

reversed-field pinch volstaan in principe koper-spoelen, wat het probleem van die kant vereenvoudigt. De pulslengte daarentegen is korter dan bij een tokamak.

Ook de technologie voor de *muon gekataliseerde fusie* heeft niet dezelfde rijpheid als de tokamak. Of men heeft zeer geavanceerde versnellers nodig, of men gaat langs hybride concepten met alle bijkomende moeilijkheden vandien.

Voor zover bekend heeft de *traagheidsopsluiting* twee grote onderzoeksassen: enerzijds de aanmaak van de brandstofkogeltjes en het begrijpen van de implosiefenomenen, en anderzijds het ontwikkelen van de apparatuur die de nodige 'multi-megajoule' energie pulsen levert. Technologieën zoals *neodymium-glass lasers*, *gas lasers*, *light-ion beams* en *heavy-ion accelerators* worden ontwikkeld om te komen tot hoge vermogens, voldoende focussing en herhalingsnelheid. De reactor ontwikkeling is nog in het stadium van basisontwerp.

2.4 Stand van de plasmafysica van de tokamak-reactor

(Voor de stand van de plasmafysica van de tokamak-reactor, zie bv. [46].)

2.4.1 Gedrag van het helium in het plasma

Experimenteel plasmafysisch onderzoek in de huidige en vroegere generatie machines gebeurt op een waterstof of deuterium plasma al of niet met een weinig helium. Om de machine niet te besmetten wordt tritium zoveel mogelijk vermeden. De ervaring met de deuterium-tritium reactie en dus ook met het gedrag van het reactieprodukt helium in het plasma is erg miniem. In een fusiereactor moeten deze (alpha-deeltjes) het 'brandend' plasma op voldoende hoge temperatuur houden en de energieverliezen compenseren. Tegelijkertijd mogen de alpha-deeltjes het plasma niet te sterk dilueren en moeten dus verwijderd worden, anders gaat de nodige deuterium/tritium dichtheid verloren. De controle van de alpha-deeltjes is dus één van de voornaamste onderzoeksthema's binnen de plasmafysica. Het ligt ook aan de grondslag van de deuterium/tritium plasma's in de huidige grote machines zoals TFTR en JET.

2.4.2 Disrupties

Met een gegeven plasmastroom komt een maximale waarde van de dichtheid van de plasmadeeltjes overeen. Wordt deze waarde overschreden, dan treedt een disruptie op, d.w.z. het plasma verliest zijn vorm en de plasmastroom valt op nul in een zeer korte periode. Daardoor kunnen zeer hoge mechanische en thermische spanningen in de machine optreden.

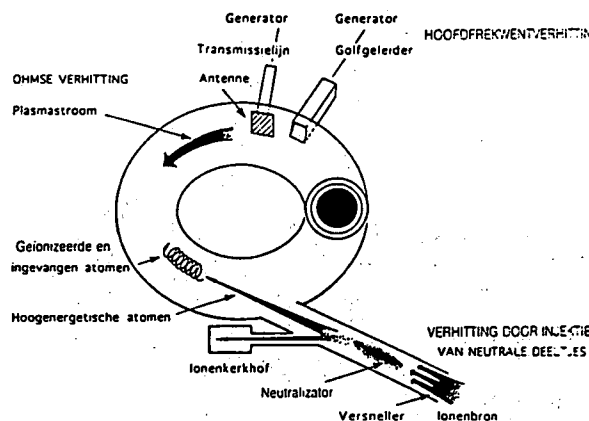
Men gaat ervan uit dat disrupties veroorzaakt worden door instabiliteiten die zich op bepaalde magnetische oppervlakken ontwikkelen. Tot op zekere hoogte zijn disrupties vergelijkbaar met aardbevingen. Ze zijn moeilijk voorspelbaar en kunnen nefaste gevolgen hebben. Het (leren) beheersen en vermijden van disrupties is dan ook essentieel voor een tokamak-fusiereactor. Vermits een stellerator geen plasmastroom heeft, treden er ook geen disrupties op.

2.4.3 Stationaire bedrijfsuitbating

In een tokamak zorgt de plasmastroom voor een klein maar essentieel deel van het magnetische veld. Deze plasmastroom wordt geïnduceerd vanuit de centrale spoel, zoals in een gewone transformator, waarbij de centrale spoel de rol van primaire winding vervult en de plasma ring de secundaire winding. Daardoor is een tokamak in wezen een niet-continue machine. Door de hoge elektrische geleidbaarheid van het plasma kan men pulsen realiseren van de grootte orde van een uur, dit in tegenstelling met conventionele verbrandings- en kernenergie centrales die quasi continu of *steady-state* energie produceren. De gepulste werking brengt problemen mee van materiaalvermoeiing en mogelijke schommelingen op het elektrische distributienet. Alhoewel er mogelijkheden zijn om dit probleem te overkomen, zeker met een Europees elektriciteitsdistributienet, drijven ze naast de investeringsprijs van de machine tevens de kostprijs en de complexiteit van de uitbating op [47].

2.4.4 Verhitting van het plasma

De plasmastroom, die in de grootste tokamaks tot verschillende mega-ampères oploopt, dient tegelijkertijd om het plasma te verhitten. De elektrische weerstand van het plasma vermindert evenwel met toenemende temperatuur (bij temperaturen van een paar keV is een waterstofplasma een betere geleider dan koper), zodat de efficiëntie van ohmse verhitting afneemt bij hogere temperaturen. Daarom moet men een beroep doen op bijkomende verhittingssystemen om de voor fusie noodzakelijke temperaturen te bereiken, namelijk verhitting door neutrale bundelinjectie en instralen van elektromagnetische golven (fig. 2.4).



Figuur 2.4 Om de voor fusie noodzakelijke temperaturen te bereiken, kan men beroep doen op neutrale bundelinjecties en op het instralen van elektromagnetische golven.

Neutrale deeltjes kunnen ongehinderd het magneetveld doordringen dat het plasma mengsel opsluit. Een verhittingstechniek bestaat er bijgevolg in bundels van neutraal deuterium of tritium in het plasma te schieten. In het plasma worden de neutrale deeltjes bijna onmiddellijk opnieuw geïoniseerd

en staan ze hun energie af door botsingen met elektronen en ionen van het achtergrondplasma dat daardoor opwarmt.

Een tweede methode bestaat erin elektromagnetische golven in het plasma te stralen met een geschikte frequentie bepaald door resonanties van de plasmadeeltjes.

De invloed van de verhittingstechnieken op o.m. de energieopsluitingstijd in het plasma vraagt nog verdere studies. Bepaalde van deze verhittingstechnieken kunnen ook gebruikt worden om de plasmastroom te onderhouden bij het herladen van de transformator [48]. Dit opent ook een weg voor het probleem van het stationair uitbaten van een tokamak-fusiereactor.

HOOFDSTUK 3

Het fusieonderzoek

3.1 Organisatie

3.1.1 Europese Unie

Bij beslissing van de Europese Ministerraad is het fusieprogramma van de Europese Unie een samenwerkingsproject op lange termijn dat al het onderzoek omvat op gebied van thermonucleaire fusie dat in de Lidstaten (Zweden en Zwitserland inbegrepen) wordt uitgevoerd [49]. De Europese Unie concentreert het fusieonderzoek op de magnetische toroïdale opsluiting met het hoofdaccent op de *tokamak*-lijn. Andere benaderingen dan de magnetische toroïdale opsluiting worden op een laag pitje 'gevolgd'. Met de kennis en ervaring van de Europese geassocieerde laboratoria was men in staat de grootste tokamak ter wereld te bouwen [16; 50], de *Joint European Torus* (JET). JET is houder van verschillende wetenschappelijke bestprestaties naar een reactor toe. In november 1991 werd voor het eerst gecontroleerd fusievermogen in het megawatt gebied geproduceerd gedurende twee seconden [17].

Het lange termijn objectief van de Europese Unie op het gebied van thermonucleaire fusie door middel van magnetische opsluiting is het gezamenlijk realiseren van veilige, omgevingschone prototype reactoren [51]. In deze strategie staat de realisatie van de machines na JET centraal:

- een *experimentele* reactor (*Next Step*), met als objectief, de wetenschappelijke en technologische haalbaarheid aantonen van fusie energie voor vredelievende doeleinden. In 1992 werd een overeenkomst afgesloten tussen Euratom, Japan, het GOS en de VS voor het ontwerp van ITER. Met ITER moet men aantonen dat men de technologie voor het uitbaten van een reactor als geïntegreerd systeem in handen heeft;
- een *demonstratie* reactor (DEMO) die op betrouwbare wijze, wezenlijke hoeveelheden elektriciteit produceert.

In uitvoering van deze strategie lopen de activiteiten langs drie assen.

ITER/NET Het objectief is te komen tot een ITER ontwerp zodanig dat men de bouw van de experimentele reactor kan aanvatten in 1998. Om voldoende competitief te zijn bij de bouw van ITER en om de mogelijkheid open te houden om alleen een reactor te bouwen — NET, *Next European Torus* genoemd [52] — mocht de internationale samenwerking te moeilijk blijken, ontwikkelt de Unie de

competenties in de noodzakelijke sleutel technologieën. De ITER/NET activiteit wordt gecoördineerd door het NET Team te Garching (Duitsland) en uitgevoerd door de geassocieerde labos, het Europees Gemeenschappelijk Onderzoekscentrum, JET en de industrie.

Concept verbeteringen Plasmafysische problemen en technologische ontwikkelingen, relevant voor de definitie en het ontwerp van een demonstratiereactor, worden onderzocht in een tiental plasma onderzoeksmachines, o.m. TEXTOR in Jülich (Duitsland), ASDEX in Garching (Duitsland) en TORE SUPRA in Cadarache (Frankrijk).

Lange termijn technologie Deze onderzoeksinspanning heeft als doel aanvaardbare oplossingen te vinden voor problemen verbonden met de uitbating van fusie reactoren.

3.1.2 ITER

De noodzakelijke schaalvergroting bij de tokamak ontwikkeling en de potentiële voordelen van het delen van kosten, risico en kennis hebben het fusie onderzoek overal ter wereld gestimuleerd tot samenwerking, en heeft geleid tot de ITER-ontwerp overeenkomst die loopt tot 1998 [53]. Het ITER team of *Joint Central Team* (JCT) is samengesteld uit wetenschappers van de vier partners: Euratom, Japan, het GOS en de VS. De aanspreekpartner van het JCT bij elk van de partners is het *Home Central Team* (HCT). Voor Euratom fungeert het NET Team als HCT. Op die manier wordt het Europees fusieonderzoeksprogramma grotendeels in lijn gebracht met het internationaal of ITER programma. Canada participeert in ITER langs Euratom; de republiek Kazakstan, langs het GOS. Naast ITER loopt in de VS en Japan en vermoedelijk ook in het GOS een behoorlijk programma rond inertiaële fusie.

3.1.3 België

Het onderzoekswerk in België op gebied van thermonucleaire fusie is geïntegreerd in het Europese fusieprogramma dat deel uitmaakt van de vijfjaarlijkse kaderprogramma's voor onderzoek en technologische ontwikkeling. Deze integratie is geformaliseerd in een associatie contract tussen Euratom en de Belgische Staat, waarbij deze laatste optreedt voor eigen rekening, nl. het Laboratorium voor Plasmafysica van de Koninklijke Militaire School (KMS) en in naam van de Université Libre de Bruxelles (ULB, Services de physique statistique, plasmas et optique non linéaire) en het Studiecentrum voor Kernenergie (SCK•CEN). De Belgische leden van het beheercomité van de associatie zijn de professoren P. Vandenplas (KMS), R. Balescu (ULB) en R. Van Geen (Nationale Raad voor Wetenschapsbeleid). Andere instellingen en diensten nemen aan het programma deel langs de geassocieerde labos, o.m. professor Brouillard van de Université Catholique de Louvain (UCL) langs de KMS en professor Bogaerts van de Katholieke Universiteit Leuven (KUL) en het Luxemburgse Gradel langs het SCK•CEN.

Het Laboratorium voor Plasmafysica (LPP) van de KMS legt zich toe op de verhitting van tokamak-plasma's en op het beschrijven van het resulterende plasmagedrag. Met behulp van antennes of golfgeleiders aan de rand van

het plasma straalt men elektromagnetische golven in het plasma met een frequentie bepaald door resonanties van de plasmadeeltjes. Het LPP bestudeert voornamelijk de ionen cyclotron verhitting. Zij hebben als eerste een multimegawatt installatie met succes beproeft op de tokamak TEXTOR te Jülich (Duitsland). Door botsingen met de plasmadeeltjes wordt deze energie verdeeld en warmt het plasma op. Vrij recent werd het LPP gevraagd om tevens de interpretatie en evaluatie te doen van de verhitting door neutrale bundelinjectie bij het TEXTOR plasma.

In de groep van de Services de physique statistique, plasmas et optique non linéaire van de ULB werkt men aan de theorie van transportverschijnselen in plasma's, gebaseerd op fundamentele theoretische inzichten vanuit de statistische fysica en de niet-evenwichts thermodynamica. Ze werken mee aan een verklaring voor het anormale transportregime waaraan magnetische opsluitingsmachines onderhevig zijn. Deze groep is ook stichtend lid (19 maart 1993) van de *Euroregional Club for High-Temperature Plasma Physics of Belgian, Dutch and North Rhine-Westphalian Universities*.

Het SCK•CEN concentreert zich op de technologische aspecten van kernfusie. Als gevolg van interne programmaherzieningen in de jaren 89-90 werden activiteiten beduidend verminderd of zelfs volledig gestopt, o.m. het aanmaken van keramisch kweekmateriaal, de magnetohydrodynamica van vloeibare metalen, de ontwikkeling van sensoren voor het meten van onzuiverheden in vloeibare metalen, het onderdrukken van radiolyse en de elektrolyse van getritieerd water.

Als huidige SCK•CEN strategie voor het thermonucleaire fusie onderzoek kan men stellen: 'Bijdragen tot het Europese fusie programma in synergie met lopende onderzoeksprogramma's voornamelijk op het gebied van materialenonderzoek, waaronder ook het onderzoek naar de stralingshardheid van componenten'. Het lopende programma bestaat dan ook voornamelijk uit het bepalen van de invloed van neutronenbestraling op kandidaat-reactormaterialen, o.m. roestvast staal AISI 316L, molybdeen legeringen en beryllium [54]. Tevens onderzoekt men het gedrag van elektronische, elektrische en optische componenten onder invloed van voornamelijk gammastraling. Het werk rond beryllium en stralingsharde componenten werd door de Europese fusiewereld geëvalueerd als 'sterkte' van het SCK•CEN. In de toekomst kan uitbreiding of reoriëntatie nagestreefd worden naar testen onder neutronen van geïntegreerde machinecomponenten, naar neutronendiagnostiek en mogelijk naar scenario's rond beheer, manipulatie en stockage van radioactief afval.

3.2 Financiering

3.2.1 Europese Unie

In het derde kaderprogramma (1990-1994) van de Europese Unie werd 568 MECU toegewezen voor onderzoek op 'beheerste thermonucleaire fusie'. Bij de herziening in 1993 werd daar 110 MECU aan toegevoegd. In het

vierde kaderprogramma (1994-1998) werd 794 MECU toegewezen, met het vooruitzicht van bijkomende 10% in 1996, met als opdeling:

- *Next Step* (ITER/NET) 40-50%;
- JET 22-32%;
- concept verbeteringen 22-32%;
- lange termijn technologie 5-9%.

Jaarlijks wordt in Europa zowat 500 MECU aan fusieonderzoek uitgegeven. De nationale inspanningen zijn namelijk van dezelfde grootte orde als de bijdrage van de CEG. De normale steun van de CEG bedraagt 25%. Voor investeringen en uitbating van zware infrastructuur wordt 20% bijkomende steun verleend. Taken toegewezen aan de industrie genieten 100% financiering.

Uit een evaluatie van 1994 blijkt dat ongeveer 2 000 *professionals*, waarvan 250 doctorandi, en zowat 2 000 man ondersteuningspersoneel werken in het Europese fusieprogramma. Het Belgische aandeel is 2,9%.

3.2.2 ITER

In de ITER overeenkomst betaalt elk van de partners zijn kosten. Het volume aan technologisch onderzoeks- en ontwikkelingswerk voor de ITER ontwerp-fase werd door de partners geschat op 750 000 ITER rekeneenheden waarbij een ITER rekeneenheid is gelijk aan 1 000 US\$ van januari 1989. Voor elke O&O-taak kent het ITER-JCT 'crédits' toe, waarbij men ervan uitgaat dat de uiteindelijke verdeling tussen de partners vrijwel gelijk is. Het ontwerp werd begroot op 840 pmy (*professional man-years*) of een JCT van zowat 150 wetenschappers, aangevuld met 125 pmy per *Home Team* [53].

Vermeldenswaard is dat sinds eind 1993 het Japanse Ministerie van Handel en Industrie voor vier jaar een budget van dertig miljoen dollar ter beschikking stelt voor onderzoek naar de Pons en Fleischmann koude fusie. Officieel heet het programma 'energie uit waterstof' [56].

3.2.3 België

Tabel 3.1 geeft de uitgave voor België voor de laatste vijf jaar. De uitgave schommelt rond 300 MBEF·jaar⁻¹ (Europees zowat 500 MECU·jaar⁻¹), met een 55/45% verdeling tussen plasmafysisch en technologisch onderzoek. Het SCK·CEN ontvangt gemiddeld 33% aan steun van de CEG. De rest wordt uit dotatiemiddelen gefinancierd.

Tabel 3.1 Uitgave voor België voor de laatste vijf jaar [MBEF].

Jaar	Technologie		Plasmafysica		Totaal België
	SCK·CEN + KUL	SCK·CEN	KMS/ERM	ULB	
1990	139	121	118	23	280
1991	114	100	129	31	274
1992	133	125	122	31	286
1993	151	144	151	32	334
1994 (voorlopig)	150	143	136	32	318



HOOFDSTUK 4

Rol van de industrie

Tot voor enkele jaren was fusieonderzoek voornamelijk gericht op plasmafysica en dus hoofdzakelijk een zaak van universiteiten en gespecialiseerde onderzoeksinstellingen, sporadisch zoals bij General Atomics in San Diego (California), ook van de industrie. De industriële betrokkenheid bij de bouw van onderzoeksmachines gaat het verst in Japan. Daar draagt de industrie de technische verantwoordelijkheid voor het ontwerp en de bouw van de onderzoeksmachines, wel in geïntegreerde samenwerking en overleg met de opdrachtgevende onderzoeksinstelling. In Europa werd de industrie vrijwel alleen betrokken als fabrikant bij de bouw van onderdelen van onderzoeksmachines. Voor JET liepen bepaalde technologische ontwikkelingen in nauwe samenwerking met de industrie; JET bleef echter leidinggevend.

4.1 Europa

De industriële participatie aan ITER is belangrijk zowel om hun ervaring reeds bij het ontwerp te integreren alsook om optimaal gebruik te maken van hun bekwaamheden bij de bouw van grote nucleaire infrastructuur als in het afdekken van één of meerdere disciplines.

Met betrekking tot de industrie stelt de *Fusion Programme Evaluation Board* in 1990 dat 'de industrie een grotere rol moet toegewezen krijgen' [57]:

- de mogelijkheden moeten geschapen worden voor de oprichting en de ondersteuning van paneuropese consortia;
- in sleuteltechnologieën moet een prefinanciering de ontwikkeling van kritische componenten mogelijk maken;
- de fusiegemeenschap moet een voldoende continuïteit verzekeren in de betrokkenheid van de industrie.

In Europa worden de ontwerptaken toegekend aan *European Fusion Engineering and Technology* (EFET), een *European Economic Interest Grouping* bestaande uit Belgatom (België), CITIF (Italië), Framatome (Frankrijk), Iberstef (Spanje), NNC (Verenigd Koninkrijk) en Siemens (Duitsland). EFET heeft

als doel deel te nemen aan het ontwerp van ITER en zijn competenties ter beschikking stellen voor het ontwerp en de bouw van andere fusie machines [58]. Daarenboven werden, voor 15 technologische gebieden die specifiek zijn aan fusie en noodzakelijk voor de *Next Step*, lijsten opgesteld van Europese firma's en consortia die gecontacteerd worden bij de aankoop van specifieke apparatuur en prototypes met inbegrip van de voorbereidende ontwerptaken.

Tevens werd er een *Committee on Fusion Industry* (CFI) opgericht dat o.m. jaarlijks een seminarie organiseert waarop de geselecteerde firma's worden uitgenodigd. Voor de ITER-ontwerpfase beschikt Europa over een krediet van zowat 70 pmy voor de uitvoering van ontwerptaken door de industrie. Het Europese fusieprogramma heeft dus, voornamelijk in het licht van ITER, gehoor gegeven aan de aanbevelingen van de evaluatie groep. Een werkvolume van 70 pmy gespreid over zes jaren lijkt echter onvoldoende om een continuïteit te verzekeren in de betrokkenheid van de industrie.

4.2 Spin-offs

In september 1988 werd door de CEG een studie uitgevoerd waarbij 56 Europese firma's werden geïnterviewd naar de spin-offs van fusie [59]. Meerdere soorten spin-offs werden vermeld. Een eerste groep betreft produkten die oorspronkelijk voor het fusie programma ontwikkeld werden, o.m. versterkers voor radiogolven, hoogspanningsuitrusting, vacuüm apparatuur en afstand bediende apparatuur. Met een tweede groep produkten wisten de fabrikanten, door de ontwikkeling voor fusie, ofwel hun gamma uit te breiden, ofwel de beschikbare kennis rond hun produkt te vergroten. Dit was natuurlijk het geval voor de hoger geciteerde gebieden, maar ook rond precisie afwerking, magneten bouw, cryogenie, optische vezels en nieuwe materialen. Voor bepaalde bedrijven was een fusiebestelling ook de aanleiding om een kwaliteitscontrole programma te implementeren. Verder verklaarden een aantal firma's dat zij door de openheid in het fusieprogramma toegang kregen tot externe markten en dat banden met onderzoeksinstituten opportuniteiten creëerden voor internationale samenwerking en opleiding van personeel.

4.3 België

De inbreng van de Belgische industrie in fusie is beperkt en dit niettegenstaande in het verleden verschillende sensibiliseringsacties werden opgezet, zowel naar individuele bedrijven als naar beroepsfederaties toe.

Tabel 4.1 geeft de verdeling van de JET-contracten tot 1993 [60]. Het Belgische aandeel bedraagt 1,2%, terwijl het Nederlandse en het Zwitserse respectievelijk 1,73% en 4,62% bedragen. Tabel 4.2 geeft het aandeel in *high-tech* contracten; de cijfers zijn hier respectievelijk 0,99%, 3,08% en 7,20%.

Tabel 4.1 Verdeling per land van de contracten, tot en met 1993, door JET geplaatst. Het Belgische aandeel bedraagt 1,2%, terwijl het Nederlandse en het Zwitserse respectievelijk 1,73% en 4,62% bedragen.

<i>Land</i>	<i>Bedrag [KECU]</i>	<i>% van totaal</i>
Verenigd Koninkrijk	525 823	54,31
Duitsland	162 377	16,78
Frankrijk	88 222	9,12
Italië	61 121	6,32
Zwitserland	44 702	4,62
Nederland	16 735	1,73
Denemarken	13 111	1,35
België	11 618	1,20
Zweden	6 825	0,71
Ierland	1 026	0,11
Andere	36 248	3,75
Totaal	967 808	100,00

Tabel 4.2 Verdeling per land van de *high-tech* contracten, tot en met 1993, door JET geplaatst. Het Belgische aandeel bedraagt hier 0,99%, tegenover 3,08% en 7,20% voor respectievelijk Nederland en Zwitserland.

<i>Land</i>	<i>Bedrag [KECU]</i>	<i>% van totaal</i>
Duitsland	142 405	28,07
Verenigd Koninkrijk	136 041	26,82
Frankrijk	77 572	15,29
Italië	53 554	10,56
Zwitserland	36 536	7,20
Nederland	15 614	3,08
Denemarken	7 457	1,47
België	5 043	0,99
Zweden	4 555	0,90
Ierland	454	0,09
Andere	28 072	5,53
Totaal	507 303	100,00

Door de deelname aan EFET groeit de betrokkenheid van Belgatom, en *in casu* van de aandeelhouder Tractebel, voor het fusieprogramma. Het Belgische aandeel in EFET van zowat 5% laat natuurlijk geen enorme inspanningen toe. Op de lijsten voor de 15 technologische gebieden bevindt zich alleen Dour Metal als Belgisch bedrijf. Dour Metal werd gekwalificeerd voor het gebied 'geleiders voor supergeleidende spoelen'.

HOOFDSTUK 5

Sterkte en zwakte

5.1 Fusiereactor

5.1.1 Sterkte

In het debat omtrent het veilig stellen van onze energietoekomst reikt kernfusie een aantal belangrijke voordelen aan.

- De brandstof is virtueel onuitputtelijk en niet geografisch gebonden.
- De fusievoorwaarden zijn zo kritisch dat de minste storing tot stopzetting van de reactie leidt. Men kan dus spreken van een 'inherent veilig systeem'.
- Fusie bezit milieuvoordelen ten opzichte van de andere mogelijke kandidaten die in staat geacht worden onze toekomstige basisbehoeften qua elektriciteit te voldoen.

5.1.2 Zwakte

Een fusiereactor bestaat nog niet en moet de eerst volgende twintig jaar ook niet verwacht worden. Uitspraken over kilowattuur-kostprijs, afval, uitbatingsschema's, enz. zijn gebaseerd op extrapolaties van experimenten en studies.

Een tokamak-fusiereactor zal vrij groot zijn, vraagt een hoge investeringskost, en de uitbating ervan vereist het simultaan beheersen van complexe technologieën. Dit alles gaat in tegen het hedendaagse streven naar 'flexibiliteit'. De onzekerheden op de betrouwbaarheid van deze technologieën en de complexiteit van interventies leggen een grote hypotheek op de beschikbaarheid van de reactor.

De hoge investeringskost, met mogelijks lange terugbetalingsperiode, geeft een bijkomende onzekerheid voor de investeerder.

Er is nog geen industriële, noch maatschappelijke vraag naar fusiereactoren.

5.2 Fusieonderzoek

5.2.1 Sterkte

- Algemeen** Het fusieonderzoek
- heeft duidelijke objectieven,
 - is Europees en zelfs mondiaal gecoördineerd en gestructureerd,
 - heeft zowel een theoretisch als een toegepast-theoretisch en een spits-technologisch luik,
 - vervult een voortrekkersrol bij spits technologische ontwikkelingen.
- Europa** Het fusieprogramma van de Europese Unie
- wordt gecoördineerd door de Europese Commissie en
 - integreert de inspanningen van al de lidstaten, alsook van Zwitserland.
- Het concentreert zich op de toroïdale magnetische opsluiting.
- Overlapping en dubbel werk worden vermeden door een centrale coördinatie.
 - Door de deel financiering vanuit de CEG zijn de onderzoeksresultaten open en toegankelijk voor alle partners. Op deze manier kunnen kleine landen volwaardig deelnemen aan het fusieonderzoek.
 - Het Europese Parlement verricht een maatschappelijke controle op de relatieve grootte van de toegekende budgetten en de aanwending ervan.
- ITER** Door de coördinatie van het onderzoek en de ontwikkeling op mondiaal niveau maakt men een beter gebruik van de beschikbare middelen en geniet men van hefboom- en kruisbestuivingseffecten.
- België** Met een relatief kleine financiële inspanning neemt België deel aan het Europese fusieonderzoeksprogramma en kan op die manier voeling blijven houden met de kennis in dit gebied.
- De recente participatie van Belgatom in EFET moet op termijn leiden naar een betere integratie van de Belgische industrie in de fusieprogramma's.
- ### 5.2.2 Zwakte
- Europa** De procedure van centrale coördinatie met mechanismen van goedkeuring en evenredige verdeling is vrij log. Ze kan aanleiding geven tot vertraging en niet optimaal gebruik van de middelen.
- Door een vrij stabiele lange termijn financiering blijven bepaalde programmaonderdelen op hun inertie doorlopen, zonder aan voldoende kritische evaluatie onderworpen te worden. Dit gevaar is vrij reëel bij de uitbating van (middelgrote) plasmamachines.
- Tot hiertoe is de bewuste beperking tot de toroïdale magnetische opsluiting succesvol geweest en heeft Europa gemaakt tot wereldleider in dit gebied

(JET). Deze keuze maakt ons echter zeer kwetsbaar indien de tokamak-lijn in de toekomst fundamentele problemen zou vertonen.

Alhoewel de algemene strategie goed gedefinieerd is, heeft Europa geen strategisch plan voor technologisch onderzoek voor de volgende vijf jaar. Men richt zich quasi uitsluitend naar ITER. Door de administratieve vertragingen bij het tot stand komen van de overeenkomst en de opeenvolgende herzieningen van het ontwerp heeft ITER nog geen coherent O&O programma opgesteld, met als gevolg dat ook in Europa de laatste jaren als niet echt produktieve transitiejaren moeten beschouwd worden.

ITER Ook hier is de procedure van centrale coördinatie met mechanismen van goedkeuring en evenredige verdeling vrij log en kan dan ook aanleiding geven tot vertraging en niet optimaal gebruik van de middelen.

De partners wensen bepaalde sleuteltechnologieën in huis te houden en tevens bepaalde alternatieven aan het ITER referentieontwerp te ontwikkelen waardoor het effect van de kostendeling moet gerelativeerd worden.

De vrees bestaat dat het ITER project evolueert in de richting van 'het louter bouwen van één tokamak-onderzoeksmachine' die alle gelden opsloort, waardoor er kritiek groeit, zowel bij de fundamentele wetenschappers als bij de aanhangers van de alternatieve lijnen.



HOOFDSTUK 6

Aanbevelingen

De integratie van het Belgische fusie onderzoeksprogramma in het Europese programma en doorheen het Europese programma in ITER moet worden behouden. De toegang tot de resultaten van de partners wordt daardoor verzekerd.

De Belgische bijdrage van zowat 1,5% (300 MBEF op 450 à 500 MECU) is aan de lage kant. In het licht van de vrij zwakke industriële *return* is het echter verdedigbaar.

De huidige verdeling in België met ongeveer 10% voor theoretische plasmafysica en 40% voor respectievelijk toegepaste plasmafysica en fusie technologie is evenwichtig.

Alhoewel niet essentieel vormt het gebruik van de nucleaire infrastructuur binnen het SCK•CEN een wezenlijk aandeel in het fusieonderzoek; dit betreft de BR2 (materiaal test reactor) en het LHMA (Laboratorium voor Hoge- en Middelgrote Activiteit) met afgeschermden cellen. De opgelegde provisies voor afval en ontmanteling brengen het SCK•CEN in een moeilijke positie t.o.v. concurrerende Europese reactoren. Deze zaak is 'fusie-overschrijdend' en vereist een aanpak op het niveau van de Commissie van de Europese Gemeenschappen.

De rol van BR2 in het fusieonderzoek blijft belangrijk. Naast het bestralen van materialen, die dan aan verder onderzoek en karakterisatie onderworpen worden, is de reactor een zeer geschikt instrument voor o.m. onderzoek op bestralingsgeïnduceerde corrosie, hoog energetische (14 MeV) neutronendiagnostieën en het testen van geïntegreerde kweekmantel en eerste wand prototype componenten.

Met de deelname van Belgatom aan het EFET consortium is er een opening voor grotere industrie participatie aan het fusieprogramma. De *high-tech* KMO's zijn echter volstrekt afwezig. Een werkgroep met vertegenwoordigers van de Overheid (Economische Zaken), onderzoeksinstituten (Associatie Euratom/Belgische Staat) en de beroepsfederaties zou maatregelen kunnen uitwerken om de betrokkenheid van de Belgische KMO's te vergroten.



BIJLAGE A

Referenties

- [1] W.D. D'haeseleer, M. J. Embrechts, 'Kernfusie — Fysisch-technische grondbeginselen', *Het Ingenieursblad* 1988:4, pagina's 13-30.
- [2] C. J. Joachain, D. E. Post, *Atomic and Molecular Physics of Controlled Thermonuclear Fusion*, Plenum Press, New York, 1983, ISBN 0-306-41398-1.
- [3] T. J. Dolan, *Fusion Research. Principles, Experiments and Technology*, Pergamon Press, New York, 1982, ISBN 0-08-025565-5.
- [4] JET Annual Report 1993.
- [5] H. Yasuda, *Emerging Nuclear Energy Systems—ICENES'93*, World Scientific, Singapore, 1994, ISBN 981-02-1719-6.
- [6] S. E. Jones *et al.*, 'Muon-Catalysed Fusion', AIP Conference Proceedings 181, Sanibel Island, Florida, VS (1988), American Institute of Physics, New York, 1989, ISBN 0-88318-381-1, DOE CONF. 8805170.
- [7] H. Th. Klippel, 'Muon gekataliseerde kernfusie', *Energiespectrum*, november/december 1989, pagina's 268-277.
- [8] 'Scientific Claim Nuclear Fusion Produced in Test Tube', *The Financial Times*, 23 maart 1989, pagina's 1, 26 en 22.
- [9] M. Snykers, A. Bruggeman, 'Kernfusie op kamertemperatuur', *Energie & Milieu* 1, januari/februari 1990, pagina's 18-19.
- [10] 'New Shot at Cold Fusion by Pumping Sound Waves into Tiny Bubbles', *The New York Times*, *Science Times*, 20 december 1994, pagina C1.
- [11] R. A. Krakowski, 'Dynamics of a Cavity Under Cyclic Acoustics Loadings: a Parametric Study', LA-UR-94-3804, 9 november 1994.
- [12] E. Canobbio *et al.*, 'Status Report on Controlled Thermonuclear Fusion', *Nuclear Fusion* 30:9, september 1990, pagina's 1641-1674.
- [13] M. Keilhacker *et al.*, 'Energy for the 21st Century: a Perspective on Nuclear Fusion', JET-P(93)56.
- [14] B. E. Keen, M. L. Watkins, 'Present State of Nuclear Fusion Research and Prospects for the Future', JET-P(93)67.
- [15] W. Sweet, 'Nuclear Fusion Advances', *IEEE Spectrum*, februari 1994, pagina's 31-36.

- [16] E.N. Shaw, *Europe's Experiment in Fusion: the JET Joint Undertaking*, North-Holland, Amsterdam, 1990, ISBN 0-444-883304.
- [17] JET Team, 'Fusion Energy Production from a Deuterium-Tritium Plasma in the JET Tokamak', *Nuclear Fusion* 32:2, 1992, pagina's 187-203.
- [18] *ITER EDA Newsletter* 1:1, november 1992, IAEA, Vienna, Oostenrijk.
- [19] M.D. Cable *et al.*, 'Indirectly Driven, High Convergence Inertial Confinement Fusion Implosions', *Physical review letters* 73:17, 24 oktober 1994, pagina's 2316-2319.
- [20] C.C. Baker *et al.*, 'STARFIRE, Commercial Tokamak Fusion Power Plant Study', Argonne National Laboratory rapport, ANL/FFP: 80-1, 1980.
- [21] 'The TITAN Reversed-Field Pinch Fusion Reactor Study', UCLA-PPG-1110, oktober 1987.
- [22] I. Maya *et al.*, 'Inertial Confinement Fusion Reaction Chamber and Power Conversion System Study', G. A. Technologies, GA-A17842, oktober 1985.
- [23] T.J. Dolan, 'Fusion Power Economy of Scale', *Fusion Technology* 24, augustus 1993, pagina's 97-111.
- [24] R. Buende *et al.*, 'Environmental Impact and Economic Prospects of Nuclear Fusion', EURFU BRU/XII-828/86, Brussel, november 1986.
- [25] *Energievoorziening*. Studiedag georganiseerd door het Technologisch Instituut, KVIV (Groep Algemene Technieken, Genootschap Energie), Antwerpen, 25 oktober 1994.
- [26] B.G. Logan, 'On the Utility of Tokamaks for Energy', *Fusion Engineering and Design* 23, 1993, pagina's 145-149.
- [27] L.M. Lidsky, 'The Trouble with Fusion', *Technology review*, oktober 1983, pagina's 32-44.
- [28] C. Hiltz, 'Energy and Environment, Report on the Public Hearing of the Committee on Energy, Research and Technology', European Parliament, STOA, november 1990.
- [29] R. Linkohr *et al.*, 'Controlled Thermonuclear Fusion—Summary of the STOA Fusion Study', ook 'Beheerste thermonucleaire fusie — Samenvatting van het STOA-onderzoek kernfusie', European Parliament, STOA, PE 149.135, 20 februari 1991.
- [30] D.K.J. Tommel, 'De politieke prijs van kernfusie', *Energiespectrum*, oktober 1991, pagina 239.
- [31] G. Greenhalgh, 'Do We Need an Energy Policy', *Atom* 421, maart 1992, pagina's 25-26.
- [32] M.S. Kazimi, 'Economics and Safety of Fusion Reactors', International School of Fusion Reactor Technology, Erice, Italië, 7-11 augustus 1989.
- [33] R.S. Pease *et al.*, 'Environmental, Safety-Related and Economic Potential of Fusion Power. Main report by the EEF Study Group', Brussel, CEC Fusion programme, december 1989.
- [34] H.Th. Klippel, 'Veiligheidsaspecten van fusiereactoren', *Energiespectrum*, november 1980, pagina's 270-279.

- [35] *Radiation Protection, ICRP Publication 60, 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, Pergamon Press, Oxford, 1991, ISBN 0-08-041144-4.
- [36] J. Raeder, 'Safety and Environmental Assessment of Fusion Power', 1994, to be published.
- [37] J.P. Holdren *et al.*, 'Report of the Senior Committee on Environmental and Economic Aspects of Magnetic Fusion Energy (ESECOM)', UCRL-53766, Lawrence Livermore Laboratory, 1989.
- [38] R. Hancox, G. J. Butterworth, 'The Management of Fusion Waste', *Fusion Technology*, 1990, pagina's 37-47.
- [39] A. Donato, 'Fusion and Fission Nuclear Power Reactors: an Attempt to Compare the Radioactive Waste Environmental Impact', ENEA, Frascati, Rome, Italië, ISSN/1120-5598, RT/NUCL/01/29, 1992.
- [40] A. Donato, R. Andreani, 'Structural Materials for Nuclear Fusion Energy: Development Status and Perspectives', ENEA, Frascati, Rome, Italië, ISSN/1120-5598, RT/ERG/FUS/93/60, 1994.
- [41] L. Bottura *et al.*, 'ITER Magnets', ITER documentation series, nr. 26, IAEA, Vienna, Oostenrijk, 1991.
- [42] D. Smith *et al.*, 'ITER Blanket, Shield and Material Data Base', ITER documentation series nr. 29, IAEA, Vienna, Oostenrijk, 1991.
- [43] T. Kuroda *et al.*, 'ITER Plasma Facing Components', ITER documentation series, nr. 30, IAEA, Vienna, Oostenrijk, 1991.
- [44] T. Houda, 'ITER Assembly and Maintenance', ITER documentation series, nr. 34, IAEA, Vienna, Oostenrijk, 1991.
- [45] M. C. Watkins *et al.*, 'JET Divertor Research in Support of ITER', JET-P (94) 47, oktober 1994.
- [46] F. Engelmann, 'Summaries of Reports on the ITER-Related Physics R&D Programme for the Period December 1991 to March 1993', PM 93-005, The NET Team, Garching, Duitsland, 1993.
- [47] W. D'haeseleer *et al.*, 'Behaviour of a Fusion Power Plant Driven by a Non-Continuously Operating Helium Cooled Tokamak Reactor', presented at the 18th SOFT, Karlsruhe, Duitsland, 22-26 augustus 1994, to be published in *Fusion Technology*.
- [48] P.E. Vandenplas *et al.*, 'Annual Report on Scientific Activities 1993', Laboratorium voor Plasmafysica, Associatie 'Euratom-Belgische Staat', Koninklijke Militaire School, Brussel, 1993.
- [49] 'Council Decision of 26 April 1994, Concerning a Framework Programme of Community Activities in the Field of Research and Training for the European Atomic Energy Community (1994 to 1998)', Cordis focus supplement, CEC, DG XIII/D-2, Luxembourg, 20 mei 1994, pagina's 26-30.
- [50] B. E. Keen *et al.*, 'Design, Construction and First Operational Experience on the Joint European Torus (JET)', *Fusion Technology* 11:1, januari 1987, pagina's 1-282.

- [51] 'The European Atomic Energy Community, Fusion Programme, Present Strategy', Consultative Committee for the Fusion Programme (CCFP doc. EUR FU(94) CCFP 62/2.2, revised), CCFP meeting, 6 juli 1994.
- [52] R. Toschi *et al.*, 'Next European Torus (NET)', *Fusion Technology* 14:1, juli 1988, pagina's 1-246.
- [53] *ITER EDA Newsletter* 3:3, maart 1994, IAEA, Vienna, Oostenrijk.
- [54] F. Moons *et al.*, 'SCK•CEN Annual Report for the Steering Committee of the Association Euratom-Belgian State for Fusion 1994', FT/MOL/94-07, BLG 663, september 1994.
- [55] *ITER EDA Newsletter* 2:2, februari 1993, IAEA, Vienna, Oostenrijk.
- [56] J.E. Bishop, 'Cold Fusion Proponents Resort to Tonics as Tokyo Plans \$30 Million Research Effort', *The Wall Street Journal*, 9 december 1993.
- [57] U. Colombo *et al.*, 'Fusion Programme Evaluation', Commission of the European Communities, ISBN 2-87263-052-X, juli 1990.
- [58] EFET, Commercial publicity folio, P.O. Box 3220, D-91050 Erlangen.
- [59] H. Conrads *et al.*, 'Qualitative Analysis of the Benefits to European High Technology Industry Arising from Fusion Contracts', CEC-DG XII Fusion programme, EURFU BRU/XII-257/87, Brussel, september 1988.
- [60] B.E. Keen, G.W. O'Hara, 'JET Joint Undertaking. Annual report 1993', report EUR 15723 (EUR-JET-AR16), Luxembourg 1994.



BIJLAGE B

Acroniemen

CFI	Committee on Fusion Industry
DEMO	DEMOstratie reactor
EFET	European Fusion Engineering and Technology
GOS	Gemenebest van Onafhankelijke Staten
HCT	Home Central Team
IAEA	International Atomic Energy Agency (Vienna, Oostenrijk)
IT	Ingestion Toxic potential
ITER	International Thermonuclear Experimental Reactor
JET	Joint European Torus
JCT	Joint Central Team
JRC	Joint Research Centre (Ispra, Italië)
CEG	Commissie van de Europese Gemeenschappen
KMO	Kleine en Middelgrote Ondernemingen
KMS/ERM	Koninklijke Militaire School/Ecole Royale Militaire (Brussel, België)
KUL	Katholieke Universiteit Leuven (Leuven, België)
LHMA	Laboratorium voor Hoge- en Middelgrote Activiteit
LPP	Laboratorium voor Plasmafysica
NET	Next European Torus
O&O	Onderzoek en Ontwikkeling
PME	Petites et Moyennes Entreprises
PWR	Pressurized-Water Reactor
RFP	Reversed-Field Pinch
SCK•CEN	StudieCentrum voor Kernenergie/Centre d'étude de l'Energie Nucléaire
SEAFP	Safety and Environmental Assessment study on Fusion Power
TFTR	Tokamak Fusion Test Reactor
UCL	Université Catholique de Louvain (Louvain-la-Neuve, België)
ULB	Université Libre de Bruxelles (Brussel, België)
VS	Verenigde Staten

SCK•CEN, april 1995

Grafisch design, opmaak, proeflezen JL Consulting, Zaventem

Kaft druk Lannoo, Tielt

Verantwoordelijke uitgever Carl M. Malbrain
Boeretang 200, B-2400 Mol, België

CONTACTEN

Reactor Materials José Van de Velde
+32 14 33 30 00 (fax 32 12 16)
jvdvelde@sckcen.be

Public Relations Anne Verledens
+32 14 33 25 86 (fax 33 25 84)
averlede@sckcen.be

ADRESSEN

Laboratoria Boeretang 200
B-2400 Mol, België
Tel.: +32 14 33 21 11
Fax: +32 14 31 50 21

Maatschappelijke zetel Papiermolenstraat 51 bus 9
B-1160 Brussel, België
Tel.: +32 2 661 08 11
Fax: +32 2 660 75 63



STUDIECENTRUM VOOR KERNENERGIE
CENTRE D'ÉTUDE DE L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE