

Energies du XXI^e siècle

PHY586 – Technologie des réacteurs et cycle du combustible

Applications non électrogènes du nucléaire

Philippe César Teixeira Pereira

Table des matières

1. Introduction.....	3
2. Applications industrielles	4
a. Production de dihydrogène.....	4
i. Cycle iode-soufre.....	6
ii. Électrolyse à haute température (HTE).....	7
b. Gazéification.....	10
3. Chauffage urbain	12
4. Propulsion nucléaire navale	13
5. Conclusion	14
6. Références bibliographiques.....	15

Introduction

A l'aube du nucléaire pendant les années 50, celui-ci se montrait comme le salut de l'humanité : une quantité monstrueuse d'énergie qui pourrait être maîtrisée afin de fournir tout nos besoins énergétiques à partir de quantités modestes de matière. Cependant l'énergie nucléaire n'a pas tardé à montrer ses inconvénients.

L'une des plus grandes déceptions associées à cette forme d'énergie est son impossibilité de la convertir directement en électricité de grande échelle. Les ingénieurs de l'époque étaient déçus du fait qu'on devrait attacher à un réacteur nucléaire (à ce moment, l'un des engins le plus sophistiqués jamais conçu par l'être humain) une turbine conventionnelle et ses 1/3 de rendement. En effet, l'énergie dégagée par les réactions nucléaires vient sous la forme de chaleur issue du ralentissement des noyaux et des neutrons dans la structure du combustible. L'énergie thermique est, du point de vue de l'ingénierie, une de formes d'énergie la moins « noble », une fois qu'elle se disperse sur toutes les degrés de liberté du système et que les lois de la thermodynamique établissent des limites physiques à son rendement lors de sa conversion.

Pourtant, le nucléaire ne laisse pas d'être une source considérable d'énergie. Actuellement il est utilisé surtout à la production d'électricité (même avec ses 1/3 de la turbine) et dans les armes nucléaires, bien qu'il trouve d'autres applications civiles un peu moins connues au grand public où il pourrait jouer un rôle plus important.

Applications industrielles

Outre la production d'électricité, l'énergie thermique issue des réactions nucléaires peut être utilisée pour fournir de la chaleur pour les plus divers processus. De telles applications ont débuté très tôt, pratiquement au même moment où on a commencé à utiliser des réacteurs nucléaires pour produire de l'électricité. Bien que moins de 1% de la chaleur produite dans les réacteurs nucléaires dans le monde soit actuellement utilisée pour les processus industriels [1], certaines indications montrent que ces applications soulèvent de plus en plus d'intérêt.

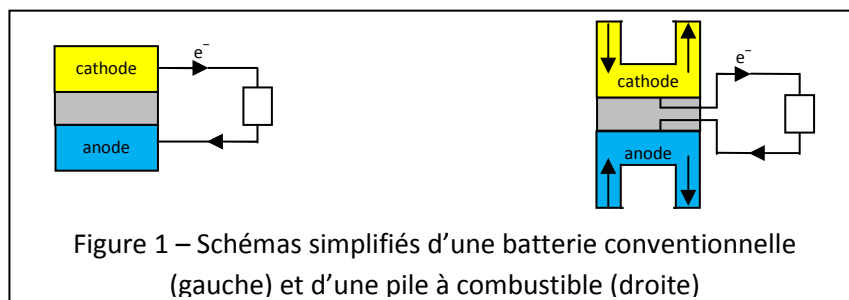
Bien que ces applications soient nombreuses, on s'arrêtera sur la production de dihydrogène, envisagé comme le combustible du futur, et la gazéification, une méthode qui permet la production de méthane depuis des matières carbonées.

Production de dihydrogène

La façon la plus commune d'obtenir de l'électricité depuis l'énergie des liaisons chimiques consiste à brûler des éléments combustibles en présence d'un comburant (dans la plupart des cas, le dioxygène atmosphérique) en obtenant de la chaleur, celle-ci étant utilisée pour faire tourner une turbine faisant en suite tourner un alternateur. Cette méthode, à la base de tous les systèmes thermoélectriques à combustion, présente des nombreux inconvénients :

- Le rendement d'une turbine (même dans les cycles à hautes températures) ne dépasse guère 40%, le restant de l'énergie étant rejetée dans l'environnement.
- La combustion de certains combustibles émet du dioxyde de carbone et d'autres gaz responsables pour l'effet de serre, voir d'autres substances nocives à la santé (comme le monoxyde de carbone et les dérivés du soufre).
- La plupart des combustibles disponibles dans la nature ne sont pas illimités (charbon, dérivés du pétrole, gaz naturel...) et leur disponibilité devient de plus en plus rare. Par ailleurs, les pays ayant aujourd'hui les plus grandes réserves de ces combustibles sont politiquement instables (Lybie, Venezuela, etc.) ou possèdent des gouvernements « non-alignés » avec l'occident (Iran, Russie, etc.).

Le premier inconvénient peut être détourné en convertissant l'énergie des liaisons chimiques directement en électricité. Cela a été possible grâce au travail de Francis Bacon, scientifique et ingénieur britannique qui pendant les années 50, en reprenant une idée proposée par William Grove en 1839, développe la pile à combustible. L'idée générale était de construire une batterie dont les réactifs y sont insérés en continu, comme dans une machine thermique.

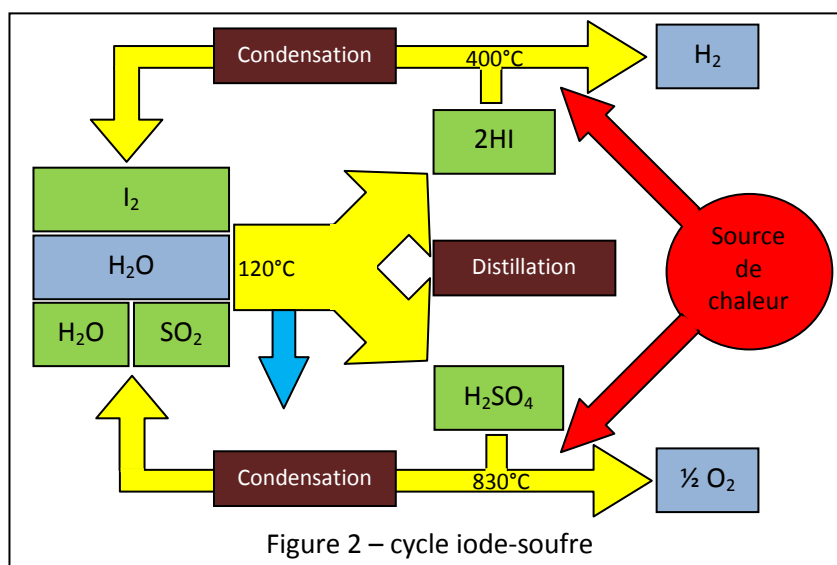


Le deuxième inconvénient peut être détourné avec l'utilisation du dihydrogène, combustible dont l'oxydation ne libère que de l'eau. Bien qu'il soit extrêmement inflammable (ce qui rend son stockage dangereux) il peut être stocké en grande échelle (contrairement à l'électricité).

Toutefois un inconvénient majeur demeure : Le dihydrogène n'est pas disponible en grandes quantités dans la nature et doit donc être produit par d'autres méthodes afin d'être en suite utilisé. C'est là où le nucléaire pourrait jouer un rôle fondamental : les principaux processus connus actuellement pour la production de dihydrogène demandent soit des températures très élevées (ex. : cycle iode-soufre) qui peuvent être fournies par un réacteur nucléaire, soit de l'électricité (ex. : électrolyse) également disponible à la sortie de l'alternateur couplé à une turbine installée à la sortie d'un réacteur. On va voir en détails les deux méthodes citées ci-dessus.

Cycle iode-soufre

Le cycle iode-soufre est une série de processus thermochimiques utilisés pour la production d'hydrogène. Le schéma ci-dessous montre les réactions y aboutissant :



Comme indiqué sur le schéma, le soufre et l'iode sont récupérés et réutilisés, ce qui fait que le procédé global peut être considéré comme un cycle. Il constitue un moteur thermique-chimique dont l'entrée de chaleur sont les réactions de décomposition de l'acide sulfurique et de l'iodure d'hydrogène (représentées par les flèches rouges) et la sortie est la synthèse de ceux deux derniers (représentée par la flèche bleue).

Parmi les avantages de ce processus, on peut citer :

- Un grand taux d'utilisation de la chaleur d'entrée (environ 50%) ;
- Cycle fermé n'ayant pas rejets ;
- Utilisation directe de la chaleur, une forme d'énergie moins coûteuse (voir « moins noble ») que l'électricité ou l'énergie mécanique.

Parmi les désavantages:

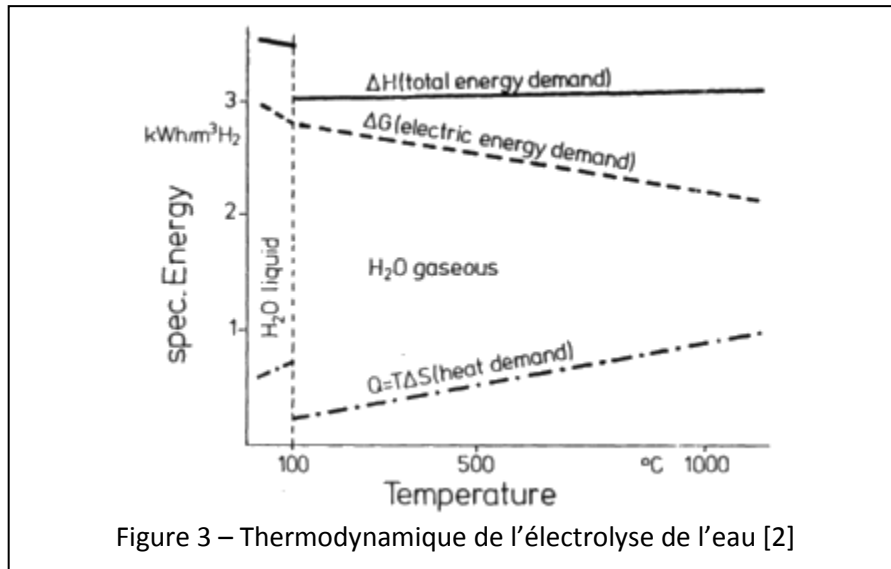
- Des températures très élevées sont nécessaires (850°C) ;
- Les réactifs intermédiaires sont corrosifs (iode, dioxyde de soufre, acide iodhydrique, acide sulfurique) ce qui demande des installations utilisant des matériaux appropriés.

Électrolyse à haute température (HTE)

L'électrolyse de l'eau est une réaction de décomposition de celle-ci en dioxygène et dihydrogène due à un courant électrique la traversant. C'est, *grosso modo*, la réaction inverse de celle se produisant dans la pile à combustible.

L'électrolyse à haute température est plus efficace que celle à température ambiante car une partie de l'énergie nécessaire à la réaction est fournie sous la forme de

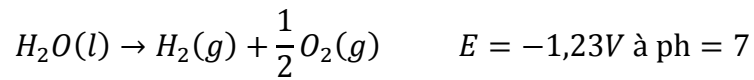
chaleur. En effet, à 2500°C l'eau se décompose en dioxygène et dihydrogène sans avoir besoin qu'un courant électrique ne la traverse (réaction de thermolyse). Pour des applications industrielles, une température aussi élevée est inatteignable. Les systèmes HTE proposés aujourd'hui travaillent à une température variant entre 100°C et 850°C[2].



Le rendement de ce système peut être très élevé si on considère que l'électricité nécessaire à ce processus provient d'une machine thermique (dont le rendement est inférieur à 50% c.à.d. que la machine produit plus de chaleur que d'électricité – c'est bien le cas des réacteurs nucléaires) et que le processus demande toujours plus d'électricité que de chaleur. Sous ces hypothèses, pour un besoin d'énergie électrique donné toute la chaleur supplémentaire nécessaire est disponible. Le tableau ci-dessous montre le rendement global du système en fonction de la température et du rendement de l'ensemble turbine-alternateur.

Rendement du processus HTE				
Température (°C)		100	500	1000
Rendement de l'ensemble turbine-alternateur (%)	$\frac{\Delta G}{\Delta H}$	0,93	0,84	0,74
	20	22%	24%	27%
	30	32%	36%	41%
	40	43%	48%	54%

La sélection des matériaux des électrodes et de l'électrolyte est essentiel : pour les réactions électrochimiques non-spontanées comme l'électrolyse de l'eau



On doit en pratique appliquer une tension supérieure à celle de la réaction. Cette différence entre la tension appliquée et celle de la réaction est appelée surtension (*overpotential* en anglais) et dépend des électrodes. Pour des électrodes en platine, la surtension de décomposition de l'eau est d'environ 0,6V (c.à.d. qu'en pratique on doit appliquer une tension d'environ 1,8V pour que la réaction se produise). Plusieurs recherches sont en cours actuellement afin de développer des électrodes ayant des valeurs de surtension de plus en plus petites [5].

Gazéification

Dans certains projets de réacteurs à très haute température (950°C), on peut envisager la production de méthane à partir de vapeur et de charbon via le processus de gazéification.

La gazéification du charbon comprend une étape initiale de pyrolyse suivie d'une oxydation partielle produisant un gaz de synthèse (ou « syngas ») comprenant principalement du CO et de l'hydrogène en teneurs variables et, dans ce cas, du méthane. D'autres gaz issus des réactions des substances présentes du charbon (comme le soufre, dont la réduction produit du H_2S) peuvent être présents dans le syngas. L'oxydant peut être l'oxygène, l'air ou la vapeur d'eau.

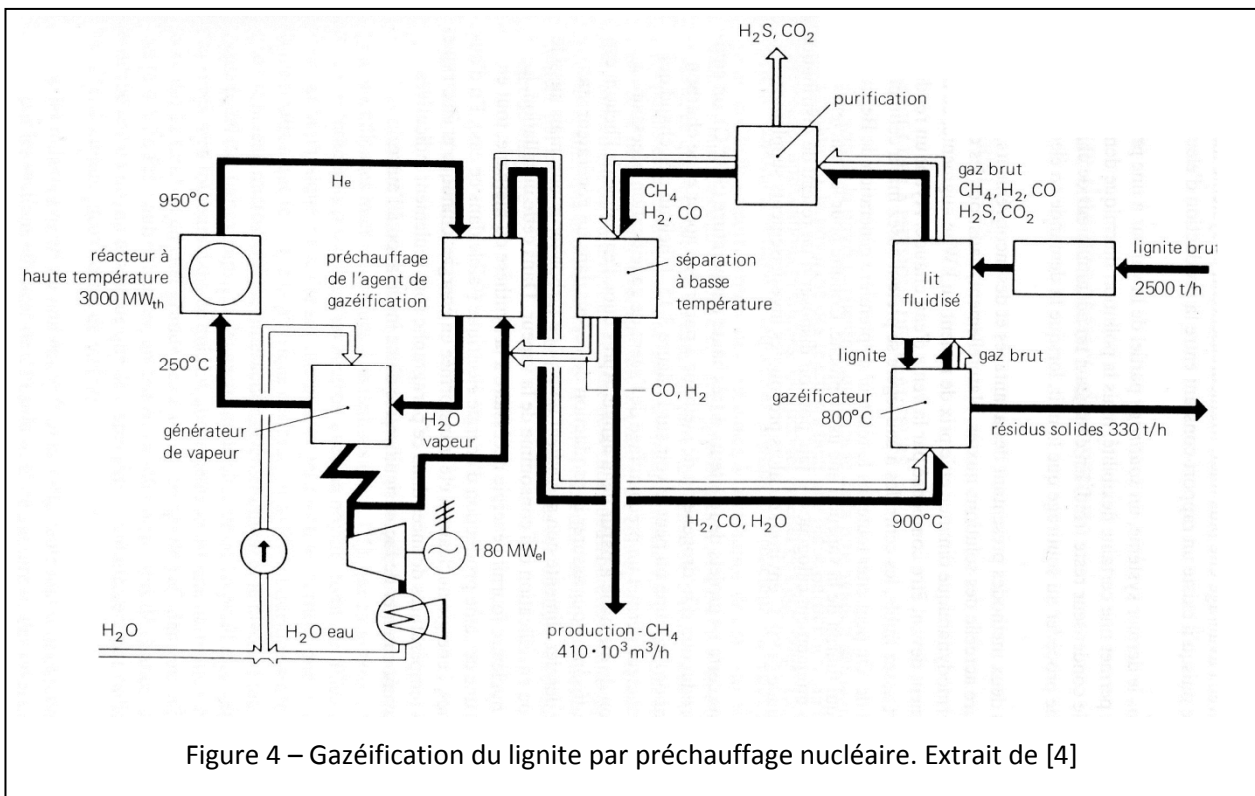


Figure 4 – Gazéification du lignite par préchauffage nucléaire. Extrait de [4]

Un exemple d'installation permettant la production de méthane depuis le lignite par gazéification avec préchauffage nucléaire est schématisé ci-dessus. Le réacteur opérant

avec de l'hélium très chaud permet un préchauffage de l'agent de gazéification nécessaire à l'obtention du méthane. Après cela, l'hélium possède encore de l'énergie suffisante pour produire de la vapeur, avec laquelle on alimente un groupe turboalternateur. Dans cette installation, le réacteur nucléaire fournit à la fois de l'énergie électrique et de l'énergie chimique (présente dans les liaisons des molécules de méthane).

Chauffage urbain

Une des possibilités d'utilisation directe de l'énergie nucléaire est la production de chaleur pour un réseau central qui en suite la distribue à plusieurs clients par l'intermédiaire de canalisations de transport de chaleur. En Suède, le réacteur Agesta a fourni de l'eau chaude pour le chauffage urbain d'une banlieue de Stockholm de 1963 à 1973[1]. En France, le réacteur piscine « THERMOS » (lancé sur le marché par le CEA par l'intermédiaire de sa filiale Technicatome, aujourd'hui intégrée à AREVA) participe au chauffage du centre nucléaire de Saclay et de ses environs [4].

Dans le cas du marché du chauffage urbain, les centrales nucléaires de cogénération constituent l'une des options possibles. Dans le cas de moyenne et de grande puissance, comme les besoins du marché de la chaleur sont limités et que les taux de charge sont relativement faibles, l'électricité serait le principal produit et le chauffage urbain ne représenterait qu'une faible fraction de la production totale de l'énergie étant en fait un sous-produit.

La production de l'eau chaude peut se faire soit par soutirage de vapeur à l'entrée de certains étages de la turbine, soit par relèvement de la température du condenseur. Dans ce dernier cas, l'eau de refroidissement du condenseur devient utilisable, ce qui supprime en principe le problème des rejets thermiques.

On peut utiliser simultanément les neutrons excédentaires du réacteur pour la fabrication d'isotopes radioactifs, comme le Co^{60} utilisé par la médecine.

Propulsion nucléaire navale

Les bâtiments à propulsion nucléaire utilisent un ou plusieurs réacteurs nucléaires. La chaleur produite est transmise à un fluide caloporteur utilisé pour générer de la vapeur d'eau actionnant soit des turbines couplées aux hélices de propulsion (propulsion à vapeur) soit des turbines couplées à des alternateurs alimentant en énergie électrique tout le bâtiment, et éventuellement des moteurs électriques de propulsion (propulsion électrique). Dans les deux cas le rendement est limité à celui de la turbine (ou du groupe turboalternateur).

L'utilisation de l'énergie nucléaire pour la propulsion navale est plutôt restreinte aux activités militaires, bien qu'il existe cependant des brise-glaces qui s'en servent. Son intérêt principal vient du fait qu'elle confère au bateau une grande autonomie et, particulièrement pour les sous-marins, une indépendance de moteurs à l'oxygène atmosphérique (contrairement aux sous-marin conventionnels, qui ont toujours besoin de l'air pour mettre en marche leurs moteurs à diesel).

Conclusion

L'énergie nucléaire, bien qu'elle nous soit disponible en grande échelle seulement sous la forme de chaleur, peut trouver sa place dans les plus divers processus industriels ayant besoin d'une source abondante et bon marché d'énergie thermique. La cogénération est toujours une option valable, en considérant que la chaleur rejetée par une centrale nucléaire, évacuée soit dans le Rhône ou dans l'Atlantique, soit par les aéroréfrigérants, représente une ressource très importante de nombre activités humaines.

Références bibliographiques

[1] Bela J. CSIK et Juergen KUPITZ, *Applications de l'énergie nucléaire : chauffage domestique et production de chaleur industrielle*. Bulletin AIEA, février 1997, page 21.

[2] S. H. JENSEN et M. MOGENSEN, Materials Research Department, Risø National Laboratory, Denmark. *Perspectives of high temperature electrolysis using SOEC* [en ligne]. Disponible sur : <<http://www.hi2h2.com/perspectives.htm> > (consulté le 16.03.2011)

[3] Department Of Energy, Office of Nuclear Energy, Science and Technology, *Nuclear Hydrogen R&D Plan* [en ligne]. Mars 2004. Disponible sur : <http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/nuclear_energy_h2_plan.pdf> (consulté le 17.03.2011)

[4] LIGOU Jacques. *Introduction au génie nucléaire*, 2^e édition. Presses polytechniques et universitaires romandes, Suisse, 1997, page 75. ISBN 2-88074-312-5

[5] ATKINS Peter. *Chemical Principles*, 4^e édition. W. H. Freeman, Etats-Unis, 2006, page 510. ISBN-10 0716773554