

10 Réacteurs de puissance

RÉACTEUR À EAU LOURDE SOUS PRESSION CANDU

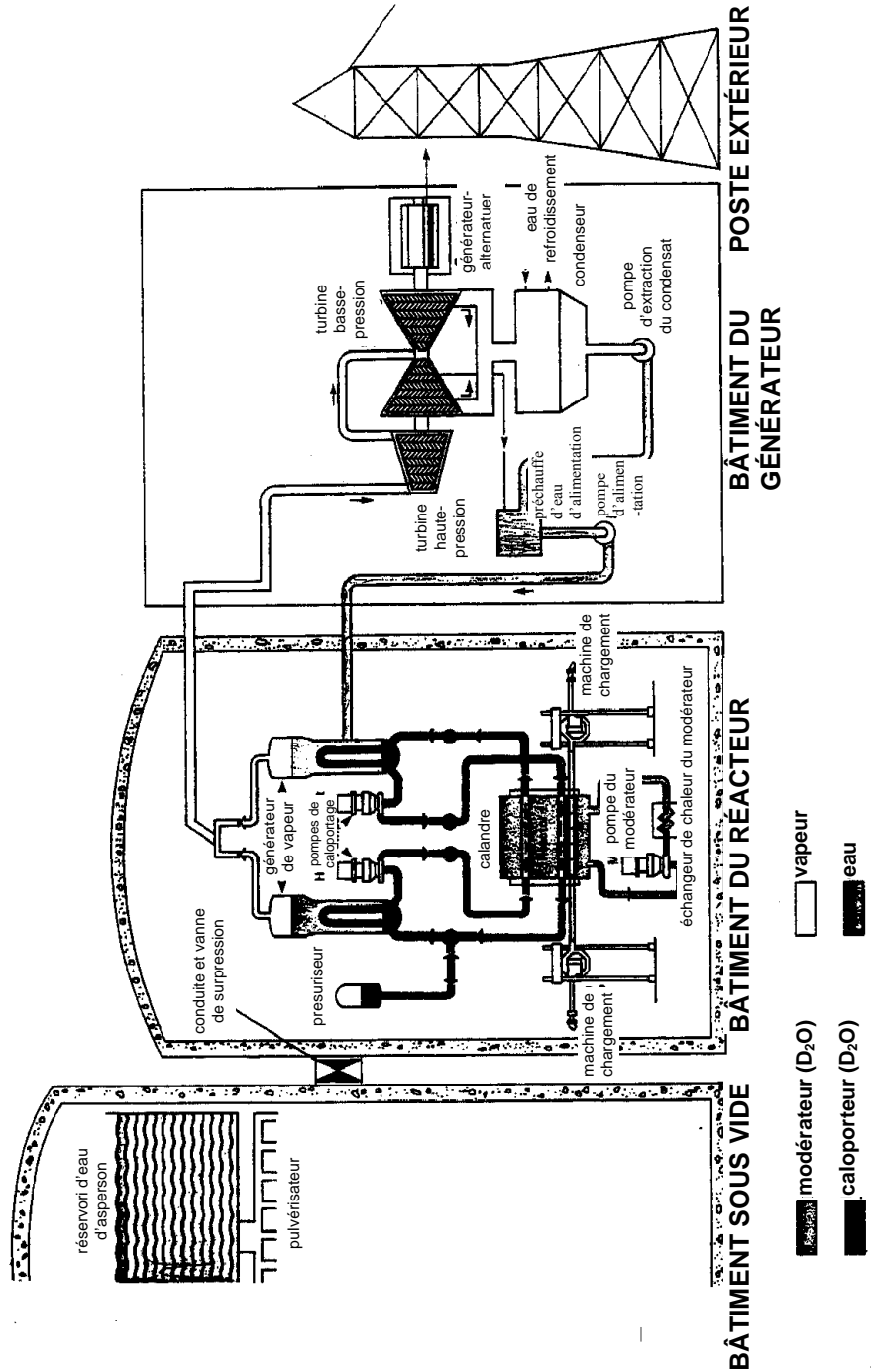


Figure 10.1

10.1 Qu'est-ce qu'une centrale nucléaire?

Une centrale nucléaire a pour fonction la production sûre, fiable et économique d'électricité.

La figure 10.1 montre une vue schématique d'un réacteur nucléaire. Une centrale peut compter plusieurs réacteurs (ou tranches) ce qui permet de partager des appareils. Par exemple, les centrales ontariennes comptent quatre réacteurs nucléaires. D'autre part, le Québec et le Nouveau-Brunswick ont construit des centrales à un seul réacteur. Les prochains chapitres de ce cours portent principalement sur les systèmes et les appareils contenus dans l'immeuble du réacteur et montrés à la figure 10.1.

La source de chaleur constitue la principale différence entre une centrale nucléaire et une centrale à combustible fossile. Dans un réacteur CANDU, le caloporteur pompé est chauffé lorsqu'il passe au-dessus du combustible d'oxyde d'uranium. Il s'écoule ensuite dans le générateur de vapeur où sa chaleur est transférée à de l'eau légère (ordinaire) qui est vaporisée. Dans une centrale non nucléaire, la chaleur utilisée pour produire de la vapeur provient de la combustion de charbon ou de pétrole. Dans chaque cas, la vapeur actionne une turbine qui fait tourner un générateur.

Le nom CANDU est dérivé de CANada Deuterium Uranium.

L'eau lourde est l'oxyde de deutérium ou D_2O . Ce dernier est l'un des isotopes lourds de l'hydrogène et se trouve naturellement, à une concentration d'environ un atome de deutérium pour 7000 atomes d'hydrogène.

Dans une centrale nucléaire, la chaleur est générée au *cœur* du réacteur. On y trouve aussi le combustible, le réfrigérant et le modérateur. Le combustible ne peut s'échauffer qu'en présence du modérateur. L'utilisation d'eau lourde est une caractéristique propre aux réacteurs CANDU.

10.2 Dangers

Lorsqu'il est dans le réacteur, le combustible produit une chaleur et une radioactivité intenses. On peut le manutentionner en toute sécurité avant qu'il soit utilisé mais, après un court séjour dans le cœur du réacteur, il contient des substances radioactives en quantités mortelles. Ces substances seront radioactives pendant une très longue période.

À pleine puissance, le cœur d'un CANDU produit entre 1700 et 3000 MW_{th} d'énergie thermique. Si le système caloporteur (le système

de refroidissement) ne parvenait pas à évacuer toute cette chaleur, les dommages causés par la haute température au combustible et aux constituants du réacteur occasionneraient la fuite de substances radioactives dangereuses, ainsi que l'affaiblissement et la fusion des matériaux qui le composent.

Pourquoi donc avoir des réacteurs nucléaires, étant donné ces risques inhérents flagrants? La prochaine section de ce chapitre justifie le recours au nucléaire. Dans la suite de ce cours, nous démontrerons que la production électronucléaire peut être sûre, fiable et économique.

10.3 Notions principales

- On construit des centrales nucléaires pour produire de l'électricité de façon sûre, économique et fiable.
- Le cœur d'un réacteur CANDU contient le combustible de dioxyde d'uranium naturel, et de l'eau lourde utilisé comme caloporteur et comme modérateur.
- Le combustible du réacteur engendre de la chaleur servant à produire de la vapeur. Toutefois, il émet des rayonnements et génère des substances radioactives.
- Ce sont les propriétés nucléaires particulières de l'eau lourde qui permettent au réacteurs CANDU de consommer de l'uranium naturel (non enrichi).
- 1 MW (mégawatt) = 1000 kW (kilowatts). On mesure la production ou la livraison d'énergie en utilisant des unités de puissance (watt). L'énergie électrique est vendue en watt (W) ou en kilowattheures (kWh). Par exemple, une puissance de production de 1 MW génère 1 kWh d'énergie toutes les 3,6 secondes. Vous rencontrerez aussi les symboles MW_{th} (mégawatts thermiques) et MW_e (mégawatts électriques) qui dénotent respectivement la production d'énergie thermique et celle d'électricité.

10.4 Comparaison des méthodes de production d'électricité

10.4.1 Les différentes options

Nous nous sommes habitués à une alimentation fiable et bon marché en électricité. En conséquence, nous n'utilisons pas toujours correctement ou efficacement l'énergie électrique. Une conservation efficace peut réduire les demandes en énergie électrique, allant même jusqu'à reporter ou éliminer la construction de nouvelles centrales électriques.

Les petites sources d'énergie (par exemple les éoliennes dans les régions éloignées ou les barrages sur de petites rivières) peuvent remplir certains créneaux. Certains services publics prévoient que l'on aura besoin de nouvelles grandes centrales. Tant que l'on n'aura pas découvert de meilleures technologies, le choix se situera entre les centrales nucléaires et les centrales à combustible fossile.

10.4.2 Aspects économiques

Les inventeurs du réacteur électronucléaire prévoyaient qu'il serait une source d'énergie beaucoup plus économique que les combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz). L'avantage économique de la production d'électricité par l'énergie nucléaire comparée à la consommation de combustibles fossiles provient du coût de l'uranium. Aux fins de comparaison, en 1990, en Ontario, les coûts du combustible nucléaire représentaient 10 % du prix du combustible utilisé par une centrale équivalente à combustible fossile. Une grande centrale au charbon brûle quotidiennement environ 20 000 tonnes de charbon. Une centrale nucléaire équivalente consomme environ 20 grappes de combustible contenant chacune moins de 20 kg d'uranium.

Ceux qui avaient prédit que l'énergie nucléaire serait peu onéreuse avaient sous-estimé d'autres coûts. Le financement, la construction et l'entretien des centrales nucléaires sont coûteux. Leurs coûts d'immobilisation sont au moins trois fois plus élevés que ceux d'une usine à combustible fossile. Leur construction, leur équipement et leur entrée en service nécessitent trois à quatre années de travail supplémentaires.

Le coût de production d'électricité, qu'elle soit classique ou nucléaire, est difficile à prévoir. Le financement pour la construction doit être assuré plusieurs années avant les premières ventes d'électricité. À cause des débours très élevés au démarrage du projet, le coût de l'énergie nucléaire dépend fortement des taux d'intérêt, alors que le coût du combustible constitue une part plus importante du prix de l'électricité produite à partir de combustibles fossiles.

Huit à dix ans s'écoulent entre le début des travaux d'une centrale nucléaire et son entrée en service. Le concepteur prévoit que grâce à la construction modulaire, une période moitié moindre sera nécessaire pour assembler un nouveau modèle de petit réacteur.

Les estimations des coûts pour chaque type de production d'énergie dépendent de la variation des prix pendant la vie utile de la centrale. L'électricité tirée de combustibles fossiles sera plus chère si le coût du

combustible augmente brusquement après la construction de la centrale. De telles augmentations de coût de l'uranium après la mise en service d'une centrale nucléaire n'affecteront pas beaucoup le coût de l'électricité produite. Emprunter le capital pour construire une centrale nucléaire est une bonne stratégie si l'on prévoit que les coûts augmenteront, particulièrement si les taux d'intérêt sont bas. La filière du charbon pourrait être un meilleur choix si le coût du combustible est stable ou si l'on prévoit qu'il baissera ou, encore, si les taux d'intérêt sont élevés.

Ces comparaisons entre les coûts ont un impact sur l'exploitation de des centrales. Les centrales ne fonctionnent pas toujours à pleine puissance, à cause des variations de la demande d'électricité. Dans une centrale thermique classique, la réduction de production amène des économies de combustible, alors que le coût de l'énergie nucléaire reste stable, que les réacteurs produisent de l'énergie ou non. De ce fait, la façon la plus économique d'utiliser une centrale nucléaire est de l'exploiter à pleine puissance.

Nous appelons *fonctionnement de base*, l'exploitation continue à pleine puissance. L'ajustement de la production des centrales à combustible fossile, ou *fonctionnement en suivi de charge*, permet d'accommoder les variations de la demande. Certaines centrales nucléaires peuvent aussi ajuster leur production en fonction de la charge. Toutefois, il n'est pas possible d'opérer de grands déplacements de charge, à cause des difficultés liées aux processus nucléaires dans le combustible. Nous discuterons de cette limitation dans des chapitres ultérieurs. Les changements fréquents de charge provoquent des contraintes thermiques qui augmentent le risque d'endommagement du combustible.

Lorsqu'un réacteur nucléaire est arrêté pour cause de réparation, l'on doit remplacer le manque de production en achetant l'électricité, plus chère, d'une centrale à combustible fossile. Or, les coûts liés à la centrale demeurent élevés pendant la panne. Les défaillances des appareils, les opérations d'entretien non prévues et les erreurs de fonctionnement sont la source d'arrêts coûteux de production d'électricité. Ainsi, il est important que les entreprises préviennent les arrêts non prévus et, s'ils se produisent, en restreignent la durée.

L'expérience acquise avec les réacteurs CANDU indique que l'énergie nucléaire sera beaucoup moins chère que celle tirée des combustibles fossiles si les centrales fonctionnent pendant 80 % ou plus du temps. Les nouveaux réacteurs CANDU atteignent couramment cet objectif et le dépassent.

Un bon rendement d'un réacteur au cours de sa vie utile produira des économies substantielles par rapport aux centrales à combustible fossile. Toutefois, si elle est mal exploitée, le coût de production d'électricité sera très élevé.

Comme estimation grossière du point d'équilibre entre les centrales nucléaires et les centrales à combustible fossile, on cite parfois un facteur de capacité de 60 %.

Les avantages de l'uranium par rapport aux combustibles fossiles augmenteront probablement avec la diminution des réserves mondiales de pétrole et de gaz et les inquiétudes relatives aux gaz à effet de serre. Les réserves d'uranium sont également limitées. Le Canada a la fortune de posséder des gisements pour ses besoins et ceux de son grand marché d'exportation qui dureront entre 50 et 60 ans. Il est possible de brûler du thorium dans les réacteurs CANDU, mais cette option est actuellement trop onéreuse. Une fois que tout l'uranium aura été utilisé, on pourra alors tirer de l'énergie du thorium pendant 100 ans ou plus.

10.4.3 Effets sur le milieu

Les centrales nucléaires et celles à combustible fossile ont des effets très différents sur l'environnement. Le rayonnement est un inconvénient incontournable de la production nucléaire. La fission nucléaire qui génère chaleur et rayonnement transforme l'uranium, substance faiblement radioactive, en produits de fission fortement radioactifs. Les produits de fission dans le combustible émettent un rayonnement longtemps après la fin de la fission. Dans les matériaux exposés au rayonnement produit dans le cœur, des substances radioactives sont générées par activation.

Ces facteurs influent sur la conception des centrales et sur la façon dont on y travaille. Toutefois, les rejets radioactifs au public sont extrêmement faibles. On surveille les rejets avec attention. Les limites légales des rejets sont inférieures à l'intensité du rayonnement naturel. Les rejets typiques effectués pendant le fonctionnement ne représentent qu'une fraction des rejets autorisés. Nous savons que ces rejets sont peu importants, et les échantillonnages réalisés à proximité des centrales CANDU ne décèlent pas un rayonnement plus intense que celui dû à la nature.

La population s'inquiète des risques de rejet accidentel de grandes quantités de matières radioactives. Dans ce cours, nous décrivons les appareils conçus pour prévenir de tels accidents. Le principe de

fonctionnement sécuritaire qui suit est simplifié à l'extrême, mais essentiellement correct :

Si l'on s'assure que le combustible est toujours mouillé, il ne se rompra pas et les substances radioactives ne seront pas dissipées.

Dans les chapitres suivants, nous signalerons les éléments de la conception du réacteur prévus pour assurer le mouillage continu du combustible. Dans d'autres cours, nous étudierons la sécurité des réacteurs, qui repose autant sur le personnel que les appareils.

On appelle *activation*, toute interaction d'un rayonnement avec de la matière qui, après un certain temps, la rend radioactive.

Les centrales traditionnelles produisent aussi leurs déchets. Une grande centrale au charbon dépourvue d'épurateur-laveur (séchateurs) produit quotidiennement plus de 15 000 tonnes de dioxyde de carbone (CO₂), 200 tonnes de gaz acides (dioxyde de soufre et oxydes d'azote), plusieurs tonnes de cendres volantes et 500 tonnes de cendres. Ces déchets sont beaucoup moins nocifs que le rayonnement nucléaire, mais ne sont pas inoffensifs. Parmi les déchets énumérés plus haut, il faut compter plus d'une tonne de poisons, notamment l'arsenic et le mercure.

Les épurateurs-laveurs réduisent les rejets des centrales à combustible fossile modernes, mais on ne peut obvier à l'émission de certains gaz acides et de substances toxiques. Les épurateurs-laveurs ne peuvent retirer le dioxyde de carbone qui, bien qu'il ne soit pas immédiatement nocif, contribue directement au réchauffement climatique.

Qu'elles soient équipées ou non d'épurateurs-laveurs, les centrales traditionnelles produisent une grande quantité de déchets solides que l'on doit évacuer. En comparaison, un gros réacteur utilise quotidiennement moins de vingt grappes de combustible nucléaire. Il s'agit de moins d'une demi-tonne de déchets. À l'heure actuelle, l'on conserve le combustible épuisé fortement radioactif, dans des piscines situées sur le terrain des centrales. On conserve le combustible plus ancien dans des silos de béton.

L'entreposage à long terme des déchets nucléaires constitue un autre problème. La radioactivité due à la désintégration nucléaire diminue avec le temps. La radioactivité de différentes substances décroît à des vitesses différentes. Dans une centaine d'années environ, la radioactivité du combustible usé ne proviendra que de quelques

substances radioactives de très longue période, surtout le plutonium et l'uranium restant, non fissionné.

à cause de la présence de ces isotopes à longue période, on doit isoler le combustible épuisé de l'environnement pendant un temps très long. Il a été difficile de concevoir une méthode sûre de conservation. Les problèmes politiques liés à la mise en place d'un site d'évacuation seront énormes.

Pour résumer, le combustible nucléaire épuisé contient des substances radioactives extrêmement dangereuses. On doit conserver ces substances au même endroit, et la probabilité de rejet doit être très basse. Les déchets des centrales à combustible fossile sont moins dangereux, mais ne sont pas isolés de l'environnement. Par exemple, les cheminées diffusent sur une grande surface des substances qui peuvent être dangereuses pour la santé ou l'environnement.

Toutes les centrales rejettent de la chaleur dans leur milieu. Les centrales nucléaires ne sont pas aussi efficaces que les centrales modernes à combustible fossile et elles perdent plus d'énergie résiduelle. Au Canada, les centrales sont situées près de grands plans d'eau froide. On ne croit pas que l'effet de cette chaleur sur le milieu environnant soit particulièrement nocif.

10.5 Notions principales

- Pour la production d'électricité, l'énergie nucléaire est plus économique que le recours aux combustibles fossiles, si les centrales sont exploitées de manière fiable, à haute capacité, pendant de longues périodes. L'avantage économique provient du faible coût du combustible nucléaire.
- La production d'électricité à partir d'une centrale nucléaire est moins souple que celle d'une centrale traditionnelle, et ce, pour deux raisons : Les centrales engendrent des coûts, même lorsqu'elles ne produisent pas d'énergie. Des raisons techniques limitent l'amplitude et la fréquence de grands déplacements de charge.
- Les répercussions d'un rejet de matières radioactives par une centrale nucléaire seraient très graves. L'exploitation sécuritaire des centrales exige une attention extrême. Les risques causés par une centrale à combustible fossile sont beaucoup plus bas, mais certains dommages à l'environnement sont inévitables.

- Les centrales à combustible fossile produisent de forts volumes de déchets relativement inoffensifs. Les centrales nucléaires produisent de petites quantités de déchets extrêmement dangereux, qui sont dangereux pendant un temps très long.
- Les deux types de centrales produisent de vastes quantités de chaleur résiduelle. Toutefois, on ne croit pas que cette chaleur résiduelle cause des problèmes graves.

10.6 Le « flux » d'énergie

Dans l'introduction de ce chapitre, nous avons précisé que la source de chaleur était la principale différence entre les centrales alimentées par des combustibles fossiles et les centrales nucléaires. La taille de leur « machine à vapeur » constitue une autre différence.

Une bonne centrale classique produit de la vapeur chaude, à haute pression (sèche). La température et la pression de la vapeur produite par un réacteur CANDU sont plus basses (il s'agit de vapeur saturée, presque humide). On doit utiliser un flux plus important de vapeur pour transférer la même quantité d'énergie. En conséquence, la tuyauterie et la turbine sont plus grosses que les installations équivalentes d'une centrale classique de même importance.

Pour augmenter la température et la pression de la vapeur, il aurait fallu concevoir le CANDU avec des matériaux plus épais. Or, la tuyauterie dans laquelle circule le caloporteur lorsqu'il est en contact avec le combustible absorbe les neutrons, et ceci nuit à la fission. Elle ne peut être plus épaisse. En outre, il faudrait changer la structure du combustible pour qu'il puisse supporter une température plus élevée.

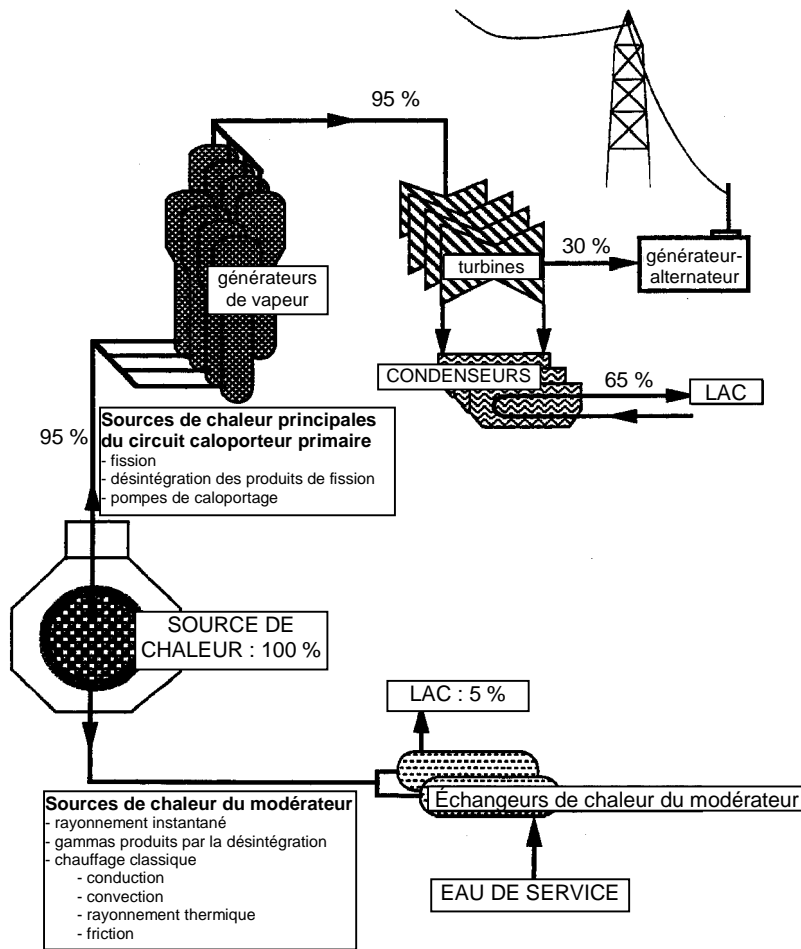


Figure 10.2
Les grands flux d'énergie d'une centrale CANDU

L'utilisation de vapeur saturée diminue l'efficacité thermique de la centrale nucléaire.

Les appareils qui transforment l'énergie thermique en énergie mécanique ne sont jamais très efficaces. Une centrale classique rejette environ 60 % (en arrondissant) de l'énergie extraite de la combustion du pétrole ou du charbon. Une centrale nucléaire perd jusqu'à 70 % de son énergie. (Un moteur d'automobile est encore moins efficace.)

La source de cette inefficacité est la turbine à vapeur. Pour tourner, une turbine doit subir une pression élevée à une extrémité et une pression faible à l'autre. Le condenseur condense la vapeur de sortie

avec de l'eau froide, afin de maintenir cette différence de pression. La chaleur contenue dans l'eau est perdue.

L'efficacité du transfert d'énergie dépend presque complètement de la différence de température entre la vapeur chaude et l'eau de condensation froide. Une vapeur plus froide implique qu'une fraction plus importante de la chaleur est perdue.

Dans ce qui suit, nous décrivons le flux d'énergie en détail, en utilisant des nombres typiques. Cette information permet de comprendre l'utilité et l'utilisation des systèmes que nous décrivons plus loin.

Le permis d'exploitation des réacteurs CANDU limite la production totale de chaleur à pleine puissance. Le permis des plus petits réacteurs impose une limite de presque $1700 \text{ MW}_{\text{th}}$, alors que ceux des grands réacteurs restreignent la production à $2800 \text{ MW}_{\text{th}}$. On mesure en mégawatt la puissance, c'est-à-dire le taux de production et de transfert d'énergie. Un réacteur produisant $2800 \text{ MW}_{\text{th}}$ doit « écouler » 2800 mégajoules par seconde. Pour bien comprendre où va toute cette énergie, consultez la figure 10.2, pendant la lecture de ce qui suit :

Les condenseurs rejettent dans le lac environ 65 % de toute l'énergie thermique produite.

La turbine convertit environ 30 % de toute l'énergie thermique produite en énergie mécanique qui, à son tour, est transformée en énergie électrique par le générateur-alternateur. Le réseau électrique distribue cette énergie à ses clients, hormis la fraction consommée par les appareils de la centrale.

Environ 5 % de toute l'énergie disparaît sous la forme de chaleur dans le système du modérateur. Ce pourcentage inclut une petite quantité de chaleur qui s'échappe dans le blindage qui entoure le cœur. Des échangeurs de chaleur refroidissent ce système en transférant la chaleur au lac.

On pourrait théoriquement évacuer la vapeur dans l'atmosphère. Ceci serait toutefois encore moins efficace.

On a attribué une désignation propre à chaque forme d'énergie. Nous les définissons et en donnons la valeur prévue dans les paragraphes qui suivent.

La puissance thermique du réacteur est la chaleur nette transférée par seconde du combustible au caloporteur. La puissance communiquée aux générateurs de vapeur par un grand réacteur peut atteindre

2700 MW_{th}. La pression de la vapeur produite par les générateurs fait tourner la turbine qui actionne le générateur-alternateur.

On appelle *puissance électrique brute*, la puissance électrique issue du générateur. Normalement, environ 30 % de la puissance thermique est transformée en électricité, c'est ce qu'on appelle l'efficacité thermique du processus de conversion d'énergie.

L'efficacité thermique du réacteur est définie comme le rapport entre la puissance électrique brute et la puissance thermique du réacteur.

On appelle *puissance de service de la centrale*, la partie de l'électricité produite, utilisée par la centrale, elle constitue environ 5 % de la production du générateur. Le reste de l'électricité produite alimente le réseau c'est la *puissance électrique nette*. Dans notre exemple, à pleine puissance, la production d'un réacteur se ventile comme suit :

puissance thermique du réacteur	2700 MW _{th}
puissance électrique brute	837 MW _e
puissance de service du réacteur	47 MW _e
puissance électrique nette	790 MW _e
efficacité thermique du réacteur	$837/2700 = 31 \%$

À 80 % de la pleine puissance, la production électrique nette serait de 632 MW_e.

Cette valeur ne tient pas compte de la chaleur perdue dans le modérateur. Dans cet exemple, puisque le modérateur absorbe environ 120 MW_{th}, la chaleur totale tirée du combustible est de 2820 MW_{th}.

Certaines centrales donnent des chiffres d'efficacité globale nette. Cette valeur est le rapport entre la puissance de l'électricité produite et de la puissance tirée du combustible. Dans notre exemple, elle vaudrait $790/2820 = 28 \%$.

10.7 Notions principales

- Le permis d'une centrale stipule la puissance thermique maximale que l'on peut tirer du combustible.

- La puissance thermique du réacteur n'est pas toute utilisée pour la production de la vapeur. Le système du modérateur absorbe environ 5 % de la chaleur.
- L'ensemble turbine-générateur transforme en électricité, environ 30 % de la puissance thermique du réacteur : la puissance électrique brute.
- L'efficacité thermique du réacteur est le rapport entre la puissance électrique brute et la puissance thermique du réacteur.
- Le fonctionnement de la centrale absorbe environ 5 % de la puissance électrique brute (la puissance de service de la centrale). Le reste, la puissance électrique nette, est vendu pour générer des revenus.

10.8 Exercices

1. On trouve dans le cœur d'un réacteur le combustible, le caloporteur et le modérateur. Quelles sont leurs fonctions et, dans un réacteur CANDU, de quelle substance sont-ils constitués?
2. Donnez les plus grands avantages et inconvénients, selon vous, de la production nucléaire d'électricité par rapport à la production par des centrales à combustible fossile. Justifiez brièvement vos choix.
3. Expliquez brièvement comment de meilleures mesures de conservation d'énergie affecteraient (il n'y a pas de réponse unique) :
 - a) les aspects économiques de la production d'énergie à partir des combustibles nucléaires et fossiles,
 - b) l'environnement.
4. Que signifient les expressions :
 - a) puissance électrique nette?
 - b) puissance thermique du réacteur?
 - c) efficacité thermique?

