

1 Objectifs

1.1 Aperçu du cours

Principes fondamentaux du réacteur CANDU est un cours d'initiation au fonctionnement des réacteurs de ce type. Commenant par un rappel des bases de la théorie atomique, il explique la structure du réacteur, de ses systèmes principaux et explique suffisamment la physique des réacteurs pour qu'un participant comprenne les pratiques des commandes et de l'exploitation d'une centrale CANDU. Nous avons placé l'accent sur la sûreté nucléaire et les systèmes qui minimisent les risques causés par les produits de fission dans le cœur du réacteur.

1.2 Structure de l'atome

- Nommer les particules atomiques fondamentales.
- Connaître la masse et la charge électrique des particules fondamentales.
- Pouvoir décrire les atomes à l'aide du modèle de Bohr.
- Reconnaître, interpréter et utiliser la notation ${}^A_Z X$ pour les atomes (nucléides).
- Connaître la signification du mot isotope.
- Connaître et utiliser le nom des isotopes de l'hydrogène.

1.3 Radioactivité — phénomènes nucléaires spontanés

- Écrire les équations types décrivant l'émission de chaque type de rayonnement : α , β et γ .
- Énumérer les propriétés des rayonnements α , β et γ .
- Connaître le mode d'interaction avec la matière, des rayonnements α , β et γ .
- Expliquer comment l'on peut se protéger des rayons α et β .
- Expliquer comment l'on peut se protéger des rayons γ , et calculer le blindage effectif à partir des couches de demi-atténuation.

1.4 Stabilité et instabilité nucléaires

- Pouvoir discuter de la stabilité des noyaux, en fonction du rapport neutron/proton et des forces intranucléaires.
- À l'aide d'un graphique du nombre de neutrons (N) en fonction du nombre de protons (Z), prédire le type d'émission probable d'un noyau donné.
- À partir d'une carte ou d'un tableau des nucléides, énumérer tous les nucléides de la chaîne de désintégration d'un noyau donné.

1.5 Activité et période

- Pouvoir définir les unités normalement utilisées pour exprimer l'activité : le becquerel, le curie.
- Pouvoir définir la période, et discuter d'activité en utilisant la notion de période.
- Réaliser des calculs simples d'activité et de période.

1.6 Les neutrons et leurs interactions

- Écrire les équations décrivant chacune des interactions neutroniques suivantes : transmutation, capture radiative et production d'un photoneutron par le deutérium.
- Décrire les diffusions élastiques et inélastiques des neutrons.

1.7 La fission

- Expliquer d'où provient l'énergie libérée par la fission (conversion masse-énergie).
- Écrire une équation typique de réaction nucléaire.
- Pouvoir dire combien d'énergie est libérée par une fission.
- Expliquer sous quelle forme se trouve la plus grande partie de l'énergie libérée par la fission.
- Définir les termes suivants : neutrons thermiques, neutrons rapides, neutrons instantanés, neutrons retardés.

- Définir les termes suivants : section efficace d'absorption de neutron et flux neutronique.
- Expliquer ce qu'est une réaction en chaîne auto-entretenu.

1.8 Combustible, modérateur et gestion du réacteur

- Expliquer la fonction du modérateur.
- Esquisser l'architecture fondamentale du combustible et du modérateur dans un réacteur CANDU.
- Justifier l'organisation physique du combustible et du modérateur des réacteurs CANDU.
- Donner les différences fondamentales entre le combustible frais et le combustible à l'équilibre.
- Comparer les propriétés modératrices de l'eau lourde, de l'eau légère et du graphite.

1.9 Sûreté nucléaire

- Décrire la composition du rayonnement naturel et expliquer la contribution des centrales nucléaires à ce rayonnement.
- Expliquer ce que signifie la défense en profondeur.
- Décrire les cinq éléments du modèle de la *défense en profondeur*.
- Énumérer les cinq barrières qui protègent le public des produits de fission.
- Expliquer comment les principes de « contrôle-refroidissement-confinement » gouvernent la conduite du réacteur.
- Expliquer comment les « concepts » suivants contribuent à la fiabilité et la disponibilité des systèmes et appareils : redondance, indépendance, diversité, essais périodiques, fonctionnement en sécurité intégrée, surveillance opérationnelle, entretien préventif.
- Expliquer la fonction des documents suivants : Rapport sur la sûreté, Permis d'exploitation de la centrale, Lignes de conduite

pour l'exploitation (LCE), Procédures d'exploitation de la centrale, Certificats d'approbation.

- Donner les conséquences probables d'une infraction aux LCE.
- Décrire comment on favorise la sûreté nucléaire en exigeant l'accréditation des titulaires de certains postes.

1.10 Réacteurs de puissance

- Connaître quels sont le combustible, le caloporteur et le modérateur utilisés par un réacteur CANDU.
- Énumérer les avantages et les inconvénients d'une centrale nucléaire par rapport aux centrales à combustible fossile, relativement à : l'économie, la souplesse de la production d'énergie et les facteurs environnementaux.

1.11 Construction d'un réacteur CANDU

- Expliquer la fonction des éléments suivants d'un réacteur : tube de force, disques de rupture de calandre, tubes de calandre, gaz annulaire, raccord d'extrémité, conduite d'alimentation, bouchon de fermeture, machine de chargement du combustible, loquet à combustible, blindages biologique et thermique, bouclier d'extrémité, bouchon écran, bouclier caisson, voûte du réacteur.
- Sur un schéma d'un canal de combustible ou d'un raccord d'extrémité sur la face d'un réacteur, identifier les éléments suivants : raccord d'extrémité, bouchon de fermeture de canal, raccord d'alimentation, soufflets d'étanchéité, palier lisse, grappe de combustible, tube de force, tube de calandre, plaque tubulaire côté calandre, tube de revêtement, bouchon écran, bouclier d'extrémité, plaque tubulaire côté machine de chargement.
- Expliquer les fonctions du circuit du gaz annulaire.
- Donner trois avantages des tubes de force (utilisés dans les réacteurs CANDU) par rapport aux réacteurs à cuve sous pression.

1.12 Modérateur et circuit du modérateur

- Donner la signification du terme « teneur isotopique du D₂O » et expliquer pourquoi elle doit être la plus élevée possible.

- Expliquer la fonction du concentrateur d'eau lourde.
- Énumérer les trois principaux isotopes radioactifs produits dans le modérateur.
- Connaître les dangers dus aux rayonnements émis par chaque isotope.
- Connaître les deux raisons principales pourquoi les neutrons produisent plus de tritium dans le modérateur que dans le liquide caloporteur.
- Donner deux fonctions du circuit du modérateur.
- Connaître les trois sources principales du réchauffement du modérateur.
- Expliquer pourquoi la présence d'un circuit de refroidissement auxiliaire (de secours) est nécessaire.
- Sur schéma du circuit du modérateur, identifier les éléments importants suivants : pompes, échangeurs de chaleur, vannes de régulation de la température du modérateur.
- Décrire comment la température du modérateur est régulée.

1.13 Circuit de gaz de couverture et circuits auxiliaires du modérateur

- Sur un schéma du circuit principal du modérateur, montrer où est raccordé le circuit d'épuration du modérateur.
- Expliquer quelles sont les trois fonctions principales du circuit du gaz de couverture du modérateur.
- Pour un réacteur doté d'un réservoir de drainage, énoncer deux fonctions supplémentaires du circuit du gaz de couverture du modérateur.
- Sur un schéma du circuit de gaz de couverture du modérateur, identifier les éléments suivants : compresseurs (deux fonctions), système de recombinaison, échangeur de chaleur, réchauffeur d'entrée du système de recombinaison, pare-flammes.

- Donner la fonction de chacun des éléments suivants du circuit de gaz de couverture du modérateur : compresseurs (deux fonctions), système de recombinaison, échangeur de chaleur, réchauffeur d'entrée du système de recombinaison, pare-flammes.
- Expliquer l'utilité de la chromatographie en phase gazeuse, dans le circuit de gaz de couverture.
- Expliquer pourquoi l'on ajoute parfois, au circuit de gaz de couverture, les gaz suivants : oxygène et hélium.
- Énumérer les fonctions des systèmes auxiliaires du modérateur suivants : système de purification (deux fonctions), système d'addition de poison liquide, circuit de collecte du D₂O, système de refroidissement auxiliaire.
- Expliquer pourquoi il est important de conserver l'eau lourde du modérateur aussi pure que possible.
- Sur un schéma du système de purification du modérateur, identifier les éléments importants et donner leur fonction : colonnes d'échange d'ions, filtres, crépines, refroidisseurs d'épuration.
- Connaître les deux poisons absorbeurs de neutrons ajoutés au D₂O du modérateur.
- Connaître les quatre points de collecte systématique de l'eau lourde du modérateur.

1.14 Circuit caloporteur (CC)

- Donner les deux fonctions du liquide caloporteur.
- Discuter des dangers nucléaires et non nucléaires existant à proximité des appareils du circuit caloporteur d'une centrale.
- Sur un schéma d'un circuit caloporteur type, identifier les éléments principaux : pompes principales du circuit caloporteur, canaux de combustible, collecteur d'entrée du réacteur, collecteur de sortie du réacteur, conduites d'alimentation, générateur de vapeur (la « chaudière »).
- Donner la fonction des éléments principaux du circuit caloporteur : pompes principales du circuit caloporteur, canaux

de combustible, collecteur d'entrée du réacteur, collecteur de sortie du réacteur, conduites d'alimentation, générateur de vapeur (la « chaudière »).

- Expliquer pourquoi l'écoulement dans le circuit caloporteur est bi-directionnel.
- Expliquer pourquoi, dans le circuit caloporteur principal, les pompes sont-elles placées après le générateur de vapeur.
- Expliquer la fonction du circuit de refroidissement à l'arrêt.
- Expliquer l'importance de la circulation par convection naturelle pour le circuit caloporteur.

1.15 Systèmes auxiliaires du circuit caloporteur

- Donner les deux fonctions principales du système de contrôle de la pression et de l'inventaire.
- Sur un schéma du système de contrôle de la pression et de l'inventaire, identifier les éléments suivants : pressuriseur, vannes de purge de la vapeur du pressuriseur, réchauffeurs du pressuriseur, vannes d'alimentation, vannes de purge, pompes d'alimentation (pompes du pressuriseur), condenseur de purge, refroidisseur de purge, réservoir de stockage du D₂O.
- Donner la fonction des éléments suivants : pressuriseur, vannes de purge de la vapeur du pressuriseur, réchauffeurs du pressuriseur, vannes d'alimentation, vannes de purge, pompes d'alimentation (pompes du pressuriseur), condenseur de purge, refroidisseur de purge, réservoir de stockage du D₂O.
- Donner la fonction de chacun des systèmes auxiliaires du circuit caloporteur qui suit : système de protection contre la surpression, circuit d'épuration, circuit de collecte du D₂O du circuit caloporteur, système de récupération du D₂O du circuit caloporteur, approvisionnement en D₂O de la machine de chargement du combustible.
- Expliquer pourquoi il est important d'avoir un bon contrôle chimique du caloporteur.
- Expliquer la fonction et le principe de fonctionnement du joint d'étanchéité de la pompe du circuit caloporteur, ainsi que du système d'alimentation du joint d'étanchéité.

- Expliquer pourquoi l'on ne verse pas de l'eau lourde du circuit caloporteur dans le modérateur et vice-versa.
- Donner deux raisons pourquoi il y a davantage de fuites dans le circuit caloporteur que dans le circuit du modérateur.
- Énumérer quatre points où le liquide fuyant du circuit caloporteur est habituellement collecté.

1.16 Le combustible CANDU

- Expliquer ce que signifie l'expression « combustible défectueux ».
- Expliquer comment on utilise le combustible CANLUB et ce que signifie son nom.
- Sur un diagramme d'une grappe de combustible, identifier les éléments suivants : crayon de combustible, gaine de combustible, pastille de combustible, plaque d'extrémité, patin.
- Donner sept caractéristiques (deux nucléaires et cinq non nucléaires) que devrait posséder le matériau du combustible nucléaire.
- Donner quatre caractéristiques (une nucléaire et trois non nucléaires) que devrait posséder le matériau de la gaine du combustible nucléaire.
- Donner trois raisons pour lesquelles la couche de graphite CANLUB prévient l'endommagement du combustible.
- Donner les six précautions qu'il convient de prendre lors de la manutention du combustible frais.
- Donner les trois précautions qu'il convient de prendre lors de la manutention du combustible épuisé.
- Décrire la procédure générale qu'il convient de suivre lors de l'ajout de combustible frais dans un canal.
- Donner trois conséquences sur le fonctionnement d'une centrale, de la présence de grappes endommagées dans un réacteur.

- Connaître et pouvoir expliquer deux fonctions du combustible appauvri et connaître les concentrations en ^{235}U du combustible normal et du combustible appauvri.

1.17 Cycle de vie des neutrons

- Faire un schéma du cycle de vie d'un neutron, montrant tous ses « destins » possibles.
- Commenter l'utilité des réflecteurs dans les réacteurs.

1.18 Criticité et multiplication des neutrons

- Définir la constante de multiplication des neutrons (k).
- Définir la réactivité (Δk) et donner les unités dans lesquelles on l'exprime.
- Expliquer, en utilisant k et Δk , ce que signifient les adjectifs : sous-critique, critique et supercritique, et préciser si la puissance produite augmente, diminue ou reste stable.
- Expliquer comment un réacteur peut être critique, quelle que soit sa puissance.
- Pouvoir donner une méthode de contrôle de la criticité et discuter comment elle affecte le cycle de vie des neutrons.

1.19 Changements dans la puissance du réacteur au fil du temps

- Définir ce qu'est la période du réacteur.
- Expliquer pourquoi et comment les neutrons retardés changent la puissance du réacteur.
- Expliquer pourquoi la puissance d'un noyau sous-critique ne tombe-t-elle pas à zéro.

1.20 Un produit de fission agissant comme poison : le xénon

- Expliquer pourquoi le xénon est le pire poison produit par la fission.
- Expliquer le mécanisme de production du xénon et comment on retire ce gaz du réacteur.

- Tracer le graphique de l'évolution de la concentration de xénon en fonction du temps après l'arrêt volontaire ou d'urgence du réacteur fonctionnant à sa puissance maximale.
- Expliquer la signification de l'expression « empoisonnement par le xénon ».

1.21 Effets des changements de température sur la réactivité

- Définir les expressions suivantes : coefficient de température de la réactivité, réactivité cavitaire, coefficient de puissance.
- Expliquer pourquoi et comment la réactivité change-t-elle lorsque la température du combustible augmente.
- Expliquer pourquoi il est souhaitable que le coefficient de température de la réactivité soit négatif.

1.22 Contrôle du flux de neutrons

- Expliquer pourquoi l'aplanissement du flux de neutrons est-il souhaitable.
- Expliquer comment chacune des méthodes utilisées dans les réacteurs CANDU aplanissent le flux.
- Expliquer en quoi consistent les oscillations de flux et comment les prévient-on grâce aux zones de contrôle liquides.

1.23 Mécanismes de contrôle de la réactivité

- Expliquer comment l'on entretient normalement la réactivité du noyau (à long terme).
- Expliquer les deux fonctions générales des mécanismes de réactivité.
- Préciser, pour chacun des mécanismes suivants de contrôle de la réactivité, s'il est utilisé (1) pour réguler la puissance du réacteur ou (2) comme mesure de protection : système de contrôle de zone liquide, barres de commande, barres de compensation, barres d'arrêt, addition de poison liquide, injection de poison liquide, niveau du modérateur, drainage du modérateur.
- Expliquer le principe du fonctionnement des trois types de systèmes de protection par arrêt des réacteurs CANDU.

- Décrire comment la logique du système « deux-sur-trois » déclenche un arrêt d'urgence du réacteur.
- Donner trois avantages du recours à la logique d'arrêt « deux-sur-trois ».
- Donner la signification de l'expression « sûr en cas de défaillance ».
- Décrire comment l'intégration au réacteur de « la sûreté en cas de défaillance » contribue à la fiabilité des systèmes d'arrêt d'urgence.

1.24 Injection d'urgence de caloporteur et confinement

- Nommer les quatre systèmes spéciaux de sûreté, conçus pour protéger le public du rayonnement.
- Expliquer la fonction du système de confinement.
- Expliquer la fonction du système d'injection d'urgence du caloporteur.
- Sur un schéma du système d'injection d'urgence du caloporteur, identifier les éléments suivants : alimentation d'eau à haute pression, vannes d'isolation (ou d'injection), puisard de collecte, pompes de récupération, échangeurs de chaleur de récupération, eau à basse pression.
- Donner la fonction des éléments suivants du système d'injection d'urgence du caloporteur : alimentation d'eau à haute pression, vannes d'isolation (ou d'injection), puisard de collecte, pompes de récupération, échangeurs de chaleur de récupération, eau à basse pression.
- Décrire le fonctionnement normal du système d'injection d'urgence du caloporteur lors d'un accident dû à la perte de réfrigérant primaire (APRP).
- Décrire les deux types de systèmes de confinement des réacteurs CANDU.
- Sur un schéma du système de confinement à pression négative, identifier les éléments suivants : réservoir d'eau d'aspersion, vannes de décharge actionnées par la pression, conduite sous

vide, conduite de décharge de pression, structure de confinement, bâtiment sous vide.

- Sur un schéma du système de confinement à suppression de pression, identifier les éléments suivants : réservoir d'eau d'aspersion, vanne d'aspersion, structure de confinement.

1.25 Les éléments non nucléaires de la centrale

- Donner les deux principales fonctions du cycle vapeur-eau d'alimentation.
- Décrire les conditions de la vapeur (humidité, température, pression) aux points suivants du circuit de vapeur : sortie de la turbine haute-pression, sortie du séparateur d'humidité, sortie du réchauffeur et sortie de la turbine basse-pression.
- Expliquer la fonction de l'ensemble turbine-générateur.
- Justifier la présence de turbines haute-pression et basse-pression.
- Expliquer l'avantage de créer un vide dans le condenseur lorsque le réacteur est en production.
- Sur un schéma, identifier les éléments qui suivent, indiquer les conduites de vapeur et d'eau entre eux, et préciser la direction de l'écoulement : générateur de vapeur, soupape de sécurité, vanne de décharge de la vapeur dans l'atmosphère, vanne d'arrêt d'urgence, vanne de régulation, turbine haute-pression, séparateur d'humidité, réchauffeur, turbine basse-pression, condenseur, pompe d'extraction du condensat, réchauffeurs d'eau, dégazeurs, pompe d'alimentation du générateur de vapeur.
- Expliquer la fonction de chacun des éléments suivants du cycle de vapeur et d'eau d'alimentation : générateur de vapeur, soupape de sécurité, vanne de décharge de vapeur dans l'atmosphère, vanne d'arrêt d'urgence, vanne de régulation, turbine haute-pression, séparateur d'humidité, réchauffeur, turbine basse-pression, condenseur, pompe d'extraction du condensat, réchauffeurs, dégazeurs, pompe d'alimentation du générateur de vapeur.
- Savoir vers quelle autre source froide peut-on évacuer l'énergie thermique si la turbine n'est pas opérationnelle.

- Décrire le processus de préparation auquel est soumise l'eau condensée, avant qu'elle pénètre dans le générateur de vapeur.
- Décrire le système de lubrification du générateur-alternateur raccordé à la turbine.
- Expliquer l'utilité du vireur.
- Justifier pourquoi l'on doit maintenir l'eau d'alimentation et la vapeur dans un bon état chimique, et expliquer les méthodes utilisées pour y parvenir.

1.26 Autres grands systèmes

- Décrire comment un générateur-alternateur produit de l'énergie électrique.
- Expliquer comment un grand générateur-alternateur produit de la chaleur et comment on l'évacue.
- Décrire les dangers principaux posés par le générateur de vapeur, la turbine et les circuits de vapeur et d'eau d'alimentation.
- Décrire la fonction des composants suivants : le transformateur principal de sortie, le poste extérieur, le transformateur d'alimentation du réacteur et le transformateur d'alimentation des systèmes.
- Nommer les quatre catégories d'alimentation électrique d'une centrale CANDU et expliquer leurs fonctions.
- Nommer la source d'énergie de relève en cas de défaillance de l'une ou des deux sources de catégorie IV.
- Préciser la fonction de l'alimentation électrique d'urgence.
- Sur un schéma, indiquer les réseaux et les systèmes d'eau légère suivants : station de traitement d'eau, eau de refroidissement du condenseur, eau de service commune, eau de service à basse pression, eau de service recirculée à haute pression et circuit fermé de refroidissement par eau de service déminéralisée.
- Expliquer l'utilité des réseaux d'eau légère suivants : station de traitement d'eau, eau de refroidissement du condenseur, eau de

service commune, eau de service à basse pression, eau de service recirculée à haute pression et circuit fermé de refroidissement par eau de service déminéralisée.

- Expliquer la fonction du réseau d'alimentation d'urgence en eau.
- Expliquer la fonction des trois réseaux d'alimentation en air d'une centrale nucléaire.
- Expliquer comment le matériel est identifié dans la centrale et sur les schémas de circulation.
- Décrire comment les circuits de tuyauteries sont codés et pourquoi.
- Décrire brièvement les éléments caractéristiques de la gestion des déchets liquides et solides.
- Décrire comment, dans une centrale CANDU, on gère l'eau lourde de façon à en minimiser la perte.
- Décrire la fonction de l'usine d'extraction du tritium et le procédé sur lequel elle est fondée.