



Progression d'un accident grave sans intervention de l'opérateur

Installation : Darlington
Classification : Non classifié

Octobre 2015



Sommaire

Après l'accident survenu à la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi en 2011, un des nombreux engagements pris par la Commission canadienne de sûreté nucléaire (CCSN) dans son Plan d'action intégré concernait la réalisation d'une évaluation et d'une présentation vidéo pour le public au sujet de la progression d'une panne totale d'électricité dans une centrale nucléaire CANDU au Canada. La vidéo a été mise en ligne en janvier 2013. Conformément à son engagement, la CCSN publie maintenant le présent document technique, qui évalue le déroulement d'une panne d'électricité hypothétique en se servant de la centrale nucléaire Darlington aux fins d'illustration.

Il a été nécessaire, pour l'évaluation, de partir de l'hypothèse extrêmement peu probable que les opérateurs n'interviennent d'aucune façon après la perte prolongée d'électricité à la centrale. L'évaluation ne sert pas à déterminer les effets des rejets, mais plutôt à établir la chronologie et évaluer l'ampleur des rejets potentiels pour établir quelles sont les interventions possibles pour l'opérateur afin de prévenir les rejets. L'évaluation indique également toutes les étapes où l'intervention de l'opérateur devient essentielle pour stopper la progression d'un accident. De plus, l'évaluation montre que l'opérateur a suffisamment de temps pour intervenir.

Le personnel de la CCSN a examiné et accepté les résultats de l'étude probabiliste de sûreté (EPS) de niveau 2 pour Darlington effectuée par Ontario Power Generation (OPG), y compris l'analyse du scénario hautement improbable d'une panne d'électricité à la centrale sans intervention de l'opérateur. Dans ce scénario, les sources d'alimentation électrique externes, les génératrices de secours au diesel et les génératrices d'urgence ne sont pas disponibles.

Dans son résumé des données d'OPG, le personnel de la CCSN a porté attention au fait que les réacteurs actuellement en exploitation au Canada offrent de multiples niveaux de défense en profondeur pour prévenir les accidents. L'événement initiateur hypothétique d'une panne d'électricité prolongée à la centrale est, en soi, hautement improbable et exigerait de multiples défaillances des systèmes de sûreté de la centrale. Cet événement dépend aussi de l'incapacité du personnel de la salle de commande à effectuer les interventions les plus simples dans la salle de commande, conformément aux procédures de sûreté établies.

Selon un tel événement hypothétique, il pourrait y avoir rejet de radioactivité dans l'environnement en raison d'une fusion grave du cœur, à environ 11 heures (première phase des rejets) après le début de cette panne prolongée d'électricité non atténuée à la centrale. Ensuite, 23 heures après le début du scénario, l'intégrité du confinement serait compromise en raison d'une défaillance structurale, ce qui entraînerait la deuxième phase des rejets à environ 25 heures. Enfin, on s'attend à ce que l'interaction entre le béton et le cœur en fusion se produise à environ 58 heures après le début de la panne, entraînant un rejet additionnel de produits de fission dans l'enceinte de confinement et dans l'environnement.

Les résultats de l'analyse d'un accident grave MAAP4-CANDU, effectuée par OPG dans le cadre de son EPS de niveau 2 pour la centrale Darlington, indiquent qu'une simple intervention effectuée par le personnel de la salle de commande offrirait environ 8 à 10 heures supplémentaires de refroidissement passif du cœur en fournissant de l'eau facilement accessible aux générateurs de vapeur. Conformément aux procédures d'exploitation, le personnel de la salle de commande a pour

instruction d'ouvrir les soupapes de sûreté-décharge pour dépressuriser les générateurs de vapeur et permettre leur remplissage avec l'eau , par l'effet de la gravité. Cette intervention pourrait être effectuée à partir de la salle de commande principale ou de la salle de commande auxiliaire, et le personnel de la salle de commande aurait plus d'une heure pour le faire. Après cette intervention, les opérateurs sur le terrain auraient suffisamment de temps pour raccorder des équipements portatif d'atténuation en cas d'urgence et ainsi assurer un refroidissement continu des générateurs de vapeur. Un raccordement réussi des équipements d'atténuation en cas d'urgence pourrait stopper complètement la progression de l'accident. De telles interventions font l'objet d'exercices réguliers et réussiraient fort probablement à mettre fin à la progression de l'accident et à prévenir tout rejet de matière radioactive dans l'environnement.

La probabilité d'occurrence de l'accident décrit dans ce scénario est très faible en raison des multiples mécanismes de sûreté en place. Toutefois, depuis l'accident de Fukushima, les centrales nucléaires au Canada ont apporté de nombreuses améliorations à la sûreté qui portent sur la prévention et l'atténuation des accidents graves. Ces améliorations à la sûreté réduiront davantage la probabilité de dommages graves au cœur découlant d'une panne d'électricité prolongée et la possibilité de rejets radioactifs.

Table des matières

SOMMAIRE	- 2 -
TABLE DES MATIÈRES	- 4 -
1. INTRODUCTION	- 5 -
2. MÉTHODOLOGIE ET SCÉNARIO DE BASE	- 5 -
3. RENSEIGNEMENTS GÉNÉRAUX	- 5 -
4. PROGRESSION DE L'ÉVÉNEMENT	- 6 -
5. DISCUSSION SUR LA FRÉQUENCE D'ÉVÉNEMENTS ET LES REJETS DE PRODUITS DE FISSION - 10 -	
5.1 FRÉQUENCE DE L'ÉVÉNEMENT	- 10 -
5.2 EFFETS DE L'INVENTAIRE DES ÉCHANGEURS DE CHALEUR (GÉNÉRATEURS DE VAPEUR).....	- 11 -
6.0 CONCLUSION	- 11 -
ANNEXE A : HYPOTHÈSE DE DISPONIBILITÉ DES SYSTÈMES DANS LA SIMULATION MAAP4 D'UNE PANNE PROLONGÉE D'ÉLECTRICITÉ DANS UNE CENTRALE CANDU	- 13 -
ANNEXE B : DESCRIPTION DE LA PROGRESSION D'UNE PANNE PROLONGÉE D'ÉLECTRICITÉ DANS UNE CENTRALE SANS INTERVENTION DE L'OPÉRATEUR	- 15 -

1. Introduction

En se servant des résultats de l'étude probabiliste de sûreté (EPS) de niveau 2 effectuée par Ontario Power Generation (OPG), le personnel de la CCSN a vérifié la progression d'un scénario hypothétique de panne d'électricité prolongée à la centrale nucléaire Darlington. Ce scénario d'accident grave accorde une attention importante au fait que les réacteurs actuellement en exploitation au Canada offrent de multiples niveaux de défense en profondeur pour prévenir les accidents menant à la fusion du cœur du réacteur. Ce document aborde également la façon dont les interventions du personnel de la salle de commande et des opérateurs sur le terrain peuvent retarder et empêcher complètement la fusion du cœur, puisqu'il existe plusieurs options de refroidissement pour évacuer la chaleur de désintégration (maintenir le refroidissement) en utilisant les sources d'eau de la centrale, même lorsqu'on perd le refroidissement normal.

2. Méthodologie et scénario de base

Les résultats de l'analyse MAAP4-CANDU (code informatique) effectuée pour appuyer l'EPS de niveau 2 pour Darlington ont servi à vérifier la progression d'un accident grave sans intervention de l'opérateur. L'accident particulier décrit ici est le scénario d'une panne d'électricité prolongée à la centrale, dans le cadre de laquelle les sources de courant alternatif, les génératrices de secours au diesel et les génératrices d'urgence sont considérés indisponibles. En outre, ce scénario suppose la défaillance de multiples systèmes de sûreté de la centrale, comme indiqué à l'annexe A.

3. Renseignements généraux

Les réacteurs CANDU (CANada Deutérium Uranium) actuellement en exploitation au Canada offrent de multiples niveaux de défense en profondeur pour prévenir les accidents menant à la fusion du cœur du réacteur. En cas de panne prolongée d'électricité dans une centrale, les réacteurs s'arrêteraient automatiquement dans le but de mettre fin à la réaction en chaîne, et seule la chaleur de désintégration du combustible devrait être évacuée. Les réacteurs CANDU dépendent d'interventions humaines pour fournir du liquide de refroidissement et des sources électriques supplémentaires si le refroidissement normal et le refroidissement d'urgence, conforme aux normes de sûreté, ainsi que les sources d'alimentation en électricité sont perdus et irrécupérables. Le personnel de la salle de commande ou les opérateurs sur le terrain peuvent recourir à de nombreuses options de refroidissement pour évacuer la chaleur de désintégration à l'aide des sources d'eau de la centrale, y compris les sources d'eau externes pompées par l'équipement d'atténuation en cas d'urgence portatif qui a été acheté pour donner suite aux leçons tirées de l'accident nucléaire de Fukushima Daiichi.

Le scénario où aucun opérateur n'intervient, décrit dans ce rapport, n'est pas considéré crédible. L'événement initiateur hypothétique, en lui-même, est extrêmement improbable. Le fait que le personnel de la salle de commande ne réussisse pas à effectuer les interventions les plus simples dans la salle de commande, conformément aux procédures requises dans le temps disponible (plusieurs heures), n'est pas crédible. Dans les procédures d'exploitation, les interventions de l'opérateur sont

approuvées dans les 15 minutes pour celles effectuées dans la salle de commande et dans les 30 minutes pour celles effectuées sur le terrain. L'EPS de niveau 2 de Darlington utilisée pour préparer ce rapport a été effectuée avant l'accident de Fukushima, et cette progression de l'accident ne prend pas en compte la mise en place des équipements d'atténuation en cas d'urgence permettant de retarder ou de stopper la progression de l'accident.

4. Progression de l'événement

La progression de l'accident, soit la panne prolongée d'électricité de la centrale, a été simulée en utilisant le code informatique MAAP4-CANDU. L'annexe A montre que la plupart des systèmes et des composants de sûreté sont considérés indisponibles dans ce scénario. (La disponibilité même d'un petit nombre de ces systèmes empêcherait la fusion du cœur ou la défaillance de la calandre.) L'annexe B décrit la progression de l'accident, soit la panne d'électricité prolongée de la centrale, plus en détail.

Tableau 1 – Scénario de la progression de la panne *prolongée* d'électricité à la centrale

Événements importants	Heure	Interventions clés possibles pour stopper ou atténuer la progression de l'accident
Perte complète de l'alimentation électrique – le réacteur est arrêté, et la circulation de tous les systèmes de refroidissement actifs est suspendue	0	<ul style="list-style-type: none"> • Rétablir l'alimentation électrique au circuit caloporteur primaire et aux pompes d'eau d'alimentation pour établir une source froide permanente • Rétablir les génératrices de secours pour alimenter le circuit caloporteur primaire et les pompes d'eau d'alimentation afin d'établir une source froide permanente
Assèchement des générateurs de vapeur	5,0	<ul style="list-style-type: none"> • Restaurer l'alimentation électrique d'urgence pour alimenter les pompes d'eau d'alimentation et établir une source froide permanente • Dépressuriser les générateurs de vapeur et ouvrir les vannes pour permettre l'approvisionnement d'urgence en eau d'alimentation dans les générateurs de vapeur à partir des sources de la centrale • Utiliser un équipement d'atténuation en cas d'urgence pour pomper d'eau provenant des sources externes dans les générateurs de vapeur • <i>Noter que la restauration des générateurs de vapeur en tant que source froide doit être faite lorsque</i>

Événements importants	Heure	Interventions clés possibles pour stopper ou atténuer la progression de l'accident
		<i>le niveau du liquide de refroidissement du circuit caloporteur est encore situé à presque plein</i>
Début de l'assèchement des canaux de combustible Stade 1 d'endommagement du cœur ^[1]	6,4	<ul style="list-style-type: none"> • Utiliser de 'équipements d'atténuation en cas d'urgence pour pomper d'eau provenant des sources externes dans la calandre • Restaurer le refroidissement de l'enceinte de confinement ou ventiler l'enceinte de confinement à l'aide de filtres • Utiliser des génératrices externes pour rétablir l'alimentation électrique aux pompes du système de refroidissement d'urgence par injection dans le cœur et maintenir le refroidissement du cœur à long terme
Les disques de rupture de la cuve de calandre éclatent, ce qui réduit la pression dans la cuve et entraîne le déversement du modérateur dans l'enceinte de confinement Stade 2 d'endommagement du cœur ^[2]	6,4	
Fuite importante dans l'enceinte de confinement ^[2]	6,4	
Des débris du cœur sont présents dans la cuve de la calandre	8,8	
Le cœur s'effondre Première phase des rejets dans l'atmosphère	10,7	
L'eau dans la cuve de calandre s'évapore complètement Stade 3 d'endommagement du cœur ^[1]	16,0	<ul style="list-style-type: none"> • Utiliser de l'équipements d'atténuation en cas d'urgence pour pomper d'eau provenant des sources externes vers le bouclier d'extrémité • Restaurer le refroidissement de l'enceinte de confinement ou ventiler l'enceinte de confinement à l'aide de filtres
Due à la surpression, survienne la défaillance catastrophique de la soudure située à la base du bouclier d'extrémité (pire scénario) en raison d'un control insuffisant de la pression	22,8	
Défaillance du confinement (défaillance structurale importante) ^[3]	22,9	
Défaillance de la cuve de calandre Stade 4 d'endommagement du cœur ^[1]	24,5	
La paroi latérale du bouclier d'extrémité fond complètement – le corium se déplace dans le conduit de la machine à chargement du combustible		
Une interaction limitée entre le cœur en fusion et le béton se produit avant que le corium ne se refroidisse rapidement en raison de l'eau accumulée dans le conduit Deuxième phase des rejets dans l'atmosphère	25,0	
Le corium est à l'état découvert dans le	58,3	<ul style="list-style-type: none"> • Utiliser de équipements

Événements importants	Heure	Interventions clés possibles pour stopper ou atténuer la progression de l'accident
conduit de la machine à chargement du combustible L'interaction entre le cœur en fusion et le béton se poursuit Troisième phase des rejets dans l'atmosphère		d'atténuation en cas d'urgence pour pomper d'eau provenant des sources externes afin de submerger le corium situé dans l'enceinte de confinement <ul style="list-style-type: none"> • Restaurer le refroidissement de l'enceinte de confinement ou le ventiler à l'aide de filtres • Atténuer les effets des interactions entre le cœur en fusion et le béton

^[1] Voir l'annexe B pour une description détaillée.

^[2] Une fuite importante se définit comme une fuite entraînée par une pression au-dessus de la limite de conception. Les rejets de produits de fission pourraient être peu importants à ce moment-ci si les radionucléides sont toujours contenus dans la masse de corium.

^[3] Défaillance structurale importante du bâtiment-réacteur en raison de la pression élevée. Cela est représenté comme un trou irréversible de 1 m².

Une évaluation des rejets d'iode et de césium a été menée, et est présentée au tableau 2; ces deux radionucléides sont représentatifs d'une présence radioactive à courte période (iode) et à longue période (césium). On suppose que la forme chimique prédominante à l'intérieur de l'enceinte de confinement est l'iodure de césium (CsI), et les radionucléides qui posent plus de risques sont l'iode 131 (I-131) et le césium 137 (Cs-137). Les rejets de césium 137 et d'iode 131 peuvent être estimés à l'aide des inventaires initiaux du cœur décrits dans le rapport de sûreté de la centrale nucléaire Darlington.

Ces deux radionucléides sont également représentatifs des divers dangers radiologiques : lorsque l'iode radioactif est absorbé par le corps humain en quantités importantes, il s'accumule dans la thyroïde, ce qui peut causer des cancers latents de la thyroïde.

Comme le montrent les tableaux 1 et 2, ainsi que la figure 1, l'analyse indique qu'il y a trois grandes phases de rejets de matières radioactives qui se produisent lors des moments de changements substantiels dans l'état de la fusion du cœur du réacteur. Les résultats de ces simulations indiquent que des produits de fission sont rejetés dans l'environnement 10,7 heures après le début du scénario, en raison d'une fusion avancée du cœur combinée à une fuite accrue hors l'enceinte de confinement.

L'analyse de la réponse de l'enceinte de confinement montre que, à environ 23 heures après le début de l'incident, la pression du confinement peut provoquer une défaillance structurale importante attribuable à une pression élevée en confinement. Cependant, la deuxième phase de rejets importants de matières radioactives ne devrait pas se produire que approximativement 2 heures plus tard, lorsqu'il y a la défaillance à la base du bouclier d'extrémité, en raison de la surpression. À ce moment, l'inventaire d'eau du bouclier d'extrémité et la masse de corium fondu se déversent sur le plancher du conduit de la machine à chargement du combustible.

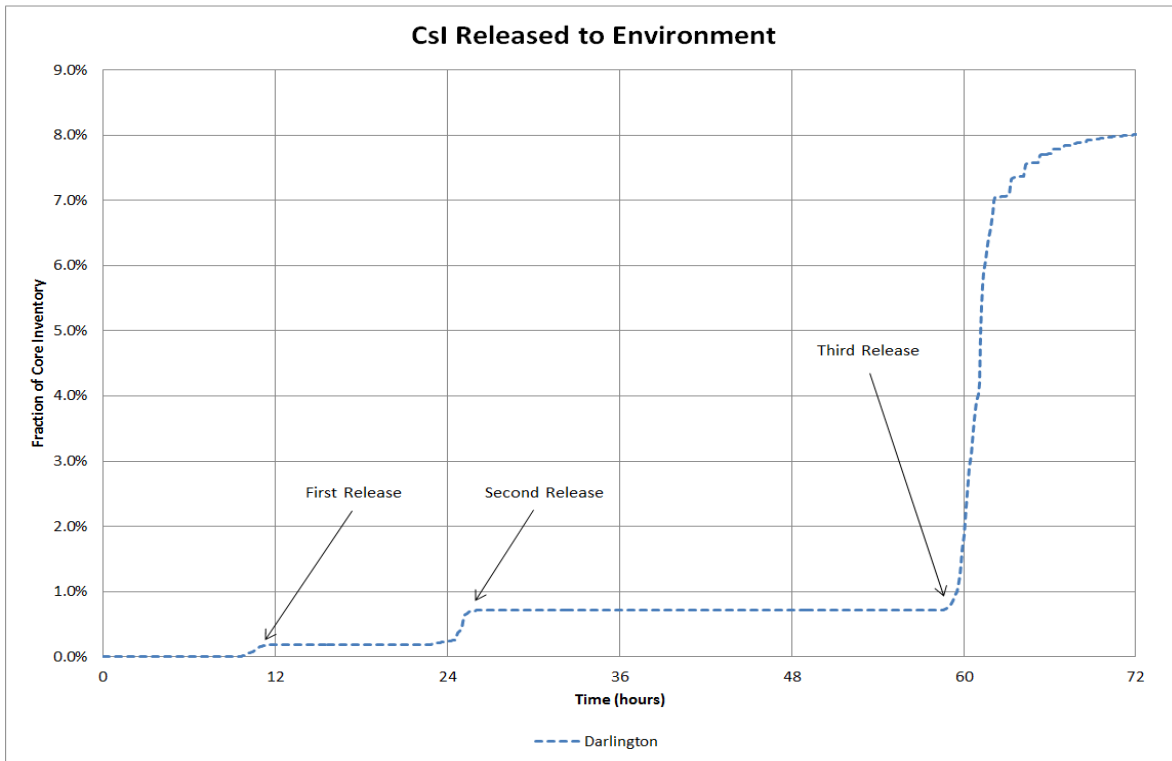
Dans le scénario de Darlington, la majeure partie des produits de fission rejetés dans l'enceinte de confinement est le résultat de l'interaction entre le cœur en fusion et le béton, qui se produit

immédiatement après que le combustible en fusion passe dans le conduit de la machine à chargement du combustible, puis à nouveau lorsque le corium est à l'état découvert. À ce moment, l'enceinte de confinement devrait perdre son intégrité et entraîner d'importants rejets dans l'environnement. Après 58 heures, la quantité d'eau en contact avec le corium est insuffisante pour éliminer toute la chaleur de désintégration. À ce moment, l'interaction entre le cœur en fusion et le béton est le principal contributeur aux rejets de matières radioactives dans l'environnement.

Tableau 2 – Rejets découlant de la panne prolongée d'électricité de la centrale

Événements importants	Heure	% du rejet du inventaire du cœur initial	Césium 137 Rejets (en Becquerels)	Iode 131 Rejets (en Becquerels)
Le cœur s'effondre Première phase des rejets dans l'atmosphère	10,7	0,2 %	$5,2 \times 10^{14}$	$2,3 \times 10^{16}$
La paroi latérale du bouclier d'extrémité fond complètement Le corium se déplace dans le conduit de la machine à chargement du combustible Inteon limitée entre le cœur en fusion et le béton se produit avant que le corium ne se durcie Deuxième phase des rejets dans l'atmosphère	25,0	0,7 %	$1,8 \times 10^{15}$	$8,2 \times 10^{16}$
Le corium est à l'état découvert dans le conduit de la machine à chargement du combustible L'interaction entre le cœur en fusion et le béton se poursuit Troisième phase des rejets dans l'atmosphère	58,3	8,0 %	$2,1 \times 10^{16}$	$9,3 \times 10^{17}$

Figure 1 – Quantité d'iodure de césium (CsI) rejetée dans l'environnement à partir de l'enceinte de confinement



CsI Released to Environment	Iodure de césium rejeté dans l'environnement
Fraction of Core Inventory	Fraction de l'inventaire du cœur
First Release	Premier rejet
Second Release	Deuxième rejet
Third Release	Troisième rejet
Time (hours)	Durée (en heures)
Darlington	Darlington

5. Discussion sur la fréquence d'événements et les rejets de produits de fission

5.1 Fréquence de l'événement

Dans une centrale nucléaire, les pannes prolongées d'électricité entraînant d'importants dommages au cœur sont les principaux contributeurs à la catégorie de rejets « grandes émissions radioactives »

« très importants » (catégorie de rejet 1 ou CR1) ; la majorité des rejets ont lieu après 24 heures. Les fréquences de des accidents, qui se trouvent dans la catégorie CR1, sont de l'ordre de 10^{-7} par an (soit, un cas tous les 10 millions d'années). L'EPS de niveau 2 pour Darlington employée pour préparer le présent rapport, a été effectuée avant l'accident de Fukushima. Elle ne tient donc pas compte de la mise en place de l'équipements d'atténuation en cas d'urgence pour retarder ou arrêter la progression des accidents.

Dans la dernière version de l'EPS de niveau 2 pour Darlington, réalisée en 2015, l'inclusion de l'équipement d'atténuation en cas d'urgence et l'élimination d'hypothèses trop prudentes offrent un modèle plus réaliste du scénario d'accident. À la lumière de ces modifications, le déroulement des événements entraînant un accident de catégorie CR1 montre une diminution d'un ordre de grandeur de la fréquence des ces accidents – c'est-à-dire, un cas tous les 100 millions d'années (10^{-8} par an).

5.2 Effets de l'inventaire des échangeurs de chaleur (générateurs de vapeur)

Le scénario limitatif d'un accident grave impliquant une panne prolongée d'électricité à la centrale Darlington montre que des rejets de produits de fission sont prédits dès la 11^e heure suivant l'événement initiateur. Les inventaires d'eau des générateurs de vapeur ont une grande incidence sur le moment où surviendra le rejet initial. Les générateurs de vapeur agissent comme de grandes sources froides au cours des premières heures de l'accident et évacuent la chaleur du circuit caloporteur, empêchant ainsi l'assèchement et la dégradation du combustible.

Pendant ce scénario d'accident, les soupapes de sûreté-décharge des générateurs de vapeur s'ouvriraient automatiquement pour évacuer la chaleur des générateurs de vapeur. Les générateurs de vapeur devraient permettre la libération des vapeurs non radioactifs dans l'atmosphère, ce qui réduirait leur chaleur et celle du circuit caloporteur.

Si les interventions de l'opérateur étaient créditées, une simple intervention effectuée par le personnel de la salle de commande pourrait grandement retarder la progression de l'accident. Dans ce cas, une fois les générateurs de vapeur dépressurisés, le personnel de la salle de commande serait en mesure de mettre en marche le système de refroidissement d'urgence des générateurs de vapeur afin d'y injecter de l'eau par l'effet de la gravité. Cette intervention pourrait permettre le refroidissement du cœur pendant 8 à 10 heures supplémentaires avec l'eau disponible dans la centrale. En raison de la diminution de la chaleur de désintégration, le refroidissement supplémentaire du cœur ferait en sorte, comme deuxième effet, que les réserves d'eau dureraient plus longtemps dans les étapes suivantes du scénario. L'utilisation par les opérateurs sur le terrain des équipements d'atténuation en cas d'urgence destinés à réapprovisionner la source d'eau des générateurs de vapeur avant leur l'assèchement, cinq heures à après l'événement initiateur) mettrait fin à l'accident.

6.0 Conclusion

L'événement initiateur hypothétique d'une panne prolongée de la centrale est en soi extrêmement improbable et nécessiterait plusieurs défaillances des systèmes de sûreté de la centrale. Dans le scénario décrit dans ce rapport, on suppose que le personnel de la salle de commande ne parviendrait pas à effectuer les interventions les plus simples prévues dans les procédures de sûreté établies pendant le temps dont il disposerait, ce qui n'est pas crédible. Par ailleurs, les équipements d'atténuation en cas d'urgence et les lignes directrices pour la gestion des accidents graves ne sont

pas crédités dans cette analyse. Même avec ces hypothèses prudentes, la probabilité d'un rejet important de substances radioactives attribuable à une panne prolongée d'électricité dans la centrale est bien inférieure aux objectifs de sûreté établis.

Les résultats de la simulation analytique indiquent qu'un rejet de produits de fission, et plus particulièrement de césium radioactif, pourrait survenir 10,7 heures après le début de l'incident à la centrale Darlington. Des rejets subséquents sont prédits après environ 25 heures, lorsque le corium est relocalisé sur le plancher du confinement, et après 58 heures, au moment où commencera l'interaction entre le cœur en fusion et le béton.

Il est à souligner, qu'une simple intervention du personnel de la salle de commande offrirait plusieurs heures de refroidissement du cœur en fournissant de l'eau facilement accessible aux générateurs de vapeur (environ 8 à 10 heures, selon le volume exact d'eau disponible à déverser dans les générateurs de vapeur et le niveau de puissance du réacteur avant l'arrêt). L'intervention vise à ouvrir les soupapes de sûreté-décharge pour dépressuriser les générateurs de vapeur et à ouvrir des vannes pour permettre l'injection de l'eau par gravité dans les générateurs de vapeur. Cette intervention, pour laquelle le personnel de la salle de commande disposerait de plus d'une heure, peut être effectuée depuis la salle de commande principale ou la salle de commande auxiliaire. Les heures supplémentaires de refroidissement passif du cœur offrirait suffisamment de temps aux opérateurs sur le terrain pour raccorder les équipements d'atténuation en cas d'urgence, assurant ainsi un approvisionnement continu en liquide de refroidissement.

Le raccordement réussit ces équipements peut arrêter entièrement la progression de l'accident. De telles interventions font régulièrement l'objet d'exercices et réussiraient fort probablement à prévenir la progression de l'accident et les rejets radioactifs dans l'environnement. Toutefois, des interventions comme celles-ci ne sont pas prises en compte dans cette étude.

Annexe A : Hypothèse de disponibilité des systèmes dans la simulation MAAP4 d'une panne prolongée d'électricité dans une centrale CANDU

Systèmes de la centrale	Disponibilité	Fonction principale du système
Courant alternatif et courant continu	Non disponible	Alimente les pompes et les instruments
Batterie	Disponible	Alimente les systèmes clés et l'instrumentation pendant une période limitée
Air d'instrumentation	Non disponible	Fait fonctionner les soupapes pneumatiques
Côté primaire		
Systèmes d'arrêt d'urgence du réacteur (SAU1/SAU2)	Disponible	Arrêtent la réaction en chaîne
Pompes de caloporteur	Arrête	Assurent la circulation continue dans le circuit caloporteur primaire
Système de refroidissement du modérateur	Non disponible	Refroidit l'eau du modérateur (calandre)
Système de refroidissement d'urgence du cœur du réacteur par injection	Non disponible	Ajoute du liquide de refroidissement au circuit caloporteur primaire
Système de refroidissement d'arrêt (système de refroidissement auxiliaire)	Non disponible	Réduit la chaleur du réacteur lorsque celui-ci est en mode arrêt
Système de refroidissement des boucliers d'extrémité	Non disponible	Réduit la chaleur des boucliers d'extrémité de
Alimentation en oxyde de deutérium (D ₂ O – eau lourde)	Non disponible	Alimente les systèmes du réacteur en eau lourde
Réchauffeur du pressuriseur	Non disponible	Permet d'accroître la pression dans le pressuriseur et, par conséquent, dans le circuit caloporteur primaire
Côté secondaire		
Eau d'alimentation principale	Non disponible	Ajoute de l'eau dans les échangeurs de chaleur à partir de condensateurs
Eau d'alimentation auxiliaire	Non disponible	Ajoute de l'eau dans les échangeurs de chaleur
Soupapes de sûreté-décharge des générateurs de vapeurs	Automatique	Permet de réduire rapidement la pression du côté secondaire des générateurs de vapeurs
Vannes de décharge de la vapeur dans l'atmosphère	Non disponible	Permet d'évacuer la vapeur dans l'atmosphère sans activer les soupapes de sûreté-décharge
Systèmes de confinement		
Unités de refroidissement de l'air	Non disponible	Refroidissent de l'air dans l'enceinte de confinement
Système de ventilation d'air filtré d'urgence	Non disponible	Permet de filtrer les rejets atmosphériques

Annexe B : Description de la progression d'une panne prolongée d'électricité dans une centrale sans intervention de l'opérateur

La description ci-dessous illustre la progression d'un accident des stades 1 à 5 de l'endommagement du cœur.

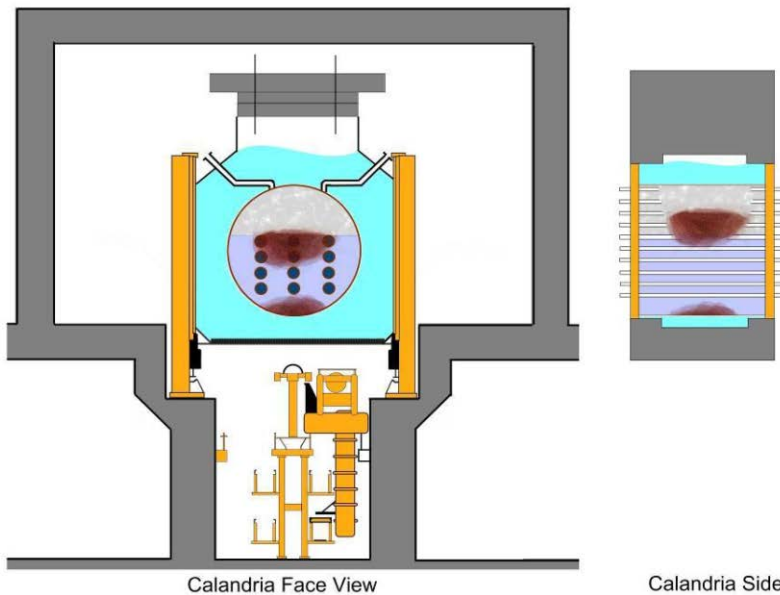
Stade 1 de l'endommagement du cœur : Réchauffement et ébullition du modérateur

Après l'arrêt du réacteur, la chaleur de désintégration générée dans le cœur est transférée par le circuit caloporteur à l'eau du côté secondaire des générateurs de vapeur, par l'intermédiaire de la circulation naturelle (convection naturelle), étant donné que les pompes du circuit caloporteur sont arrêtées. Sans l'eau d'alimentation, la pression dans les générateurs de vapeur augmente rapidement, ce qui entraîne l'ouverture des soupapes de sûreté-décharge des générateurs de vapeur peu après l'arrêt automatique du réacteur. La vapeur qui s'échappe permet temporairement d'évacuer la chaleur. Les générateurs de vapeur s'assèchent en environ cinq heures. L'ébullition de l'eau du circuit caloporteur épuise l'inventaire du côté primaire, puis le canal de combustible s'assèche. Cet événement entraîne l'éclatement des disques de rupture de la cuve de calandre qui épuise rapidement le inventaire du modérateur. La défaillance du premier canal de combustible (tube de force et tube de calandre) est prédite à 8,8 heures.

Stades 2 et 3 de l'endommagement du cœur : Désassemblage et effondrement du cœur

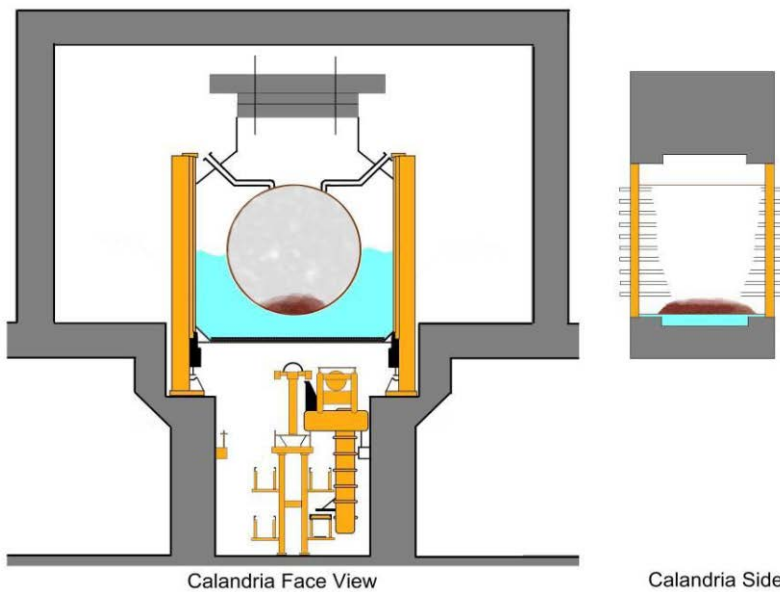
Le modérateur s'évapore par l'ouverture des disques de rupture de la cuve de calandre lorsque le canal de combustible fait défaillance. Le niveau du modérateur diminue rapidement et découvre les canaux de combustible situés dans partie supérieure du cœur. Les canaux de combustible n'étant plus immergés dans l'eau du modérateur, mais désormais exposés à de la vapeur, ils se réchauffent de façon significative. À 10,7 heures, le poids des débris en suspension sur les canaux intacts entraîne l'effondrement de l'ensemble du cœur dans le bas de la cuve de calandre, où il constitue un lit de débris.

Stade 2 de l'endommagement du cœur



Calandria Face View	Vue frontale de la calandre
Calandria Side View	Vue latérale de la calandre

Stade 3 de l'endommagement du cœur

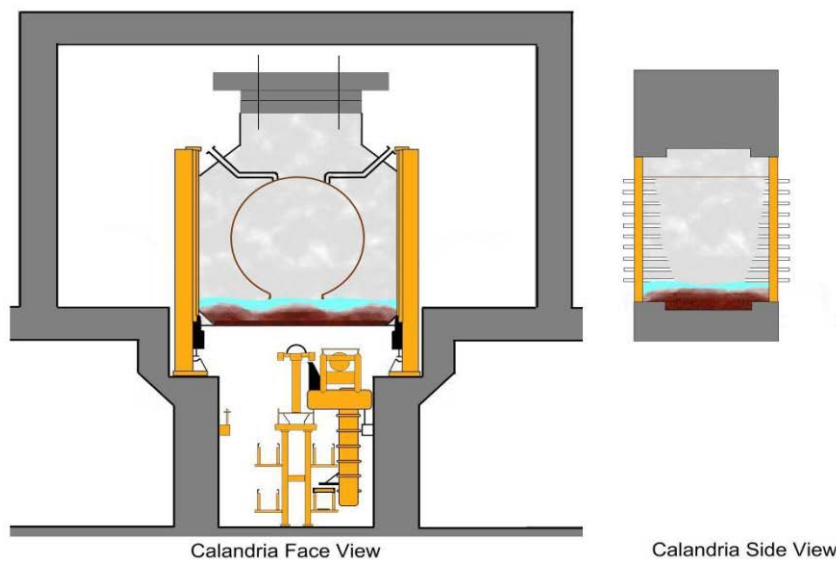


Calandria Face View	Vue frontale de la calandre
Calandria Side View	Vue latérale de la calandre

Stade 4 de l'endommagement du cœur : Suppression du bouclier d'extrémité et défaillance de la cuve de calandre

La dissipation de la chaleur de désintégration provoque une augmentation de la pression dans le bouclier d'extrémité jusqu'à ce qu'une défaillance catastrophique se produise à cause de l'insuffisance de conception pour la capacité d'évacuation de l'excès de pression dans le circuit du bouclier d'extrémité. On suppose que l'une des soudures inférieures du bouclier d'extrémité cède. Cette rupture explique la diminution rapide de la masse d'eau du bouclier d'extrémité à 22,8 heures. Après épuisement de l'inventaire du bouclier d'extrémité, la chaleur de désintégration du corium est transférée aux parois de la cuve de la calandre. Ce transfert se poursuit pendant près de deux heures, puis la cuve de la calandre fait défaillance à cause de la surchauffe et du fluage. À ce stade, la masse du corium en fusion est transférée dans le bouclier d'extrémité.

Stade 4 de l'endommagement du cœur



Calandria Face View	Vue frontale de la calandre
Calandria Side View	Vue latérale de la calandre

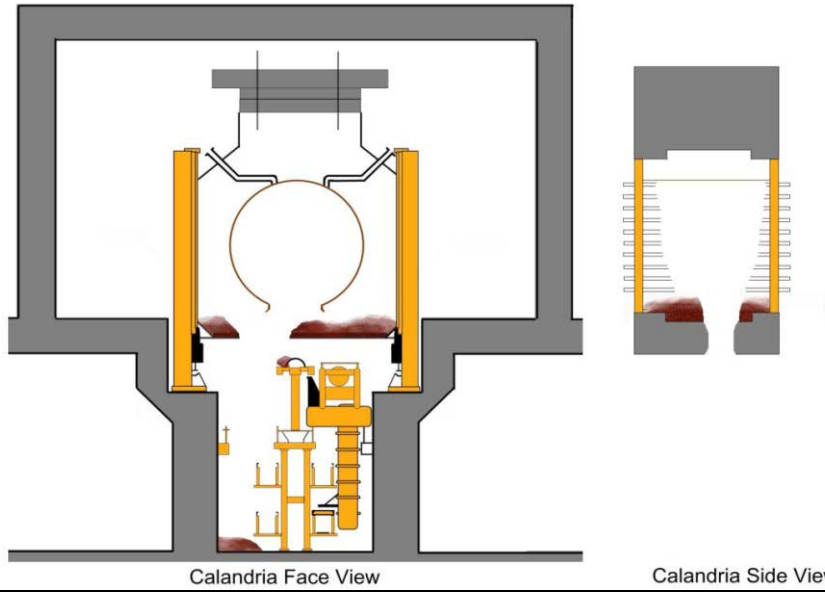
Stade 5 de l'endommagement du cœur : Défaillance du bouclier d'extrémité et transfert du corium vers le conduit de la machine à chargement du combustible

Le corium reste dans le bouclier d'extrémité pendant une demi-heure avant que son intégrité structurale soit compromise. La simulation MAAP-CANDU prévoit la fusion du bouclier d'extrémité 25 heures après le début de l'accident. Avec la défaillance du bouclier d'extrémité, le corium s'écoule dans le conduit de la machine à chargement du combustible, situé sous celui-ci.

Pendant le transfert du corium dans le conduit de la machine à chargement du combustible, pourrait se produire une explosion de vapeur, puisque le corium s'écoule dans le bassin d'eau sous-refroidie situé sur le plancher du conduit de la machine à chargement du combustible. À ce moment, la simulation MAAP-CANDU prédit une explosion lorsque le corium pénètre dans le conduit de la machine à chargement du combustible.

Lorsque le corium se délocalise dans le conduit, il est entièrement submergé dans l'eau. Pendant le corium est submergé dans l'eau, la chaleur de désintégration provoque l'évaporation de l'eau, et une fusion limitée du plancher de béton se produit jusqu'à 58,3 heures après le début de l'incident. À ce stade, le niveau de l'eau est réduit jusqu'à la hauteur du bassin de corium, et la température du corium augmente encore rapidement jusqu'au point de fusion du béton.

Stade 5 de l'endommagement du cœur



Calandria Face View	Vue frontale de la calandre
Calandria Side View	Vue latérale de la calandre