

# Effet d'une vidange stratifiée du caloporteur sur la réactivité et la distribution du flux neutronique d'une cellule CANDU-6

Mathieu Massicotte  
Département de génie physique, École Polytechnique de Montréal  
CP 6079, succ Centre-ville, Montréal, QC H3C 3A7

## Résumé

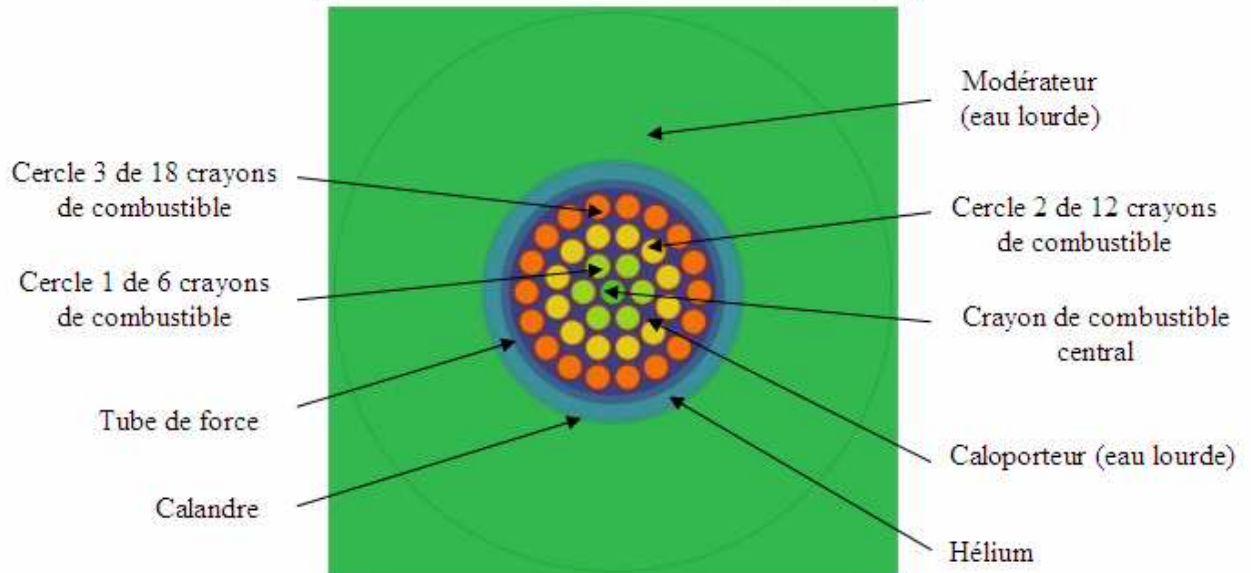
Les grappes de combustible du réacteur CANDU-6 sont insérées dans des tubes de force horizontaux dans lesquels circule le caloporteur à l'eau lourde. Ainsi, advenant un bris dans le circuit caloporteur (CC), le tube de force se videra du haut vers le bas faisant d'abord émerger les crayons supérieurs. Ceux-ci, privé de caloporteur, verront leur température grimper rapidement jusqu'à excéder les limites permises si aucune action n'est prise pour désactiver le réacteur. De plus, la présence de vide dans le tube de force aura un impact important sur la réactivité de la cellule et donc sur la sûreté du réacteur. Toutefois, puisque la plupart des codes de calcul de réseau ne peuvent simuler une telle vidange en strate du caloporteur, les recherches ne traitent généralement que les cas de cellules pleines et vides. Depuis peu, le code de calcul DRAGON développé à l'École Polytechnique de Montréal permet l'analyse de ce type de géométrie. Au cours cette étude, nous tenterons donc de simuler une vidange stratifiée du caloporteur à l'aide du code DRAGON afin de déterminer son impact sur la réactivité de la cellule et le taux de fission dans chacun des crayons. Dans un premier temps, nous considérerons un modèle 2-D en supposant une vidange uniforme le long du tube de force. Puis, nous étendrons cette étude à une cellule 3-D afin d'évaluer l'effet d'une vidange différentielle dans l'axe du canal de combustible.

## 1. Introduction

### 1.1. Réacteur et grappe CANDU-6

Fleurons de l'industrie nucléaire canadienne, le réacteur CANDU-6 est caractérisé par la combustion d'uranium naturel refroidi et modéré au moyen d'eau lourde (oxyde de deutérium). Composé d'environ 0,7% d'uranium 235, le combustible d'uranium naturel est employé sous forme de pastilles d'oxyde (UO<sub>2</sub>) empilées et recouvertes d'une gaine faite d'un alliage de zirconium (zircaloy).<sup>[1]</sup> L'ensemble, appelé crayon de combustible, fait 48 cm de long. La grappe du réacteur CANDU-6 comporte 37 crayons de combustible, disposés en trois cercles centrés contenant respectivement 6, 12 et 18 tiges, autour d'un crayon central (voir figure 1). Douze de ces grappes sont encastrées axialement dans un tube de force à l'intérieur duquel circule de l'eau lourde pressurisée à haute température jouant le rôle du caloporteur. Plusieurs centaines de tubes de force en zircaloy (380 pour être exact) traversent horizontalement la grande cuve d'acier, appelée calandre, contenant de l'eau lourde à basse température qui assure la modération des neutrons.

Figure 1 Cellule du réacteur CANDU-6 (vue de face).



## 1.2. Vidange du caloporteur

Unique en son genre, le CANDU se distingue des autres réacteurs par une circulation horizontale du caloporteur dans les tubes de force. Cette disposition, avantageuse lors de la manutention du combustible, peut toutefois compromettre la sûreté du réacteur s'il y a vidange du caloporteur. Celle-ci, appelé PERCA (perte de caloporteur) peut survenir, par exemple, lors du bris d'un des collecteurs d'entrée et de sortie, ou suite à l'ouverture d'une brèche importante dans une des conduites d'alimentation. Dans ces conditions, le tube de force affecté par l'accident se videra verticalement, laissant d'abord les crayons du haut sans contact avec le caloporteur. La température de ces derniers augmentera plus rapidement que celle des crayons du bas et pourrait dépasser les limites permises. Les conséquences de cette éventuelle surchauffe sont nombreuses et importantes : affaiblissement du zircaloy, bris du combustible, rejet de matières radioactives dangereuses, etc.

Par ailleurs, la formation d'un vide partiel ou total dans un tube de force a une incidence importante sur la distribution spatiale du flux neutronique et donc sur la réactivité du réacteur. Ainsi, contrairement à la majorité des réacteurs en activité, la variation de la réactivité lors de la vidange complète du caloporteur, appelée réactivité cavitaire, est positive et se chiffre à environ +16.3 mk.<sup>[2]</sup> Cette valeur est très importante, car elle « est en mesure de causer un accroissement beaucoup trop rapide de puissance ». Une telle montée en puissance, combinée à la surchauffe du combustible, pourrait s'avérer catastrophique. Afin d'évaluer l'ampleur de cet effet, nous considérerons en première approximation que l'eau lourde demeure horizontale à sa surface. Toutefois, étant donné le grand débit d'eau lourde dans le tube de force, il serait étonnant que le caloporteur se vide ainsi. C'est pourquoi nous étendrons notre étude à une vidange en pente du caloporteur.

## 2. Code de calcul et modèles

### 2.1. *Le code DRAGON*

Outil informatique très puissant, le code de réseau DRAGON est le fruit des travaux menés à l'Institut de Génie nucléaire de l'École Polytechnique de Montréal visant à rationaliser et unifier en un seul logiciel différents modèles et algorithmes utilisés pour la résolution de l'équation de transport des neutrons.<sup>[3]</sup> Pour résoudre cette dernière, DRAGON se base sur la méthode des probabilités de collision, l'une des approches les plus utilisées pour résoudre l'équation de transport.<sup>[4]</sup> Fort de cette méthode analytique polyvalente, le code de calcul DRAGON permet de simuler et d'analyser le comportement neutronique de plusieurs types de cellules élémentaires (ou assemblage de combustible) sous diverses conditions. Pour ce faire, DRAGON utilise des fonctions typiques aux codes de calcul de ce genre, à savoir : l'interpolation des sections efficaces microscopiques fournies par des bibliothèques standardisées; les calculs multigroupes de flux neutronique, de même que ceux d'autoprotection des résonances pour des géométries multidimensionnelles; et finalement, les calculs d'évolution isotopique lors de la combustion nucléaire.

### 2.2. *Les modèles CANDU-6 de référence*

Puisque DRAGON effectue l'analyse de cellules élémentaires, il s'avère nécessaire de subdiviser le réacteur CANDU-6 de sorte que chaque section contienne une grappe de combustible. La cellule 2-D résultant de ce maillage est représentée à la figure 1. Bien qu'elle reproduise fidèlement la réalité matérielle de la grappe CANDU-6, cette cellule, de par sa discrétisation grossière, ne peut servir à simuler adéquatement le flux neutronique. Ceci est dû à l'approximation de source constante inhérente à la méthode des probabilités de collision. Il s'avère essentiel d'élaborer des modèles aux maillages plus fins tels qu'illustrés à la figure 2. Désormais, le modérateur et le caloporteur sont respectivement discrétisés en 10 et 6 cercles concentriques espacés de 1.4 cm et 0.861 cm, tandis que les crayons de combustibles sont divisés en 2 cercles scindés par une droite diamétrale. Cette droite est d'ailleurs tangente au cercle tracé par les centres des crayons de combustible.

Lors de la construction de la cellule 3-D, la principale difficulté consiste à trouver le juste milieu entre la discrétisation de la cellule et le temps d'utilisation du code DRAGON. En effet, un maillage grossier de la cellule résulterait en une mauvaise approximation du flux neutronique, tandis qu'une discrétisation trop fine nécessiterait un temps et une puissance de calcul déraisonnables. Afin d'optimiser ces variables, nous avons comparé le  $k$  effectif de différentes combinaisons de discrétisation. Ainsi, en calculant l'écart absolu entre le  $k$  effectif de la cellule 2-D de référence et celui de la cellule discrétisée différemment, nous pouvons constater l'effet relatif que provoque un changement de discrétisation. Nous cherchons par conséquent à obtenir le cas de discrétisation où l'écart absolu entre les  $k$  effectifs est faible, tout en ayant le moins de régions possible. En bref, notre étude justifie l'utilisation d'une cellule 3-D constituée de trois régions dans le modérateur, six dans le caloporteur et d'un maillage diamétral dans les crayons de combustible (voir figure 3).

Figure 2 Vidange stratifiée du caloporteur dans une cellule CANDU-6 2-D discrétisée.

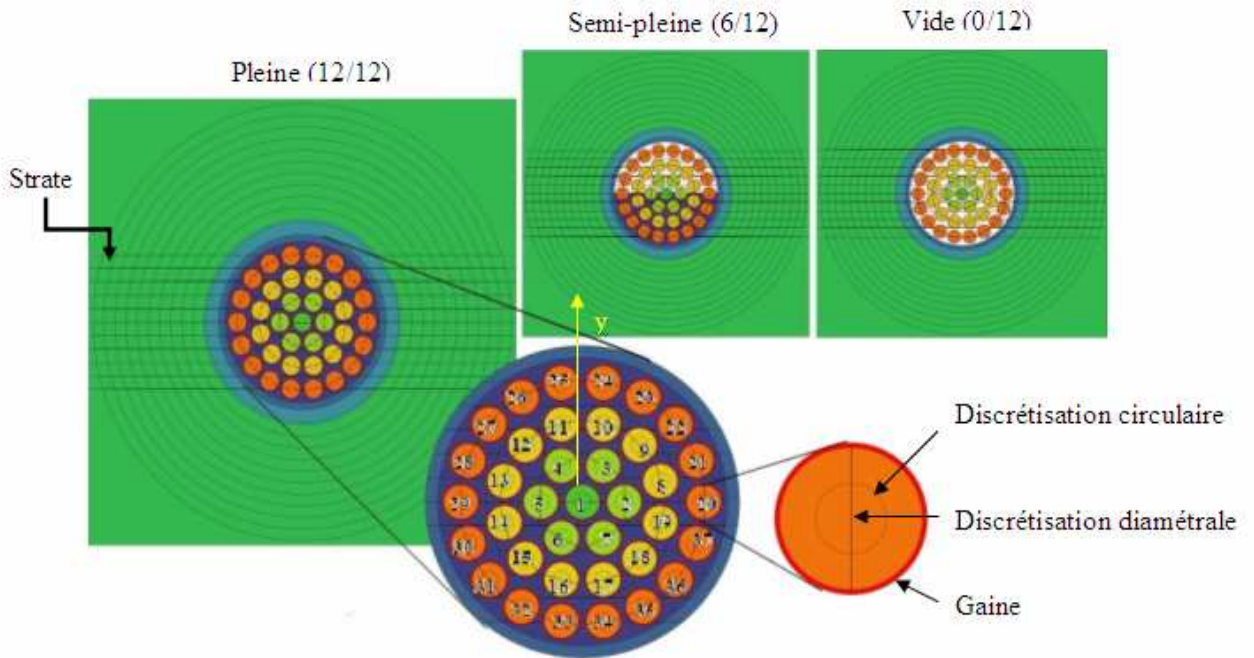
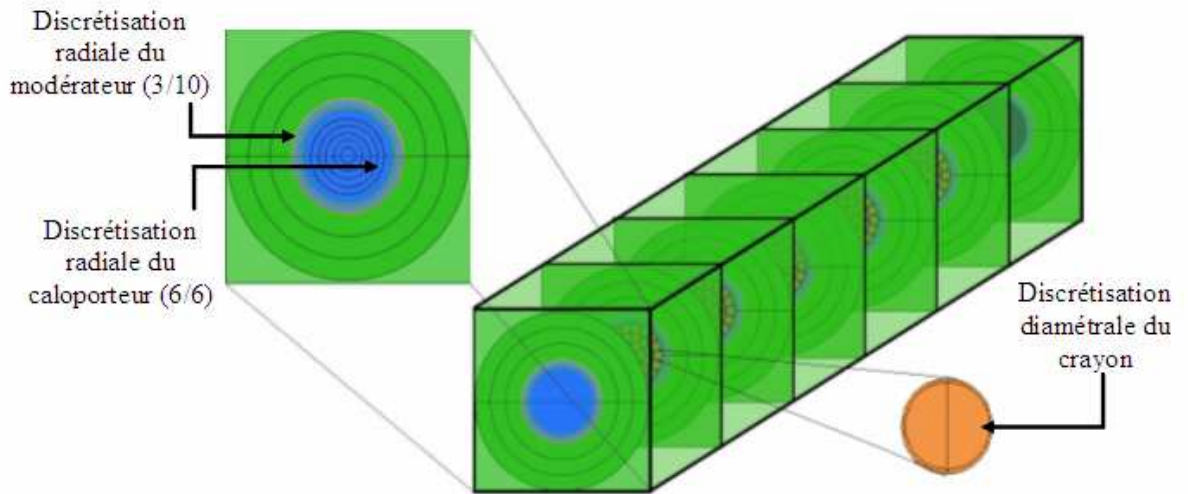


Figure 3 Cellule CANDU-6 3-D discrétisée (vue de biais).



### 2.3. Les modèles 2-D de vidange stratifiée

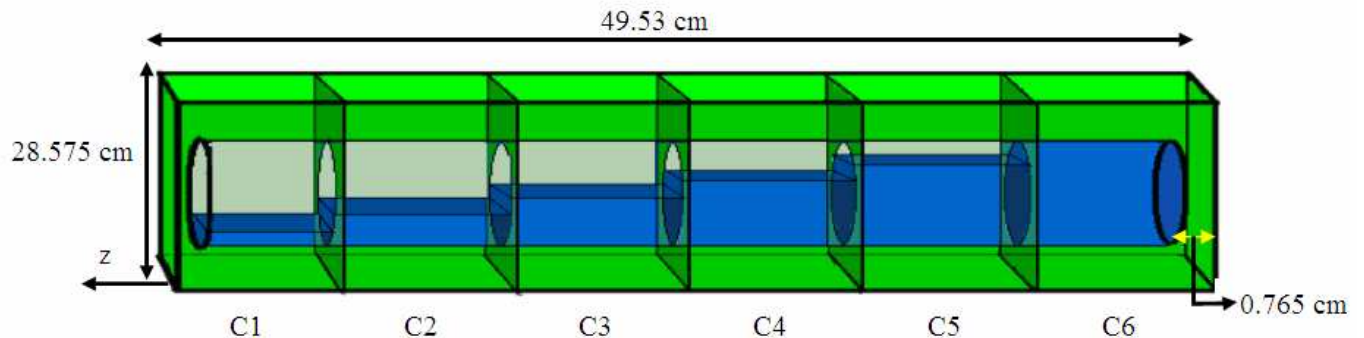
Cette recherche ayant pour objet d'étudier l'impact d'une vidange du caloporteur, il nous

faut d'abord discrétiser adéquatement ce dernier de sorte que la vidange désirée puisse être simulée. Pour ce faire, le code DRAGON permet de subdiviser le caloporteur en plusieurs strates horizontales. Ainsi, en vidant successivement et cumulativement chaque strate, nous parvenons à simuler une vidange du caloporteur. Toutefois, puisque la stratification augmente le nombre de régions à analyser par DRAGON, nous nous sommes limités à une vidange en douze strates (voir figure 2). Afin de ne pas créer de régions minuscules, les lignes stratifiant le caloporteur sont tangentes aux cercles de discrétisation radiale. La figure 2 représente les cellules pleine, semi-pleine et vide de la vidange. Finalement, il va sans dire que l'eau lourde remplit la section inférieure du caloporteur, tandis que le vide occupe celle du haut.

## 2.4. Les modèles 3-D de vidange stratifiée

Comme nous l'avons mentionné précédemment, la vidange du caloporteur, dû au fort débit d'eau lourde dans le tube de force, s'effectue en pente. Afin de reproduire dans DRAGON une pareille géométrie, nous procédons à une vidange différentielle du caloporteur. Ainsi, la pente réelle du caloporteur est imitée par de petites diminutions d'eau lourde le long de l'axe des z (voir figure 4). Dans le but de limiter le nombre de régions, la cellule sera divisée en six sous cellules indépendantes. Cette dernière caractéristique constitue un atout important puisqu'elle nous permet de créer des sous cellules différentes comportant une seule strate à hauteur désirée. Plus précisément, la ligne stratifiant le caloporteur occupe la position d'une des douze strates définies précédemment. La figure 4 illustre l'une des dix étapes de la vidange différentielle dans le tube de force.

Figure 4 : Vidange stratifiée différentielle du caloporteur dans une cellule CANDU-6 3-D.



### 3. Résultats et discussion

#### 3.1. Effets en réactivité

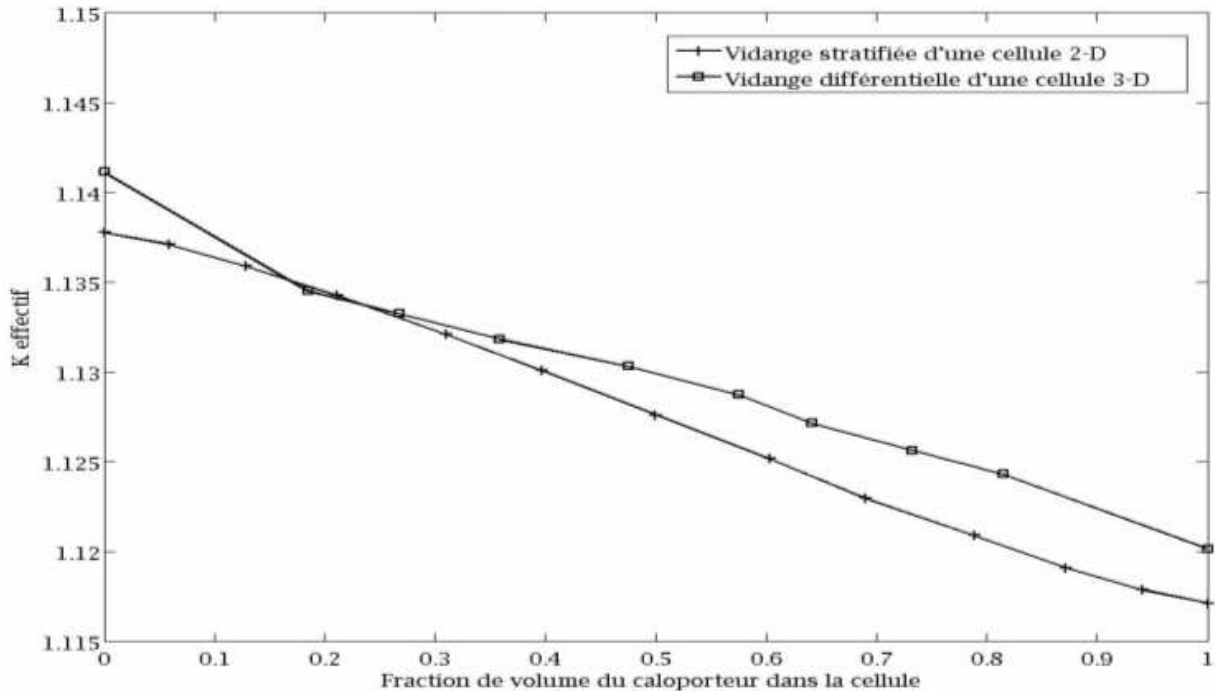
Puisque la sûreté du réacteur dépend en grande partie de sa réactivité, il s'avère essentiel d'étudier l'impact d'une PERCA sur la réactivité de la cellule 2-D et 3-D. Pour ce faire, nous avons calculé le  $k$  effectif (mesure de la réactivité) des douze étapes de la vidange stratifiée à l'aide du code DRAGON. Les résultats de ces calculs sont représentés par la courbe composée de croix sur la figure 5. Il apparaît clairement que le  $k$  effectif, et donc la réactivité, augmente au fur et à mesure que la cellule se vide. Pour quantifier ce gain en réactivité, il suffit d'appliquer l'équation suivante :

$$\Delta\rho = \frac{k_{\text{perturbé}} - k_{\text{réfrigéré}}}{k_{\text{perturbé}} \cdot k_{\text{réfrigéré}}} \times 1000 \text{ (mk)}$$

La réactivité cavitaire (gain total en réactivité) obtenue se chiffre donc à +16.23 mk, valeur qui concorde bien avec celles obtenues par d'autres chercheurs.<sup>[2,5]</sup> De plus, l'analyse approfondie du changement de la réactivité au cours de la vidange stratifiée nous révèle que ce phénomène est foncièrement non linéaire. Cette conclusion s'impose suite à l'étude d'une vidange homogène (par variation de densité) du caloporteur.

Par ailleurs, la figure 5 permet également d'apprécier l'effet d'une vidange différentielle sur la réactivité de la cellule 3-D. Cette variation, représentée par la courbe à carrés, se traduit par un gain en réactivité se chiffrant à  $\Delta\rho = +16.43$  mk. Cette valeur n'étant que légèrement supérieure à celle obtenue lors de l'analyse de 2-D, force est de constater que l'effet global de la vidange différentielle est semblable à celui de la vidange stratifiée. Cependant, en comparant les courbes de la figure 5, nous pouvons constater que la variation du  $k$  effectif au cours de ces deux types de vidanges diffère sensiblement. Tandis que la réactivité de la cellule 2-D suit une courbe sinueuse assez régulière, le comportement de la courbe de la cellule 3-D est plutôt erratique.

**Figure 5 : Variation du  $k$  effectif lors de la vidange stratifiée et différentielle du caloporteur dans une cellule CANDU-6**



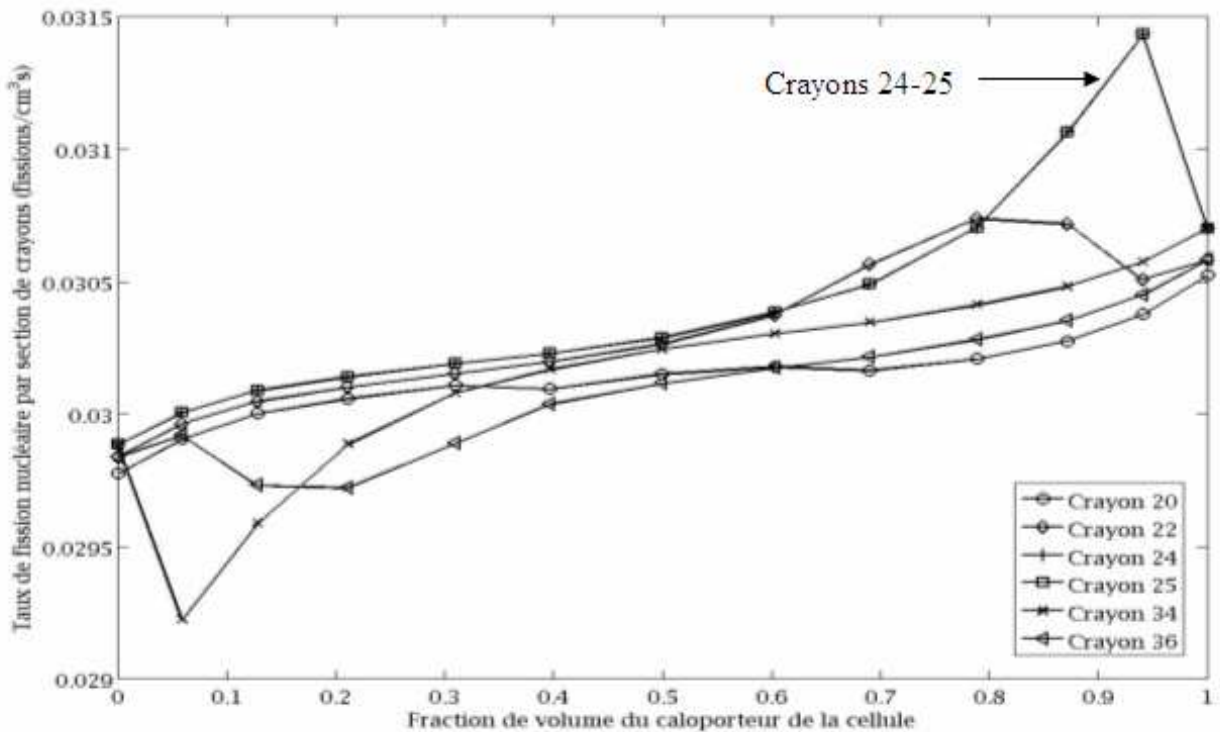
### 3.2. Analyse du pic de puissance

Comme nous l'avons mentionné au début de cet article, la surchauffe des crayons qui ne sont plus réfrigérés et la montée en puissance du réacteur sont à craindre suite à la perte du caloporteur. Nous savons déjà que cette dernière entraîne globalement une augmentation de la puissance dans la cellule, mais quel stade de la vidange menace le plus la sûreté du réacteur? Pour répondre à cette question, il nous faut d'abord identifier le crayon possédant le taux de fission le plus élevé tout au long de la vidange. Dans le cas de la cellule 2-D, l'analyse du taux de fission dans chaque crayon de combustible nous révèle d'abord une augmentation de l'activité nucléaire dans les crayons en fonction de leur distance du centre de la cellule. Ainsi, le crayon recherché doit nécessairement faire partie du troisième et dernier cercle de crayons. La figure 6 représente la variation du taux de fission dans certains de ces crayons lors de la vidange du caloporteur. Les crayons ont été sélectionnés afin d'illustrer le comportement général de leur taux de fission fonction de la position qu'ils occupent dans la grappe (voir figure 2). Nous avons également tenu compte de la symétrie des crayons par rapport à l'axe y de manière à alléger la présentation. Bref, en examinant la figure 6, il s'avère que les crayons 24 et 25 possèdent un taux de fission supérieur aux autres durant presque toute la vidange. En effet, le taux de fission du couple de crayons 22-27 (et implicitement 23-26) supplante celui des crayons 24 et 25 à certains moments de la vidange, mais ces soubresauts sont sans conséquence : les crayons 24 et 25 sont les plus actifs de la cellule.



Cela dit, sachant que « la puissance produite dépend du nombre de fissions par seconde », une augmentation du taux de fission dans un crayon entraîne donc une hausse de la puissance à cet endroit. Or, puisque le code DRAGON normalise la puissance pour chaque étape de la vidange, il suffit d'effectuer le rapport entre les taux de fission dans les crayons actifs et la moyenne des crayons pour déterminer le pic de puissance lors de la vidange du caloporteur. Comme l'indique la courbe composée de croix à la figure 7, la puissance dans les crayons 24 et 25 de la cellule 2-D grimpe jusqu'à environ 16%. Or, cette augmentation survient précisément lors de l'émergence de ces crayons, soit après une perte du caloporteur de seulement 6%. Privé de caloporteur et soumis à une hausse de puissance significative, les crayons 24-25 deviennent les points névralgiques du réacteur et risquent dangereusement une surchauffe. Cette étape de la vidange est d'autant plus critique qu'elle se produit au moment où l'augmentation de la réactivité est moindre, ce qui la rend difficilement détectable.

**Figure 6 : Détermination du crayon le plus actif lors de la vidange d'une cellule CANDU-6 2-D.**



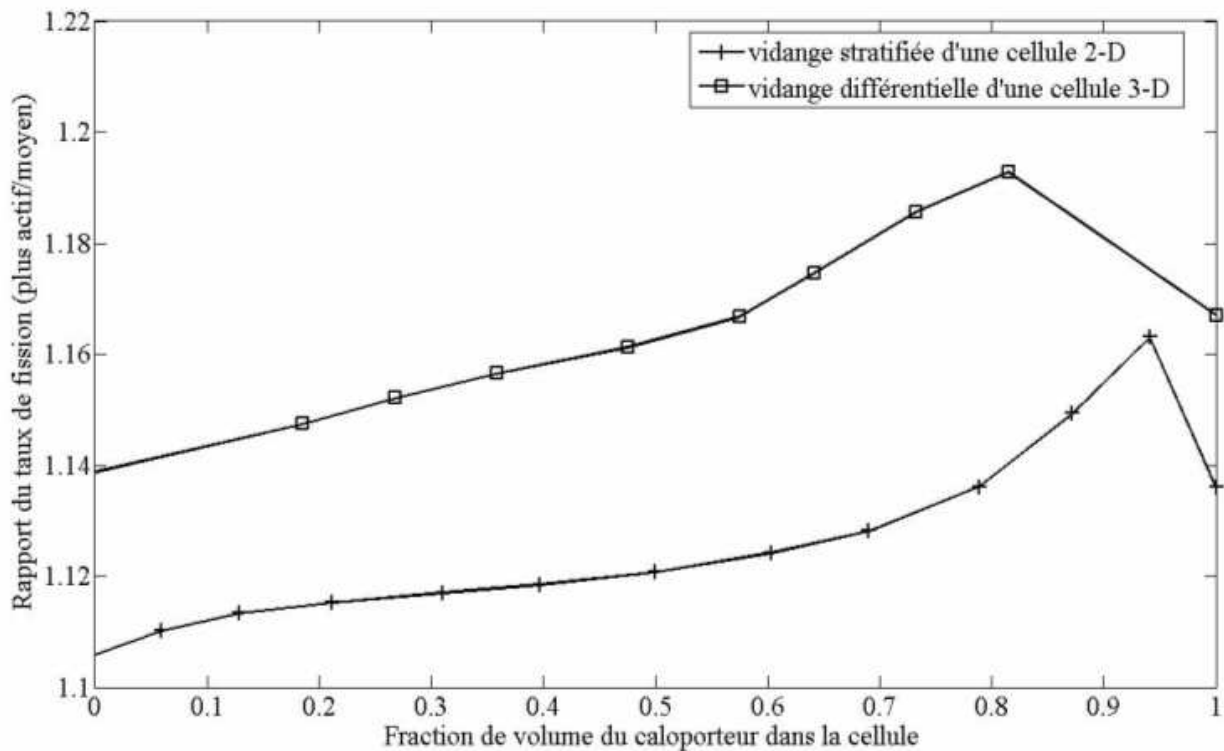
L'analyse tridimensionnelle du pic de puissance porte sur des segments de crayons. En effet, la cellule étant divisée en six sous-cellules (voir figure 4). Nous avons étudié indépendamment le taux de fission dans chacun des six morceaux de crayons, ce qui porte le nombre de courbes étudiées à 222 (dont nous vous ferons grâce dans cet article). En regroupant les courbes selon leur sous-cellule respective, nous constatons que le taux de fission des crayons de chaque sous-cellule semble se conformer au modèle 2-D tel que présenté sur la figure 6. Notre analyse nous indique entre autres un taux de fission nettement plus faible dans les sous-cellules C1 et C6 situées aux extrémités de la cellule, baisse provenant sans doute de l'espace (1.53cm) entre les grappes consécutives. En bref, l'examen attentif des 222 courbes nous permet d'identifier les



morceaux de crayons 24 et 25 de la sous-cellule C5 comme étant les régions plus actives au cours de la vidange différentielle.

Le pic de puissance résultant de l'augmentation du taux de fission est tracé à la figure 7 (courbe à carrés). Notons d'abord que ce pic se produit en début de vidange, ce qui concorde bien avec les résultats de la cellule 2-D. Toutefois, puisque nous ne possédons pas d'information sur le taux de fission entre le stade « cellule pleine » et la première étape de la vidange, il nous est impossible de savoir à quel endroit se situe précisément le maximum dans cet intervalle. Nous pouvons néanmoins affirmer que la puissance augmente d'au moins 19% dans les morceaux de crayons 24-25 de la sous-cellule C5.

**Figure 7 : Pic de puissance lors de la vidange du caloporteur dans une cellule CANDU-6**



## 4. Conclusion

Cette étude détaillée des cellules CANDU-6 nous permet de constater l'ampleur de l'effet produit par une vidange du caloporteur. D'abord, selon nos calculs, la réactivité cavitaire des cellules 2-D et 3-D se chiffre respectivement à +16.23 mk et +16.43 mk, ce qui correspond aux valeurs des études antérieures. Combinée à cette augmentation de la réactivité, l'analyse du pic de puissance nous mène à la conclusion que la vidange du caloporteur pourrait menacer la sûreté du réacteur sans l'intervention des systèmes d'arrêt d'urgence. En effet, un examen minutieux du taux de fission en fonction de la vidange a permis de confirmer que les crayons les plus actifs se situent en périphérie du tube de force et que parmi ceux-ci, les crayons 24-25 (voir figure 6) possèdent un pic de taux de fission nettement supérieur à la moyenne observée dans le reste de la cellule. Dans la cellule 3-D, notre étude nous indique que le taux de fission dans ces crayons est particulièrement élevé dans la sous-cellule C5. Concrètement, cette augmentation du taux de fission se traduit par une hausse soudaine de la puissance de 16% dans les crayons 24 et 25 de la cellule 2-D lorsque seulement 6% du caloporteur est perdu. Pour la cellule 3-D, la puissance fait un bond en début de vidange d'au moins 19% dans les morceaux de crayons 24-25 de la sous cellule C5. Ainsi, la perte d'une petite fraction du caloporteur mène à une augmentation significative de la puissance dans les crayons émergés, dont la température grimpe inévitablement. Même si pour une si petite quantité de caloporteur vidangé, il est fort probable que l'incident ne puisse être détecté avant cette hausse de puissance, l'accumulation totale d'énergie dans le crayon pendant une si courte période est faible et la vidange se poursuivant, les mécanismes de sûreté du réacteur, feront en sorte d'arrêter celui ci avant que des dommages irréparables se produisent dans la grappe.

Pour terminer, mentionnons qu'il serait profitable d'effectuer une vidange différentielle 3-D contenant davantage de phases au début et à la fin du processus de perte de caloporteur. Ainsi, nous pourrions chiffrer plus exactement la hausse de puissance dans la cellule CANDU-6 3-D et donc mieux caractériser les pics de puissance qu'entraîne la vidange du caloporteur.

## 5. Remerciements

D'abord, je tiens à remercier sincèrement tous les étudiants de l'institut de génie nucléaire que j'ai eu le plaisir de côtoyer cet été pour l'atmosphère de travail conviviale et le support fourni tout au long de mon stage. Plus particulièrement, je voudrais remercier monsieur Alexis Popov, doctorant, pour sa bonhomie contagieuse et pour m'avoir formidablement guidé dans l'amorce de mon projet. Je souhaite par-dessus tout remercier mon directeur de stage, Monsieur Guy Marleau, qui m'a d'abord offert la chance de travailler avec lui cet été, qui s'est montré attentif du début à la fin de mon stage et qui m'a aidé à « dompter » DRAGON. Finalement, je tiens à remercier la Société Nucléaire canadienne (SNC) pour son support financier sous la forme d'une bourse d'été.

## 6. Références

- [1] CANTEACH. *Principes fondamentaux des réacteurs CANDU*. CNSC CANDU Training Course in French. 2005. 341 pages. [<http://canteach.candu.org/library/20060300.pdf>].
- [2] J.J. Whitlock, W.J. Garland, M S. Milgram, Annual Meeting of the American Nuclear Society, Philadelphia, June 25-29, 1995.
- [3] G. Marleau, A.Hébert, R. Roy. *A User Guide for DRAGON 3.05D*, rapport IGE-174R6D, École Polytechnique de Montréal (2007).
- [4] G. Marleau. *DRAGON Theory Manual, Part 1 : Collision Probability Calculations*, rapport IGE-236, École Polytechnique de Montréal (2001)
- [5] Y. Bonnafous. *Analyse des changements de réactivité dans une cellule CANDU dus à des variations radiales de température du caloporteur*, Institut de génie nucléaire, École Polytechnique de Montréal (1998).