

Qualification des outils de calcul scientifique utilisés dans la démonstration de sûreté nucléaire – 1^{re} barrière

Réalisé conjointement avec
l'Institut de radioprotection
et de sûreté nucléaire



IRSN
INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

GUIDE N° 28

Version du 25/07/2017

Préambule

La collection des guides de l'ASN regroupe les documents à destination des professionnels intéressés par la réglementation en matière de sûreté nucléaire et de radioprotection (exploitants, utilisateurs ou transporteurs de sources de rayonnements ionisants, public, etc.). Ces guides peuvent également être diffusés auprès des différentes parties prenantes, telles que les Commissions locales d'information.

Chaque guide a pour objet, sous forme de recommandations :

- d'explicitier une réglementation et les droits et obligations des personnes intéressées par la réglementation ;*
- d'explicitier des objectifs réglementaires et de décrire, le cas échéant, les pratiques que l'ASN juge satisfaisantes ;*
- de donner des éléments d'ordre pratique et des renseignements utiles sur la sûreté nucléaire et la radioprotection.*

Le présent guide a été développé conjointement par l'ASN et l'IRSN et présente les recommandations relatives à la qualification des outils de calcul scientifique (OCS) utilisés afin de vérifier le respect des critères de sûreté associés à la première barrière du combustible.



Sommaire

1. INTRODUCTION.....	4
1.1. CONTEXTE ET REFERENCES REGLEMENTAIRES	4
1.1.1. <i>Références réglementaires</i>	4
1.1.2. <i>Contexte réglementaire</i>	4
1.2. OBJET DU GUIDE	5
1.3. CHAMP D'APPLICATION DU GUIDE	5
1.4. STATUT ET STRUCTURE DU DOCUMENT.....	5
2. UTILISATION DE L'OCS DANS LE CHAMP D'UTILISATION VISÉ.....	6
2.1. DESCRIPTION DU CHAMP D'UTILISATION VISE.....	6
2.2. IDENTIFICATION DES PHENOMENES PHYSIQUES DOMINANTS ET HIERARCHISATION	6
2.2.1. <i>Identification des grandeurs d'intérêt</i>	6
2.2.2. <i>Identification des phénomènes physiques dominants</i>	6
2.2.3. <i>Paramètres influents</i>	6
2.2.4. <i>Domaine d'utilisation</i>	7
3. PROCESSUS DE VÉRIFICATION, VALIDATION ET QUANTIFICATION DES INCERTITUDES POUR L'ÉTUDE VISÉE	7
3.1. PREAMBULE	7
3.2. VERIFICATION.....	7
3.3. VALIDATION.....	7
3.4. QUANTIFICATION DES INCERTITUDES.....	9
3.5. SYNTHÈSE DU CHAPITRE 3.....	10
4. TRANSPOSITION POUR L'UTILISATION DE L'OCS DANS LA DÉMONSTRATION VISÉE.....	10
5. PRONONCÉ DE LA QUALIFICATION.....	10
6. POINTS PARTICULIERS.....	11
6.1. PRE- ET POST-TRAITEMENTS	11
6.2. CHAINAGES ET COUPLAGES	11
6.3. EFFET LIÉ À L'UTILISATEUR.....	12
6.4. OUTILS SPÉCIALISÉS	12
6.5. CAS DE MANQUES DANS LES DONNÉES EXPÉRIMENTALES.....	12
6.6. LIEN AVEC LES MÉTHODES D'ÉTUDE	13
7. COMPOSITION DU DOSSIER À FOURNIR À L'ASN	13
7.1. CAS DE LA PREMIÈRE QUALIFICATION D'UN OCS.....	13
7.2. CAS DE LA QUALIFICATION D'UN OCS POUR UNE MODIFICATION DU CHAMP OU DU DOMAINE D'UTILISATION OU POUR UNE NOUVELLE MÉTHODE D'ÉTUDE	13
7.3. CAS D'UNE NOUVELLE VERSION D'UN OCS.....	14
GLOSSAIRE	15
ANNEXE	18

1. INTRODUCTION

1.1. Contexte et références réglementaires

1.1.1. Références réglementaires

- [1] Le code de l'environnement, notamment le titre IX de son livre V
- [2] Décret n° 2007-1557 du 2 novembre 2007 modifié relatif aux installations nucléaires de base et au contrôle, en matière de sûreté nucléaire, du transport de substances radioactives
- [3] Arrêté du 7 février 2012 modifié fixant les règles générales relatives aux installations nucléaires de base

1.1.2. Contexte réglementaire

Le code de l'environnement précise notamment dans l'article L. 593-7 que l'exploitant fournit la *démonstration de sûreté nucléaire(*)*¹ de son installation. Le décret en référence [2] prévoit que cette démonstration doit figurer dans le rapport de sûreté de l'installation et qu'elle est à fournir à l'appui des demandes d'autorisation de création, de mise en service, de modification relevant de l'article L. 593-15 du code de l'environnement et dans le dossier de démantèlement de l'installation.

Par ailleurs, l'arrêté en référence [3] précise notamment que « *La démonstration de sûreté nucléaire s'appuie sur des outils de calcul et de modélisation **qualifiés** pour les domaines dans lesquels ils sont utilisés.* ».

Article L. 593-7 du code de l'environnement (extrait)

[L'autorisation de création d'une installation nucléaire de base] ne peut être délivrée que si, compte tenu des connaissances scientifiques et techniques du moment, l'exploitant démontre que les dispositions techniques ou d'organisation prises ou envisagées aux stades de la conception, de la construction et de l'exploitation ainsi que les principes généraux proposés pour le démantèlement ou, pour les installations de stockage de déchets radioactifs, pour leur entretien et leur surveillance après leur fermeture sont de nature à prévenir ou à limiter de manière suffisante les risques ou inconvénients que l'installation présente pour les intérêts mentionnés à l'article L. 593-1.

Article 3.8 de l'arrêté en référence [3]

- I. – La démonstration de sûreté nucléaire s'appuie sur :
- des données à jour et référencées ; elle tient notamment compte des informations disponibles mentionnées à l'article 2.7.7 ;
 - des méthodes appropriées, explicitées et validées, intégrant des hypothèses et des règles adaptées aux incertitudes et aux limites des connaissances des phénomènes mis en jeu ;
 - des outils de calcul et de modélisation qualifiés pour les domaines dans lesquels ils sont utilisés.
- II. – L'exploitant précise et justifie ses critères de validation des méthodes, de qualification des outils de calcul et de modélisation et d'appréciation des résultats des études réalisées pour démontrer la sûreté nucléaire.

1.1.3 Textes de référence internationaux

- [4] NRC Regulatory guide RG-1.203 Transient and accident analysis methods. December 2005
- [5] Deterministic Safety Analysis for Nuclear Power Plants for protecting people and the environment IAEA guide No. SSG-2

¹ Les mots en italique suivis d'une astérisque (*) sont explicités dans le glossaire à la fin du guide.

1.2. Objet du guide

Certaines études de la *démonstration de sûreté nucléaire*(*) des installations nucléaires de base (INB) reposent sur l'utilisation d'*outils de calcul scientifique*(*) (OCS).

L'article 3.8 de l'arrêté en référence [3] impose l'usage de méthodes « validées »² et d'OCS qualifiés pour la réalisation de ces études. À cet effet, l'exploitant doit disposer de démarches formalisées établissant la validation des méthodes et la *qualification*(*) des OCS.

L'examen par l'ASN et l'IRSN du dossier d'une méthode et celui de la *qualification*(*) d'un OCS utilisé pour l'application de cette méthode sont généralement séparés ; toutefois, dans les cas où la méthode et l'OCS sont liés, ces deux dossiers sont généralement examinés conjointement. Ces dossiers sont examinés préalablement à l'examen des études réalisées à l'aide de ces méthodes et OCS.

Dans ce guide, on entend par *qualification*(*) d'un OCS la reconnaissance par l'exploitant qu'un OCS est apte à fournir des résultats utilisables dans le cadre de la *démonstration de sûreté nucléaire*(*). Cette reconnaissance est établie au vu d'éléments apportés par des opérations de *vérification*(*), de *validation*(*), de quantification des *incertitudes*(*) et de transposition. Ces opérations font partie d'un processus d'ensemble décrit aux chapitres 3, 4 et 5 permettant de s'assurer que l'OCS est capable de calculer les *grandeurs d'intérêt*(*) avec les *incertitudes*(*) adaptées aux besoins, dans le *champ d'utilisation visé*(*).

Le présent guide expose les recommandations de l'ASN et de l'IRSN pour ces opérations et ce processus. Il a pour objet de fournir un ensemble cohérent de recommandations dont la mise en œuvre constitue une manière de s'assurer qu'un OCS est qualifié selon les attentes de l'ASN. Il a pour ambition de faciliter l'élaboration et l'instruction des dossiers établissant la *qualification*(*) des OCS en précisant le contenu du dossier à produire par l'exploitant pour sa transmission à l'ASN. Il tient compte des textes de référence internationaux (références [4] et [5]).

1.3. Champ d'application du guide

Le présent guide s'applique aux OCS utilisés pour démontrer, dans les études contribuant à la *démonstration de sûreté nucléaire*(*), le respect des critères techniques d'acceptation associés au comportement du combustible en *fonctionnement normal*(*) ou lors d'incidents ou d'accidents³ affectant les réacteurs à eau sous pression, les réacteurs de recherche ou les piscines de désactivation et d'entreposage du combustible.

Les domaines techniques visés sont la neutronique, la thermohydraulique, la thermomécanique du combustible et la physicochimie du combustible.

Le présent guide est applicable aux OCS mis en œuvre au stade de la conception initiale des installations nucléaires de base (INB), lors de leurs réexamens périodiques de sûreté, pour les modifications ou dans le cadre de dossiers justificatifs complémentaires, pendant leur période de fonctionnement ou au cours de leur mise à l'arrêt et de leur démantèlement.

1.4. Statut et structure du document

Le présent guide a été élaboré par l'ASN et l'IRSN, avec la participation de représentants des industriels et des exploitants lors de certaines étapes. Il a été soumis à consultation des industriels et des exploitants, puis du public du 31 mars 2017 au 4 mai 2017.

² La validation des méthodes, qui ne relève pas du présent guide, est distincte de la validation des OCS mentionnée au chapitre 1.2

³ Hors accidents graves avec fusion de combustible

Après avoir rappelé le contexte de la *qualification*(*) (cf. chapitre 1.2), le guide aborde successivement :

- le *champ d'utilisation*(*) visé de l'OCS dans la démonstration de sûreté (chapitre 2), qui doit être défini préalablement aux processus de *vérification*(*), de *validation*(*) et de transpositions présentés ensuite ;
- le processus de *vérification*(*) et de *validation*(*) (chapitre 3) de l'OCS, qui est le cœur de la *qualification*(*) ;
- le processus de transposition des *cas de validation*(*) au *champ d'utilisation*(*) visé (chap. 4) ;
- le prononcé de la *qualification*(*) (chapitre 5) ;
- plusieurs points particuliers relatifs à certains logiciels (pré- et post-traitements, couplages, etc.) et à certains usages des OCS (chapitre 6) ;
- la description du contenu du dossier de *qualification*(*) à fournir à l'ASN (chapitre 7).

2. UTILISATION DE L'OCS DANS LE CHAMP D'UTILISATION VISÉ

2.1. Description du champ d'utilisation visé

Le *champ d'utilisation*(*) visé de l'OCS est défini comme l'ensemble des situations ou des scénarios associés aux études de la *démonstration de sûreté nucléaire*(*) que l'on vise à justifier au moyen de cet outil.

Ces situations ou scénarios peuvent être décrits en faisant référence au *fonctionnement normal*(*) de l'installation et aux incidents ou accidents étudiés dans le rapport de sûreté.

2.2. Identification des phénomènes physiques dominants et hiérarchisation

La définition du *domaine d'utilisation*(*) de l'OCS se déroule selon les quatre étapes ci-après. La profondeur de l'analyse effectuée à chacune d'elle est proportionnée aux enjeux.

2.2.1. Identification des grandeurs d'intérêt

La première étape consiste à identifier les *grandeurs d'intérêt*(*) à calculer avec l'OCS.

2.2.2. Identification des phénomènes physiques dominants

Dans une deuxième étape, les phénomènes physiques qui influent sur ces *grandeurs d'intérêt*(*) sont identifiés puis hiérarchisés par ordre d'importance afin d'identifier les phénomènes physiques dominants. L'identification et la hiérarchisation des phénomènes physiques intervenant dans les études visées de la *démonstration de sûreté nucléaire*(*) résultent de l'analyse du champ d'utilisation et s'appuient sur des jugements d'expert, des résultats expérimentaux, des résultats d'application d'OCS validés, ou encore des résultats de calculs de sensibilité. Le caractère suffisant de la liste de phénomènes physiques dominants ainsi retenus vis-à-vis du *champ d'utilisation*(*) visé doit être établi.

2.2.3. Paramètres influents

Au cours d'une troisième étape, les paramètres d'entrée de la *simulation*(*) qui influent sur ces phénomènes physiques sont à leur tour identifiés et hiérarchisés par ordre d'importance afin de définir les *paramètres influents*(*). Les *paramètres influents*(*) peuvent être des paramètres des modèles physiques de l'OCS associés aux phénomènes physiques. Leur identification et leur classement peuvent s'appuyer sur des jugements d'expert, ou des résultats d'essais, ou encore des études de sensibilité. Le caractère suffisant de la liste des *paramètres influents*(*) ainsi retenus vis-à-vis du *champ d'utilisation*(*) visé doit être établi.

2.2.4. Domaine d'utilisation

L'analyse qui précède se termine par la détermination du domaine de variation des paramètres les plus influents ou des *grandeurs d'intérêt*(*) qui permet de préciser le *domaine d'utilisation*(*) de l'OCS pour la démonstration visée.

3. PROCESSUS DE VÉRIFICATION, VALIDATION ET QUANTIFICATION DES INCERTITUDES POUR L'ÉTUDE VISÉE

3.1. Préambule

Ce chapitre décrit le processus qui permet de s'assurer de la capacité d'un OCS à représenter correctement les différents phénomènes physiques qu'il doit simuler. L'application de ce processus permet de montrer l'aptitude de l'OCS à fournir des résultats de calcul utilisables pour la *démonstration de sûreté nucléaire*(*).

Ce processus porte sur un OCS dont la version est identifiée. Il se situe en amont de l'étape de transposition décrite au chapitre 4.

Le processus se compose de trois étapes, détaillées ci-après.

3.2. Vérification

La *vérification*(*) est un processus formalisé visant à déterminer si les équations sont résolues correctement du point de vue numérique et informatique. La *vérification*(*) porte sur les méthodes numériques et les algorithmes, leur implémentation, les diagrammes de flux de données, l'architecture des programmes informatiques ainsi que le respect des règles de programmation éventuellement définies par l'exploitant.

Dans le cas de *couplage*(*) d'outils de calcul, la *vérification*(*) porte notamment sur la conception et la mise en œuvre des liens et des interfaces entre les outils de calcul.

Si l'OCS est utilisé sur une plate-forme informatique (architecture matérielle, système d'exploitation et compilateur) différente de celle sur laquelle la *vérification*(*) a été effectuée, il est recommandé de s'assurer, autant que possible, de l'absence d'impact de ce changement sur la *vérification*(*).

3.3. Validation

On s'intéresse ici à la *validation** de l'OCS dans son *champ d'utilisation*(*).

La *validation*(*) suit autant que possible un processus progressif en deux étapes⁴ afin de minimiser les compensations d'erreurs :

- la *validation*(*) à effets séparés a pour objectif de valider les modèles physiques de l'*outil de calcul scientifique*(*) dans des conditions où les phénomènes physiques dominants identifiés dans le chapitre 2.2.2 sont aussi isolés que possible ;
- la *validation*(*) intégrale a pour objectif de vérifier l'aptitude globale de l'*outil de calcul scientifique*(*) à simuler correctement l'ensemble des phénomènes physiques et leurs interactions.

Cette *validation*(*) s'appuie sur la comparaison des résultats de calculs sur des *cas de validation*(*) par

⁴ Il peut être nécessaire de compléter ces deux étapes par une étape de validation dite « intermédiaire » dans le cas où le champ d'utilisation fait intervenir de nombreux phénomènes physiques couplés.

rapport à :

- des mesures issues d'expériences ou du fonctionnement des INB :
 - dans le cas de la *validation*(*) à effets séparés : essais réalisés sur des maquettes ou des installations permettant de représenter au mieux les phénomènes physiques élémentaires, comparaisons à des *solutions analytiques*(*) lorsqu'elles existent ;
 - dans le cas de la *validation*(*) intégrale : essais réalisés sur des maquettes ou des installations permettant de simuler les phénomènes physiques (en tout ou partie) représentatifs de l'utilisation visée, retour d'expérience d'exploitation ou essais physiques sur une INB ;
- des résultats *d'outils de calcul scientifique de référence*(*).

À défaut, si ce processus progressif ne peut être suivi (par exemple, s'il n'a pas été possible de procéder à une *validation*(*) à effets séparés) ou en cas de lacunes (par exemple, manque de données pour valider certains modèles), l'impact sur la *qualification*(*) devra être évalué, en déroulant par exemple la démarche suivante :

- identification des modèles concernés ;
- sensibilité des réponses de l'OCS à ces modèles ;
- réévaluation des *incertitudes*(*) en prenant en compte les lacunes de *validation*(*) ou évaluation d'une pénalité à appliquer dans les méthodes pour couvrir ces lacunes.

La justification de la pertinence et du caractère suffisant des *cas de validation*(*) retenus au regard des phénomènes physiques dominants identifiés (chapitre 2) doit être apportée et documentée. Il est recommandé que cette formalisation expose notamment :

- la description des phénomènes physiques étudiés ;
- la description des grandeurs mesurées et de leur domaine de variation, de l'instrumentation utilisée et des *incertitudes*(*) de mesure associées ;
- les objectifs et la description des *cas de validation*(*) à effets séparés et intégraux ;
- la description de l'étude, de l'analyse et de l'interprétation du résultat des essais ;
- la définition du domaine de variation des *paramètres influents*(*).

Les mesures expérimentales ou les données issues du retour d'expérience utilisées doivent, dans la mesure du possible, être représentatives des *grandeurs d'intérêt*(*) et des *paramètres influents*(*) ainsi que de leurs domaines de *validation*(*) dans le *champ d'utilisation*(*).

S'il n'est pas possible de justifier le caractère suffisant des *cas de validation*(*) à effets séparés ou intégrale au regard des phénomènes physiques dominants, des compléments de *validation*(*) à effets séparés ou de *validation*(*) intégrale devraient être apportés. Dans le cas d'un manque de données expérimentales, il est nécessaire de s'assurer de la *validation*(*) de l'OCS par une démarche appropriée et proportionnée aux enjeux, telles les démarches alternatives mentionnées au chapitre 6.5.

La cohérence des choix (modèles physiques, maillage spatial, discrétisation temporelle, schémas numériques, critères de convergence, options de calcul, etc.) entre les différents calculs des *cas de validation*(*) retenus (qu'il s'agisse de *validation*(*) à effets séparés ou de *validation*(*) intégrale) est à rechercher. En cas de différences de choix, les calculs de *validation*(*) devraient être révisés. À défaut, l'impact de ces différences sur la *qualification*(*) de l'OCS devra être évalué.



En particulier, les critères de convergence numérique des *schémas de calcul*(*) en espace et temps doivent être identifiés et respectés. Les recommandations de modélisation issues des différents calculs des *cas de validation*(*) à effets séparés, ainsi que le *domaine de validation*(*) de chacun des modèles associés aux phénomènes physiques dominants, doivent être identifiés et, dans la mesure du possible, respectés dans les calculs de *validation*(*) intégrale. En cas de non-respect de domaines de *validation*(*) ou de certaines recommandations, l'impact de ce non-respect dans le dossier de *validation*(*) devra être évalué.

Enfin, le recours à des *ajustements*(*) définis lors de calculs de *validation*(*) à effets séparés ou de calculs de *validation*(*) intégrale est acceptable à condition d'être explicité et justifié. La méthode suivie pour définir ces différents *ajustements*(*) devra être décrite et justifiée. Par ailleurs, leur impact sur le caractère prédictif de l'*outil de calcul scientifique*(*) devra être évalué. En effet :

- les *ajustements*(*) permettent de diminuer les *incertitudes*(*) de certaines *grandeurs d'intérêt*(*) calculées dans un domaine donné, mais ils peuvent aussi réduire le caractère prédictif global de l'*outil de calcul scientifique*(*) hors de ce domaine ;
- la cohérence des *ajustements*(*) entre les différents calculs de *validation*(*) (qu'il s'agisse de *validation*(*) à effets séparés ou de *validation*(*) intégrale) est à rechercher. L'impact d'éventuelles incohérences sur le caractère prédictif de l'OCS devra être évalué.

3.4. Quantification des incertitudes

La *validation*(*) devrait permettre, par la comparaison des résultats fournis par l'OCS avec ceux des *cas de validation*(*), l'évaluation des différentes *incertitudes*(*) :

- *incertitudes*(*) issues de la *validation*(*) à effets séparés, associées à chaque modèle physique élémentaire ;
- *incertitudes*(*) issues de la *validation*(*) intégrale, associées à la prédiction par l'OCS des *grandeurs d'intérêt*(*).

L'appréciation des *incertitudes*(*) issues de la *validation*(*) intégrale devrait tenir compte, dans la mesure du possible, des *incertitudes*(*) des modèles physiques élémentaires issues des calculs de *validation*(*) à effets séparés retenus, afin de limiter au mieux les compensations d'erreurs.

Pour les cas où il ne serait pas possible de comparer les résultats fournis à des données expérimentales ou à des résultats obtenus à l'aide d'OCS de référence, l'évaluation des *incertitudes*(*) peut, moyennant des justifications, s'appuyer sur des comparaisons avec d'autres OCS, sur des jugements d'experts ainsi que sur des études de sensibilité.

Enfin, les méthodes de quantification des différentes *incertitudes*(*) devront être décrites et justifiées.

Lorsque la détermination des différentes *incertitudes*(*) s'avère particulièrement complexe, une approche alternative dite « conservative » peut être utilisée : cette approche consiste à montrer que l'application d'hypothèses conservatives (sur les conditions initiales ou aux limites, ou encore sur les modèles physiques) permet d'obtenir une valeur conservative des *grandeurs d'intérêt*(*) des *cas de validation*(*).

3.5. Synthèse du chapitre 3

La mise en œuvre de ce processus contribue à l'élaboration du dossier de *qualification*(*) au regard de son *champ d'utilisation*(*). Elle est propre à la version considérée de l'OCS. Sur la base de ce dossier, un *domaine de validation*(*) est défini, c'est-à-dire le domaine de variation de grandeurs caractéristiques (pression, température, débit, puissance, taux d'enrichissement, type de combustible, géométrie...) couvert par les *cas de validation*(*) et pour lequel les résultats de l'OCS sont jugés satisfaisants.

Une attention particulière doit être portée à la définition du *domaine de validation*(*), qui peut être délicate dans certains cas notamment lorsqu'il subsiste des configurations potentiellement non couvertes expérimentalement.

4. TRANSPOSITION POUR L'UTILISATION DE L'OCS DANS LA DÉMONSTRATION VISÉE

L'objectif de la transposition est de préciser la manière dont les conclusions de la *validation*(*) de l'OCS s'appliquent au *champ d'utilisation*(*) visé.

La transposition peut être réalisée en deux étapes :

- une première étape consistant à identifier les différences géométriques (effet d'échelle) et physiques entre les *cas de validation*(*) (par exemple des maquettes expérimentales ou des données recueillies sur l'INB elle-même) et le *champ d'utilisation*(*) pour l'installation visée. L'impact de ces différences sur les phénomènes physiques dominants (liste et intensité des phénomènes) et les *paramètres influents*(*) est évalué, en s'appuyant notamment sur une analyse physique. Si l'impact est très faible, voire nul, cette étape peut suffire ;
- une seconde étape consistant, le cas échéant, à évaluer la capacité des modèles à rester prédictifs (ou pénalisants) compte tenu des différences identifiées entre le *domaine de validation*(*) de l'OCS et le *domaine d'utilisation*(*). Cette évaluation peut reposer sur des éléments expérimentaux complémentaires, sur des calculs de sensibilité ou sur des jugements d'experts. Elle inclut notamment la justification de la transposition des *ajustements*(*) et des *incertitudes*(*).

Enfin, au cours de la transposition, il est important de s'assurer que les choix de modélisation des études de sûreté (modèles physiques, maillage spatial, discrétisation temporelle, schémas numériques, critères de convergence, options de calcul, etc.) dans le *champ d'utilisation*(*) visé sont cohérents avec les choix retenus pour les *cas de validation*(*). En cas d'incohérence, les *simulations*(*) des *cas de validation*(*) devraient être révisées. À défaut, l'impact de cette incohérence sur les études de sûreté devra être évalué.

À l'issue de la transposition, le *domaine de validité*(*) de l'OCS est défini.

5. PRONONCÉ DE LA QUALIFICATION

La *qualification*(*) de l'OCS est prononcée par l'exploitant pour le *champ d'utilisation*(*) visé au vu des éléments obtenus par les processus décrits aux chapitres 2 à 4.

La *qualification*(*) est prononcée si les conditions suivantes sont réunies :

- l'OCS est capable de calculer les *grandeurs d'intérêt*(*) pour le *champ d'utilisation*(*) visé avec des valeurs d'*incertitudes*(*) adaptées aux besoins des études de sûreté dans lesquelles il sera employé ;



- le *domaine d'utilisation*(*) pour lequel la *qualification*(*) est prononcée se situe à l'intérieur du *domaine de validité*(*) de l'OCS.

L'exploitant peut prononcer la *qualification*(*) d'un OCS lorsque les démarches décrites aux chapitres 3 et 4 n'ont pas été entièrement suivies : l'exploitant justifie alors que, dans le *champ d'utilisation*(*) visé, des hypothèses et découplages retenus dans la méthode permettent d'obtenir des valeurs conservatives des *grandeurs d'intérêt*(*) des études de sûreté concernées.

Le document concrétisant la *qualification*(*) doit indiquer :

- la version de l'OCS concernée ainsi que celles des pré- et post-processeurs nécessaires pour la réalisation des études prévues (cf. chapitre 6.1) ;
- le *champ et le domaine d'utilisation*(*) de l'OCS ;
- le cas échéant, la ou les *méthodes d'étude*(*) avec lequel l'OCS doit être utilisé (cf. chapitre 6.6).

6. POINTS PARTICULIERS

6.1. Pré- et post-traitements

La plupart du temps, le calcul des *grandeurs d'intérêt*(*) par les OCS nécessitent des mises en données⁵ et des post-traitements (maillages, interpolations de données ou de résultats, projections, calculs de grandeurs dérivées ou de grandeurs statistiques, tracés de courbes ou graphiques, etc.) qui peuvent avoir *in fine* une influence sur les valeurs des *grandeurs d'intérêt*(*).

Les logiciels de pré- et post-traitement dont l'utilisation est nécessaire pour la réalisation des études par l'OCS ainsi que leurs conditions d'utilisation doivent être pris en compte dans la démarche de *qualification*(*). Par ailleurs, une *vérification*(*) adéquate de ces outils doit être réalisée.

6.2. Chaînages et couplages

Un OCS peut être constitué d'un *chaînage*(*) ou d'un *couplage*(*) de plusieurs OCS. Ces OCS doivent alors avoir été préalablement vérifiés et validés. *A priori*, aucune distinction en termes d'exigences de *qualification*(*) ne doit être faite par rapport au cas d'un OCS unique. De ce fait, les étapes de *vérification*(*), de *validation*(*) à effets séparés, de *validation*(*) intégrale puis de transposition sont nécessaires.

Certaines spécificités doivent toutefois être prises en considération :

- durant l'étape de *vérification*(*), il est nécessaire de veiller à ce que les liens ou les interfaces entre les OCS soient correctement conçus et mis en œuvre (vérification fonctionnelle) ;
- durant les étapes de *validation*(*), des éléments démontrant la maîtrise de la convergence pour les *couplages*(*) (convergence spatiale, temporelle mais aussi des itérations de *couplage*(*)) devront être apportés ;
- dans le cas d'un *chaînage*(*) d'OCS, l'étape de *validation*(*) intégrale peut ne pas être nécessaire à condition d'avoir réalisé :
 - o une analyse de la pertinence du *chaînage*(*), par exemple par comparaison à un *couplage*(*) d'OCS ;
 - o une vérification fonctionnelle du *chaînage*(*) ;

⁵ Par exemple, la réalisation de jeux de données avec des logiciels de prétraitement

- dans le cas d'un *couplage*(*) d'OCS, la *validation*(*) intégrale peut ne pas être nécessaire si l'exploitant démontre que le *couplage*(*) des phénomènes physiques modélisés par les différents OCS ne remet pas en cause l'identification et l'ampleur des phénomènes physiques dominants.

In fine, il faut veiller à ce que le *domaine de validité*(*) de chaque OCS intervenant dans un *chaînage*(*) ou *couplage*(*) d'OCS soit respecté. Les données des différents OCS doivent se trouver dans leurs domaines de validité respectifs.

6.3. Effet lié à l'utilisateur

Les résultats obtenus avec l'OCS par un utilisateur peuvent différer des résultats obtenus par un autre utilisateur avec le même OCS. Des précautions peuvent être prises afin de limiter cet effet, par exemple en encadrant l'accès des utilisateurs aux possibilités de paramétrages et choix de modélisation.

6.4. Outils spécialisés

Pour certaines études de la démonstration de sûreté, un OCS spécialisé peut être élaboré à partir d'OCS généralistes (neutronique, thermohydraulique, mécanique, etc.).

Pour cet OCS spécialisé, la *qualification*(*) est à prononcer uniquement pour les champs d'utilisation visés. Les processus prévus aux chapitres 3 et 4 peuvent s'appuyer sur des éléments de *vérification*(*), *validation*(*), quantification des *incertitudes*(*) et transposition établis pour l'OCS généraliste. Il est néanmoins nécessaire de montrer que ces éléments sont effectivement pertinents pour le *champ d'utilisation*(*) visé de l'OCS spécialisé.

6.5. Cas de manques dans les données expérimentales

Les étapes de *validation*(*) à effets séparés et de *validation*(*) intégrale doivent autant que possible s'appuyer sur des résultats expérimentaux ou des éléments du retour d'expérience pertinents pour le *champ d'utilisation*(*) visé. Dans certains cas, ces résultats ne sont pas disponibles (car non atteignables techniquement par exemple). Il est alors possible de procéder à des démarches alternatives.

Ainsi, la *validation*(*) peut être réalisée sur la base de :

- comparaisons à un OCS de référence ;
- réalisations *d'évaluations croisées*(*) avec d'autres OCS équivalents. Cette alternative est à exploiter avec précaution car les modèles de ces OCS peuvent être similaires voire identiques et donc ne pas apporter de validation physique des modèles de l'OCS.

Par ailleurs, les résultats d'études de sensibilité aux modèles physiques et aux choix de modélisation peuvent être exploités. En effet, si de telles études de sensibilité montrent qu'*in fine* les *grandeurs d'intérêt*(*) sont peu sensibles à certains modèles physiques et au choix de modélisation, l'étape de *validation*(*) peut être adaptée. Cependant, pour les choix de modélisation, la pertinence de ces études de sensibilité est nécessairement limitée par les capacités de l'OCS. Ces résultats sont donc à exploiter avec les réserves nécessaires.

Enfin, il est possible de couvrir les manques de données expérimentales et donc les lacunes de *validation*(*) correspondantes par des choix d'hypothèses permettant d'obtenir une valeur conservative des *grandeurs d'intérêt*(*). Dans ce cas, la justification du caractère suffisant de ces hypothèses doit être apportée.

6.6. Lien avec les méthodes d'étude

Les OCS sont généralement employés en liaison avec des *méthodes d'étude*(*) dont l'arrêté en référence [3] précise qu'elles doivent être « *appropriées, explicitées et validées* ».

Dans certains cas, l'OCS peut être disjoint de la *méthode d'étude*(*). Dans ces cas, la *qualification*(*) de l'OCS peut être prononcée sans mentionner la *méthode d'étude*(*).

Dans d'autres cas, la *méthode d'étude*(*) est uniquement appropriée et validée pour un ou plusieurs OCS donnés, qui exécutent les calculs en déclinant la démarche prévue dans cette méthode. Dans ce cas, la *qualification*(*) de l'OCS doit mentionner la *méthode d'étude*(*) appliquée.

Par ailleurs, la *validation*(*) et la transposition peuvent nécessiter des analyses complémentaires pour l'utilisation de l'OCS dans la *démonstration de sûreté nucléaire*(*) dans le cadre de l'application d'une *méthode d'étude*(*). En effet, certaines hypothèses ou découplages introduits dans les méthodes peuvent éventuellement affecter le résultat de l'OCS. Ces analyses complètent alors les dossiers de méthode d'étude.

Enfin, comme mentionné au chapitre 6.5, en cas de manques dans les données expérimentales ou lorsque les *incertitudes*(*) n'ont pas été déterminées (cf. chapitre 3.4), des hypothèses particulières peuvent être retenues dans les *méthodes d'étude*(*) afin d'assurer le caractère conservatif des valeurs des *grandeurs d'intérêt*(*).

7. COMPOSITION DU DOSSIER À FOURNIR À L'ASN

Le dossier de *qualification*(*) capitalise l'ensemble des connaissances acquises à travers les différentes étapes décrites aux chapitres 2 à 6.

7.1. Cas de la première qualification d'un OCS

Pour le cas de la première *qualification*(*) d'un OCS, les éléments associés à la description de l'OCS (voir annexe), aux étapes associées à la description du *champ d'utilisation*(*) et à l'identification des phénomènes physiques dominants, à la *validation*(*) et à la quantification des *incertitudes*(*) et à la transposition sont à transmettre à l'ASN.

L'étape de *vérification*(*) (cf. chapitre 3.2) ne fait généralement pas l'objet d'une instruction technique et donc les éléments associés ne sont pas à transmettre.

7.2. Cas de la qualification d'un OCS pour une modification du champ ou du domaine d'utilisation ou pour une nouvelle méthode d'étude

En cas de modification du champ ou du *domaine d'utilisation*(*) visé, ou bien de mise en œuvre d'une nouvelle *méthode d'étude*(*), il est nécessaire de s'assurer que ces évolutions ne remettent pas en cause les éléments du dossier de *qualification*(*), en particulier en ce qui concerne l'identification des phénomènes physiques dominants et, le cas échéant, le caractère suffisant de la base de *validation*(*). Si tel n'est pas le cas, il est nécessaire d'étendre la base de *validation*(*) et de définir le *domaine de validité*(*) issu de l'étape de transposition, suivant la démarche décrite aux chapitres 3 et 4.

La description de la modification du champ ou du *domaine d'utilisation*(*) ainsi que la justification du *domaine de validité*(*) de l'OCS sont des éléments à transmettre à l'ASN.



7.3. Cas d'une nouvelle version d'un OCS

Une nouvelle version d'un OCS est le résultat d'une ou plusieurs évolutions correspondant aux actions suivantes :

- maintenance corrective (correction d'une erreur dans le code source) ;
- maintenance adaptative (adaptation à une évolution de l'environnement informatique) ;
- maintenance évolutive ou développement (modification d'algorithmes, de *schémas de calcul*(*), de modèles physiques, introduction de nouvelles fonctionnalités comme des nouveaux solveurs ou de nouveaux modèles physiques, etc.).

L'impact des évolutions sur la *qualification*(*) de l'OCS est analysé en suivant une démarche prenant en compte leur importance. Cette analyse peut s'appuyer selon les cas, soit sur un argumentaire, soit sur une analyse de *non-régression*(*) de la *vérification*(*) et de la *validation*(*) menée à partir d'une base représentative de cas tests (base à définir au cas par cas). Certaines évolutions, notamment celles liées aux modèles physiques et affectant la réponse de l'OCS, peuvent nécessiter de recalculer voire de compléter les *cas de validation*(*).

La description de ces évolutions et leurs impacts sur les étapes de *validation*(*) et transposition sont des éléments à transmettre à l'ASN.

GLOSSAIRE

Ajustement

Processus consistant à ajuster les paramètres des modèles de l'*outil de calcul scientifique*(*), de manière à minimiser la différence entre les valeurs calculées et les valeurs de référence.

Cas de validation

Tout ensemble de données jugé pertinent et retenu pour réaliser la validation à effets séparés ou la validation intégrale d'un OCS (essai expérimental, retour d'expérience, *simulation*(*) à l'aide d'un *outil de calcul scientifique de référence*(*), *solution analytique*(*),...).

Chaînage / couplage d'OCS

Un OCS peut être composé de plusieurs OCS liés entre eux par des outils d'interface qui permettent un « *chaînage*(*) » (lorsque les résultats d'un premier OCS servent de données d'entrée à un second) ou un *couplage*(*) (*chaînage*(*) avec rétroactions ou lorsque les OCS effectuent leurs *simulations*(*) respectives en parallèle, avec partage des résultats intermédiaires par exemple).

Champ d'utilisation

Ensemble des situations ou des scénarios étudiés dans le cadre de la démonstration de sûreté que l'on vise à justifier au moyen de cet OCS.

Démonstration de sûreté nucléaire (définition de l'arrêté en référence [3])

Art. 1.3

« Ensemble des éléments contenus ou utilisés dans le rapport préliminaire de sûreté et les rapports de sûreté mentionnés aux articles 8, 20, 37 et 43 du décret du 2 novembre 2007 et participant à la démonstration mentionnée au deuxième alinéa de l'article L. 593-7 du code de l'environnement, qui justifient que les risques d'accident, radiologiques ou non, et l'ampleur de leurs conséquences sont, compte tenu de l'état des connaissances, des pratiques et de la vulnérabilité de l'environnement de l'installation, aussi faibles que possible dans des conditions économiques acceptables. »

Art. 3.8:

« I/ La démonstration de sûreté nucléaire s'appuie sur :

- des données à jour et référencées ; elle tient notamment compte des informations disponibles mentionnés à l'article 2.7.2 ;
- des méthodes appropriées, explicitées et validées, intégrant des hypothèses et des règles adaptées aux incertitudes et aux limites des connaissances des phénomènes mis en jeu ;
- des outils de calcul et de modélisation qualifiés pour les domaines dans lesquels ils sont utilisés.

II/ L'exploitant précise et justifie ses critères de validation des méthodes, de qualification des outils de calcul et de modélisation et d'appréciation des résultats des études réalisées pour démontrer la sûreté nucléaire. »

Domaine de validation

Domaine de variation des grandeurs caractéristiques géométriques ou physiques (pression, température, débit, puissance, etc.) pour lequel les résultats de l'OCS sont jugés satisfaisants.

Domaine de validité

Le domaine de validité résulte de l'adaptation éventuelle, à l'issue de la transposition, du *domaine de validation*(*) en vue de l'application visée.

Domaine d'utilisation

Domaine de variation des grandeurs caractéristiques géométriques ou physiques (pression, température, débit, puissance, etc.) pour les scénarios du *champ d'utilisation*(*) visé.

Évaluation croisée

Étude permettant de comparer les résultats d'un OCS à ceux d'un autre OCS ou à des résultats de calcul de référence.

Fonctionnement normal (définition de l'arrêté en référence [3])

Art. 1.3

« *Fonctionnement de l'installation qui comprend l'ensemble des états et des opérations courants de l'installation, y compris les situations de maintenance ou d'arrêt programmées, que les matières radioactives soient présentes ou non ; relève également du fonctionnement normal toute situation définie comme telle dans la démonstration mentionnée au deuxième alinéa de l'article L. 593-7 du code de l'environnement.* »

Grandeurs d'intérêt

Les grandeurs d'intérêt sont celles dont la valeur permet de statuer, directement ou indirectement, sur le respect des critères techniques d'acceptation liés au comportement du combustible, à respecter pour l'étude visée.

Incertitude

Gamme de variation du résultat d'une mesure ou d'un calcul qui caractérise les valeurs possibles et qui contient vraisemblablement la valeur réelle de la réponse cible considérée.

Méthode d'étude

Démarche définissant certaines hypothèses (conditions initiales, aux limites, etc.), la prise en compte des *incertitudes*(*), les pénalités, les *schémas de calcul*(*) et l'enchaînement des calculs nécessaires à l'étude de sûreté, en cohérence avec les règles de la *démonstration de sûreté nucléaire*(*).

Non-régression

Absence de dégradation significative des résultats de calcul des *grandeurs d'intérêt*(*) par un OCS.

Outil de calcul scientifique (OCS)

Les OCS sont des logiciels qui effectuent la *simulation numérique*(*) de phénomènes physiques. Ils sont composés d'un ou plusieurs solveurs et éventuellement de pré- et post-processeurs

- les solveurs sont conçus en plusieurs étapes successives :
 - o formulation d'hypothèses de modélisation physique, conduisant généralement à un système d'équations ;
 - o élaboration d'algorithmes de résolution numérique de ces équations ;
 - o implémentation de ces algorithmes ;
- les pré-processeurs permettent d'introduire les données de calcul (maillage, caractéristiques physiques, etc.) ;
- les post-processeurs permettent l'exploitation des résultats de calcul, en particulier sous forme graphique.

Outil de calcul scientifique de référence

Outil de calcul scientifique dont les performances prédictives sont jugées supérieures à celles attendues de l'outil de calcul scientifique à valider.

Par exemple, en neutronique, des OCS de type « Monte-Carlo » ou déterministes avec un nombre très élevé de groupes d'énergie et de mailles spatiales peuvent, dans certains cas, être considérés comme OCS de référence.



Paramètres influents

Paramètres d'entrée géométriques ou physiques de l'étude visée ou des *cas de validation*(*) qui, du fait de leur contribution aux phénomènes physiques dominants, ont un impact sur les *grandeurs d'intérêt*(*).

Qualification

Reconnaissance par l'exploitant qu'un OCS est apte à fournir des résultats utilisables dans le cadre de la *démonstration de sûreté nucléaire*(*).

Schéma de calcul

Ensemble de choix de modélisation effectués pour réaliser une *simulation*(*) numérique. Il définit notamment le choix des modèles physiques, des corrélations, de la discrétisation spatiale (maillage) et temporelle (pas de temps), des options de calcul et, plus généralement, tous les choix qui conditionnent la réalisation du calcul.

Simulation (numérique)

Action qui met en œuvre un ou des OCS, avec des schémas de calculs et des données d'entrée, pour produire des résultats numériques décrivant l'évolution d'une situation physique.

Solution analytique

Solution d'un problème théorique qui peut s'exprimer sous forme d'expressions mathématiques.

Sûreté nucléaire

Définition de l'article L591.1 du code de l'environnement : *La sûreté nucléaire est l'ensemble des dispositions techniques et des mesures d'organisation relatives à la conception, à la construction, au fonctionnement, à l'arrêt et au démantèlement des installations nucléaires de base ainsi qu'au transport des substances radioactives, prises en vue de prévenir les accidents ou d'en limiter les effets.*

Validation

La validation consiste à s'assurer qu'un OCS permet de simuler de manière satisfaisante les phénomènes physiques dans le *domaine de validation*(*).

Vérification

La vérification consiste à s'assurer que l'OCS fonctionne comme voulu (réalisation informatique et numérique correcte, résultats numériques corrects).

ANNEXE

Description de l'outil de calcul scientifique

D'une manière générale, la description de l'OCS doit permettre d'appréhender son fonctionnement, les modèles et les méthodes numériques utilisés dans le champ d'utilisation visé de l'*outil de calcul scientifique*(*).

Le document descriptif de l'*outil de calcul scientifique*(*) devrait comprendre :

- l'identification précise et complète de la version de l'*outil de calcul scientifique*(*) et, le cas échéant, des versions des éventuels outils de calcul qui le composent (cas des *couplages*(*) et des utilitaires de pré- ou post-traitement). À titre d'exemple, pour un outil de calcul neutronique : version de l'OCS, de la bibliothèque de procédures et de la bibliothèque de données nucléaires (sections efficaces, etc.) ;
- l'identification des plates-formes informatiques sur lesquelles l'OCS a été porté et vérifié ;
- la description des évolutions par rapport à la précédente version qualifiée (s'il en existe une) ;
- la description des modèles, au sens large, retenus pour simuler les phénomènes physiques identifiés dans le champ d'utilisation de l'*outil de calcul scientifique*(*) : équations résolues, lois de fermeture, modèles numériques, mode de représentation de l'espace (0D, 1D, 2D, 3D), *schémas de calcul*(*) et critères de convergence spatiale et temporelle, bibliothèques de propriétés des matériaux, etc. ;
- la description fonctionnelle de l'outil sous forme synthétique : le schéma général de l'architecture informatique, la liste des principaux modules de l'outil de calcul et leurs fonctions essentielles, la présentation des enchaînements de ces modules, ainsi que les schémas numériques mis en œuvre ; la description des schémas numériques et des équations qu'ils résolvent permet en particulier de juger de la cohérence d'ensemble.

Dans le cas d'un *chaînage*(*) d'OCS, les éléments ci-dessus seront fournis pour chaque chaînon et le mécanisme d'enchaînement sera décrit ; il en sera de même pour le cas de *couplage*(*) d'OCS couplés, pour lesquels seront de plus présentés un organigramme général du *couplage*(*) et les éléments justifiant la maîtrise de la convergence du *couplage*(*) (convergence spatiale, temporelle mais aussi des itérations de *couplage*(*)).

LA COLLECTION DES GUIDES DE L'ASN

- N°1 Stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde
- N°2 Transport des substances radioactives en zone aéroportuaire
- N°3 Recommandations pour la rédaction des rapports annuels d'information du public relatifs aux INB
- N°4 Auto-évaluation des risques encourus par les patients en radiothérapie externe
- N°5 Management de la sécurité et de la qualité des soins de radiothérapie
- N°6 Arrêt définitif, démantèlement et déclassement des INB en France
- N°7 Transport à usage civil de colis ou de substances radioactives sur la voie publique (*3 tomes : expéditions, colis soumis et non soumis à agrément*)
- N°8 Évaluation de la conformité des Équipements sous pression nucléaires
- N°9 Déterminer les périmètres d'une installation nucléaire (INB)
- N°10 Implication locale des CLI dans les 3^{èmes} visites décennales des réacteurs de 900 MWe
- N°11 Déclaration et codification des critères relatifs aux événements significatifs dans le domaine de la radioprotection (*hors INB et transports de substances radioactives*)
- N°12 Déclaration et codification des critères relatifs aux événements significatifs impliquant la sûreté, la radioprotection ou l'environnement applicable aux INB
- N°13 Protection des INB contre les inondations externes
- N°14 Assainissement des structures dans les INB en France
- N°15 Maîtrise des activités au voisinage des INB
- N°16 Événement significatif de radioprotection patient en radiothérapie : déclaration et classement sur l'échelle ASN-SFRO
- N°17 Contenu des plans de gestion des incidents et accidents de transport de substances radioactives
- N°18 Élimination des effluents et des déchets contaminés par des radionucléides produits dans les installations autorisées au titre du Code de la santé publique
- N°19 Application de l'arrêté du 12/12/2005 relatif aux équipements sous pression nucléaires
- N°20 Rédaction du Plan d'Organisation de la Physique Médicale (POPM)
- N°21 Traitement des écarts de conformité à une exigence définie d'un EIP REP - Risques d'accidents radiologiques
- N°22 Exigences de sûreté et recommandations pour la conception des REP
- N°23 Établissement et modification du plan de zonage déchets des INB
- N°24 Gestion des sols pollués par les activités d'une INB
- N°25 Élaboration d'une décision réglementaire ou d'un guide de l'ASN : modalités de concertation avec les parties prenantes et le public
- N°27 Arrimage des colis, matières ou objets radioactifs en vue de leur transport
- N°28 Qualification des outils de calcul scientifique utilisés dans la démonstration de sûreté nucléaire
- N°31 Déclaration des événements liés au transport de substances radioactives (*sur voie publique terrestre, voie maritime ou aérienne*)
- N°32 Installations de médecine nucléaire in vivo - Règles techniques minimales de conception, d'exploitation et de maintenance



15, rue Louis Lejeune
92120 Montrouge
Centre d'information du public : 01 46 16 40 16 • info@asn.fr

Coordonnées des divisions de l'ASN :

www.asn.fr/Contact

www.asn.fr/Professionnels

