

Projet de guide de l'ASN

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

Réalisé en partenariat avec
l'Institut de radioprotection
et de sûreté nucléaire



IRSN
INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Projet de **GUIDE N° 28**
SOUMIS A CONSULTATION DU PUBLIC

Version du 07/03/2017

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'expliciter une réglementation et les droits et obligations des personnes intéressées par la réglementation ;*
- d'expliciter 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 références réglementaires	4
1.1.1. Références réglementaires	4
1.1.2. Contexte réglementaire	4
1.2. Champ d'application du guide	5
1.3. Objet du guide	5
1.3. Statut du document	5
2. UTILISATION DE L'OCS DANS LE CHAMP D'UTILISATION VISÉ	6
2.1. Description du champ d'utilisation visé	6
2.2. Identification des phénomènes physiques dominants et hiérarchisation	6
2.2.1. Identification des grandeurs d'intérêt	6
2.2.2. Identification des phénomènes physiques dominants	6
2.2.3. Paramètres influents	6
2.2.4. Domaine d'utilisation	7
3. PROCESSUS DE VÉRIFICATION, VALIDATION ET QUANTIFICATION DES INCERTITUDES POUR L'ÉTUDE VISÉE	7
3.1. Préambule	7
3.2. Vérification	7
3.3. Validation	8
3.4. Détermination des incertitudes	9
3.5. Synthèse du chapitre 3	10
4. TRANSPOSITION POUR L'UTILISATION DE L'OCS DANS LA DÉMONSTRATION VISÉE	10
5. PRONONCE DE LA QUALIFICATION	11
6. POINTS PARTICULIERS	11
6.1. Pré- et post-traitements	11
6.2. Chaînages et couplages	11
6.3. Effet utilisateur	12
6.4. Outils spécialisés	12
6.5. Cas de manques dans les données expérimentales	12
6.6. Lien avec les méthodes	13
7. COMPOSITION DU DOSSIER À FOURNIR À L'ASN	13
7.1. Cas de la première qualification d'un OCS	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
7.2. Cas de la qualification d'un OCS pour une modification du champ ou du domaine d'utilisation ou pour une nouvelle méthode	14
7.3. Cas d'une nouvelle version d'un OCS	14
9. GLOSSAIRE	15



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

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 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.





1.2. 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 de calcul « 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*^(*) et les *incertitudes*^(*) associées 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 préconisations dont la mise en œuvre permet de s'assurer qu'un OCS est qualifié conformément aux 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 utilisable au stade de la conception initiale ou lors de modifications de l'installation nucléaire de base (INB) pendant la période de fonctionnement ou au cours du démantèlement.

1.4. Statut du document

Le présent guide a été élaboré par l'ASN et l'IRSN avec la participation de représentants des industriels lors de certaines étapes. Il a été soumis à consultation du public du **XX au XX**.

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

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 avec fusion de combustible



Après avoir rappelé le contexte de la qualification, le guide aborde successivement :

- le champ d'utilisation visé de l'OCS dans la démonstration de sûreté (chapitre 2), qui doit être défini en préalable 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 (chapitre 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.

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 classés par ordre d'importance afin d'identifier les phénomènes physiques dominants. L'identification et le classement 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 devra 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 classés 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.



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 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 5.

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'erreur :

- 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.

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.



Cette validation s'appuie sur la comparaison des résultats de calculs sur des cas de validation par 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 3) 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 certaines recommandations ou de domaines de validation, 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, l'impact sur le caractère prédictif de l'outil de calcul scientifique devra être évalué. À cette fin :

- les ajustements permettent de diminuer les incertitudes de certaines grandeurs d'intérêt calculées dans un domaine donné, (mais ils peuvent 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 à 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 à 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 sur 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 qualification de l'OCS et son 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.) sont cohérents avec les choix retenus pour les cas de validation le champ d'utilisation visé. En cas d'incohérence, les simulations des cas de validation devraient être révisées. À défaut, l'impact de l'incohérence sur la validité des études de sûreté devra être évalué.

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

5. PRONONCE 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'incertitude 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 de 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, les grandeurs d'intérêt calculées par les OCS nécessitent des mises en données⁵ et des post-traitement (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.

⁵ Par exemple la réalisation de jeux de données avec des logiciels de pré-traitement



Certaines spécificités doivent toutefois être considérées :

- 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 de 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 ;
- dans le cas de 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 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, la 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

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. En effet, certaines hypothèses ou découplages introduits dans les méthodes peuvent éventuellement affecter le résultat de l'OCS.

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 des documents 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.



Enfin, dans certains cas, des analyses complémentaires justificatives de la pertinence de la validation et de la transposition peuvent être nécessaires dans le cadre de l'élaboration de méthodes liées aux OCS pour la démonstration de sûreté. Ces analyses complètent alors les dossiers de méthodes d'étude.

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

En cas de modification du champ ou du domaine d'utilisation visé, ou bien de mise en œuvre d'une nouvelle méthode, 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 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 de la qualification l'OCS 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 (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 visé

Ensemble de situations ou de scénarios des études de sûreté.

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 mentionnées 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. a

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 (et loi de probabilité associée) 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 par un OCS en ce qui concerne les grandeurs d'intérêt.

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 résultent de 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, en contribuant 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.

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 (réalisation informatique et numérique correcte, résultats numériques corrects) fonctionne comme voulu.



ANNEXE 1

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 plateformes 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'une chaîne 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 d'OCS couplés, pour lesquels seront de plus apportés 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 matières radioactives en zone aéroportuaire
- N°3 Recommandations pour la rédaction des rapports annuels d'information du public relatifs aux installations nucléaires de base
- 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 installations nucléaires de base 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 matières radioactives)
- N°12 Déclaration et codification des critères relatifs aux événements significatifs impliquant la sûreté, la radioprotection ou l'environnement applicable aux INB et au transport de matières radioactives
- N°13 Protection des Installations nucléaires de base contre les inondations externes
- N°14 Assainissement des structures dans les installations nucléaires de base en France
- N°15 Politique de Management de la sûreté dans les 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 installations nucléaires de base
- N°24 Gestion des sols pollués par les activités d'une installation nucléaire de base
- 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



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

<http://professionnels.asn.fr>

