

SÛRETÉ DES CENTRALES À EAU SOUS PRESSION

UTILISATION DE L'APPROCHE PROBABILISTE

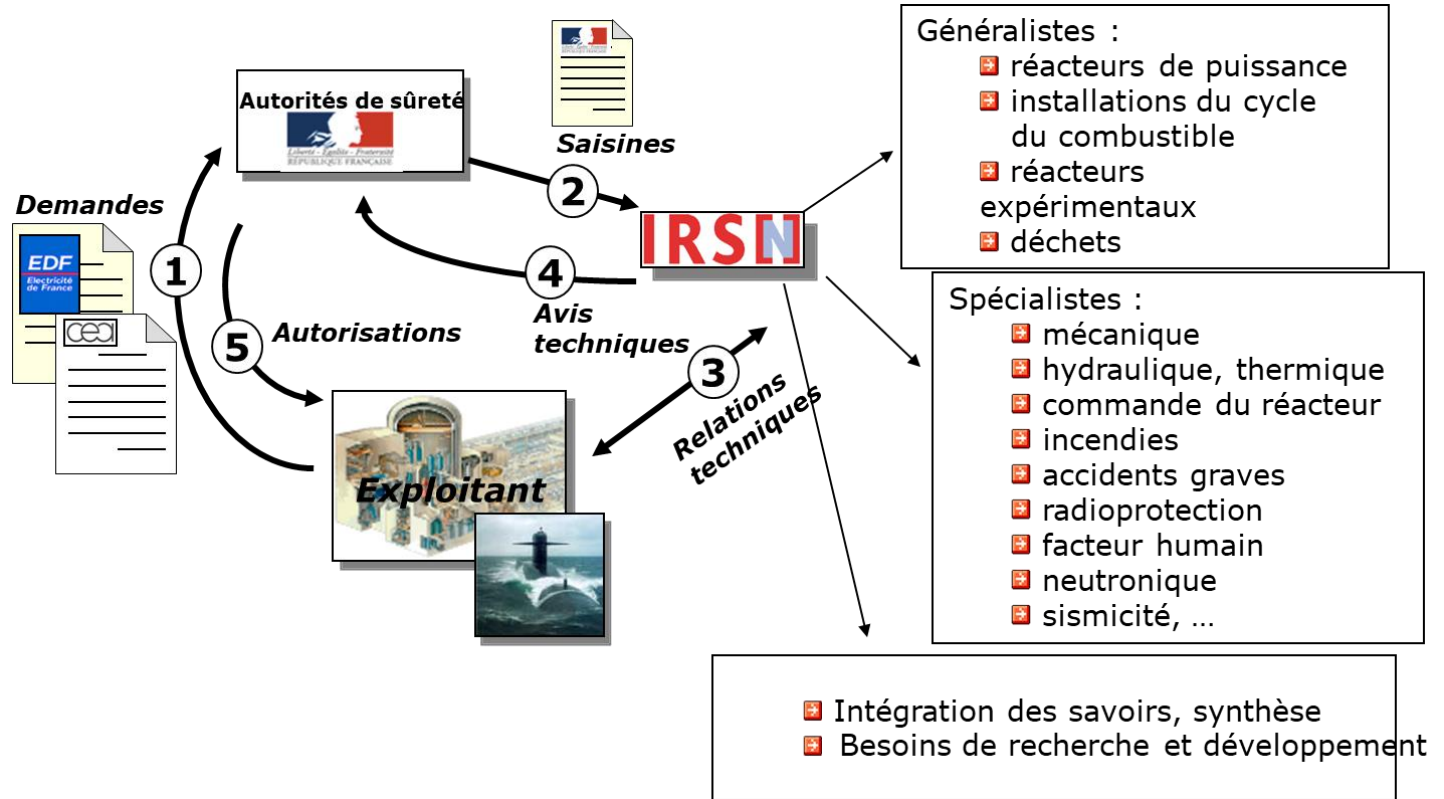
F. Corenwinder
IRSN/PSN-EXP/SSyR

Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire

- L'IRSN, créé par la loi sur l'AFSSE⁽¹⁾ puis par décret n°2002-254 du 22 février 2002, est un établissement public industriel et commercial, placé sous la tutelle conjointe des ministres chargés de la Défense, de l'Environnement, de l'Industrie, de la Recherche et de la Santé. Il rassemble plus de 1 700 experts et chercheurs issus de l'IPSN et de l'OPRI, et compétents en sûreté nucléaire et radioprotection ainsi que dans le domaine du contrôle des matières nucléaires et sensibles.
- Expertise et recherche
 - L'IRSN réalise des recherches, des expertises et des travaux dans les domaines de la sûreté nucléaire, de la protection contre les rayonnements ionisants, du contrôle et de la protection des matières nucléaires, et de la protection contre les actes de malveillance.
- Contrôle et expertise séparés
 - L'IRSN n'exerce pas de fonction d'autorité de contrôle. Pour plus de transparence, le gouvernement a décidé de séparer l'expertise technique de la fonction d'autorité de contrôle (autorisations et décisions à caractère réglementaire).

⁽¹⁾AFSSE : Agence française de sécurité sanitaire environnementale

Sûreté nucléaire : la méthode de travail



Sommaire

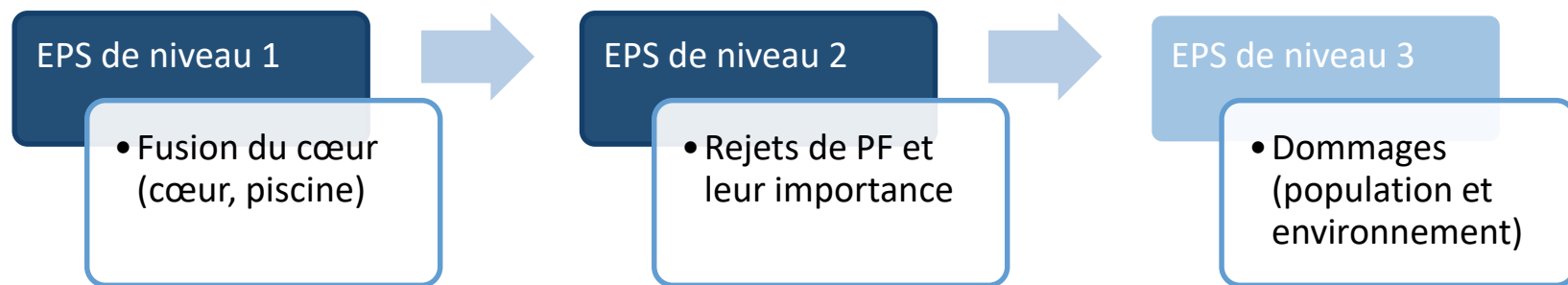
- Introduction générale
- Démarche (qu'est ce qu'une EPS)
- Quelques résultats et enseignements
- Utilisations des EPS
- Conclusion

Introduction générale

- Les différents types d'EPS, les méthodes et apports
- La genèse des EPS
- Le périmètre des études
- Les EPS dans la réglementation
- Les EPS développées en France

Les différents types d'EPS

[ÉVALUER LA PROBABILITÉ POUR QU'UNE INSTALLATION SOIT À L'ORIGINE D'UN ÉVÉNEMENT REDOUTÉ



L'approche probabiliste : la méthode



Quantification de la fréquence d'occurrence d'un événement « rare »
(ex. : *fusion du cœur*)

Par décomposition en scénarios élémentaires pouvant conduire à cet événement et quantifiables en utilisant la statistique des événements « non-rares »
(*événements initiateurs, défaillances des composants, erreurs humaines*)

Les EPS : méthodes et enseignements

La méthode

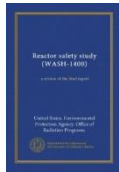
- Identification des initiateurs possibles
 - défaillances internes simples, multiples
 - erreurs humaines
 - agressions (internes, externes)
- Investigation des scénarios conduisant aux événements redoutés, modélisation
 - Combinaisons de défaillances matérielles, humaines, DCC
 - En tenant compte des dépendances
- Quantification des scénarios
- Interprétation des résultats : enseignements pour la sûreté ?

Les enseignements

- Quantifier le risque de l'installation
 - Vision macro du risque, positionnement par rapport à des cibles chiffrées
 - Comparaison avec un état antérieur de l'installation, voire d'autres installations
- Déterminer les scénarios accidentels les plus probables selon les événements redoutés
 - Identifier les défaillances (matérielles, FH) impliquées dans ces scénarios
 - Pister les contributeurs excessifs au risque
 - Cibler les éventuels besoins d'amélioration
- Hiérarchiser les composants en fonction de leur importance pour la sûreté

La genèse des EPS

- EPS utilisées dans tous les pays ayant un programme électronucléaire principalement pour les réacteurs nucléaires de puissance
- Considérées comme indispensables en complément à la démonstration déterministe, par tous les acteurs
- Requises par les Autorités de sûreté avec
 - rôle plus important pour les nouveaux réacteurs
 - extension du périmètre des études EPS

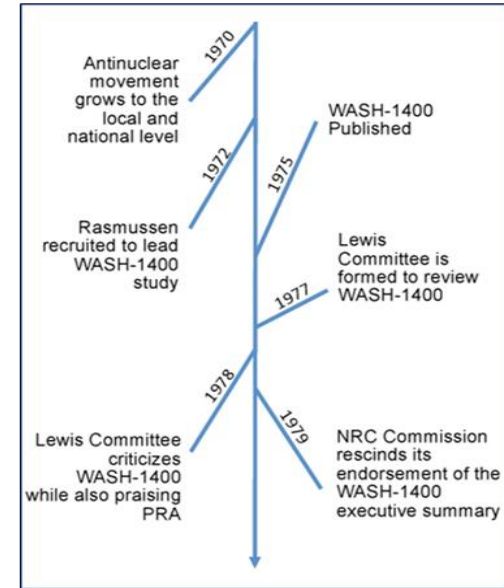
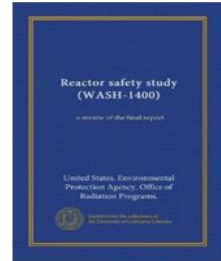


Le rapport Wash 1400 (ou rapport Rasmussen)

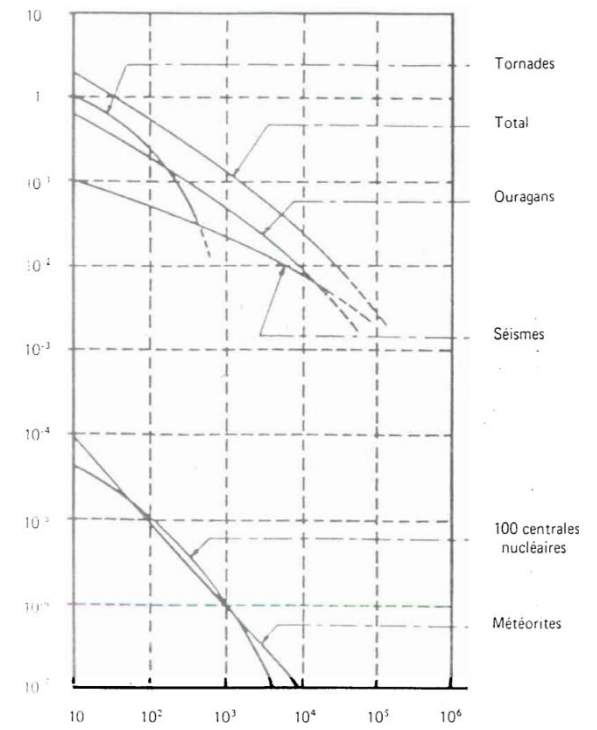
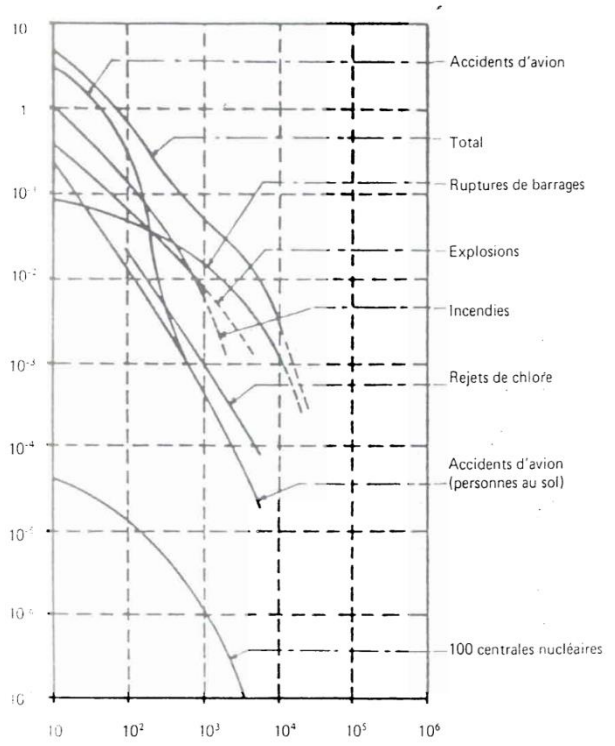


LA FAISABILITÉ

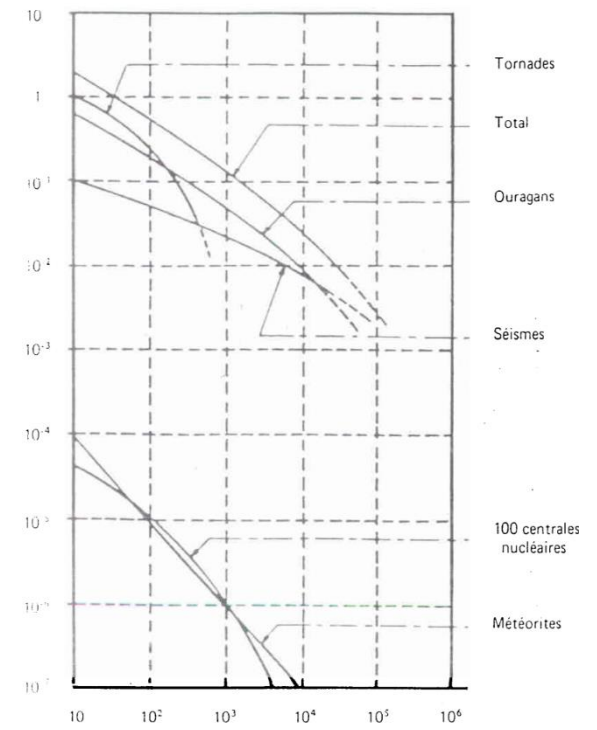
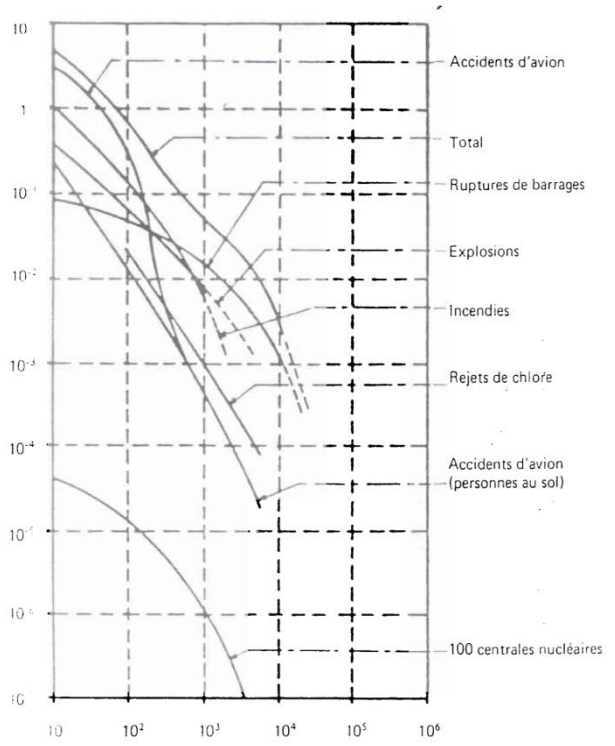
- EPS (1, 2 et 3) réalisées pour les réacteurs nucléaires de Surry 1 (REP) et de Peach Bottom 2 (REB) aux États-Unis de 1972 à 1975
 - Probabilité de fusion du cœur d'un réacteur nucléaire de $5 \cdot 10^{-5}$ /an
 - Conséquences sur l'environnement minimales : plusieurs heures à plusieurs dizaines d'heures entre la fusion et le relâchement, permettant l'évacuation des populations
 - Risque très faible, comparable à celui relatif aux météorites
 - Conclusions largement discutées par les partisans et adversaires de l'énergie nucléaire
- Recommandation : utilisation de l'approche probabiliste



Risques dus aux activités humaines ou aux événements naturels (exprimé en nombre de morts par effet immédiat)



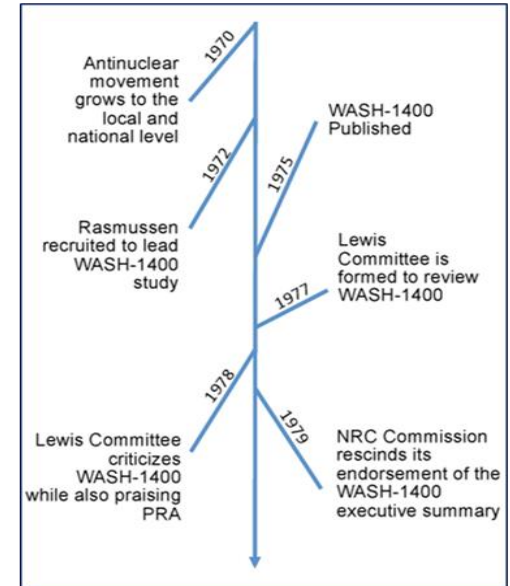
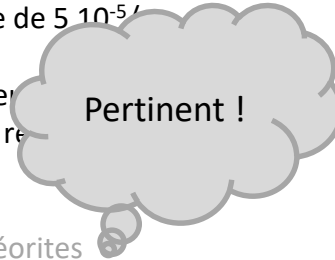
Risques dus aux activités humaines ou aux événements naturels (exprimé en nombre de morts par effet immédiat)



Le rapport Wash 1400 (ou rapport Rasmussen)

LA FAISABILITÉ

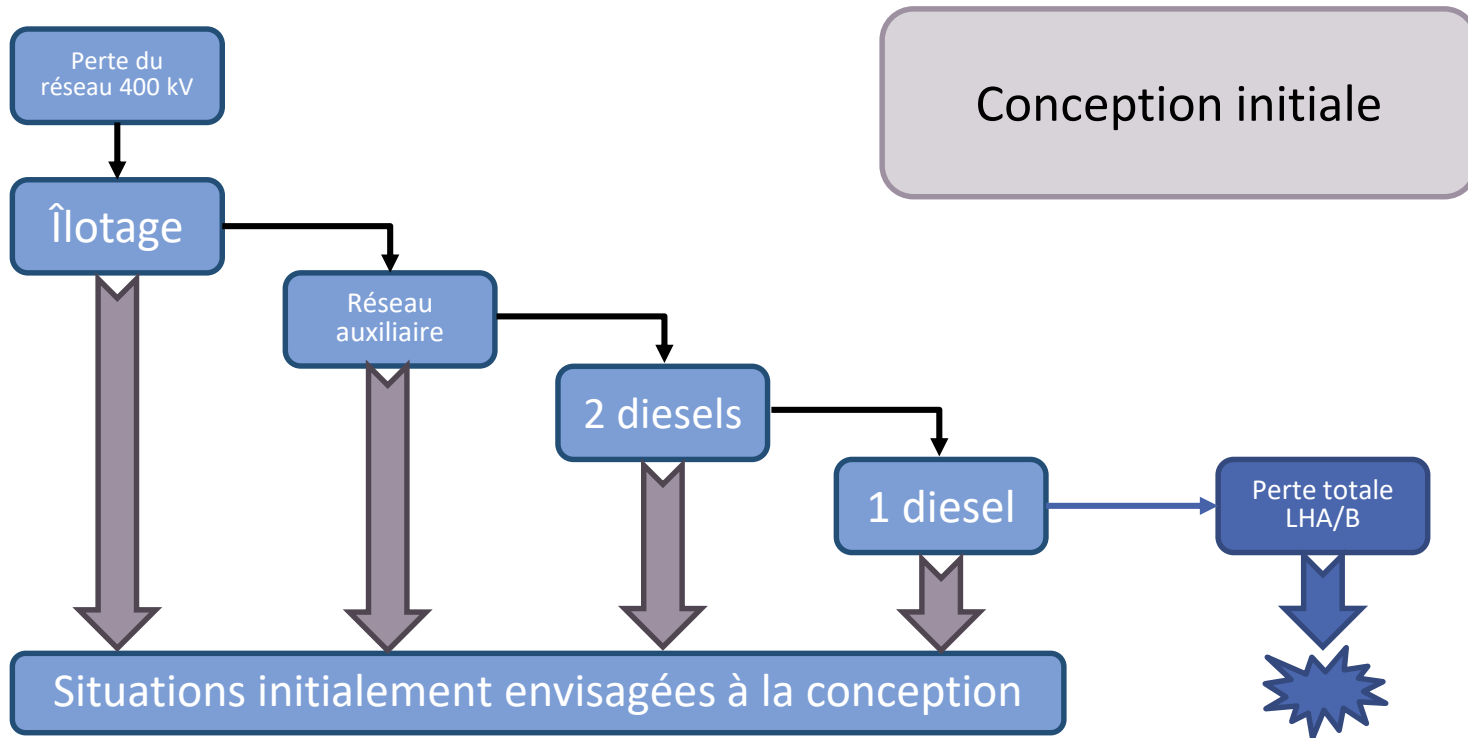
- EPS (1, 2 et 3) réalisées pour les réacteurs nucléaires de Surry 1 (REP) et de Peach Bottom 2 (REB) aux États-Unis de 1972 à 1975
 - Probabilité de fusion du cœur d'un réacteur nucléaire de $5 \cdot 10^{-5}$ / an
 - Conséquences sur l'environnement minimales : plusieurs dizaines d'heures entre la fusion et le réacteur s'arrêtant, permettant l'évacuation des populations
 - Risque très faible, comparable à celui relatif aux météorites
 - Conclusions largement discutées par les partisans et adversaires de l'énergie nucléaire
- Recommandation : utilisation de l'approche probabiliste



L'étude de la perte des alimentations électriques sur les REP Français



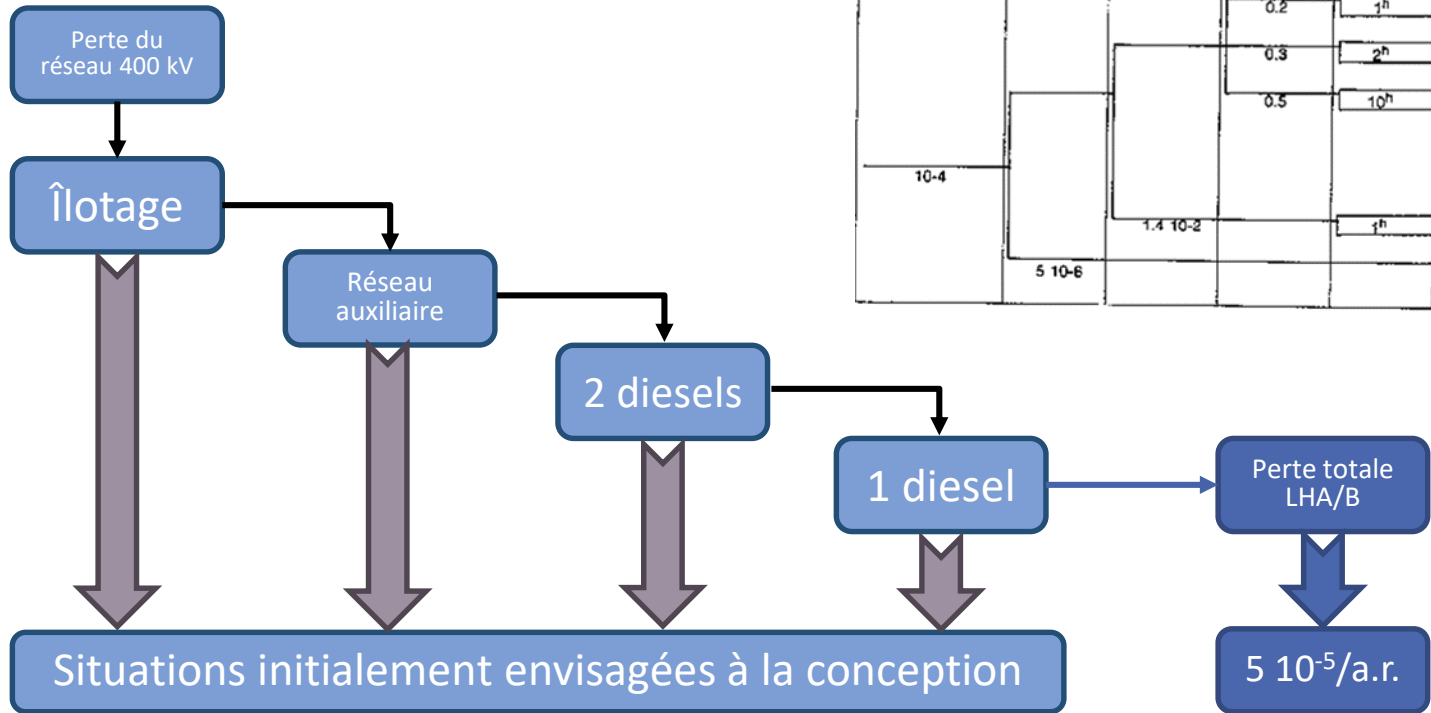
L'APPORT : LES SITUATIONS HORS DIMENSIONNEMENT



L'étude de la perte des alimentations électriques sur les REP Français



L'APPORT : LES SITUATIONS HORS DIMENSIONNEMENT

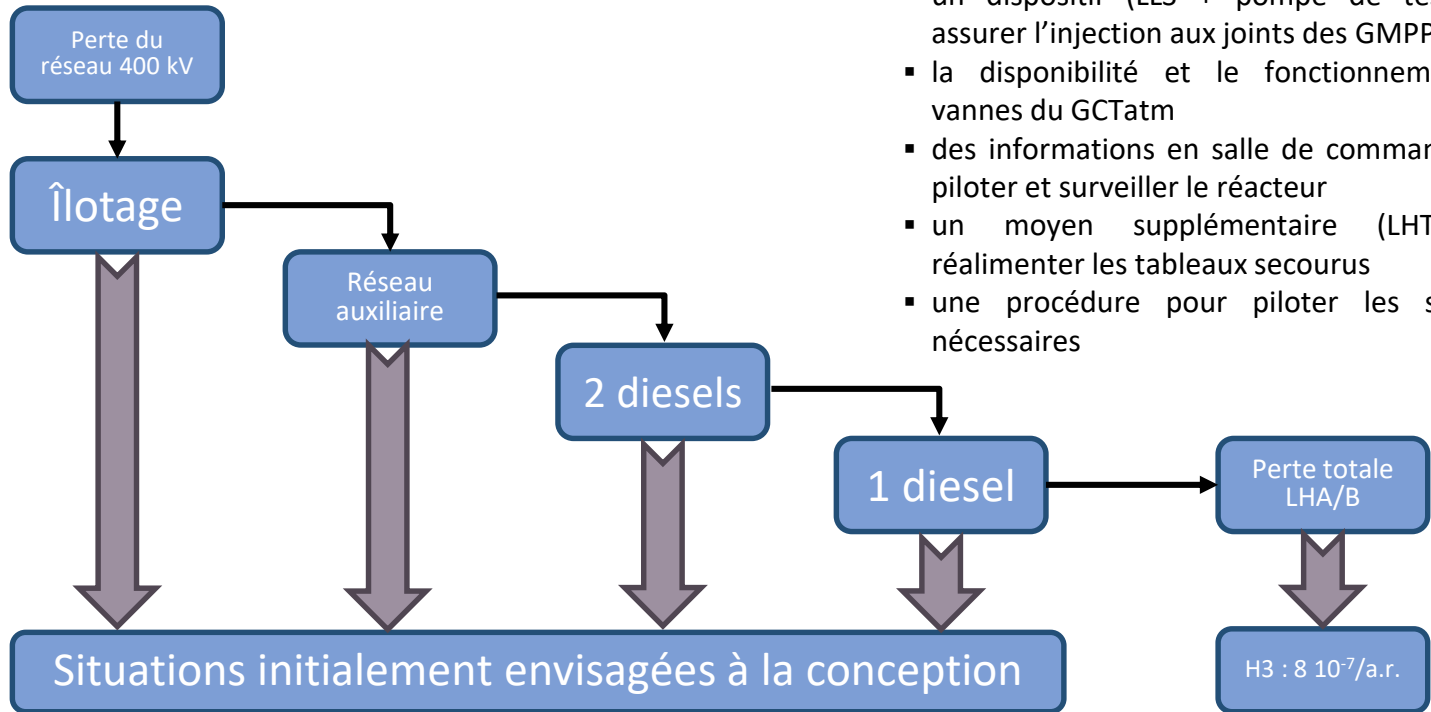


Initiateur	Arrêt d'urgence	ASG TPS	Brèche primaire	Retour tension	Probabilité estimée de fusion du cœur
			0.2	1 ^h	S F: $1.6 \cdot 10^{-5}$
			0.3	2 ^h	S F: $1.8 \cdot 10^{-5}$
			0.5	10 ^h	S F: $5 \cdot 10^{-6}$
10-4				1 ^h	S F: $1.1 \cdot 10^{-6}$
	5 10 ⁻⁶				F: $5 \cdot 10^{-10}$
		1.4 10 ⁻²			

L'étude de la perte des alimentations électriques sur les REP Français



L'APPORT : LES SITUATIONS HORS DIMENSIONNEMENT



Une faiblesse : la pompe primaire

Besoins de moyens supplémentaires :

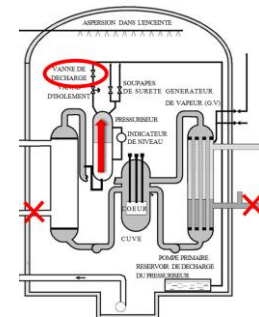
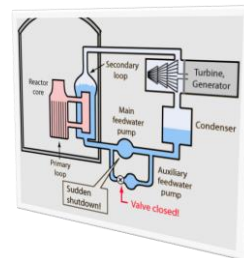
- un dispositif (LLS + pompe de test) pour assurer l'injection aux joints des GMPP
- la disponibilité et le fonctionnement des vannes du GCTatm
- des informations en salle de commande pour piloter et surveiller le réacteur
- un moyen supplémentaire (LHT) pour réalimenter les tableaux secours
- une procédure pour piloter les systèmes nécessaires

L'accident de Three Mile Island (mars 1979)



LE BESOIN : LIMITE DE L'APPROCHE DÉTERMINISTE AVEC UN ACCIDENT AVEC FUSION PARTIELLE

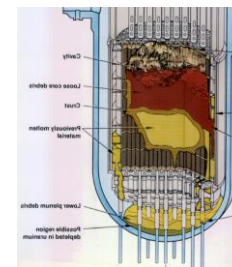
- Le rapport WASH 1400 avait mis en évidence les accidents débutant par une petite brèche et conduisant à la fusion
- L'accident présente des analogies avec certains scénarios du WASH 1400 :
 - un transitoire accidentelle
 - des erreurs humaines pré et post accidentelles
 - des défaillances mécaniques
- La commission créée suite à l'accident recommande de nouveau l'utilisation croissante des méthodes d'analyse probabiliste
- En 1980, la NRC lance ses premiers travaux relatifs aux objectifs de sûreté de nature probabiliste dans la réglementation



Les opérateurs croient que la vanne de décharge est fermée

Ils veulent préserver la « bulle » au pressuriseur

Ils arrêtent l'injection de sécurité !



Cruas décembre 2009 : Perte totale source froide du réacteur n°4 par colmatants

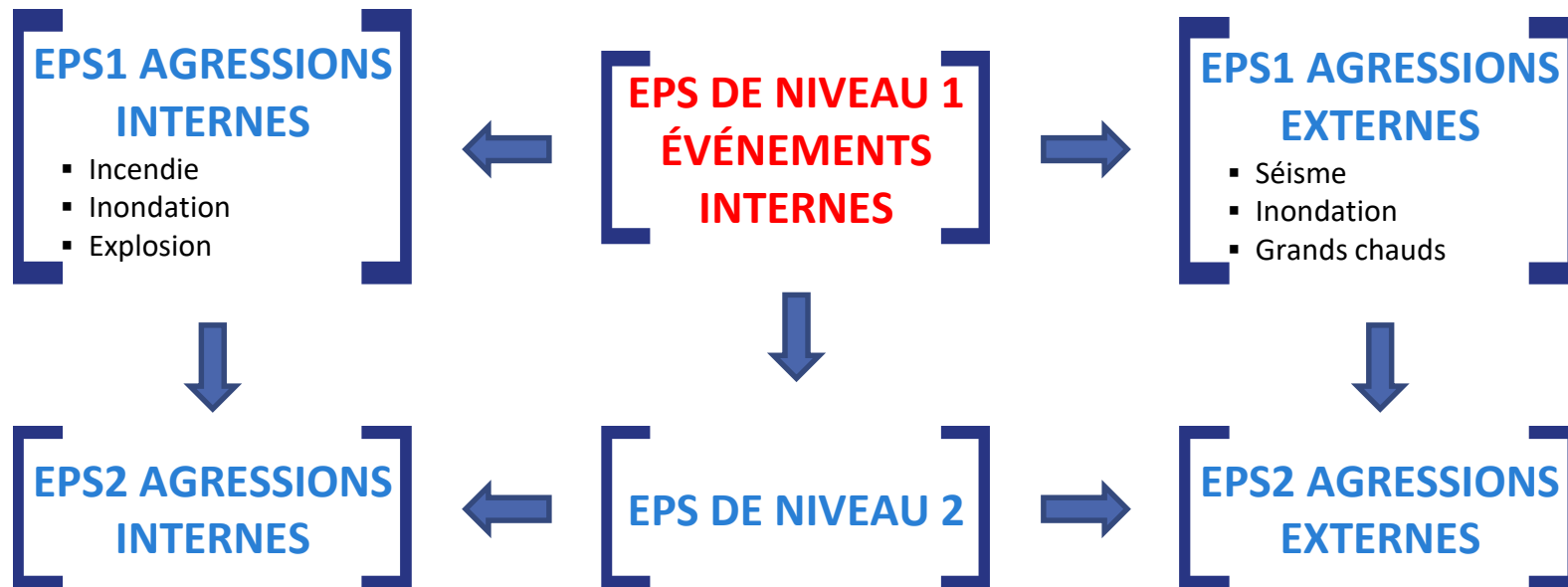


LE BESOIN : DES SITUATIONS INSUFFISAMMENT ANTICIPÉES AU DIMENSIONNEMENT INITIAL (PAS FORCÉMENT MOINS PROBABLES)

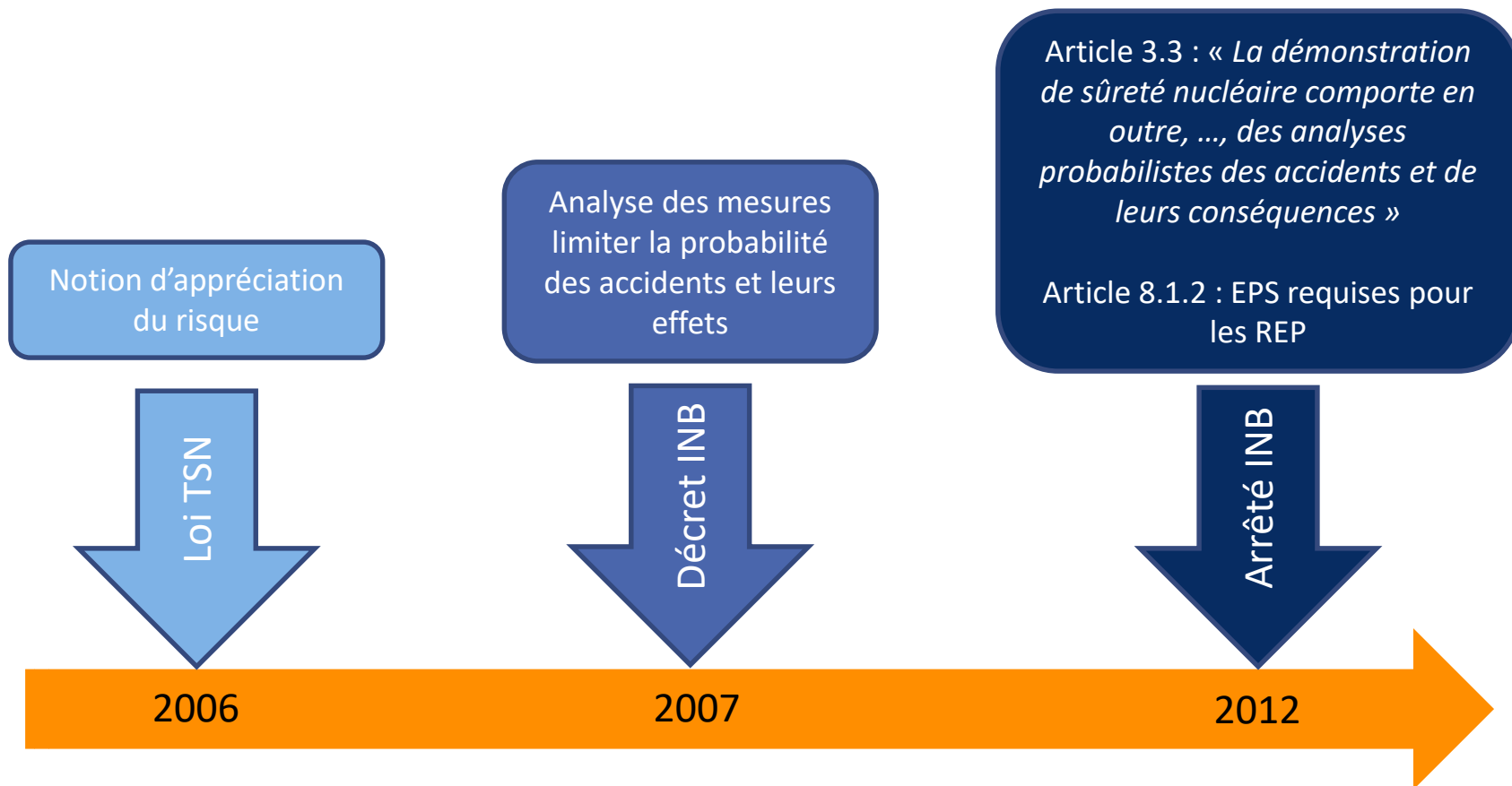
- Augmentation débit Rhône → arrivée d'une masse exceptionnelle de débris accumulés les mois précédents (env. 50 m³ au lieu de 5 m³/mois) → obstruction des stations de pompage des réacteurs 3 et 4
- TR 4 : bas débit voie A → basculement voie B mais bas débit → AAR et PUI avec une situation de perte de la source froide
- Autres tranches : une seule voie disponible !
- Utilisation de l'inertie PTR + GV disponibles
- Restauration en 10 heures



Le périmètre des études → une chronologie à respecter



La réglementation en France



La réglementation en France – textes para-réglementaires



Règle fondamentale de sûreté RFS 2002-01 « EPS »



Directives Techniques pour la conception des réacteurs de génération III

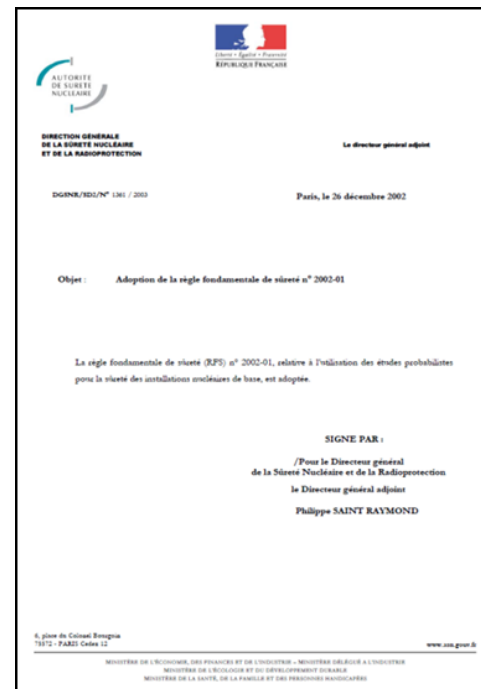


Guide « conception » n°22

Règle Fondamentale de Sûreté – RFS 2002-01

« Développement et utilisation des études probabilistes de sûreté »

- Méthodes acceptables pour le développement des EPS de niveau 1 pour les REP
- Applications des EPS pour les REP français en exploitation ou futurs
 - Réexamen de sûreté
 - STE
 - Importance des systèmes
 - « Précurseurs »
 - EPS à la conception (nouveau réacteur)





[OBJECTIFS DE SÛRETÉ PROBABILISTES ?

En France, pas de critères probabilistes fixés par le régulateur

Plusieurs raisons

- même si les “objectifs probabilistes” sont respectés, d’autres considérations entrent en jeu pour décider de modifications et les définir
- effet pervers de fixer des limites probabilistes : une fois atteintes, l’exploitant pourrait ne pas suffisamment rechercher à améliorer la sûreté, même si cela peut être fait raisonnablement

Dans plusieurs cas, des objectifs probabilistes sont néanmoins définis pour faciliter la démonstration de sûreté

- à comprendre comme des « valeurs repères »
- pas des limites réglementaires

Les EPS dans la réglementation

[POSITION ASN-IRSN SUR L'UTILISATION DES EPS

- Règles déterministes prioritaires et infranchissables
 - EPS complémentaires aux études déterministes (principe de défense en profondeur...) et à l'analyse du retour d'expérience
 - EPS, un outil très utile pour évaluer le niveau de sûreté
 - Informations sur le risque « en relatif » utiles pour établir les priorités d'améliorations de sûreté, valeurs absolues plus discutables
 - Utilisation des EPS encouragée dans l'objectif d'améliorer la sûreté
- ➔ Par contre, ce n'est pas le rôle de l'ASN-IRSN d'encourager l'utilisation des EPS pour "relaxer" des contraintes

Les EPS pour les REP Français



Développements des EPS par étapes, extension progressive



Premières études probabilistes partielles

- 1980 : Études probabilistes d'accidents initiés par défaillances multiples
 - ex : perte de voies redondantes de systèmes électriques ou de refroidissement
 - Situations non postulées initialement de façon déterministe

Premières EPS complètes (initiateurs internes)

- 1990 : premières EPS niveau 1, initiateurs internes, partie réacteur
- EPS1 900 MWe développée par IRSN ; EPS1 1300 MWe par EDF

De nombreuses EPS développées depuis

- EPS niveaux 1 et 2 - Tous paliers
- Extension aux piscines, aux agressions internes et externes

Les EPS pour les REP Français

« EPS de référence » = celles développées par EDF

- Requises par l'ASN
- Utilisées pour les réexamens de sûreté, d'autres utilisations courantes



Les EPS développées par EDF

Événements internes

- EPS1&2 : 900MWe ,1300MWe , N4 et [EPR](#)
- EPS piscines : 900MWe ,1300MWe , N4 et [EPR](#)

Agressions internes

- EPS1 incendie : 1300 MWe et [EPR](#) ; EPS1&2 incendie : 900 MWe et N4
- EPS1 inondation interne : 900 MWe, 1300 MWe, « transposition » N4 et [EPR](#)
- EPS1 explosion interne : 900 MWe et [EPR](#)

Agressions externes

- EPS1 séisme : [Saint-Alban] ; EPS1&2 séisme : Tricastin, Bugey
- EPS1 inondation externe : Tricastin, Gravelines, Bugey
- « Screening » des agressions externes

Les EPS pour les REP Français



« EPS de référence » = celles développées par EDF

- Requises par l'ASN
- Utilisées pour les réexamens de sûreté, d'autres utilisations courantes



Rôle IRSN = Expertiser les EPS d'EDF et leurs enseignements

- Périmètre, méthodes, données, hypothèses, scénarios
- Résultats, enseignements pour la sûreté



Les EPS pour les REP Français



« EPS de référence » = celles développées par EDF

- Requises par l'ASN
- Utilisées pour les réexamens de sûreté, d'autres utilisations courantes



Rôle IRSN = Expertiser les EPS d'EDF et leurs enseignements

- Périmètre, méthodes, données, hypothèses, scénarios
- Résultats, enseignements pour la sûreté



L'IRSN développe aussi des études probabilistes !

- Aide à l'expertise : vérification indépendante, études sensibilité
- Maintien d'un haut niveau de compétences à l'IRSN sur les EPS
- Développements d'EPS complètes ou d'évaluations ciblées

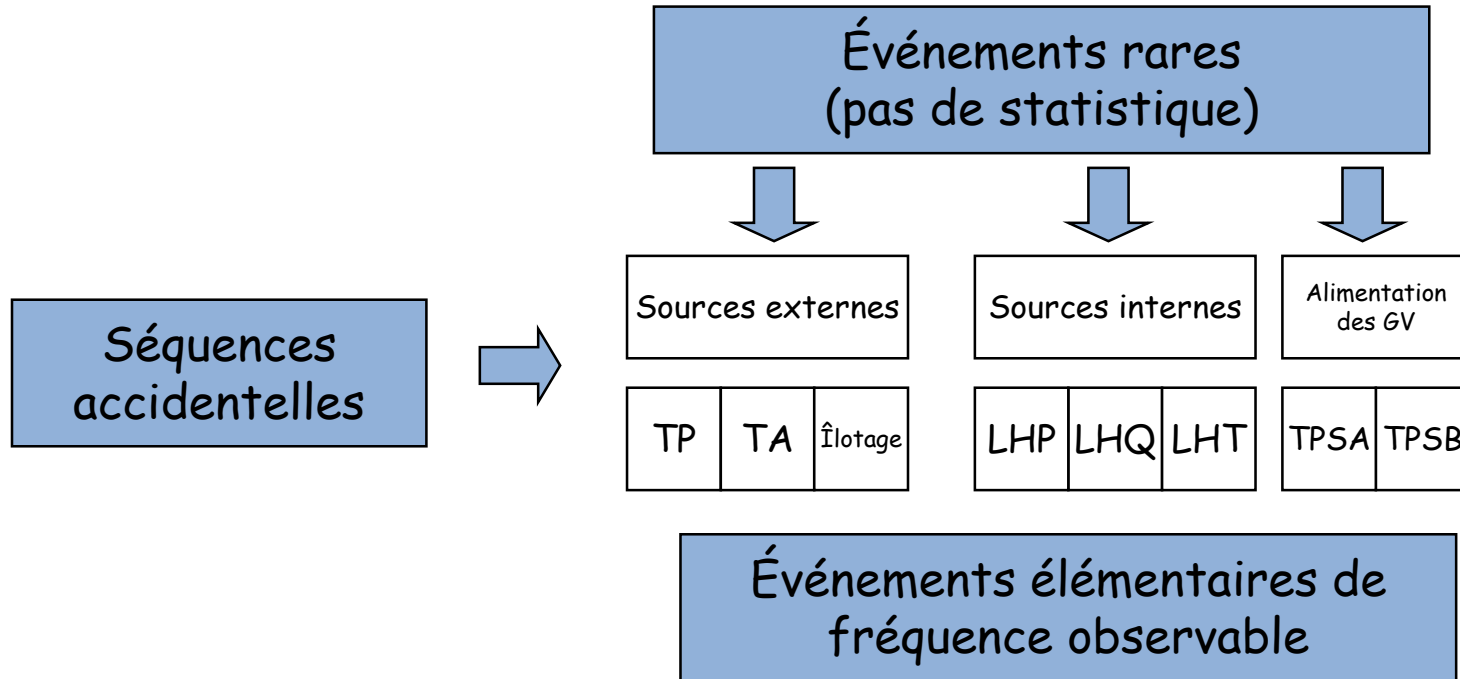
Présentation de la démarche EPS de niveau 1

- | Analyse qualitative → les arbres d'événements

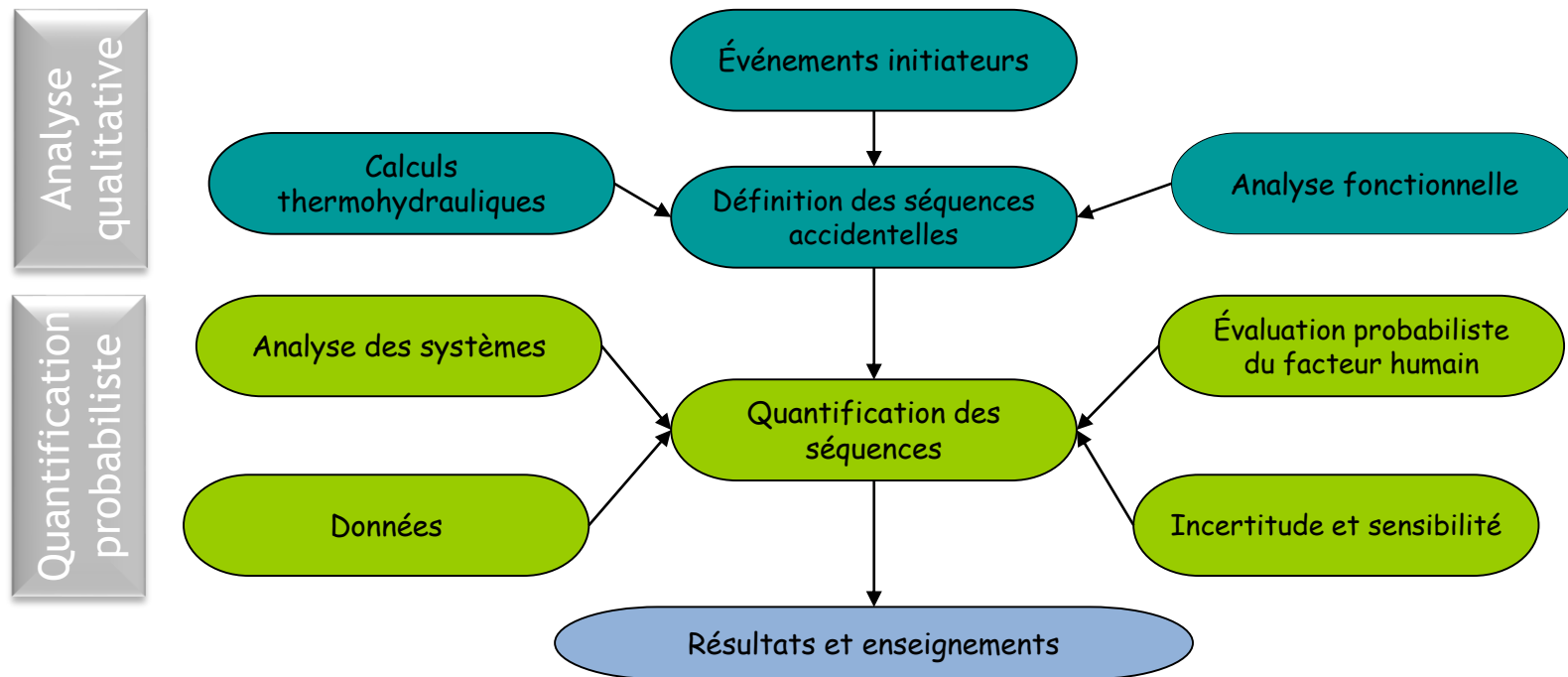
- | Analyse quantitative → les arbres de défaillance

Principe de l'approche probabiliste

[DÉFINI DANS LE WASH 1400 PUIS CONFIRMÉ PAR LES ÉTUDES ULTÉRIEURES



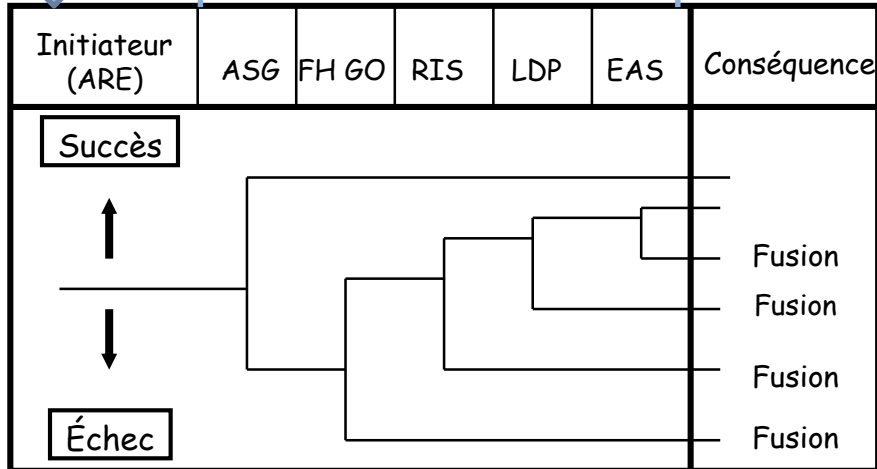
- Elle consiste en une recherche aussi exhaustive que possible des initiateurs et des scénarios conduisant à l'événement redouté
- Ces scénarios sont des combinaisons de défaillances matérielles et/ou humaines
- La définition des scénarios fait appel à des analyses fonctionnelles et physiques aussi réalistes que possible (évite les conservatismes excessifs)



Analyse qualitative

Un événement qui perturbe le fonctionnement normal de l'installation et conduit à une dérive des paramètres de l'installation

Les échecs et les succès des systèmes et des actions humaines mis en œuvre pour pallier la progression de l'accident sont pris en compte



Calcul TH

Chaque branche est analysée pour en déduire :

- le type de conséquences
- la définition précise de la mission des systèmes

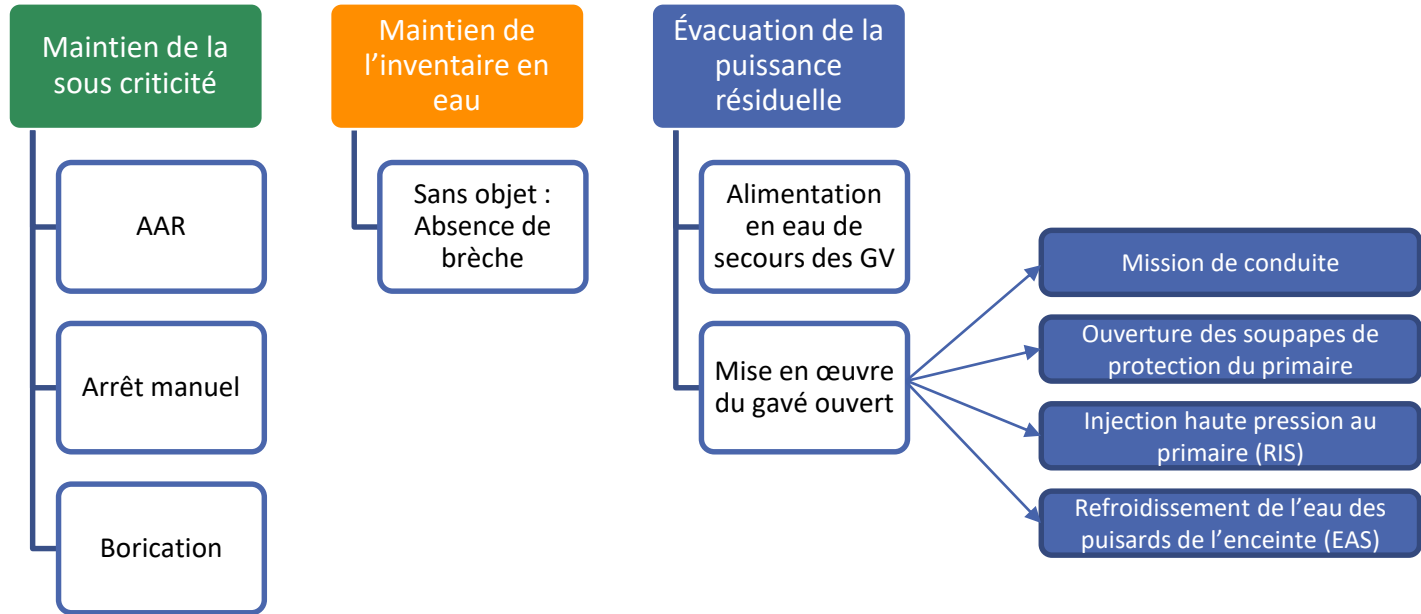
Perte de l'alimentation normale en eau des GV

Maintien de la
sous criticité

Maintien de
l'inventaire en
eau

Évacuation de la
puissance
résiduelle

Perte de l'alimentation normale en eau des GV



Perte de l'alimentation normale en eau des GV

Maintien de la sous criticité

Évacuation de la puissance résiduelle

Découpage nécessaire pour estimer les délais disponibles pour la mission « gavé ouvert »

Cesite				GV		Gavé ouvert					No.	Freq.	Conseq.
PAN/GV	AAR	A.M.	BORICATION	ASG	DEPRESSURISATION	LOP	RIB	EAB					
											1		CS
											2		CS
											3		FUSION
											4		FUSION
											5		FUSION
											6		FUSION
											7		CS
											8		CS
											9		FUSION
											10		FUSION
											11		FUSION
											12		FUSION
											13		CS
											14		CS
											15		FUSION
											16		FUSION
											17		FUSION
											18		FUSION
											19		FUSION



Cesite				GV		Gavé ouvert					No.	Freq.	Conseq.
PAN/GV	AAR	A.M.	BORICATION	ASG CT	ASG	DEPRESSURISATION	LOP	RIB	EAB				
											1		CS
											2		CS
											3		FUSION
											4		FUSION
											5		FUSION
											6		FUSION
											7		CS
											8		CS
											9		FUSION
											10		FUSION
											11		FUSION
											12		FUSION
											13		CS
											14		CS
											15		FUSION
											16		FUSION
											17		FUSION
											18		FUSION
											19		CS
											20		CS
											21		FUSION
											22		FUSION
											23		FUSION
											24		CS
											25		CS
											26		FUSION
											27		FUSION
											28		FUSION
											29		CS
											30		CS
											31		FUSION
											32		FUSION
											33		FUSION
											34		FUSION

Les événements initiateurs

Famille	Principaux initiateurs
Perte de réfrigérant primaire	GB, BI, PB, BV et TPB
Perte de réfrigérant primaire hors enceinte	Barrières thermique, PTR, RRA, RCV, clapets RIS
Rupture de tube de GV	RTGV 1 tube, 2 tubes, Cumul RTV et RTGV
Rupture de tuyauterie secondaire	RTV, RTE
Perte de la source froide	Prise d'eau, SEC, RRI, RRA
Transitoires primaires	Dilutions homogènes et hétérogènes, IS intempestif
Transitoires secondaires	Poste d'eau, ASG
Pertes de sources électriques	Alimentations externes, tableaux, DCC LH
Transitoires avec défaillance de l'arrêt automatique du réacteur	

Problèmes soulevés lors de la construction des arbres d'événements

Physique

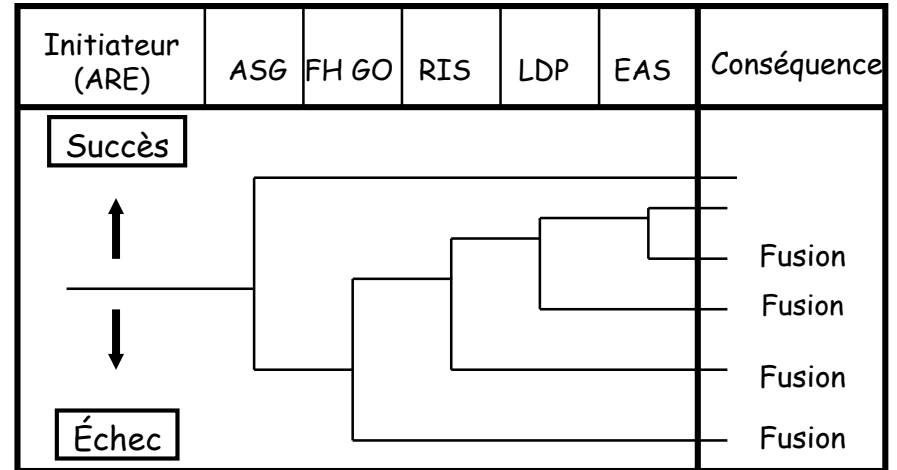
- Conséquences des séquences
- Mission des systèmes
- Délais pour intervention
- Signaux

Conduite des réacteurs

- Procédures
- Stratégies vraisemblables

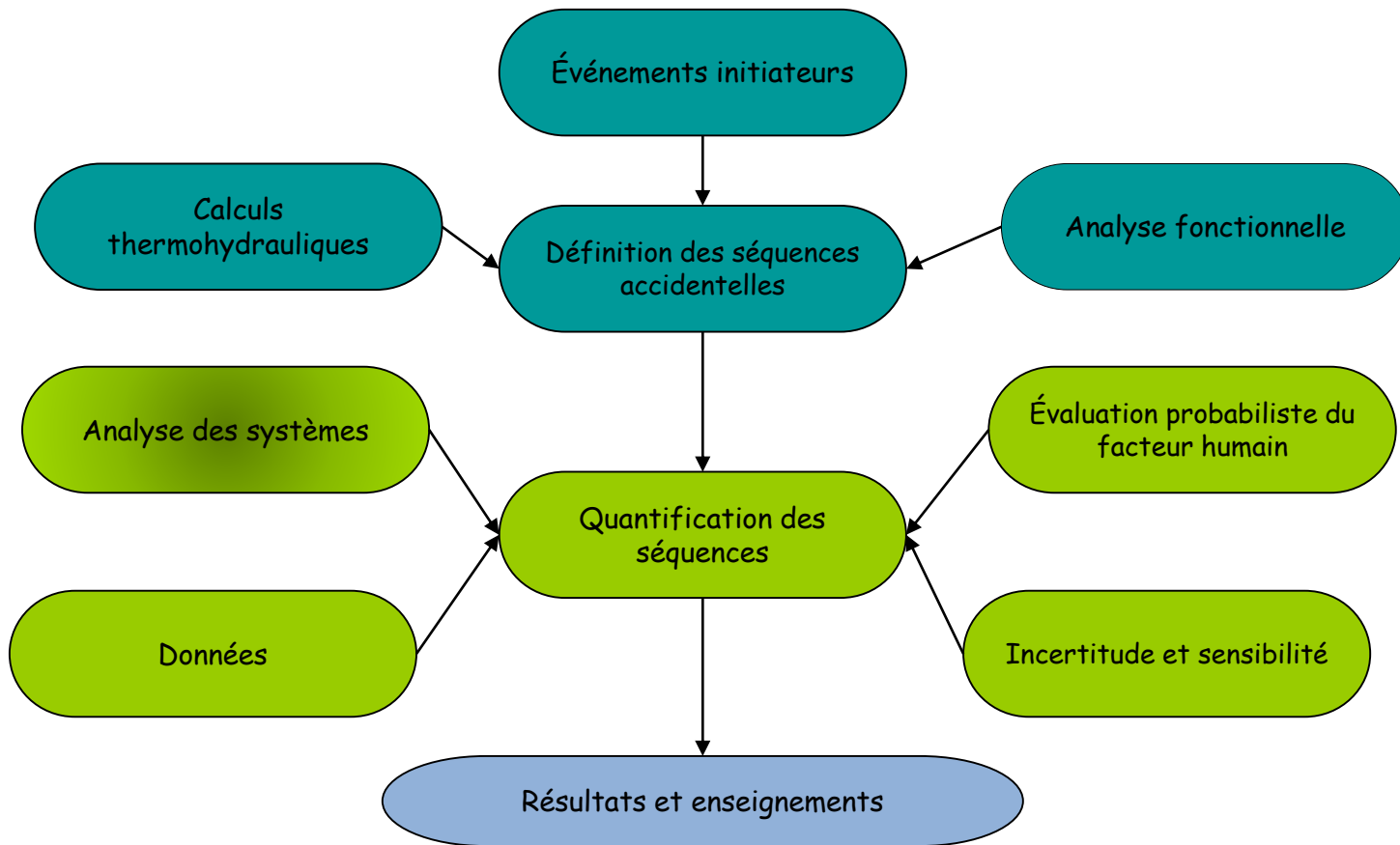
Comportement des matériels

- Domaine de qualification



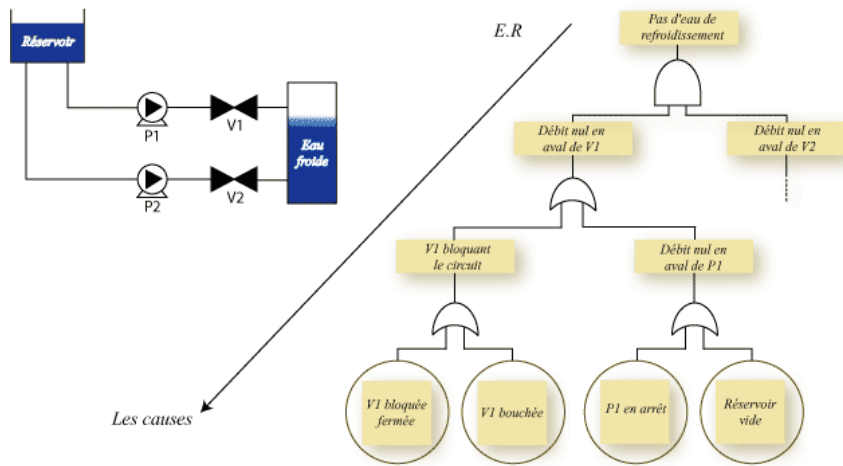
Analyse qualitative

Quantification probabiliste



Quantification probabiliste

Arbres de défaillance : Schéma logique permettant de relier par une méthode déductive, l'événement analysé (défaillance du système) aux événements élémentaires susceptibles de l'entraîner (défaillance des composants)



Coupe minimale = combinaison minimale de défaillances conduisant à la défaillance du système

$$R + V1 \times V2 + V1 \times P2 + P1 \times V2 + P1 \times P2$$

Commutativité

$$A \times B = B \times A$$

$$A + B = B + A$$

Associativité

$$A + (B + C) = (A + B) + C$$

$$A \times (B \times C) = (A \times B) \times C$$

Distributivité

$$A \times (B + C) = A \times B + A \times C$$

$$A + B \times C = (A + B) \times (A + C)$$

Idempotent

$$A \times A = A$$

$$A + A = A$$

Absorption

$$A \times (A + B) = A$$

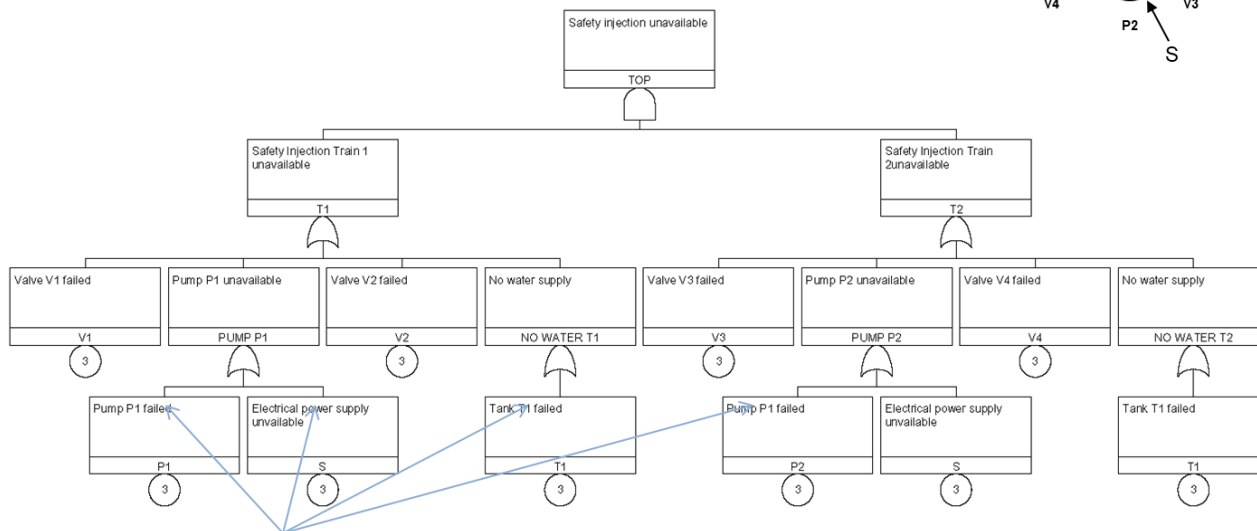
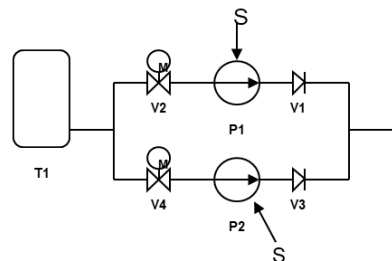
$$A + A \times B = A$$

Remarque :

« X » ≈ porte logique « ET »

« + » ≈ porte logique « OU »

Arbres de défaillance

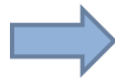


Evénements de base

Coupes minimales

Coupe minimale = combinaison minimale de défaillances conduisant à la défaillance du système

Réduction booléenne



Coupes minimales

ET = « x »
OU = « + »
 $A \times A = A$
 $A + A = A$
 $A + A \times B = A$

S ou
T1 ou
V1 et V3 ou
V1 et P2 ou
V1 et V4 ou
P1 et V3 ou
P1 et P2 ou
P1 et V4 ou
V2 et V3 ou
V2 et P2 ou
V2 et V4

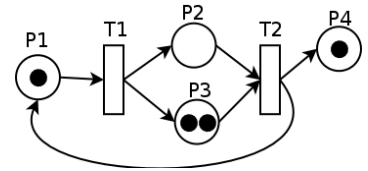
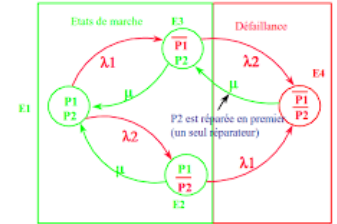
Fiabilité des systèmes - Autres méthodes de quantification

Méthodes applicables aux problèmes « dynamiques »

- Graphes de MARKOV
- Simulation de MONTE-CARLO
- Réseaux de PETRI

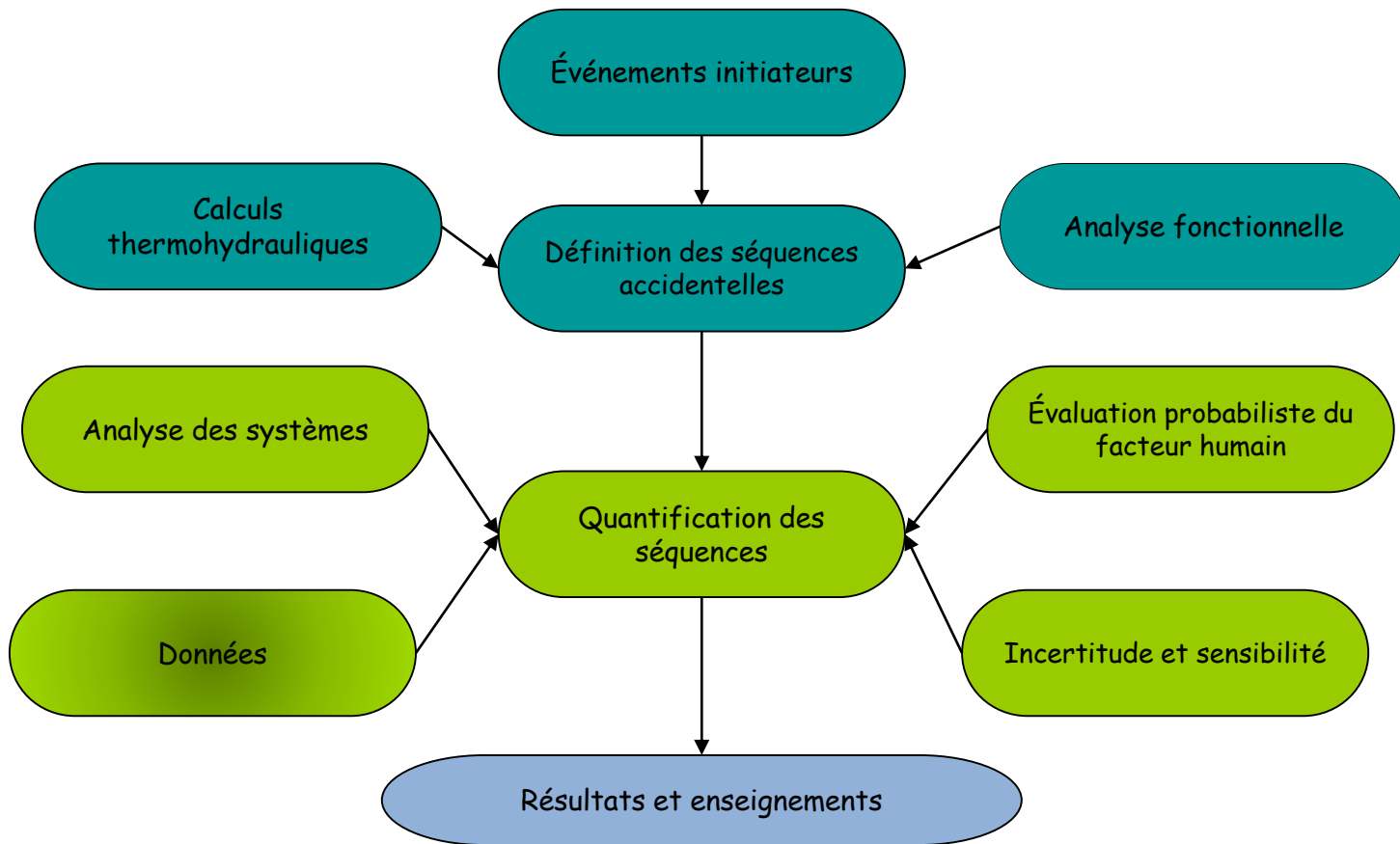
Domaines d'utilisation

- Cas particuliers complexes
- Validation de modèles plus simples



Analyse qualitative

Quantification probabiliste



Données utilisées dans les EPS

Retour d'expérience des
REP français

200 Années x réacteur en 1987

2000 Années x réacteur aujourd'hui

Parc homogène → qualité des données

Estimation des données

- Objectif : évaluer les probabilités des événements de base afin de réaliser la quantification des AD et AE

- Les données nécessaires :
 - données relatives aux fonctionnements
 - profil de fonctionnement
 - indisponibilités des matériels
 - fréquences des initiateurs (fréquents, rares et hypothétiques)
 - données concernant les modes de défaillances des composants
 - défaillances de cause commune
 - probabilités des erreurs humaines

Données de fiabilité

- Probabilité de défaillance à la sollicitation d'un matériel
 - Paramètre noté γ en général : c'est une probabilité, donc $\gamma \in [0,1]$
 - Une détermination : nombre de défaillances observées à la sollicitation sur le nombre total de sollicitations
- Taux de défaillance en fonctionnement d'un matériel
 - Paramètre noté λ en général : c'est le nombre de défaillances par unité de temps de fonctionnement
 - C'est un nombre positif (nombre de défaillance par an, ou par heure)
 - Une détermination : nombre de défaillances observées en fonctionnement sur la durée cumulée de fonctionnement
- Problèmes rencontrés
 - Exhaustivité des collectes de données
 - Détermination des défaillances « critiques »
 - Évaluation du nombre de sollicitations et du temps total de fonctionnement
 - Prise en compte d'une modification importante d'un matériel

Quelques valeurs de paramètres de fiabilité

Composants	λ (par heure)	γ (par sollicitation)
Clapet de non retour	$2 \cdot 10^{-7}$ (fuite interne)	10^{-5} (refus d'ouverture)
Groupe électrogène	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-3}$
Pompe ASG	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$4,2 \cdot 10^{-5}$
Pompe RIS BP	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$9,6 \cdot 10^{-4}$
Turbine ASG	$5,4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-3}$
Vanne motorisée	$1 \cdot 10^{-8}$ (fuite interne)	$3 \cdot 10^{-4}$ (refus d'ouverture)

Défaillances de cause commune (défaillances multiples dues à une cause commune)

Points communs
identifiés

Entre différents composants ou systèmes

- Ex : systèmes supports

→ Introduits explicitement dans les arbres de défaillance ou d'événements

Modes communs
proprement dits

Origine :

- Erreurs de conception
- Erreurs de fabrication ou d'installation
- Erreurs de procédure (opération, test, maintenance)
- Effets de l'environnement

Défaillances de cause commune

Les DCC sont considérées si :

- les composants sont dans les mêmes coupes minimales (fonctions redondantes)
- les composants sont de même type
- le mode de défaillance est le même
 - ex : défaillance à la sollicitation des diesels, refus d'ouverture de vannes motorisées

Quantification

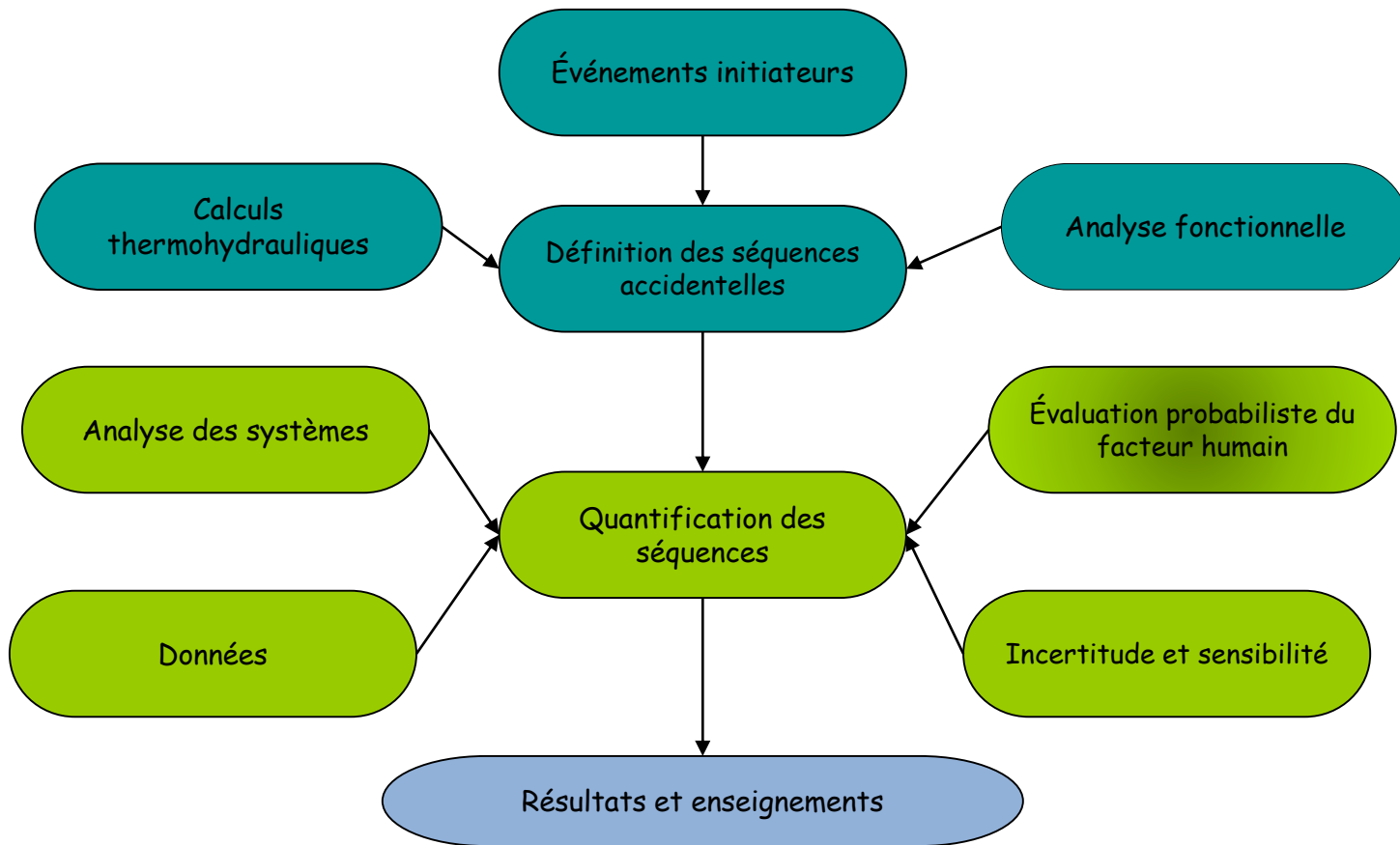
- Beta facteur (le modèle DCC d'origine)
 - **la probabilité conditionnelle d'observer la défaillance du deuxième composant, sachant que le premier est défaillant**
 - **une valeur en général entre 1% et 10 %**
- MGL – Multiple Greek Letter (plus de 2 composants)
- Alpha facteur (plus de 2 composants)

Valeurs utilisées pour les facteurs « beta »

Composant EPS 900 MWe	Beta22
Capteurs	$5 \cdot 10^{-2}$
Clapets (blocage)	$7 \cdot 10^{-2}$
Clapets (fuite interne)	10^{-1}
Diesels	$3 \cdot 10^{-2}$
Moteurs électriques	$5 \cdot 10^{-2}$
Pompes	$5 \cdot 10^{-2}$
Vannes motorisées	$6 \cdot 10^{-2}$
Ventilateurs	$5 \cdot 10^{-2}$

Analyse qualitative

Quantification probabiliste



Prise en compte du facteur humain dans les EPS

Rôle fondamental

- Positif & négatif

Démarche

- Identification
- Impact (screening)
- Analyse fine
- Quantification

Actions humaines prises en compte dans les EPS

Explicitement

- Erreurs humaines avant l'accident
 - Contribuent à la défaillance des systèmes
 - Arbres de défaillance
- Erreurs humaines après l'accident
 - Contribuent à modifier le déroulement des séquences
 - Arbres d'événements

Implicitement

- Initiateurs
- Modes communs

Erreurs humaines avant l'accident

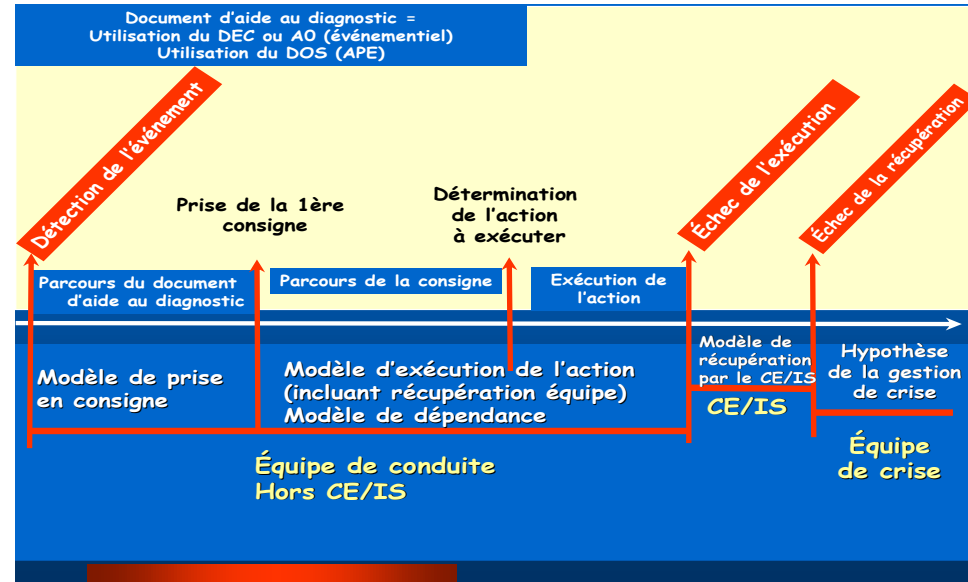
- Erreurs humaines commises lors de la conduite normale, de test ou de maintenance
- Quantification :
 - Valeur de base ($3 \cdot 10^{-2}$) x Probabilité de non récupération (1 à 10^{-3})
 - Facteurs de récupération considérés :

Classe	Éléments favorisant la récupération	PNR
1	■ Alarme de catégorie 1 sur verrine (« alarme rouge »)	10^{-3}
2	■ Modification importante de la valeur d'un paramètre relevé à chaque quart ■ Requalification permettant effectivement de détecter l'anomalie considérée ■ Condamnation administrative	10^{-2}
3	■ Test périodique de fréquence égale ou inférieure à un mois ■ Anomalie détectable par les vérifications prévues lors des changements d'états standards ■ Indication de position en salle de commande Alarme de catégorie autre que 1 (sur écran)	10^{-1}
4	■ Aucun des facteurs ci-dessus	1

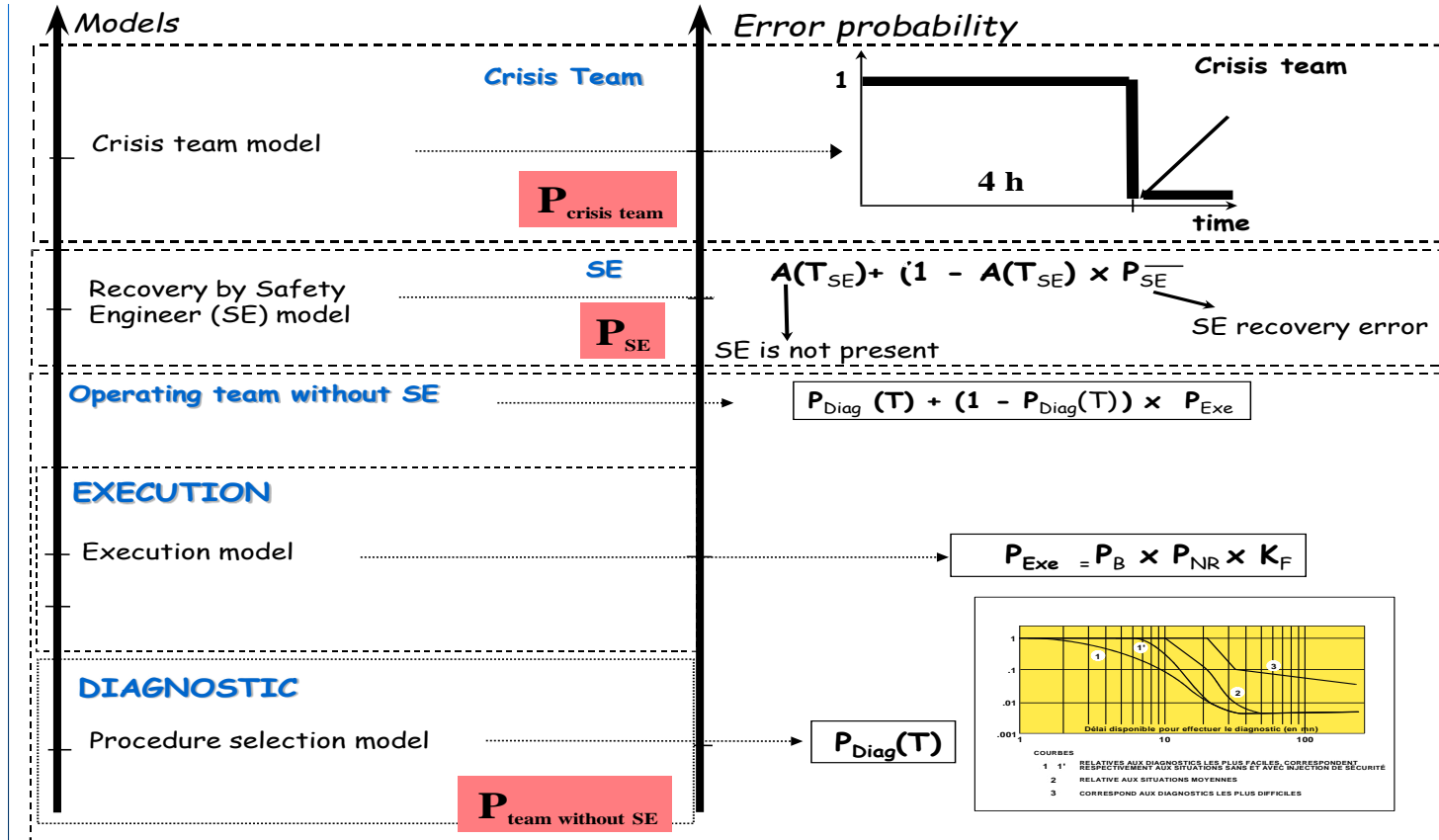
Erreurs humaines en situation accidentelle

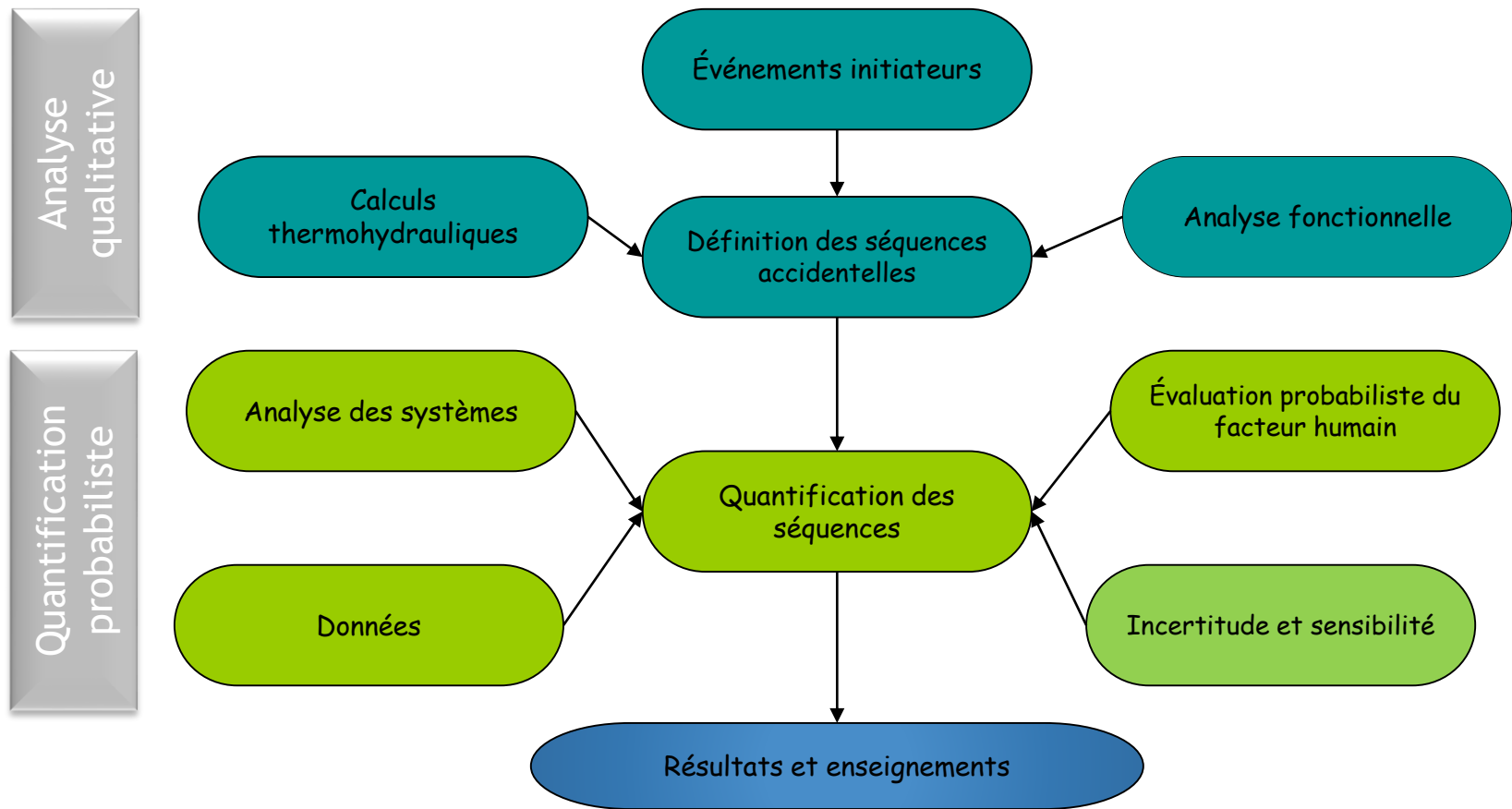
Modélisations :

- Diagnostic et prise de décision (modèle de diagnostic dépendant de la complexité de la situation, du délai disponible, de la qualité des procédures,...)
- Exécution des actions (erreurs d'omission, de confusion, actions inopportunes)
- Récupération de situations dégradées



Structure du modèles EPFH de l'IRSN pour les EPS de niveau 1





Résultats et apports d'une EPS de niveau 1

Les EPS s'appuient sur un REX issu de 2000 années*réacteurs (10⁷ heures de fonctionnement cumulées)

La quantification du « risque »

- La fréquence de fusion du cœur : vérifier l'objectif global visé pour l'installation

Les contributions au « risque »

- Les séquences accidentelles : identifier les séquences dominantes
- Les combinaisons de défaillances élémentaires / erreurs humaines conduisant à la fusion du cœur : identifier l'importance des composants et/ou des actions humaines

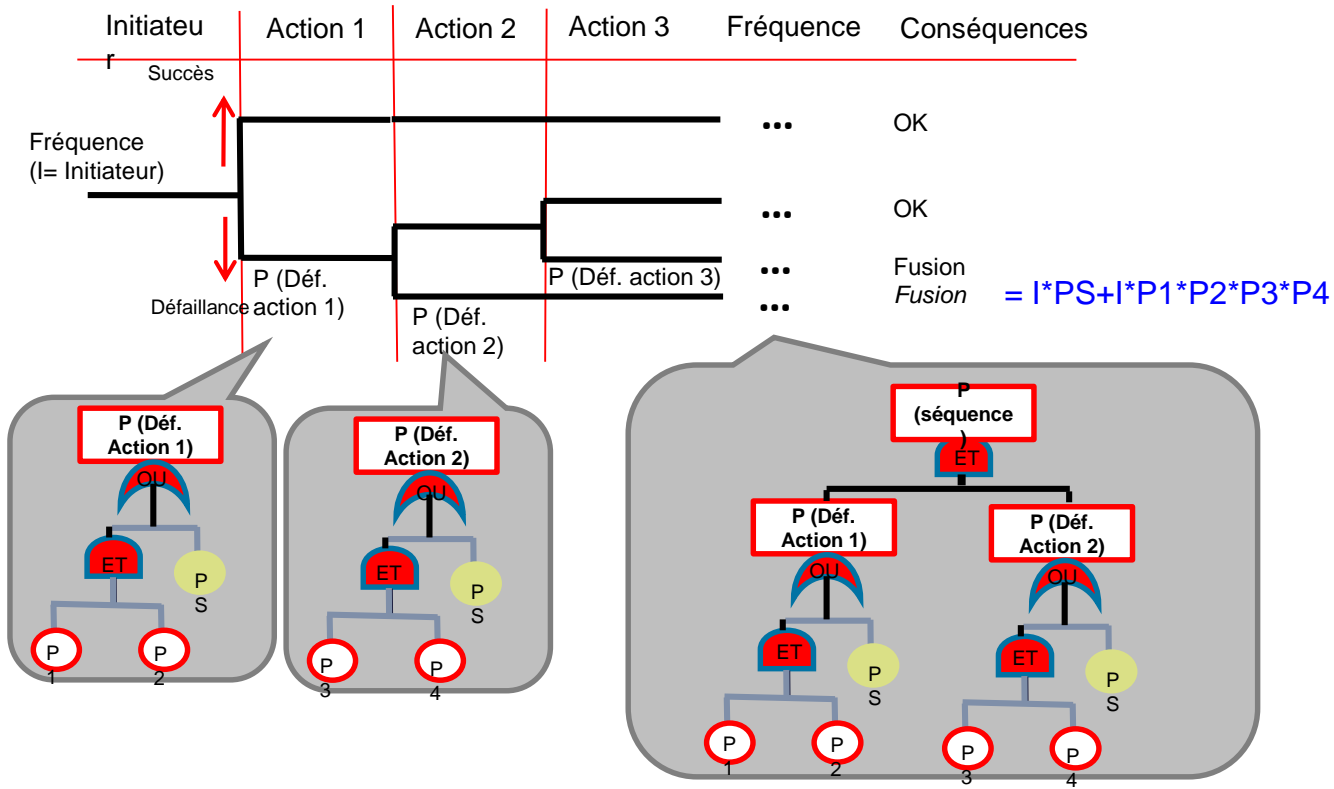
Un outil propre à l'IRSN permettant notamment :

- D'accroître la pertinence de nos expertises
- De réaliser des études de sensibilité (importance d'une hypothèse, comparaison de différentes options de conception ou modifications ...)
- D'évaluer le gain de modifications décidées par ailleurs
- D'évaluer le risque lié à certaines problématiques (ex: colmatage des puisards...)
- D'apporter un éclairage aux analyses d'incidents, aux demandes de dérogation des STE, ...

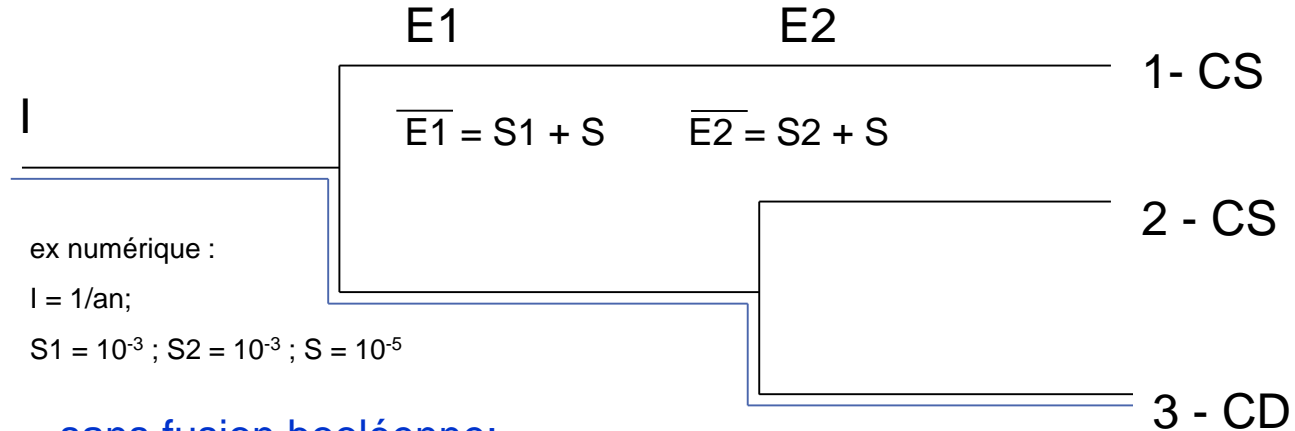
L'EPS 900 MWe de l'IRSN c'est :

- 300 événements initiateurs
- 2000 séquences accidentelles
- 4800 basic events

La quantification



La quantification



ex numérique :

$$I = 1/an;$$

$$S1 = 10^{-3} ; S2 = 10^{-3} ; S = 10^{-5}$$

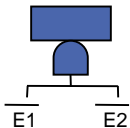
sans fusion booléenne:

$$\text{séquence 3} = 1 \times (10^{-3} + 10^{-5}) \times (10^{-3} + 10^{-5}) = \mathbf{10^{-6} \text{ (faux)}}$$

avec fusion booléenne:

$$\text{séquence 3} = I * \overline{E1} * \overline{E2} = I \times (S1+S) \times (S2+S) = I \times S + I \times S1 \times S2$$

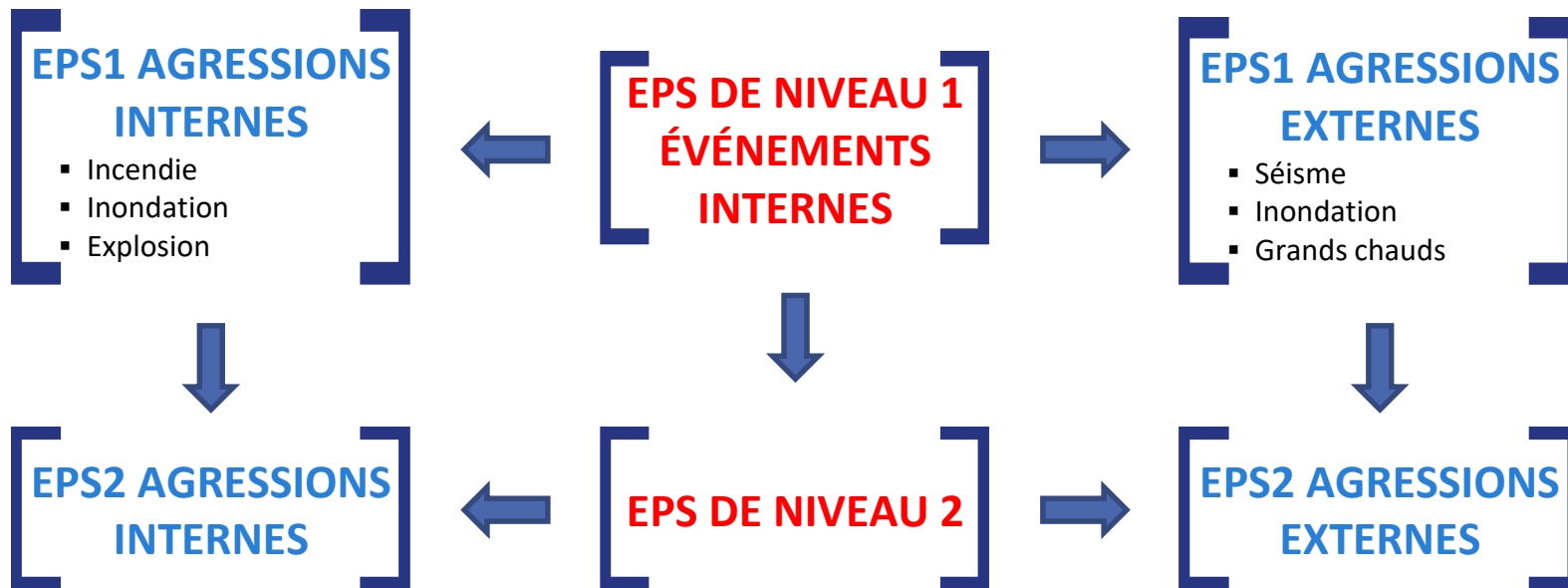
$$\text{séquence 3} = 10^{-5} + (10^{-3} \times 10^{-3}) = \mathbf{10^{-5}}$$



Analyses d'importance

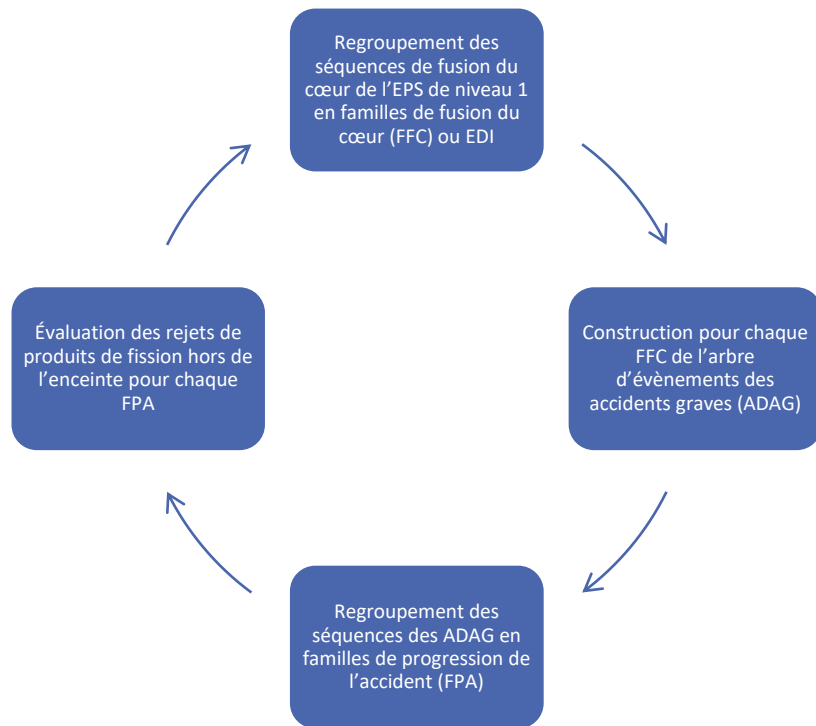
- Mesures d'importance → analyse quantitative des contributeurs prépondérants et la sensibilité du risque
 - calculées au niveau de la fusion du cœur
 - les plus connues
 - Fussel – Vesely – facteur de contribution
 - l'addition de l'ensemble des coupes minimales contenant un événement de base donné - **la contribution dans le risque**
 - RAW – Risk Achievement Worth – Facteur d'accroissement du risque
 - le rapport entre le risque si la défaillance est avérée et le risque nominal – **la sensibilité du risque**
 - RRW – Risk Reduction Worth – Facteur de réduction du risque
 - le rapport entre le risque si la défaillance est impossible et le risque nominal – **l'efficacité des mesures de réduction du risque**

L'extension du périmètre des EPS

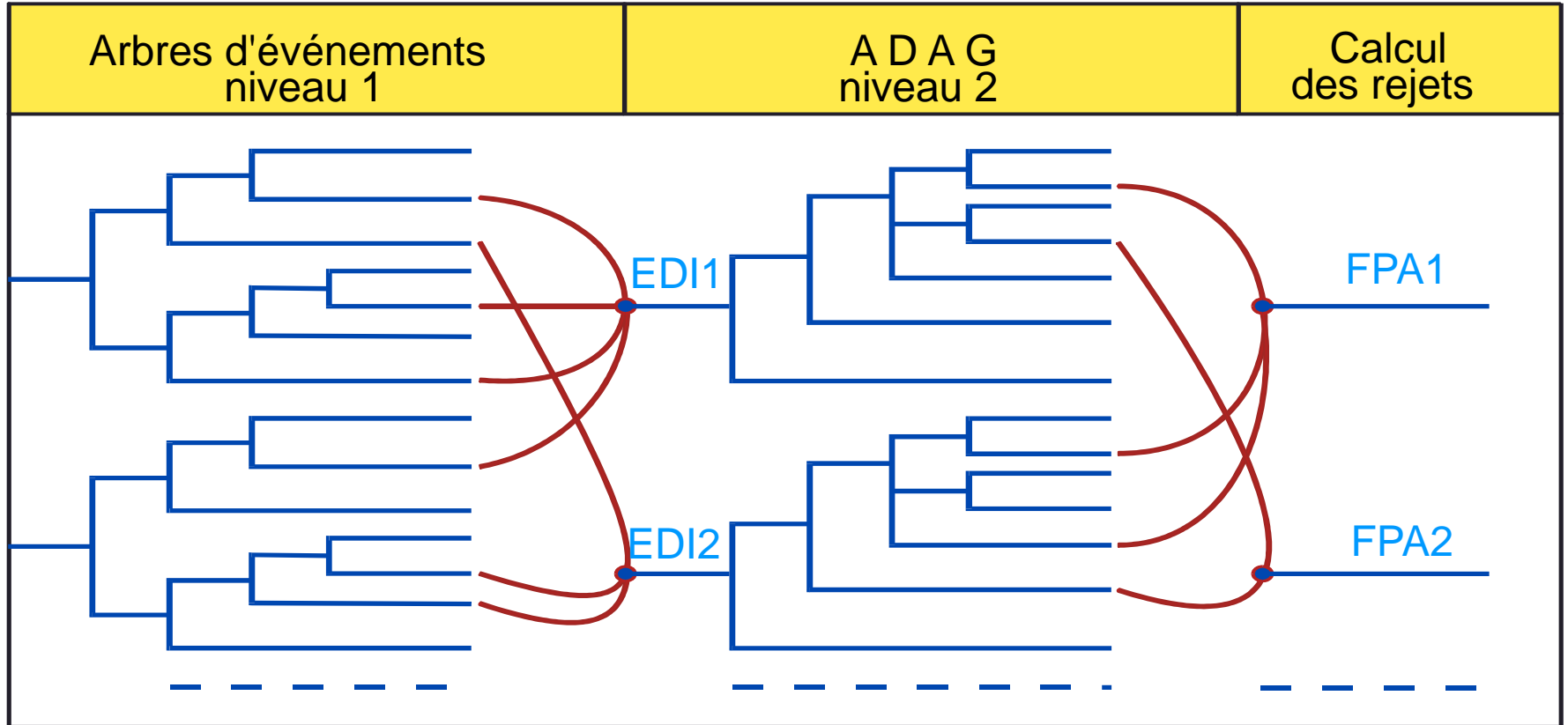


EPS de niveau 2 – Objectifs et démarche

- Identifier les différentes familles d'accidents graves entraînant des rejets de produits radioactifs hors de l'enceinte
- Évaluer :
 - Leur probabilité
 - Le niveau de rejets correspondant



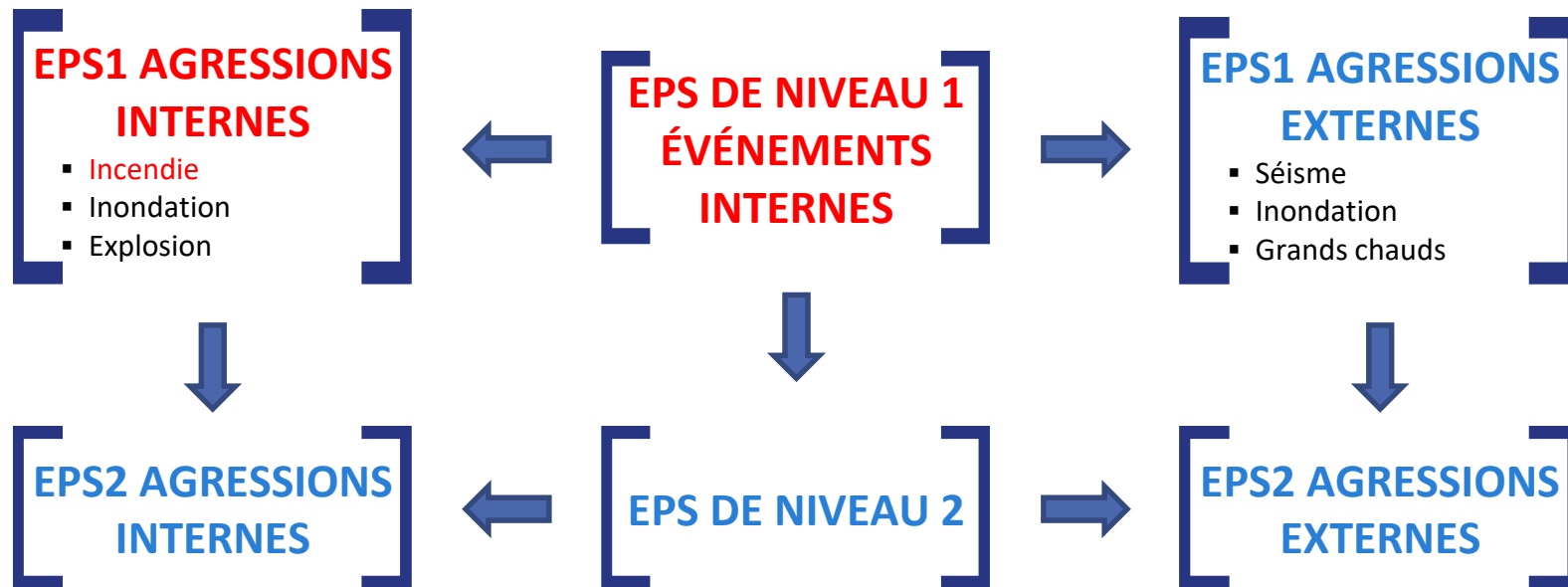
EPS de niveau 2 - Démarche



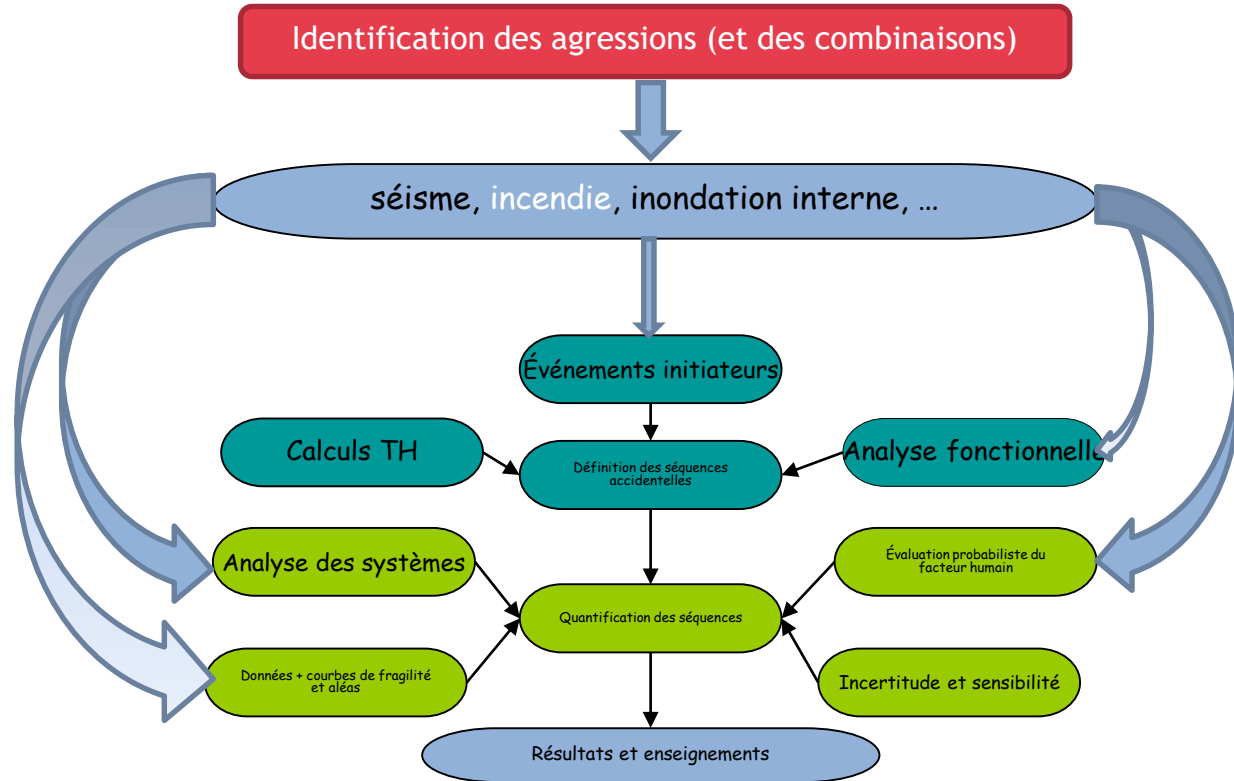
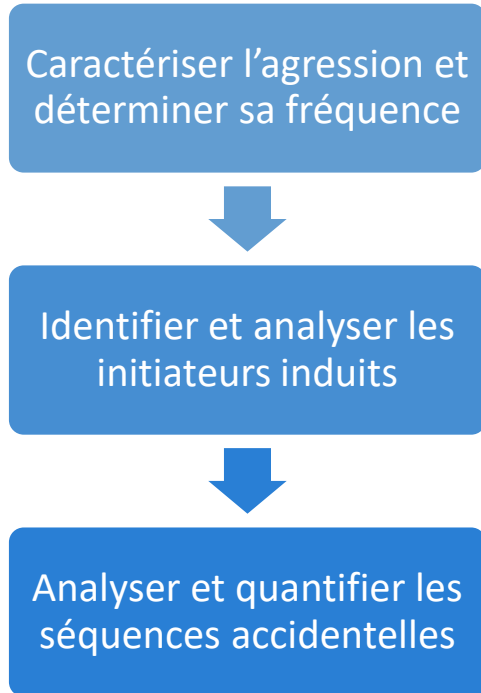
EPS de niveau 2 - Quelques questions de l'ADAG

- Application du GIAG
- Fonctionnement de l'aspersion dans l'enceinte
- Fuites préexistantes de l'enceinte
- Bypasses du confinement
- Explosion de vapeur dans la cuve ou dans l'enceinte
- Explosion d'hydrogène

L'extension du périmètre des EPS

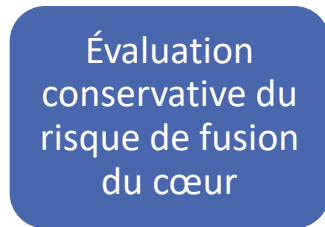
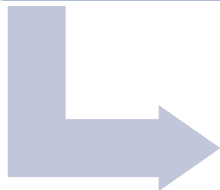


Démarche d'une EPS de niveau 1 « agressions »

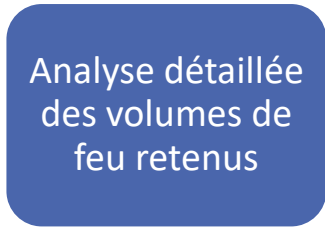
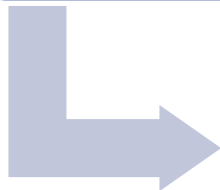




- Analyse qualitative
- Élimination des volumes de feu (pas d'initiateur « EPS » ou pas d'impact sur les moyens de mitigation)



- Tous les équipements dans le VFS sont défaillants
- Détection et extinction non valorisées
- Sélection des volumes de feu pour une analyse détaillée



EPS incendie



Élaboration des scénarios d'incendie

- Construction d'un arbre d'événements incendie (détection, extinction et sectorisation)
- Pour chaque source d'incendie (équipements et câbles électriques), étude des conséquences de l'incendie dans le local en feu et dans les locaux adjacents

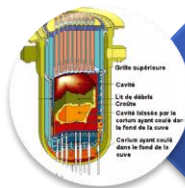


Analyses fonctionnelles et conduite

- Analyse de l'impact de l'incendie sur les équipements (mécaniques, électriques, contrôle-commande) et les câbles
- Identification des événements initiateurs de l'EPS de niveau 1
- Analyse de l'impact de l'incendie sur le facteur humain (stress, visibilité, ...)



Modification du modèle EPS de niveau 1



Quantification du risque de fusion du cœur et analyse des résultats

Analyse détaillée des volumes de feu retenus – déclinaison de la démarche



Départ de feu dans le local X	Fermeture des portes et clapets coupe feu	Détection de l'incendie	Extinction de l'incendie par les moyens automatiques	Extinction de l'incendie par les pompiers	No.	Freq.	Conseq.
FEU	SECTORISATION	DETECTION	EXTINCTION	POMPIERS			
					1		EDI 1
					2		EDI 2
					3		EDI 3
					4		EDI 4
					5		EDI 2
					6		EDI 3
					7		EDI 5
					8		EDI 6
					9		EDI 6
					10		EDI 5
					11		EDI 6
					12		EDI 6

Perte de la voie A	Alimentation de secours des générateurs	L'opérateur actionne manuellement l'ouverture	Maintien de l'inventaire en eau assuré par	Evacuation de la puissance résiduelle	No.	Freq.	Conseq.
PVOIEA	ASG	DEPRESSURISATION	RIS	EAS			
					1	1,00E-03	CS
					2	1,52E-07	CS
					3	8,65E-09	CD
					4	1,21E-06	CD
					5	4,08E-08	CD

Quelques résultats et enseignements

- Améliorations notables issues des EPS de niveau 1 pour le parc en exploitation
- Les résultats pour les réacteurs 900 MWe de 1990 à la VD4

Améliorations issues des EPS de niveau 1 pour le parc en exploitation

[PROBLÈMES DE CONCEPTION / D'EXPLOITATION

- Modifications et dispositions de conduite pour réduire les risques de dilution hétérogène (900 et 1300 MWe)

Risque initial : 10^{-4}



Risque actualisé : 3.10^{-7}

- Appoint automatique au circuit primaire dans les états à faible inventaire en eau (900 et 1300 MWe)

Risque initial : 10^{-5}



Risque actualisé : 6.10^{-7}

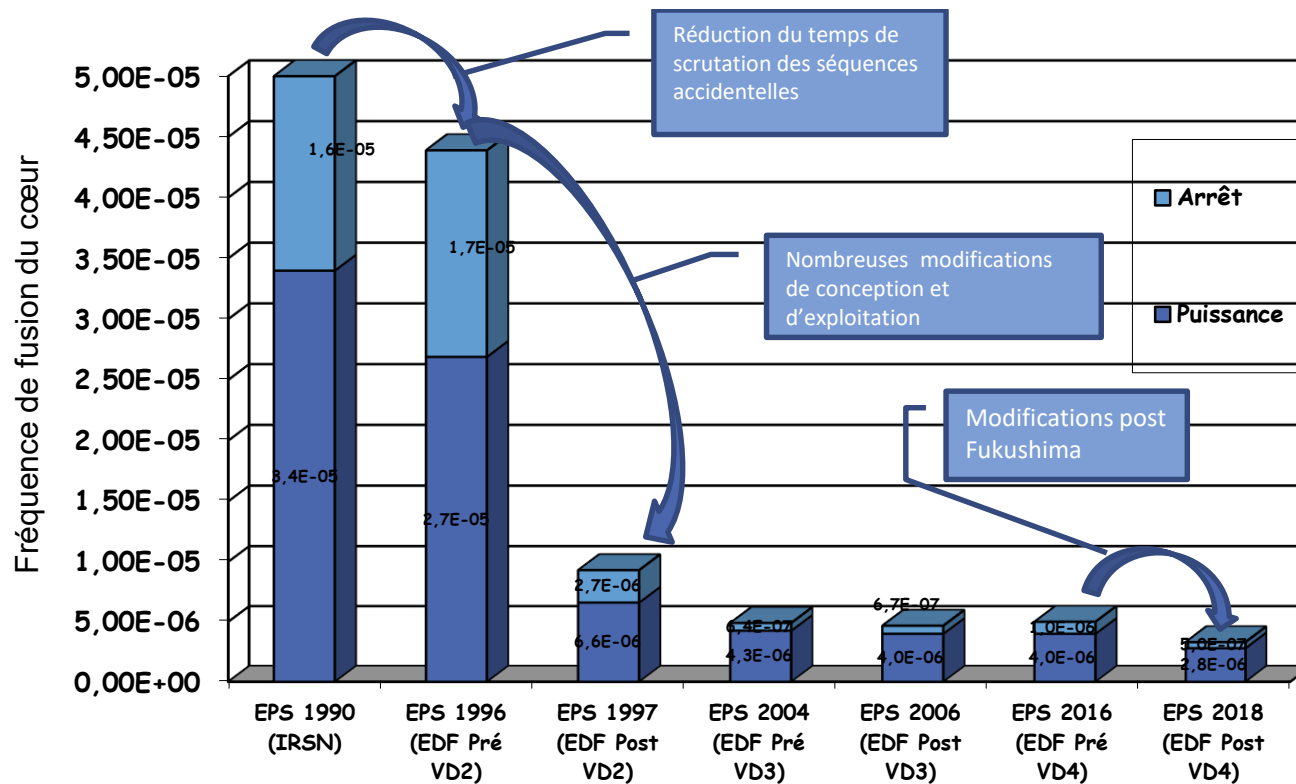
- Mesures pour réduire le risque de surpression à froid (900 MWe)

Risque initial : 6.10^{-5}



Risque actualisé : 10^{-7}

Les évolutions des EPS de niveau 1 (événements internes) pour les REP 900

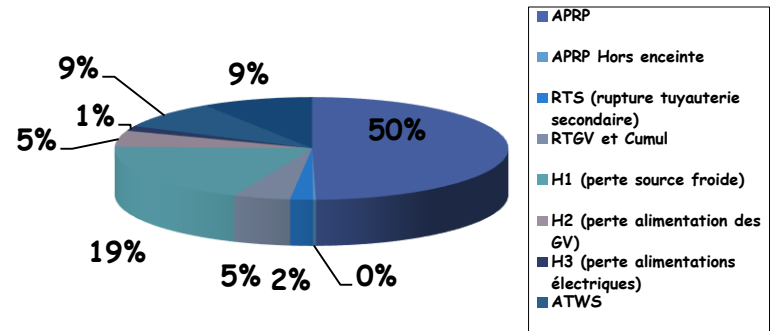
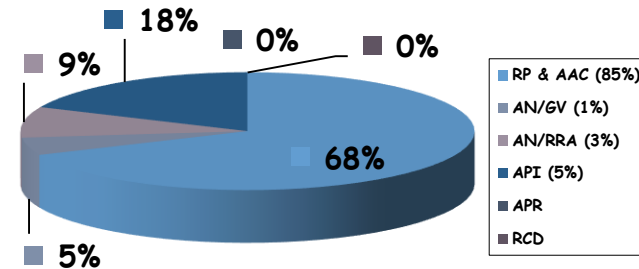


Les premiers résultats des EPS françaises (1990)

- Fréquence de fusion du cœur
 - REP 900 MWe : 5.10^{-5} /tr.an
 - REP 1300 MWe : 1.10^{-5} /tr.an

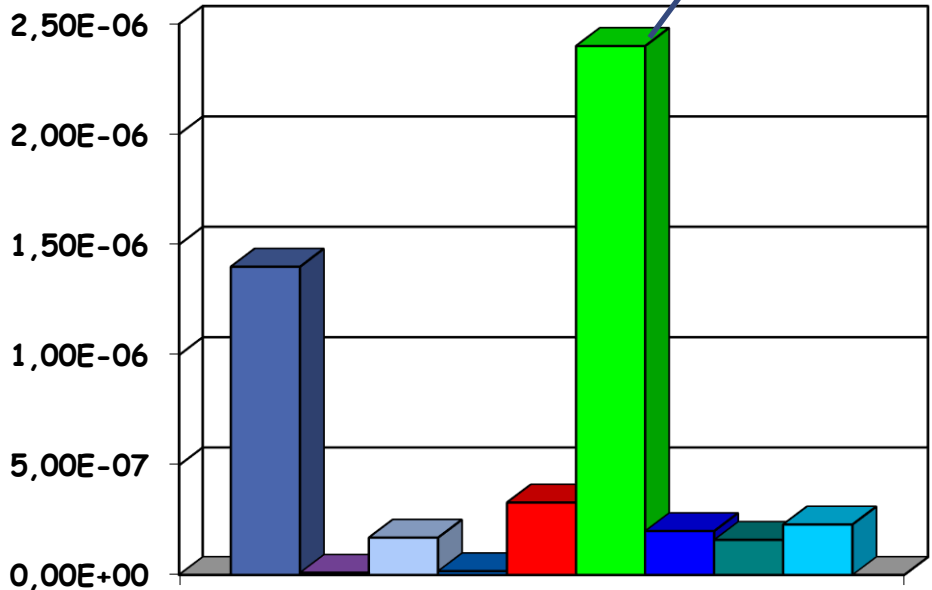
- Importance des états d'arrêt
 - REP 900 MWe : 32%
 - REP 1300 MWe : 56%

- Contribution (REP 900 MWe) :
 - Pertes de réfrigérant primaire
 - Pertes de la source froide
 - ATWS
 - Transitoires I et II



REP 900 MWe EPS VD3 EDF

Dégradation de la fiabilité de la pompe de test

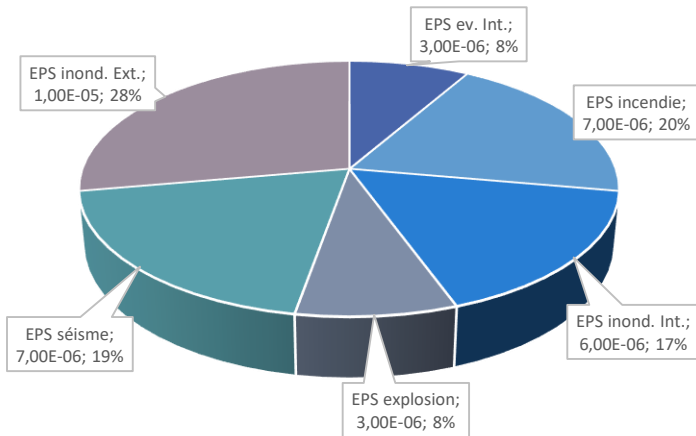


- Brèches sur le circuit primaire (LOCA)
- Bipasse de l'enceinte de confinement
- Brèches sur le circuit secondaire
- Rupture de tube de générateur de vapeurs
- Transitoires sur le circuit secondaire
- Perte des alimentations électriques externes
- Transitoires sur le circuit primaire (dilution intempestive incluse)
- Perte des systèmes de refroidissement ou de la source froide
- ATWS

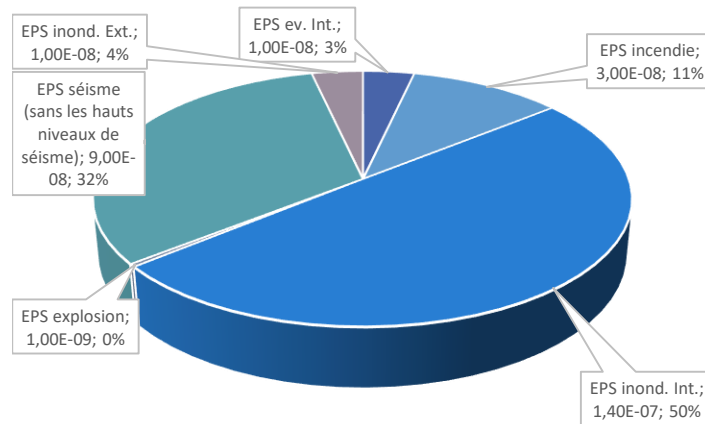
Les EPS en VD4 900 MWe

**De nombreuses modifications, issues des EPS, nécessaires.
Les agressions en VD4-900, une contribution importante, mais un niveau de conservatisme important.
Une valorisation partielle des modifications post-Fukushima.**

EPS1 pour le réacteur



EPS pour la piscine



Source : Avis IRSN/2019-00142 du 26 juin 2019

Les EPS en VD4 900 MWe

[MODIFICATIONS VD4 900 ISSUES DES EPS (HORS DEMANDE D'ÉTUDES OU DE COMPLÉMENTS)

EPS événement interne

- Remplacement des contacteurs des ventilateurs DVL
- Évolution de la conduite relative au secours du RRI par la bêche PTR
- **Recommandation IRSN** : isolement ligne de retour des joints des GMPP en H3 avec défaillance de l'IJPP

EPS Incendie

- Commande des SEBIM (éviter leur ouverture intempestive)
- Enrubannage de câbles de commande de la TPS ASG
- Protection de la TPS ASG et enrubannage de câbles

EPS Inondation

- Installation de siphons de sol dans des locaux électriques
- Étanchéification des trémies de plancher des casemates ARE et VVP

EPS Explosion

- Mise en place de détecteurs d'hydrogène dans les locaux des batteries
- Plan de coupure des batteries

EPS Séisme

- Renforcement au séisme des bâches à fioul des diesels

Les utilisations des EPS

- Réexamen de sûreté
- Le domaine complémentaire
- ...

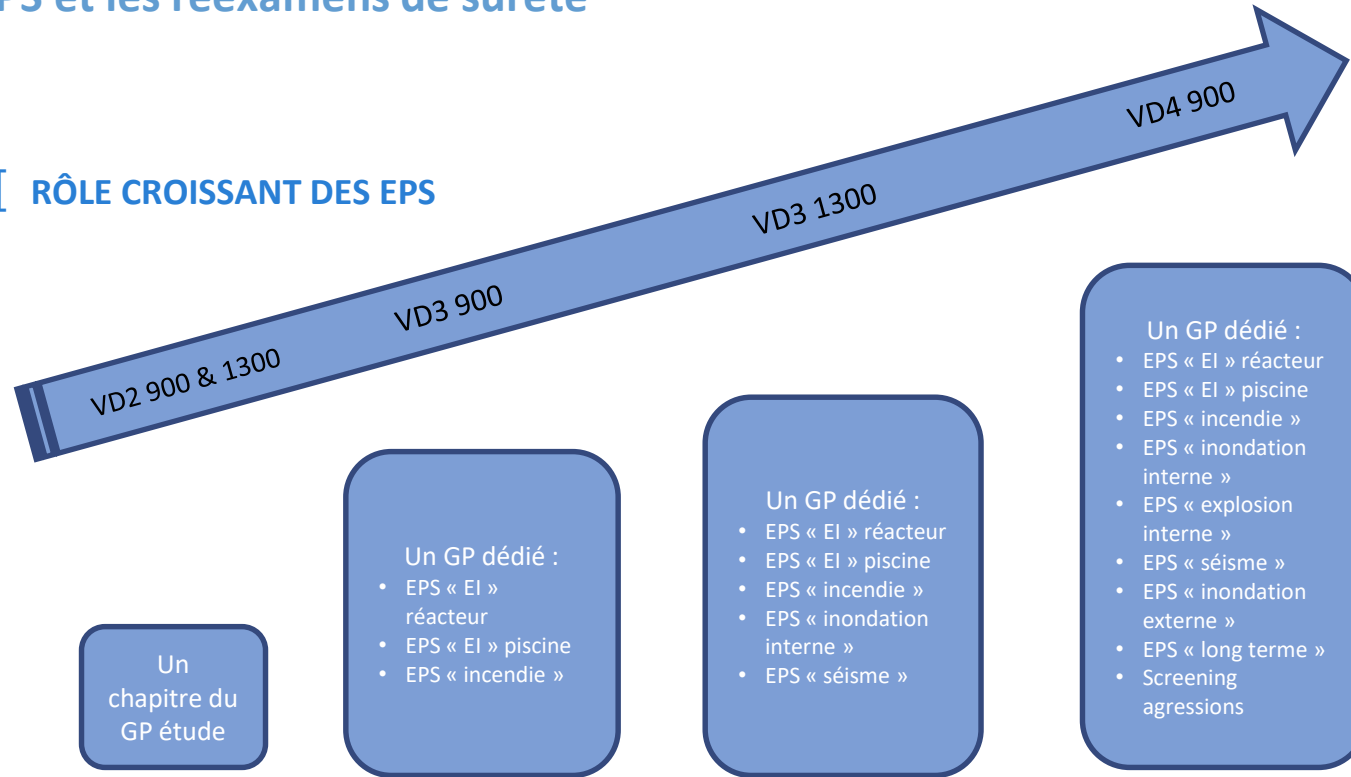
Utilisation des EPS lors des réexamens périodiques de sûreté

[DÉMARCHE GÉNÉRALE D'UTILISATION DES EPS

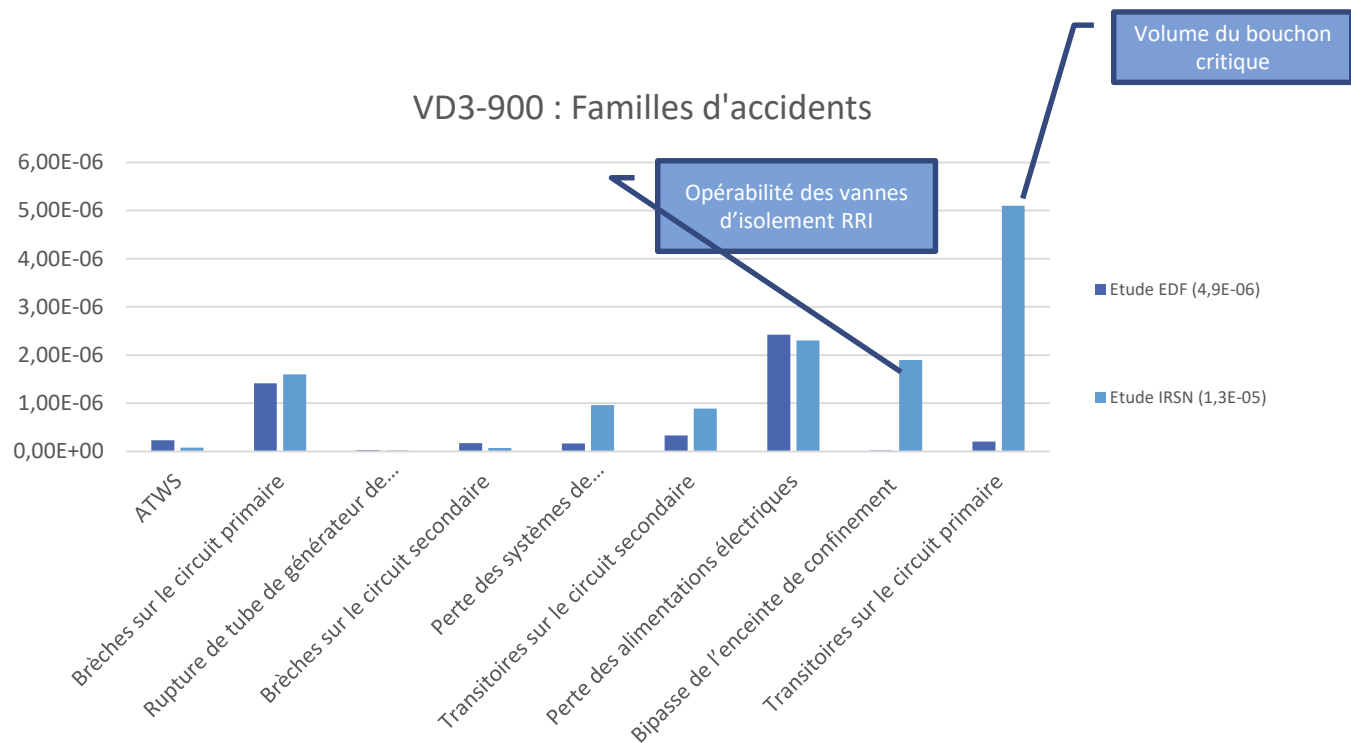
- Mettre à jour l'EPS en intégrant :
 - l'expérience d'exploitation récente
 - les connaissances nouvelles
- Évaluer la fréquence de fusion du cœur et son évolution
- Regrouper les séquences en séquences « fonctionnelles »
- Examiner les séquences « fonctionnelles » pour statuer sur l'intérêt de mettre en œuvre des modifications
- Apprécier les avantages et les inconvénients des diverses solutions pressenties

Les EPS et les réexamens de sûreté

[RÔLE CROISSANT DES EPS



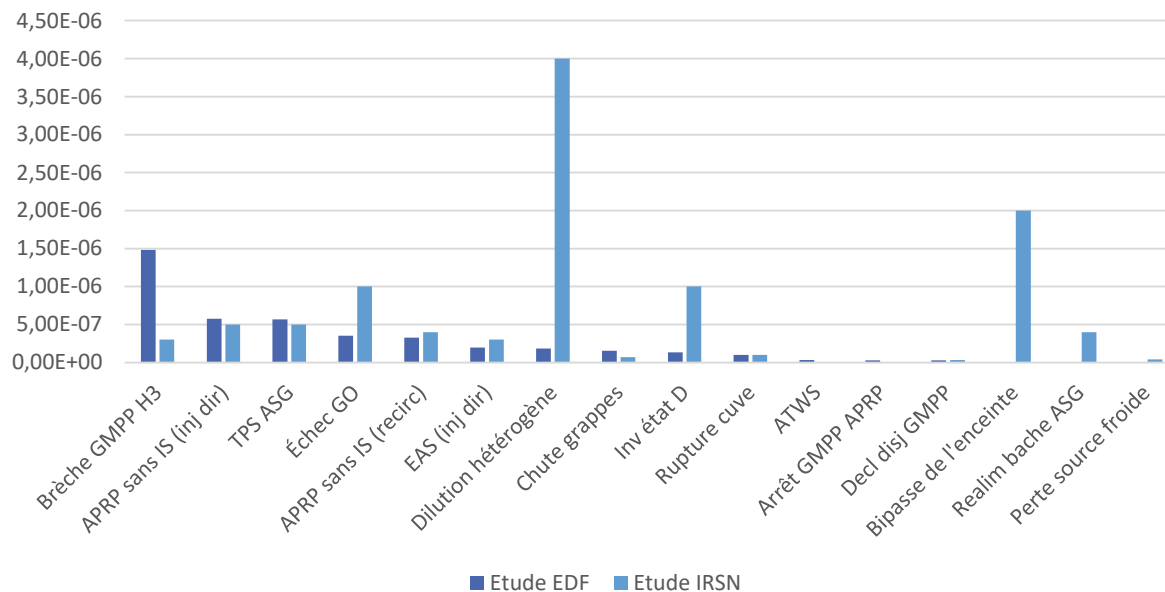
VD3 900 MWe : une expertise de l'IRSN avec une comparaison des EPS EDF et IRSN



VD3 900 MWe : Comparaison EPS EDF et EPS IRSN

[UNE ANALYSE PLUS FINE AVEC LES SÉQUENCES FONCTIONNELLES

VD3-900 : Résultats par séquence fonctionnelle



Définition du nouveau domaine complémentaire

- Les études du domaine complémentaire permettent de définir des dispositions (dites « dispositions complémentaires ») visant à ramener à un niveau acceptable les conséquences d'événements déclencheurs différents, éventuellement plus complexes que ceux pris en compte dans le dimensionnement conventionnel de base
- Une disposition complémentaire est un dispositif automatique ou manuel, non préventif (vis-à-vis de l'initiateur), spécifique à la gestion des situations accidentelles non couvertes par le dimensionnement conventionnel de base, et nécessaire à la vérification du niveau de sûreté de l'installation, eu égard à des objectifs probabilistes.

Démarche du domaine complémentaire (900 MWe – VD4)

Identification des dispositions complémentaires potentielles sur la base :

- de l'**EPS1** (systèmes non classés de sûreté ou fonctions spécifiques participant à la limitation du RFC)

Identification de la séquence fonctionnelle

- Ensemble de séquences élémentaires issues de l'EPS ou d'un examen spécifique
 - probables ($> 10^{-8}$ /a.r. sans la disposition)
 - dont le risque peut être réduit par la mise en œuvre d'une même disposition

Sélection des dispositions complémentaires nécessaires pour atteindre les objectifs probabilistes

- Disposition nécessaire si $P_{SF \text{ sans } DC} > \text{valeur cible}$

Etude thermohydraulique des conditions de fonctionnement du domaine complémentaire

- Sélection du scénario dont l'étude permet de démontrer l'efficacité de la disposition : une des séquences élémentaires prépondérantes (95 % du RFC) présentant le caractère le plus enveloppe
- Réalisation d'une étude TH ou neutronique (cohérente avec les études de dimensionnement)
 - Taux de couverture élevé (95 %)
 - Pas d'aggravant
 - Action humaine sur atteinte des critères CIA à partir de 20 mn (à partir de 50 mn si local)

Les dispositions complémentaires REP 900 MWe (VD3)

Dispositions Complémentaires		Séquences Fonctionnelles
III-4.4.2.	Isolement automatique de la décharge RCV	Perte totale de la source froide en RP et AN/GV
III-4.4.3.	Isolement du retour des joints des pompes primaires et de la ligne de débit nul RCV	Perte totale de la source froide en RP et AN/GV
III-4.4.4.	Mise en service manuelle du Gavé-Ouvert	Perte totale de l'alimentation en eau des GV en RP, AN/GV et AN/RRA
III-4.4.5.	Fonctionnement du LLS : injection aux joints des GMPP par la pompe de test alimentée par le turbo-alternateur LLS	Perte totale des alimentations électriques ou perte des tableaux LH par mode commun en RP et AN/GV
III-4.4.6.	Fiabilisation de l'injection aux joints des pompes primaires	Perte des tableaux LH par mode commun (ou court circuit d'un tableau LH + défaillance du diesel de l'autre file) en RP et AN/GV, cumulée à une défaillance du turbo-alternateur de secours LLS
III-4.4.7.	Alimentation des GV par le CEX en secours de l'ASG	Perte des tableaux LH par mode commun en RP et AN/GV, cumulée à la défaillance de la TPS
III-4.4.8.	Mise en service manuelle d'un appoint gravitaire au primaire	Perte des tableaux LH en API suffisamment ouvert
III-4.4.9.	Mise en service d'un appoint au primaire par le RCV de la tranche voisine	Perte des tableaux LH en API non fermé
III-4.4.10.	Mise en service manuelle d'une borication du primaire	ATWS par blocage multiple de grappes en RP et AN/GV
III-4.4.11.	Refroidissement maximal	Brèche primaire sans ISHP en RP et AN/GV
III-4.4.12.	Mise en service manuelle de l'IS	Brèche primaire en AN/GV
III-4.4.13.	Mise en service manuelle de l'ISBP en AN/RRA	Brèche primaire en AN/RRA

Dispositions Complémentaires		Séquences Fonctionnelles
III-4.4.14.	Appoint automatique au primaire	Perte ou brèche sur RRA en API non fermé
III-4.4.15.	Mise en service manuelle d'un appoint au primaire en API	Perte ou brèche sur RRA en API non fermé et échec de l'appoint automatique
III-4.4.16.	Passage manuel en recirculation	Recirculation en cas de perte ou brèche sur RRA en API non fermé
III-4.4.17.	Protection Anti-Dilution automatique (PAD)	Dilution hétérogène en RP, AN/GV et AN/RRA
III-4.4.18.	Secours de l'ISBP ou de l'EAS (procédure H4)	Défaillance totale du RIS ou de l'EAS en recirculation suite à une brèche primaire en RP, AN/GV et AN/RRA
III-4.4.19.	Appoint manuel à la piscine BK	Perte de refroidissement de la piscine BK
III-4.4.20.	Mise en service manuelle du GUS	Perte totale des alimentations électriques dans les états RP à API et nécessitant la mise en service du GUS
III-4.4.21.	Déclenchement en local des groupes RAM	Echec du signal ou blocage des interrupteurs d'Arrêt Automatique Réacteur (AAR) ou défaillance de la protection relative au blocage à l'extraction du groupe R (RP)
III-4.4.22.	Nouveau Signal Palliatif (NSP)	Echec de l'Arrêt Automatique du Réacteur (AAR) par défaillance de mode commun de la commande des interrupteurs d'AAR en RP, AN/GV et AN/RRA
III-4.4.23.	Arrêt automatique des GMPP sur haute température paliers et butées des moteurs	Perte du tronçon commun RRI en RP et AN/GV
III-4.4.24.	Réalimentation manuelle de la bache ASG par SER en gravitaire	Perte totale de la source froide en RP et AN/GV

Autres utilisations des EPS

- Élaboration des Spécifications techniques d'exploitation (STE)
- Analyse du retour d'expérience (gravité des incidents)
- Amélioration des procédures de conduite
- Optimisation de la Maintenance par la Fiabilité
- Projet EPR (prise en compte des EPS dès la conception)
- ...

Conclusion

Les EPS sont considérées comme une **aide à l'analyse de sûreté**, toujours utilisées en complément de l'approche déterministe

Elles apportent une aide dans la définition et la hiérarchisation des actions à mener

Pour les réacteurs en exploitation, elles permettent de mettre en évidence **d'éventuels points faibles de l'installation** pour lesquels des modifications de conception ou d'exploitation sont nécessaires

Même si les aspects probabilistes n'ont quasiment jamais été utilisés comme unique élément de jugement pour prendre une décision, dans certains cas, les **résultats d'études probabilistes** ont été jugés **suffisamment probants** pour pouvoir considérer que les **décisions** prises ont reposé principalement sur les **résultats des EPS**

Conclusion

Les EPS sont largement utilisées pour les REP mais seulement

- Étude développée au début des années 2000 sur une installation de stockage de butane et de propane
- Approches probabilistes de type EPS en cours de développement pour les ateliers SPF 5 & 6 de l'usine de La Hague

Motivation de l'IRSN

- Démontrer aux exploitants la faisabilité et l'intérêt des EPS pour les LUDD
- Disposer d'évaluations indépendantes de celles de l'exploitant (demande ASN)
- Identifier les séquences accidentelles dominantes, les matériels les plus critiques, ainsi que les actions humaines ayant le plus d'impact sur la sûreté de ce type d'installation
- Enrichir l'expertise et l'appui à l'autorité de sûreté en ce qui concerne la conception, l'exploitation et la conduite incidentelle et accidentelle de ce type d'installation