



The difficult automatic calculation of RAW

Introduction

In PSA applications importance measures like RAW, RDF, RRW, FV and Birnbaum indicator are well known and used



They have to be easy to compute and precise

To control importance = to control model uncertainties
measures accuracy and code uncertainties

Among code uncertainties : the uncertainty due to the truncation
of the set of MCS used to estimate the risk



To find a compromise between calculation time and
accuracy of importance measures

Importance measures

- ▶ Risk Achievement Worth:
$$RAW(BE_i) = \frac{P(Fus / BE_i)}{P(Fus)} = \frac{R_{1,i}}{R}$$
- ▶ Vesely Fussel factor :
$$VF(BE_i) = \frac{P(Fus) - P(Fus / \overline{BE_i})}{P(Fus)} = \frac{R - R_{0,i}}{R}$$
- ▶ Birnbaum indicator :
$$I_B(BE_i) = P(Fus / BE_i) - P(Fus / \overline{BE_i}) = R_{1,i} - R_{0,i}$$
- ▶ ...



All common importance measures can be computed
if R , $R_{0,i}$ and $R_{1,i}$ are known

NB : R is still known, it is the baseline risk



université de technologie
Troyes



R

9.25E-7	break_3mm	Valve1_RO	Pump2_DS	Pump3_DS
1E-12	break_3mm	Valve1_RO	Pump2_DS	Valve3_RO
5E-13	break_3mm	Pump1_DS	Valve2_RO	Pump3_DS
...				

R₁

9.25E-7	break_3mm	Valve1_RO	Pump2_DS	Pump3_DS
1E-06	break_3mm	Valve1_RO	Pump2_DS	Valve3_RO
5E-13	break_3mm	Pump1_DS	Valve2_RO	Pump3_DS
...				

R₀

9.25E-7	break_3mm	Valve1_RO	Pump2_DS	Pump3_DS
1E-12	break_3mm	Valve1_RO	Pump2_DS	Valve3_RO
5E-13	break_3mm	Pump1_DS	Valve2_RO	Pump3_DS
...				

Truncation of a MCS set for baseline risk estimation

- ▶ **With our Boolean model** => Minimal Cut Sets
- ▶ **PSA models are very detailed and result in an huge amount of MCS** => negligible MCS have to be suppressed
- ▶ **Truncation process** :
 - A threshold S_a is defined by the user
 - If $P(MCS_j) \geq S_a$ MCS_j is retained
 - If $P(MCS_j) < S_a$ MCS_j is suppressed
 - R (the risk) is estimated from the truncated set of MCS

=> The under-estimation of R (Δ_R) is judged acceptable with actual value S_a (1E-12 for example) [risque F_seuil.xls](#)

Truncation uncertainty

Example

9.25E-7	break_3mm	Valve1_RO	Pump2_DS	Pump3_DS
1E-12	break_3mm	Valve1_RO	Pump2_DS	Valve3_RO
5E-13	break_3mm	Pump1_DS	Valve2_RO	Valve3_RO
...				

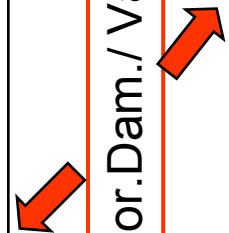
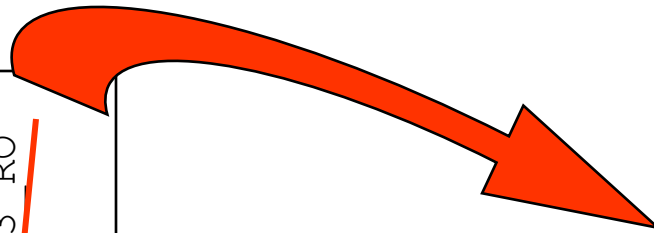
P(Cor.Dam. / Valve3_RO) is studied with $P(\text{Valve3_RO})=1\text{E-}6$

9.25E-7	break_3mm	Valve1_RO	Pump2_DS	Pump3_DS
1E-06	break_3mm	Valve1_RO	Pump2_DS	Valve3_RO
5E-07	break_3mm	Pump1_DS	Valve2_RO	Valve3_RO
...				



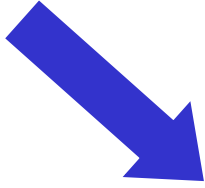
P(Cor.Dam./ Valve1_RO) is underestimated by 1,5E-6

9.25E-7	break_3mm	Valve1_RO	Pump2_DS	Pump3_DS
...				

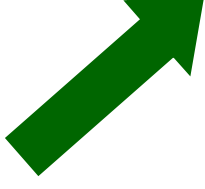


Calculation of $R_{0,i}$ and $R_{1,i}$

Calculation of $R_{0,i}$ and $R_{1,i}$



By modifying the
PSA model
=burdensome



From the set of MCS
corresponding to the
baseline case

Truncation uncertainty

► Impact of the truncation :

- A negligible impact on R and $R_{0,i}$ if the threshold is well adapted,
- The underestimation of $R_{1,i}$ is a function of EB_i probability
[FAR F prob EB.xls](#)
- A moving ranking [R1 F P.pps](#)

► Is the impact on $R_{1,i}$ really significant ?

- The sum of $R_{1,i}$ for all i .
[somme FAR.xls](#)
[zoom somme FAR.xls](#)

► How to chose the value of S_a ?

- A huge MCS set [nb cp F seuil.pps](#)



It is really difficult to keep all MCS to compute all $R_{1,i}$ whatever i

Conclusion

- ▶ **Really difficult to compute RAWs from a baseline case MCS set (too many MCS)**
- ▶ **Need of a new truncation process of the baseline case MCS set to compute RAWs (see PSAM 8)**
- ▶ **How to detect underestimated RAWs**



The difficult automatic calculation of RAW

Troncation double

► Nature du problème :

- Les EB peu probables avec une probabilité élevée d'être critique $\Rightarrow R_{1,i}$ élevé car EB_i souvent critique mais les coupes contenant cet EB sont peu probables $\Rightarrow S_p$ doit être très faible pour sélectionner ces coupes \Rightarrow jeu de coupes gigantesque constitué de nombreuses coupes « inutiles »

► Objectif :

- Sélectionner les coupes significatives et les coupes potentiellement significatives (lorsque l'un de leur EB est considéré comme certain)

Troncation double

► Un processus de troncation double :

- Le seuil S_p est conservé pour sélectionner les coupes significatives,
- Un seuil S_{pot} est introduit. Ce seuil sélectionne les coupes en se basant sur leur « probabilité potentielle ». Cette probabilité se définit comme la probabilité de la coupe lorsque son EB le moins probable est certain :

$$= \max_{EB_i \in CM_j} [P(CM_j / EB_i)]$$

► Une coupe est gardée si :

$$P(CM_j) \geq \min \left(S_p; \frac{P(CM_j)}{\min_{EB_i \in CM_j} [p(EB_i)]} \right)$$

Troncation double

► Efficacité de cette troncation double :

- Peu intéressante pour les EB relativement probables
- Un seuil S_{pot} est introduit. Ce seuil sélectionne les coupes en se basant sur leur « probabilité potentielle ». Cette probabilité se définit comme la probabilité de la coupe lorsque son EB le moins probable est certain :

$$= \max_{EB \in CM_j} [P(CM_j / EB_i)]$$

► Une coupe est gardée si :

$$P(CM_j) \geq \min \left(S_p, \frac{P(CM_j)}{\min_{EB \in CM_j} [p(EB_i)]} \right)$$

Troncation double

► Efficacité de ce processus :

- Une efficacité fonction de la probabilité des EB R1_pro_be_tpas.pps

► Efficacité vérifiée de manière globale ?

- Une vérification faite sur une EPS de niveau 1 : res_globaux.pps
- Un processus de troncation robuste et efficace

Plan

► Présentation des Facteurs d'Importance (FI)

- Expression des mesures d'importance
- Applications des mesures d'importance

► Incertitudes lors de leurs calculs

- Adapter les modèles EPS aux FI
- Seuils de troncature

► Solutions

- Un nouveau processus de troncation
- Un post-traitement des résultats de RSW

Post-traitement des résultats de RSW

► Adaptation au contexte d'utilisation d'EDF

- Un processus de troncation qui n'est pas implémenté sous RSW
- Nécessité de s'adapter :
 - Générer le plus de coupes possible avec RSW
 - A partir de ce jeu de coupes calculer les $R_{1,j}$ sans supprimer les coupes non minimales => ils sont surestimés mais le calcul est rapide
 - Tronquer le jeu de coupes à l'aide de notre processus double
 - Pour chaque EB rechercher les coupes non-minimales lorsqu'il est certain (ne peut pas être fait sur le jeu de coupes complet car trop long)
 - $R_{1,j} = R_{1,j} - \text{CM non-min}_j$

Incertitudes du logiciel

Exemple :

9.25E-7	Fuite_3mm	Vanne1_RO	Pompe2_DS	Pompe3_DS	R _{1,Pompe3_DS}
1E-12	Fuite_3mm	Vanne1_RO	Pompe2_DS	Vanne3_RO	
5E-13	Fuite_3mm	Pompe1_DS	Vanne2_RO	Pompe3_DS	
...					

$$R_{1,Pompe3_DS} = R_{1,Pompe3_DS} - \text{CM non min}_{1,Pompe3_DS}$$

CM non min_{1,Pompe3_DS}

Troncation double

9.25E-7	Fuite_3mm	Vanne1_RO	Pompe2_DS	Pompe3_DS
1E-12	Fuite_3mm	Pompe1_DS	Pompe2_DS	Vanne3_RO
...				



Facteurs d'Importance et incertitude

Plan

- ▶ **Présentation des Facteurs d'Importance (FI)**
 - Expression des mesures d'importance
 - Applications des mesures d'importance

- ▶ **Incertitudes lors de leurs calculs**
 - Adapter les modèles EPS aux FI
 - Seuils de troncature

- ▶ **Solutions**
 - Un nouveau processus de troncation
 - Un post-traitement des résultats de RSW

Plan

► **Présentation des Facteurs d'Importance (FI)**

- **Expression des mesures d'importance**
- Applications des mesures d'importance

► **Incertitudes lors de leurs calculs**

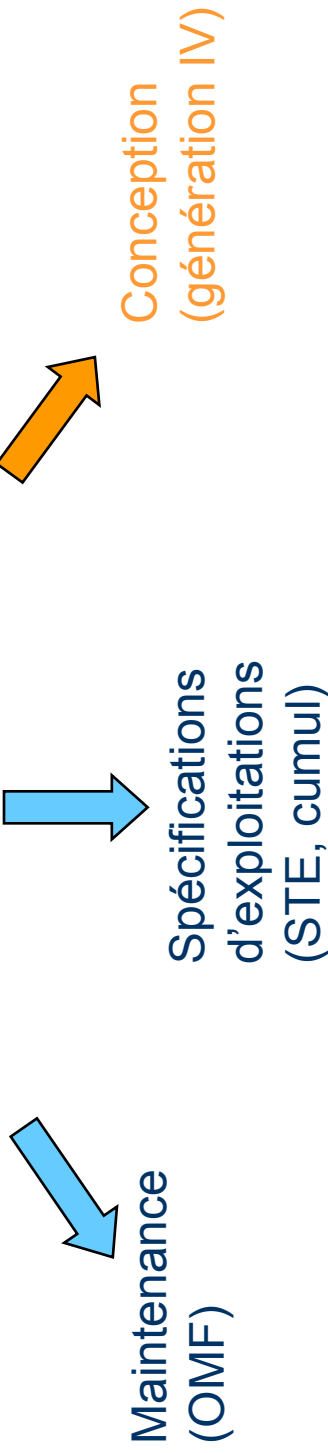
- Adapter les modèles EPS aux FI
- Seuils de troncature

► **Solutions**

- Un nouveau processus de troncation
- Un post-traitement des résultats de RSW

Les Études Probabiliste de Sûreté

- ▶ **Application du risque de référence et des séquences :**
 - Le domaine complémentaire
 - ANPI
 - Ré-examen de sûreté
- ▶ **Autres applications des EPS :**
 - Déterminer la contribution au risque ou à la défense en profondeur d'un événement (défaillance d'un matériel, erreur humaine...)



Les mesures d'importance

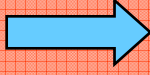
Autres applications des EPS :

Déterminer la contribution au risque ou à la défense en profondeur d'un événement (défaillance d'un matériel, erreur humaine...)

Maintenance
(OMF)



Spécifications
d'exploitations
(STE, cumul)



Conception
(génération IV)



Comment déterminer l'importance d'un événement ?



Les facteurs d'importance

Les mesures d'importance

Les principaux facteurs d'importance :

$$FAR(Evmt_i) = \frac{P(FUSION / Evmt_i) - P(FUSION)}{P(FUSION)}$$

C'est le pourcentage d'accroissement de risque lorsque l'événement i est considéré comme certain.

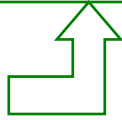
$$FDR(Evmt_i) = \frac{P(FUSION) - P(FUSION / \overline{Evmt_i})}{P(FUSION)}$$

C'est le pourcentage de diminution de risque lorsque l'événement i est considéré comme impossible.

$$I_B(Evmt_i) = P(FUSION / Evmt_i) - P(FUSION / \overline{Evmt_i})$$

C'est la probabilité que la centrale soit dans un état critique pour l'événement i (si la fonction de structure est cohérente)

...



Les principaux facteurs d'importance peuvent être exprimés à partir de

$$\underbrace{P(FUSION / Evmt_i)}_{R_{1,i}}, \underbrace{P(FUSION / \overline{Evmt_i})}_{R_{0,i}} \text{ et } \underbrace{P(FUSION)}_R$$

Plan

► **Présentation des Facteurs d'Importance (FI)**

- Expression des mesures d'importance
- Applications des mesures d'importance

► **Incertitudes lors de leurs calculs**

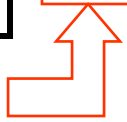
- Adapter les modèles EPS aux FI
- Seuils de troncature

► **Solutions**

- Un nouveau processus de troncation
- Un post-traitement des résultats de RSW

Application des FI à l'OMF

	FDR élevé	FDR faible
FAR élevé	La maintenance peut être ou ne pas être efficace : <i>Révision de la maintenance préventive, surveillance et ou re-conception</i>	La maintenance est efficace : <i>garder le programme de maintenance préventive et de surveillance</i>
FAR faible	La maintenance n'est pas suffisante : <i>fiabiliser le matériel ou reconception</i>	La maintenance peut être réduite : <i>maintenance corrective</i>



Une erreur d'estimation sur les FI peut conduire à des décisions ayant un impact sur le risque

Plan

- ▶ **Présentation des Facteurs d'Importance (FI)**
 - Expression des mesures d'importance
 - Applications des mesures d'importance
- ▶ **Incertitudes lors de leurs calculs**
 - Adapter les modèles EPS aux FI
 - Seuils de troncature
- ▶ **Solutions**
 - Un nouveau processus de troncation
 - Un post-traitement des résultats de RSW

Incertitudes de modèles

- ▶ **les EPS ont été développées pour connaître le risque de référence, pas l'importance des événements**

Certaines simplifications valides dans le cadre du calcul du risque de référence ne le sont plus lorsqu'on veut calculer des facteurs d'importance

- ▶ **Exemple :**

- **Des sous-systèmes symétriques modélisés de manière dissymétrique**

Deux voies identiques régulièrement permutées

Modélisation simplifiée



La voie A modélisée en fonctionnement et la voie B modélisée en secours



L'importance de la défaillance en fonctionnement de la voie B est sous-évaluée. L'importance de la défaillance à la sollicitation de la voie B est sur-évaluée.

Incertitudes de modèles

► **Solution apportées :**

- **Répertorier** les simplifications posant problème
 - Initiateurs non-développés,
 - Défaillances masquées,
 - Dissymétrie non-justifiées,
 - Séquences négligées,
 - ...

- **Proposer des solutions simples** pour faire évoluer les modèles

Plan

- ▶ **Présentation des Facteurs d'Importance (FI)**
- ▶ **Présentation de leurs applications existantes**
 - OMF
 - Cumuls d'indisponibilités
- ▶ **Problèmes lors de leurs calculs**
 - Adapter les modèles EPS aux FI
 - **Seuils de troncature**
- ▶ **Perspectives**
 - Fi pour des événements composés
 - Aide à la conception (gen. IV)

Incertitudes du logiciel

▶ Troncation de l'information :

- les EPS sont de très gros modèles : il faut supprimer les informations superflues.

▶ Exemple :

- Troncation du jeu de coupes

Un modèle EPS peut correspondre à des centaines de millions de coupes minimales => On ne peut pas toutes les générer



Simplification logiciel



On garde celles qui contribuent le plus au risque de référence



Les coupes importantes pour le risque de référence ne sont pas forcément celles importantes pour le calcul des facteurs d'importance

Incertitudes du logiciel

Processus de troncation actuel :

- Troncation par ordre :
 - Les coupes contenant plus de S_N EB ne sont pas prises en compte
 - inadapté aux EPS (dans les 200 coupes les plus probables certaines sont d'ordre six ou sept)
- Troncation probabiliste :
 - Les coupes dont la probabilité est inférieure à un seuil S_p ne sont pas conservées
 - Bien adapté au calcul du risque de référence : [risque F seuil.xls](#)
 - Problème lors du calcul des FI ? => vérifier que $R_{0,i}$ et $R_{1,i}$ ne sont pas trop impactés par la troncation du jeu de coupes de référence.

Incertitudes du logiciel



► Solution : un calcul « à la main »

- Tous les facteurs d'importance sont calculés très précisément,
- Solution très longue et très manuelle donc très coûteuse.

Plan

- ▶ **Présentation des Facteurs d'Importance (FI)**
 - Expression des mesures d'importance
 - Applications des mesures d'importance

- ▶ **Incertitudes lors de leurs calculs**
 - Adapter les modèles EPS aux FI
 - Seuils de troncature

- ▶ **Solutions**
 - **Un nouveau processus de troncation**
 - Un post-traitement des résultats de RSW



Facteurs d'importance d'événements composés

► Objectif :

Les facteurs d'importance sont définis et utilisés pour déterminer l'importance des Événements de Base (EB) : mode de def. spécifique d'un comp. spécifique.

On peut vouloir connaître l'importance d'événements composés (à partir de plusieurs EB) appelés macro-événements.

► État de l'art :

Plusieurs extensions des facteurs d'importance existent mais :

- Définitions contradictoires (exemple des systèmes)
- Application potentielles non envisagées

► Travail à effectuer :

Clarifier les définitions mathématiques. Expliciter leur signification physique. Proposer des exemples d'application.

Facteurs d'importance d'événements composés

▶ Exemple : l'importance d'un système

– Définitions existantes :

Les considérer comme tous défaillant OU considérer que la fonction est perdue

– Notre définition :

Un système caractérisé par une et une seule fonction. Les composants du système = les composants contribuant à la mission perte du système = occurrence d'une de ses coupes

– Signification :

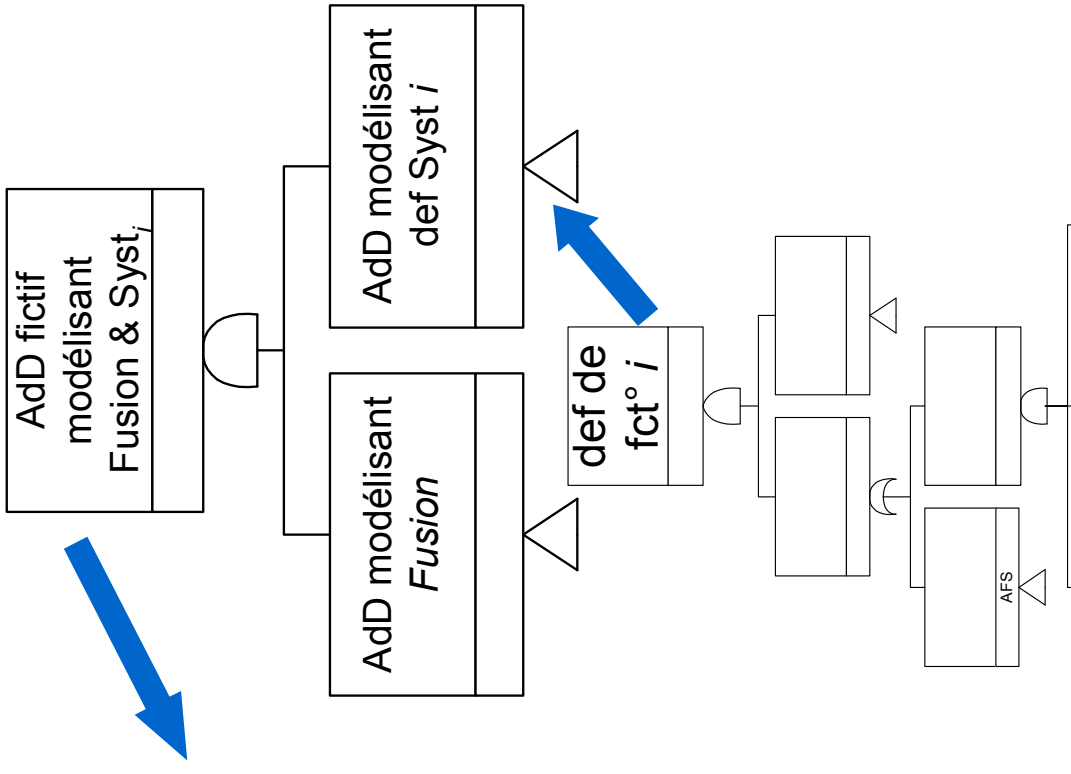
$P(FUSION / Système_i)$ La probabilité de fusion du cœur sachant que la mission i est défaillante : on sait qu'une coupe du système est réalisée. On ne sait pas laquelle.

Facteurs d'importance d'événements composés

Mode de calcul :

$$P(\text{Fusion} / E_{\text{Syst}_i}) = \frac{P(\text{Fusion} \cap E_{\text{Syst}_i})}{P(E_{\text{Syst}_i})}$$

$$P(\text{Fusion} / \overline{E_{\text{Syst}_i}}) = \frac{P(\text{Fusion}) - P(\text{Fusion} \cap E_{\text{Syst}_i})}{1 - P(E_{\text{Syst}_i})}$$





Facteurs d'importance d'événements composés



► Résultats « académiques »

Présentation en congrès (ESREL06 et Lambda Mu 15)

► Application à EDF (en cours)

Cumul d'indisponibilités et STE :

Prise en compte d'événement composés (perte d'une voie RIS)
Définition du délai avant repli de la tranche à partir de l'effet du cumul sur le risque : nul, "additif", "multiplicatif"

↳ Développement d'un facteur d'importance spécifique

► Application potentielle :

Utilisation de ces facteurs d'importances "étendus" à l'aide à la conception et à la vérification de l'indépendance des lignes de défense

Plan

- ▶ **Présentation des Facteurs d'Importance (FI)**
- ▶ **Présentation de leurs applications existantes**
 - OMF
 - Cumuls d'indisponibilités
- ▶ **Problèmes lors de leurs calculs**
 - Adapter les modèles EPS aux FI
 - Seuils de troncature
- ▶ **Perspectives**
 - Fi pour des événements composés
 - Aide à la conception (gen. IV)



Facteurs d'importance et conception

► Contexte :

Le remplacement des centrales existantes par de nouvelles centrales doit être envisagé (gen. IV). La conception sera à la fois déterministe et probabiliste. Les facteurs d'importance peuvent donc y trouver une place.

► Objectif :

Le plus sûre et le plus disponible possible à moindre coût.

- ⇒ peu de lignes de défense très fiables, robustes, polyvalentes et indépendantes les unes des autres.
- ⇒ couverture homogène des risques,
- ⇒ bonne défense en profondeur,
- ⇒ risque résiduel acceptable



Facteurs d'importance et conception



► Travail effectué :

Rechercher les travaux effectués dans ce domaine, élaborer une première proposition de démarche de conception probabiliste/déterministe.

► Schéma général :

Faire un va et vient successif entre approche déterministe pour concevoir et EPS pour enrichir la conception.

Les étapes seraient :

- **pré-design déterministe** (quel caloporteur, quel modérateur, quel combustible)
- **EPS compacte** (re-répartition, re-conception des lignes de défenses, ajout de nouvelles lignes)
- **design déterministe des systèmes** (critère de défaillance unique...)
- **EPS complète** (vérification de l'indépendance des lignes de défense, de la défense en profondeur au niveau composant et du niveau de risque = dernière phase d'enrichissement de la conception)

Facteurs d'importance et conception

Exemple :

Pour savoir si une ligne de défense est indépendante des autres on peut comparer le FAR du système qui supporte la mission de la ligne de défense au FAR de la mission (c.f. figure).

Si les deux FAR sont identiques la ligne de défense est indépendante des autres.

Fuite	isolement de la fuite	injection d'eau de secours	injection auxiliaire	Conséquence
				MITIGATION
				MITIGATION
				FUSION
				MITIGATION
				FUSION

Pour calculer

$P(\text{FUSION}/\text{Mission}_{\text{inj. Aux.}})$



Facteurs d'importance d'événements composés



- ▶ **Résultats « académiques »**

Présentation en congrès (ESREL juin 07)

- ▶ **Perspectives pour EDF
(actuellement)**

Production d'un rapport présentant ces pistes de développement
(à venir)

Discussion sur les pistes de développement proposées

Expression du risque

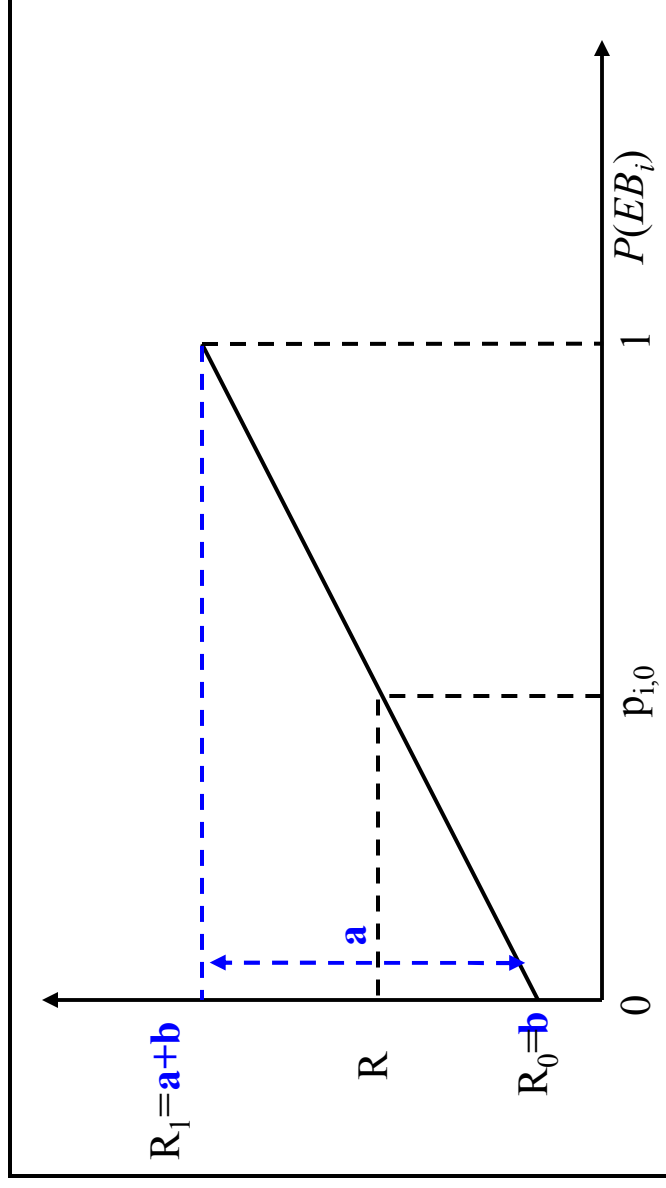
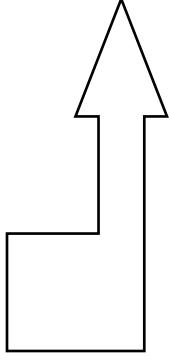


▀ Décomposition pivotale :

$$P(FUSION) = p_i \cdot P(FUSION / EB_i) + (1 - p_i) \cdot P(FUSION / \overline{EB_i})$$

$$P(FUSION) = p_i \cdot \underbrace{\left(P(FUSION / EB_i) - P(FUSION / \overline{EB_i}) \right)}_{a_i = P(EB_i \text{ critique})} + \underbrace{P(FUSION / \overline{EB_i})}_{b_i}$$

$$R = a_i \cdot p_i + b_i$$



Les FI



► Le FAR :

$$FAR(EB_i) = \frac{R_{1,i} - R}{R} = \frac{a_i \cdot (1 - p_i)}{R} = \frac{P(EB_i \text{ critique}) \cdot (1 - p_i)}{R}$$

► Signification :

- Si EB_i correspond à la def. de la pompe, le FAR de EB_i nous donne la probabilité que la pompe soit critique et en marche.
- C'est le pourcentage d'augmentation du risque instantané lorsque la pompe est défaillante

► Utilisation :

- Il indique sur le niveau de défense en profondeur relativement à EB_i

Les FI



► Le FDR :

$$FDR(EB_i) = \frac{R - R_{0,i}}{R} = \frac{a_i \cdot p_i}{R} = \frac{P(EB_i \text{ critique}) \cdot p_i}{R}$$

► Signification :

- Si EB_i correspond à la def. de la pompe, le FDR de EB_i nous donne la probabilité que la pompe soit critique et en panne => la probabilité que la def. de la pompe provoque la fusion.
- Ce serait le pourcentage de diminution du risque si la pompe est défaillante
- C'est le pourcentage d'accroissement de risque instantané lorsque p_i est doublé

► Utilisation :

- Il indique sur le niveau contribution au risque de EB_i