

The logo for IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire) is located in the top left corner. It consists of the letters 'IRSN' in a bold, sans-serif font. The 'I', 'R', and 'S' are red, while the 'N' is blue. Below the acronym, the full name of the institution is written in a smaller, blue, sans-serif font.

INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Intérêt des théories de l'incertain pour représenter et propager la connaissance imprécise en évaluation des risques

Jean Baccou , Eric Chojnacki, Sébastien Destercke

Plan

- 1) Pourquoi modéliser l'incertitude?
- 2) Aperçu des théories de l'incertain
- 3) Exemples d'application : radioprotection et sûreté nucléaire
- 4) Méthode RaFu et logiciel SUNSET
- 5) Activités R&D

1) Pourquoi modéliser l'incertitude : Motivations

- **Raisons économiques :**

Utilisation de modèles et de données réalistes permet de réduire des marges prises à cause d'hypothèses pénalisantes

- **Raisons de sûreté :**

En France, l'article 4 de la loi sur la prévention des risques technologiques du 30 juillet 2003

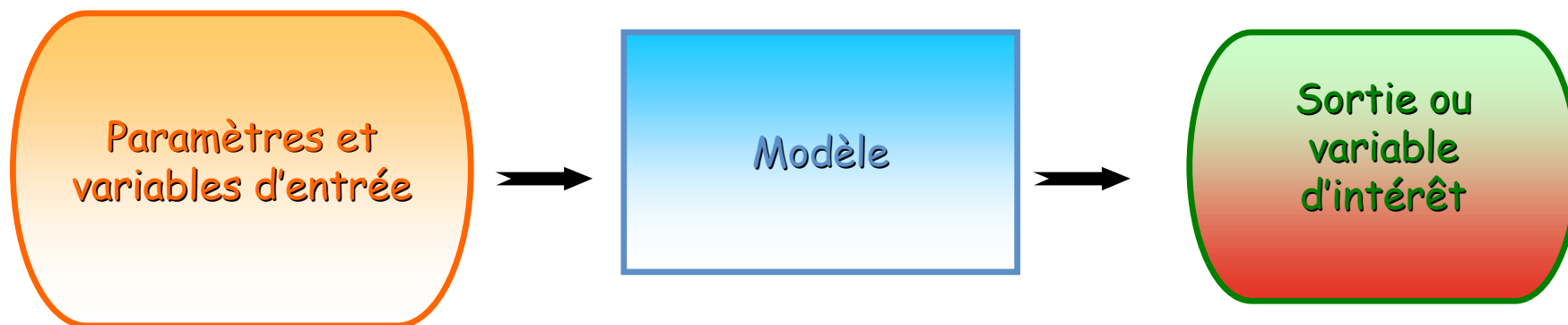
« Le demandeur d'une installation nouvelle ou de la modification d'une installation existante doit fournir une étude de dangers ...

Cette étude donne lieu à une analyse de risque qui prend en compte la probabilité d'occurrence, suivant une méthodologie qu'elle explicite. Elle définit et justifie les mesures propres à réduire la probabilité et les effets de ces accidents.».

- **Out il de communication :**

Permet de rendre visible l'état des connaissances et donc d'expliquer les règles de sûreté prises.

1) Pourquoi modéliser l'incertitude : Exemples



- Coefficient de transfert de chaleur gaz-paroi,.....

- Quantité de lait produit par une vache,

- Date d'incorporation d'une substance radioactive, ...

- Code de thermohydraulique, incendie

- Modèle de transfert d'un polluant dans l'environnement

- Modèle de contamination radioactive des travailleurs

- Pic de température de gaine, température dans le local,...

- Concentration d'un polluant,...

- Dose, risque

2) Aperçu des théories de l'incertain

Objectif modéliser de l'information incertaine

2 types d'incertitude = **Variabilité** + **Imprécision**

Variabilité naturelle d'un phénomène (e.g. temps de défaillance d'un composant, concentration d'un polluant) :
incertitude aléatoire

Imprécision due au manque de données ou de connaissances (e.g. constante d'un modèle, date d'un évènement passé) :
incertitude épistémique

2) Aperçu des théories de l'incertain

- 2.1) Théorie des probabilités
- 2.2) Autres théories de l'incertain
 - Théorie des possibilités
 - P-boxes
 - Théorie de Dempster-Shafer

2.1) Théorie des probabilités

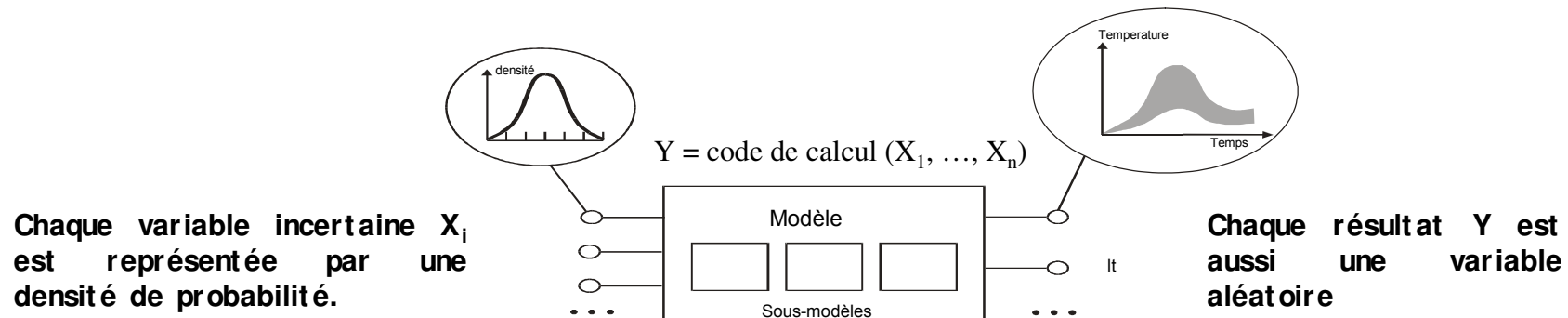
Approche classique pour l'analyse d'incertitude

- Quantification de l'incertitude par le choix d'une pdf + dépendances entre paramètres
- Propagation à travers le modèle par simulations de Monte-Carlo
- Analyse statistique des réponses : moyenne, variance, fonction de répartition, percentiles,.....



Méthode générale et simple à mettre en oeuvre

2.1) Théorie des probabilités



Résolution numérique : simulation de Monte- Carlo

Loi des grands nombres :

$$\frac{1}{N} \sum_1^N G(y_i) \xrightarrow{N \rightarrow \infty} E(G(y))$$

Statistiques usuelles :

$$G(x) = x$$

$$G(x) = x^2$$

$$G(x) = 1 \text{ si } x \leq x_0 \text{ et } 0 \text{ sinon}$$

$E(G(X))$: moyenne

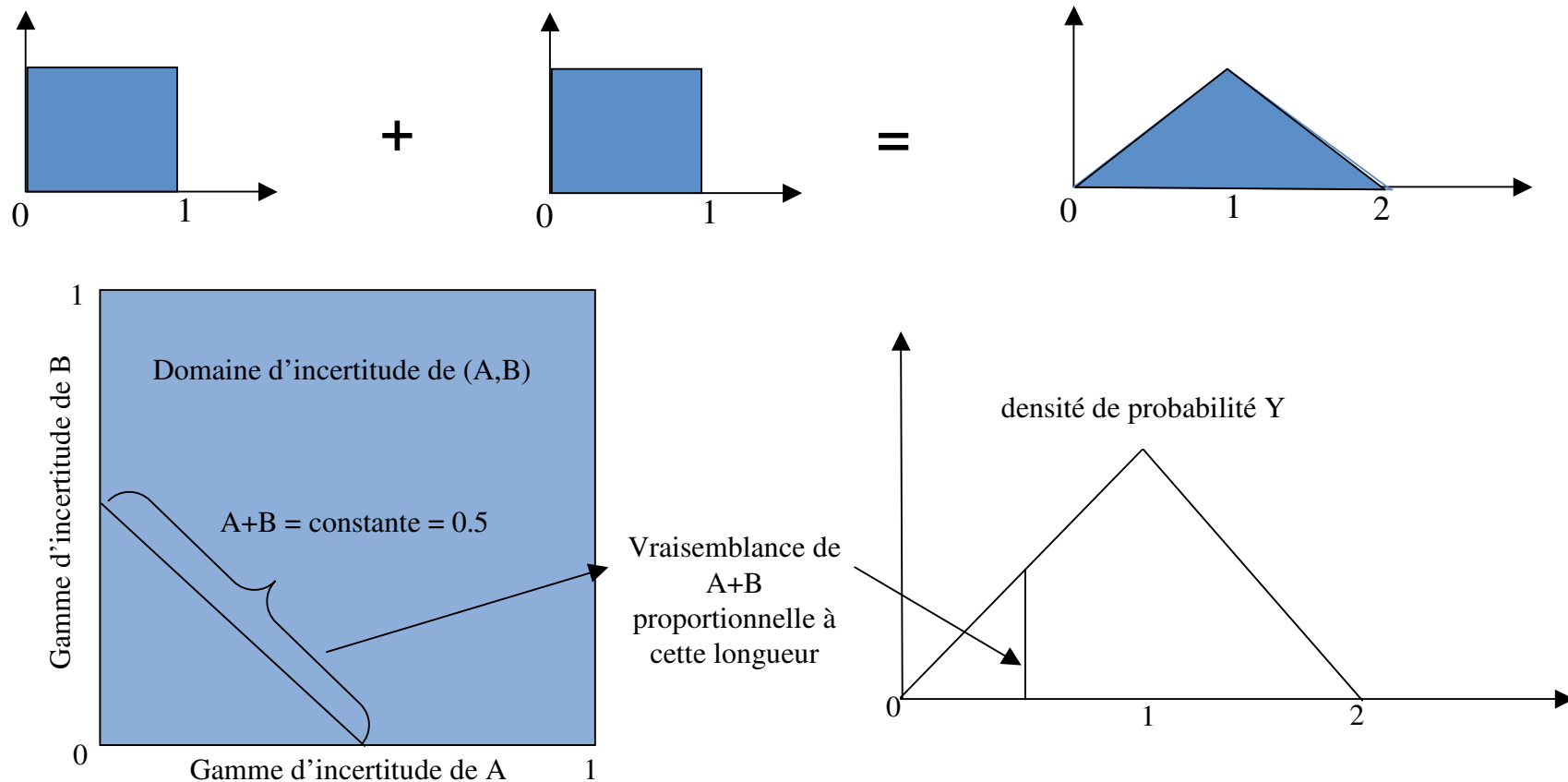
$E(G(X))$: variance

$E(G(X))$: percentile de x_0

2.1) Théorie des probabilités

Rappel sur le calcul probabiliste

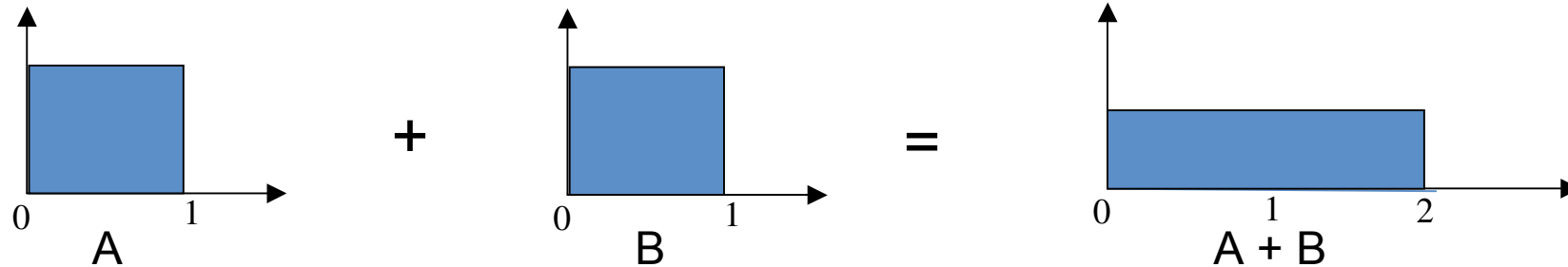
Exemple : Considérons A et B 2 variables aléatoires indépendantes équadistribuées sur $[0, 1]$,
et Y la somme : $Y=A+B$



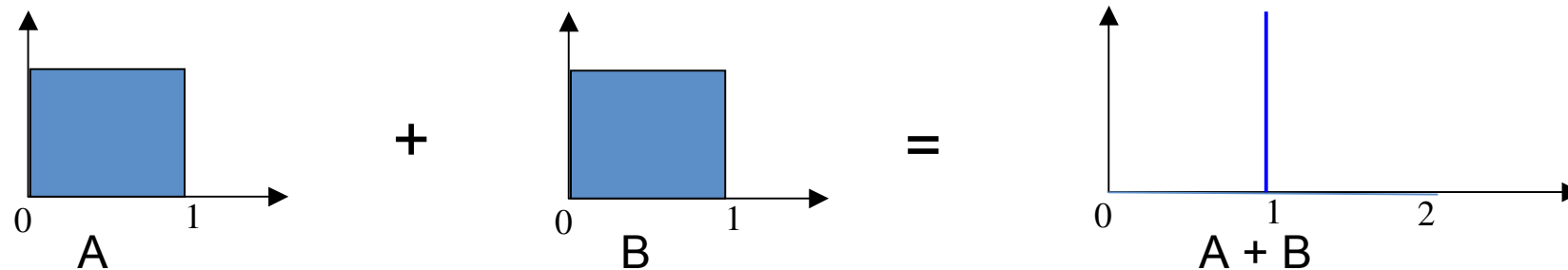
2.1) Théorie des probabilités

Effet de la dépendance sur le calcul probabiliste

Reprise de l'exemple précédent en supposant A et B totalement positivement corrélées



Reprise de l'exemple précédent en supposant A et B totalement négativement corrélées

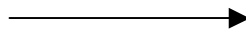


2.1) Théorie des probabilités

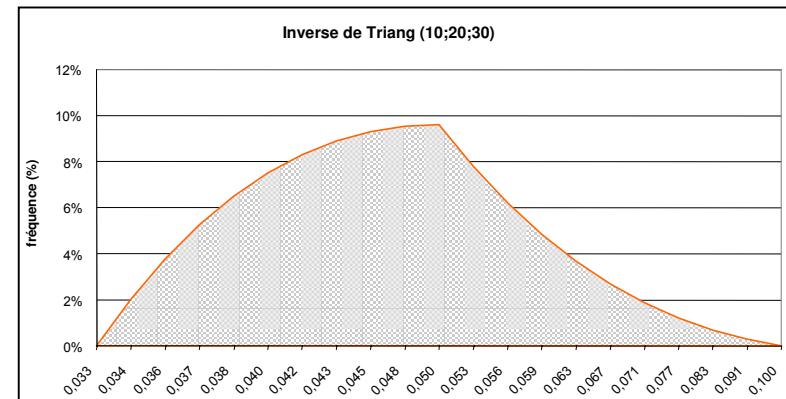
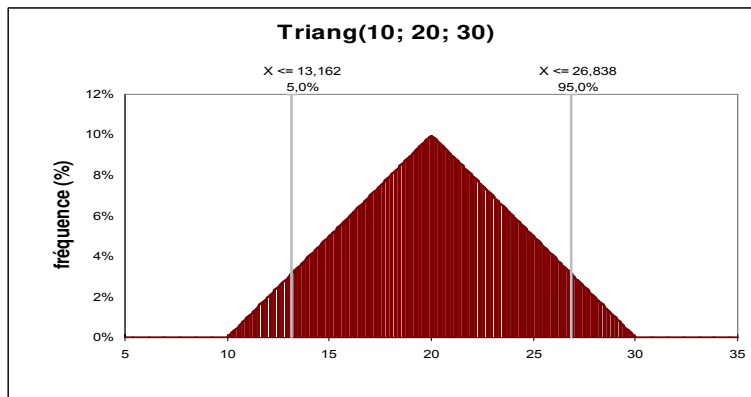
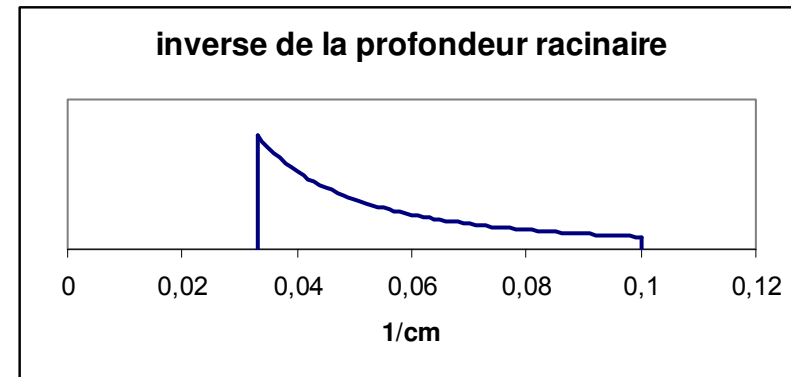
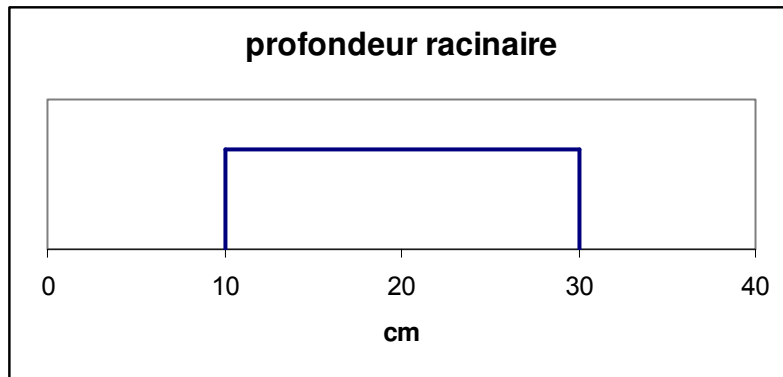
Choix d'une densité

Effet de la métrique

métrique X



métrique $1/X$



2.1) Théorie des probabilités

Conclusion :

La théorie des probabilités constitue :

- un moyen simple et performant pour propager des incertitudes

Exemple *la méthode de Monte-Carlo*

Pas de restriction sur le nombre de paramètres, sur la complexité de la fonction de transfert, mesure de la précision numérique pour tous les percentiles ...

- nécessite de représenter l'ensemble des incertitudes "source" par une densité conjointe de probabilité

Comment déterminer les incertitudes "source", leurs densités marginales, leurs dépendances

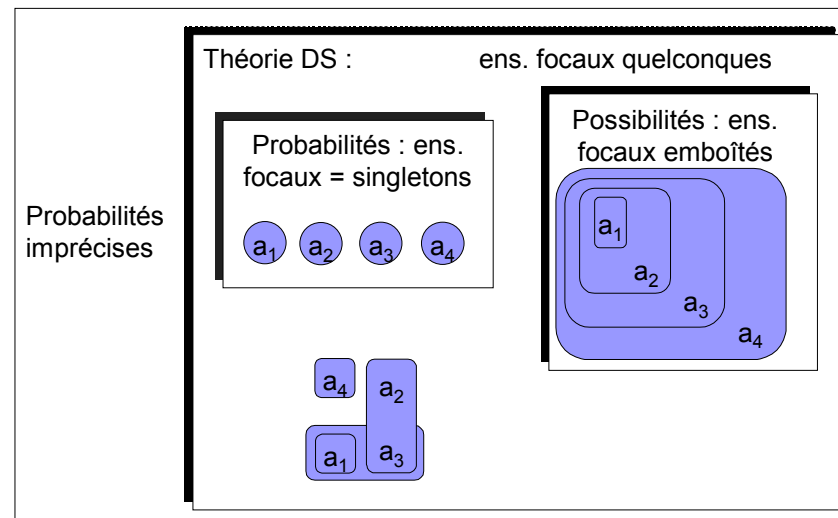
⇒ besoin d'étendre les résultats de la théorie des probabilités à des familles de probabilité : théories de l'incertain

2.2) Autres théories de l'incertain :

modéliser des sous-familles de probabilités

Exemple

$$\Omega = \{a_1, a_2, a_3, a_4\}$$



Théorie des probabilités : théorie « point »

Théorie Dempster Shafer : théorie « ensemble »

2.2) Autres théories de l'incertain :

Théorie des possibilités : sous-famille “emboîtée” de probabilités

Distribution de possibilité modélise un ensemble d'intervalles de confiance.

Exemple → un opinion d'expert sur les valeurs du pH d'un sol :

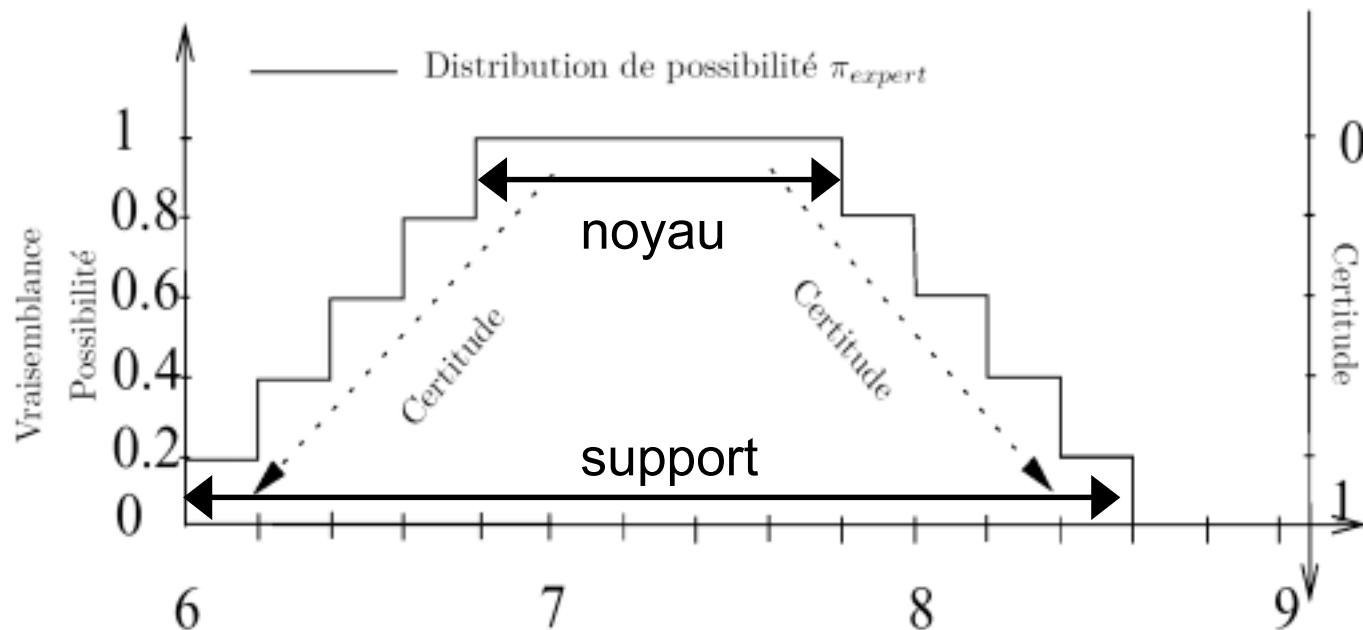
Je suis certain que $pH \in [6, 8.6]$

Je suis sûr à 80% que $pH \in [6.2, 8.4]$

Je suis sûr à 60% que $pH \in [6.4, 8.2]$

Je suis sûr à 40% que $pH \in [6.6, 8]$

Je suis sûr à 20% que $pH \in [6.8, 7.8]$

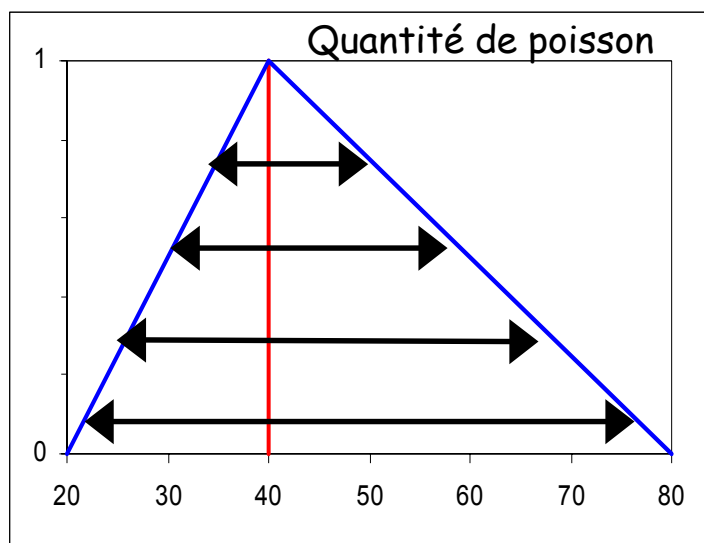


2.2) Autres théories de l'incertain : possibilités

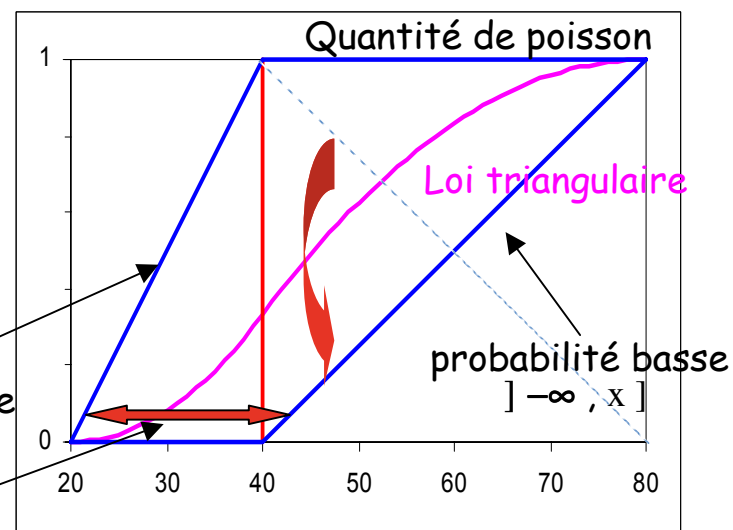
Une possibilité correspond à une famille de probabilités :

Exemple : possibilité de consommer une quantité de poisson

Distribution de possibilité



Famille correspondante de CDFs



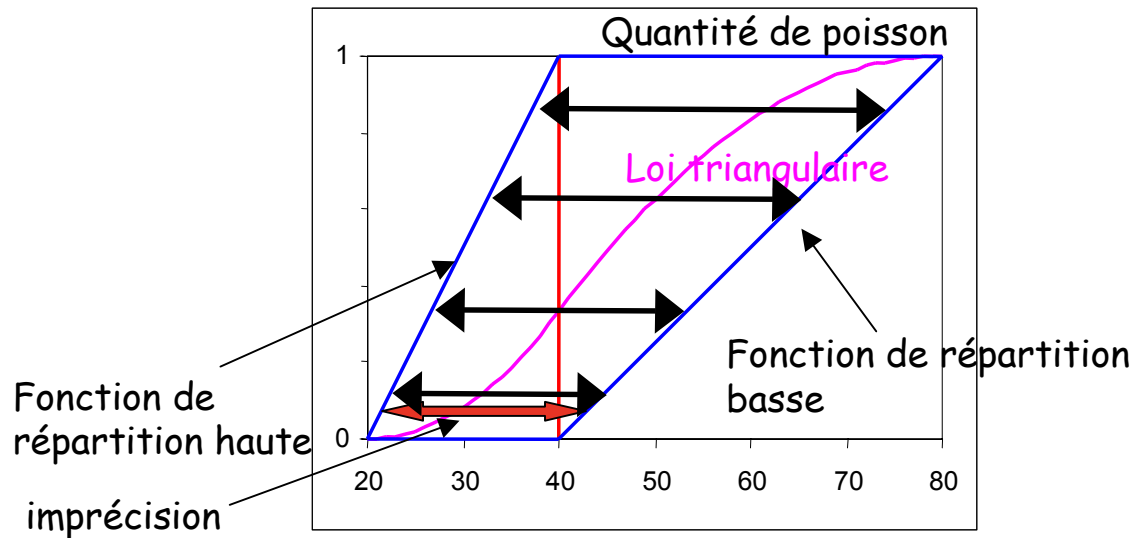
Une distribution de possibilité triangulaire contient toutes les probabilités continues de même mode et de même support.

2.2) Autres théories de l'incertain : P-boxes

Une P- box est une famille de probabilité définie par une fonction de répartition inférieure et une fonction de répartition supérieure.

Exemple : P- box d'une quantité de poisson

Famille de fonction de répartitions

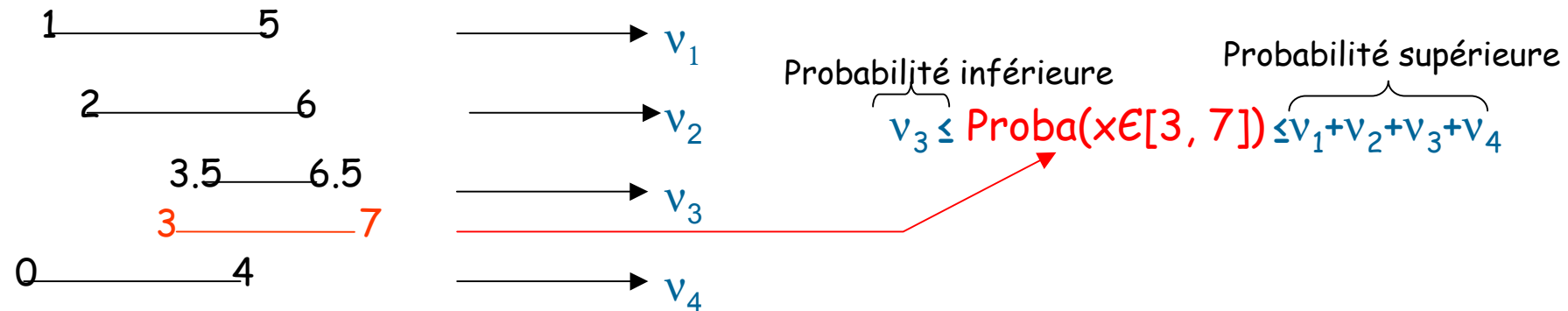


Une distribution de possibilité triangulaire contient toutes les probabilités dont la fonction de répartition est comprise entre une limite sup et inf.

2.2) Autres théories de l'incertain : Théorie DS

Une structure DS est une famille de probabilité définie par un ensemble d'éléments focaux pesants.

Exemple de structure DS



N.B. Evidemment, les fonctions de répartition inférieures et supérieures s'obtiennent en considérant les intervalles $] -\infty, x]$

2.2) Autres théories de l'incertain : Exemples pratiques

Phénomène variable de loi connue \Rightarrow théorie des probabilités

nbre de morts sur les routes : loi de Poisson de paramètre $\mu = 6000/\text{an}$

Phénomène variable de loi empirique imprécise \Rightarrow P-box

Concentration d'un polluant et peu de données expérimentales

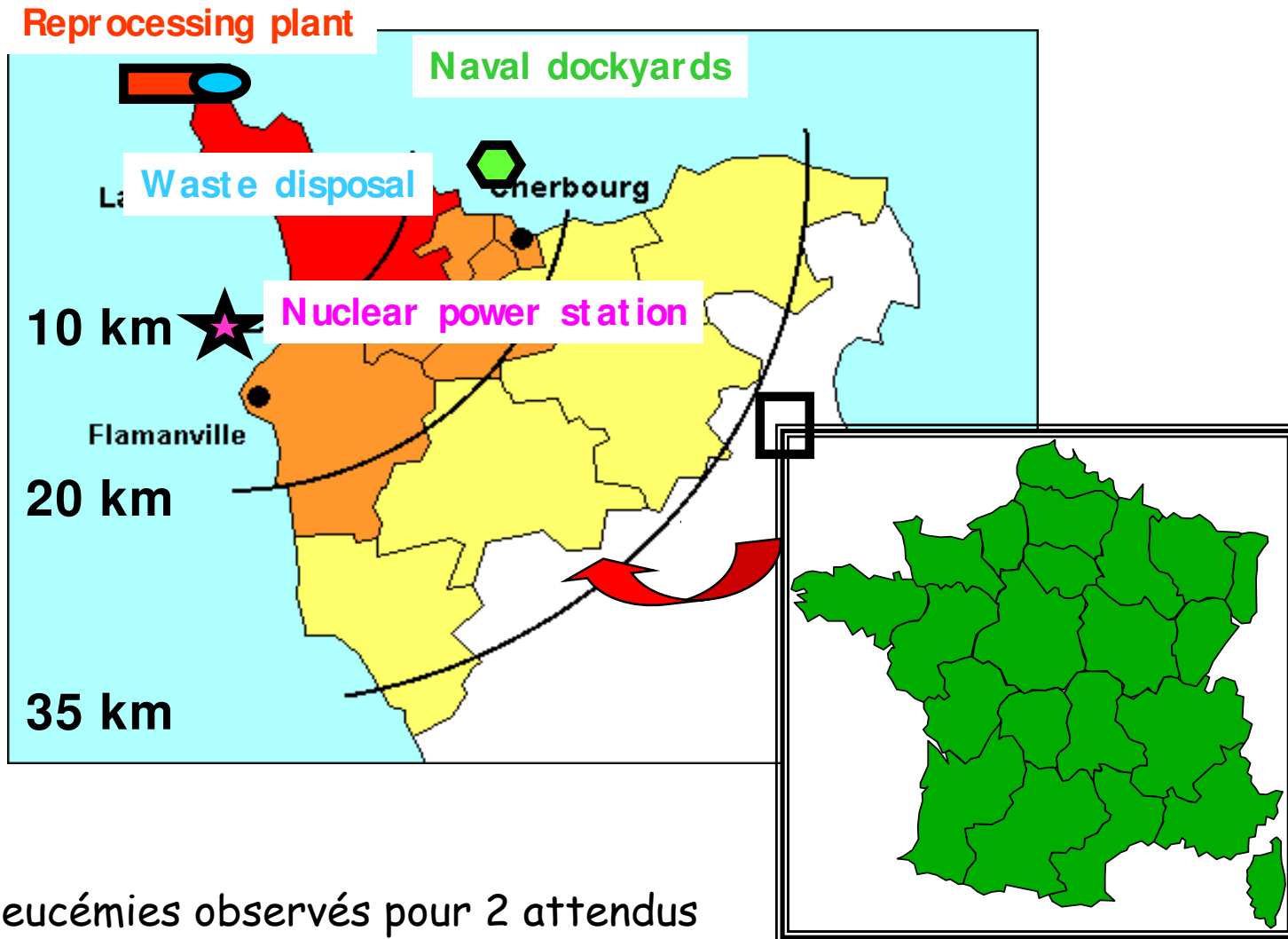
Grandeur fixe mais imprécise \Rightarrow théorie des possibilités

nbre de chômeurs en France en 2006 : 2 millions \pm

Phénomène variable de loi connue mais de paramètre(s) imprécis \Rightarrow DS

durée de vie d'un composant : loi exponentielle de $\lambda = 0.05 \pm 50\%$

3.1) Exemple en radioprotection

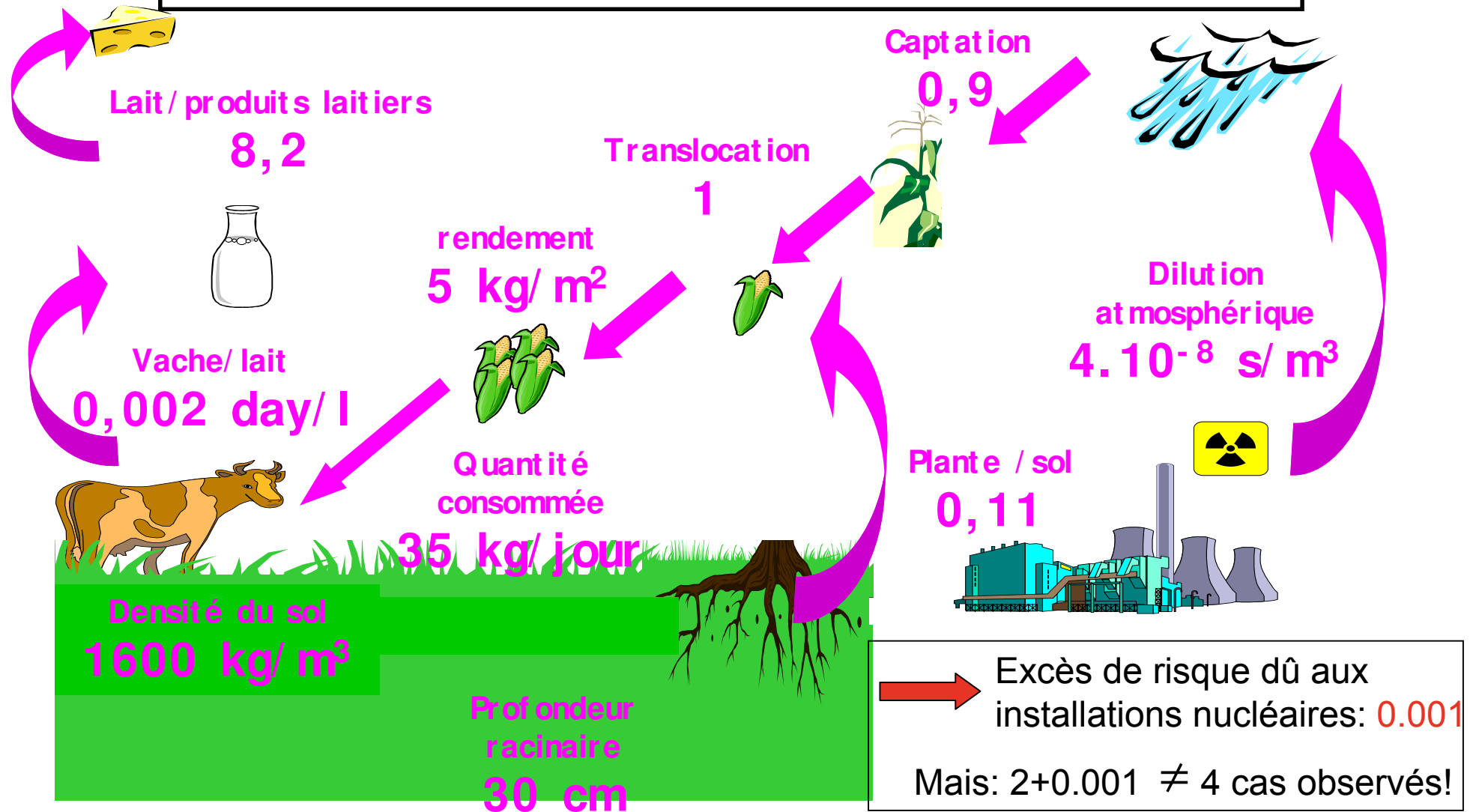


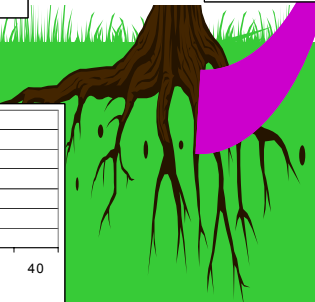
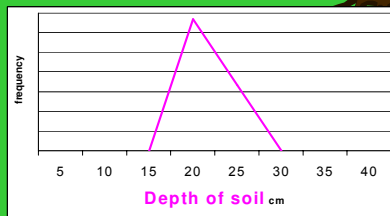
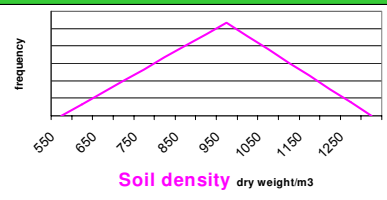
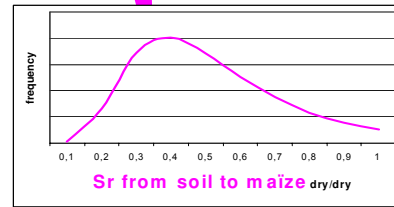
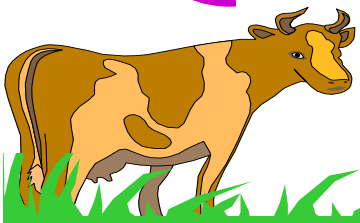
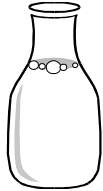
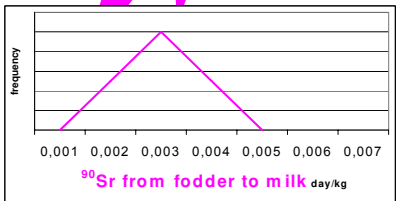
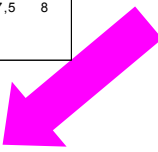
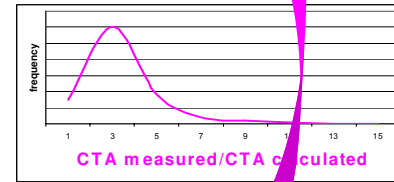
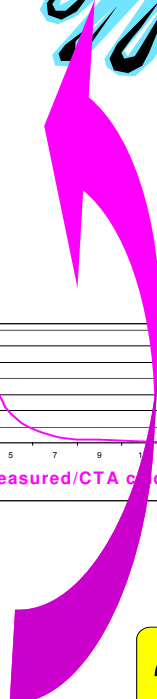
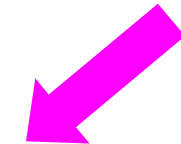
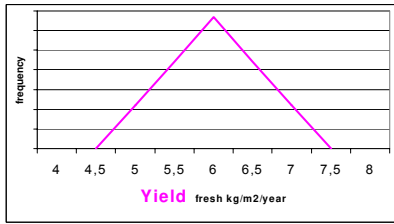
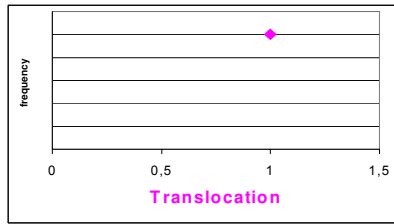
4 cas de leucémies observés pour 2 attendus

Combien de cas de leucémies peuvent être expliqués par les installations nucléaires du Nord-Cotentin ?

3.1) Exemple en radioprotection

Un exemple de voie d'atteinte : l'ingestion de produits laitiers





3.1) Exemple en radioprotection

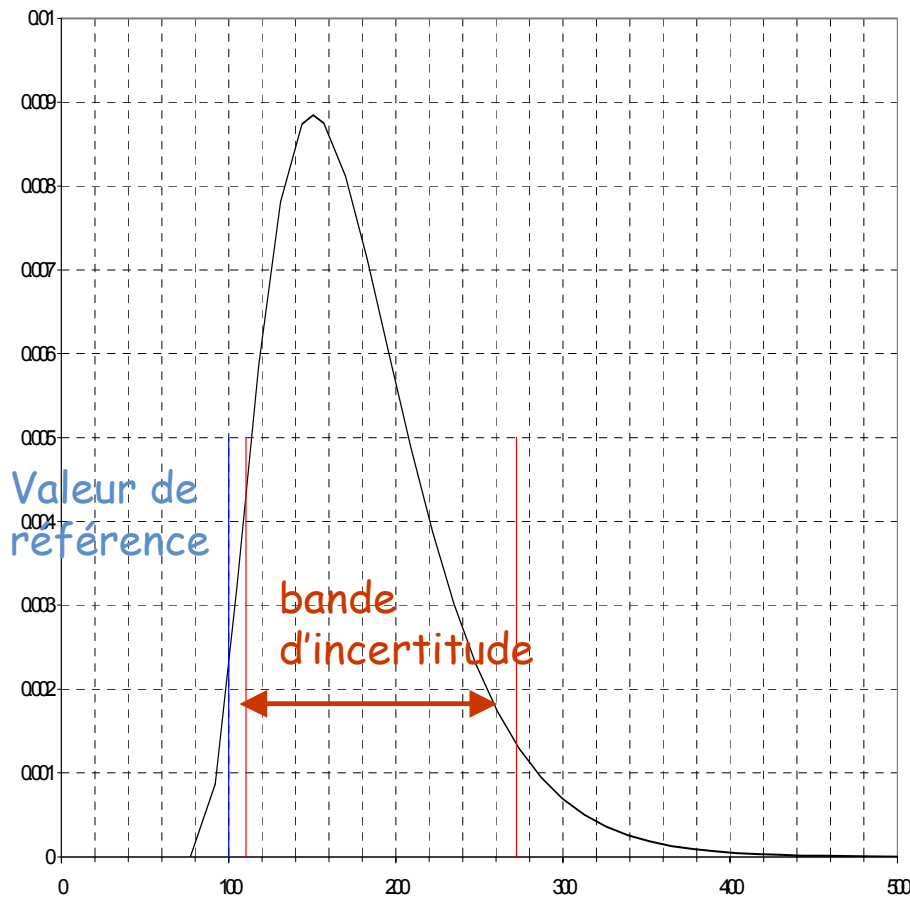
Résultats de l'analyse probabiliste

Bande d'incertitude faible (en % de la valeur de référence):
111%(percentile 5%) - 272%
(percentile 95%)

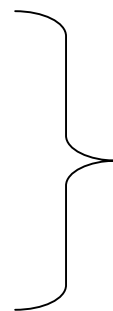
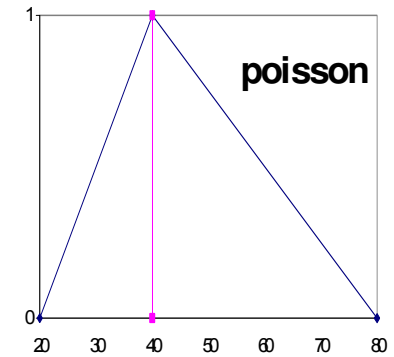
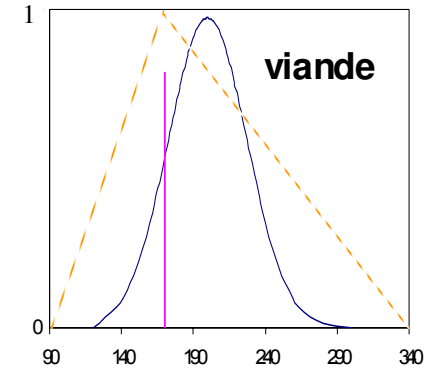
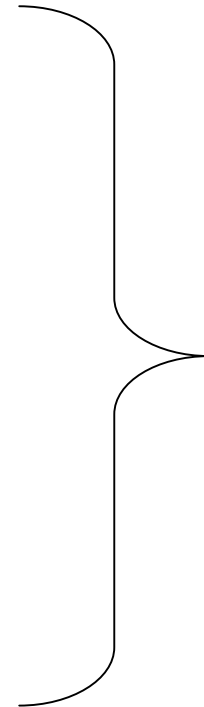
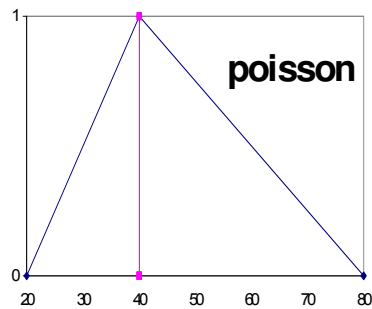
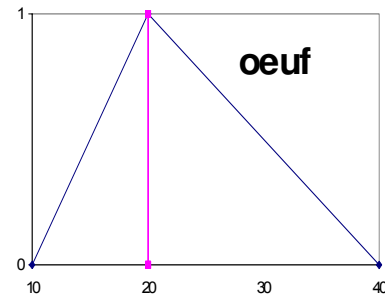
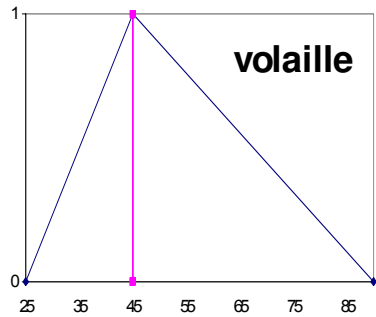
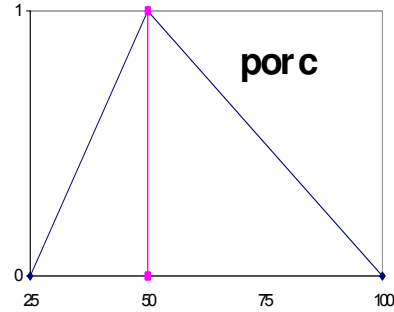
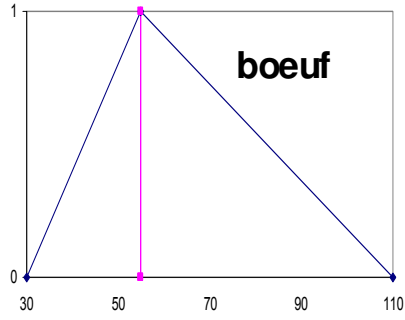
Bande d'incertitude ne peut pas être expliquée par l'effet de la taille de l'échantillon (cf. **statistique d'ordre**)

Calcul de référence en dehors de la bande d'incertitude, apparaissant comme fortement non conservatif

Résultats étonnants de l'analyse probabiliste Monte-Carlo



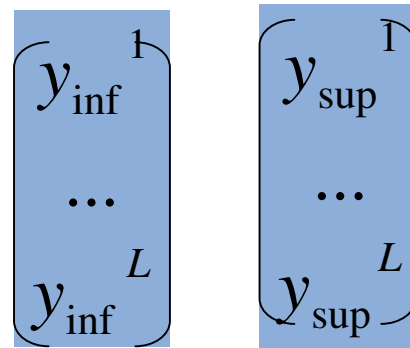
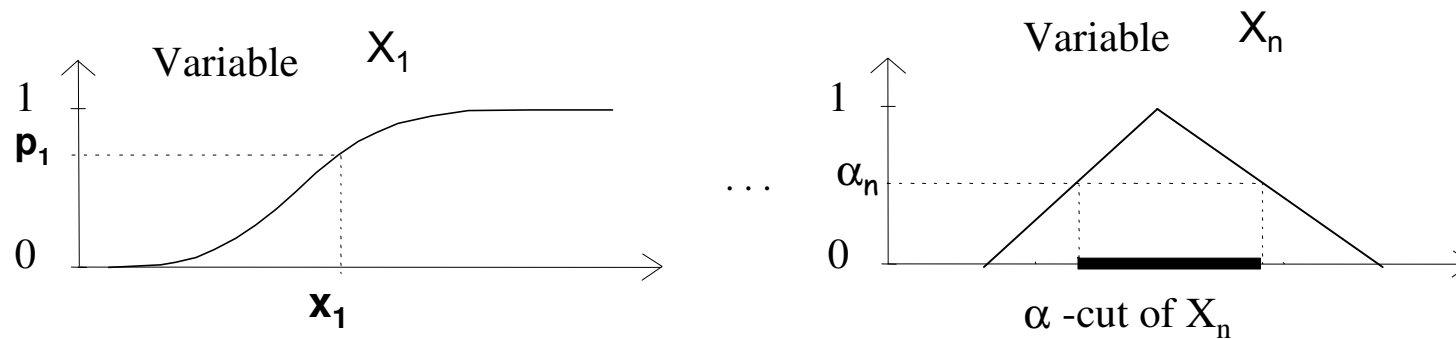
Exemple : quantité de viande/poisson consommée



3.1) Exemple en radioprotection

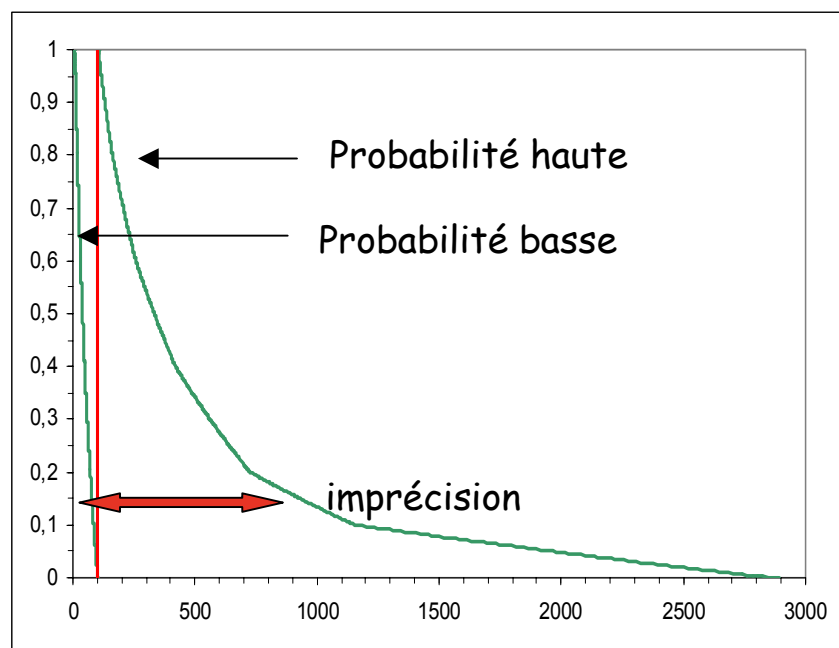
Méthode de Dempster-Shafer: extension des techniques de Monte-Carlo

- Propagation : gestion des tirages = cumul ou compensation des incertitudes



3.1) Exemple en radioprotection

Résultats de l'analyse « Dempster-Shafer »



Résultats :

Percentile 95% : [90% , 2000%]

Percentile 5% : [10% , 120%]

Calcul de référence tout à fait possible.

Résultat plus conforme à la connaissance réelle, confirme la non vraisemblance d'un cas de leucémie imputable aux installations nucléaires.

3.1) Exemple en radioprotection

Conclusions

- Méthode probabiliste: facile à implémenter (Monte-Carlo), estimation simple des percentiles

Mais

Pas adaptée quand peu de connaissance (hypothèses trop restrictive)

→ Réduction artificielle des marges d'incertitudes (facteur 3 dans la bande d'incertitude), manque de fiabilité pour la prise de décision

- Meilleure prise en compte de l'état de connaissance, extension des techniques de Monte-Carlo

→ Marge d'incertitude + grande ($/10$, $\times 20$ = facteur 200 dans la bande d'incertitude) mais plus fiable (à intégrer dans une démarche itérative)

→ Justification de la **qualité/transparence** des résultats obtenus

3.2) Exemple en sûreté nucléaire

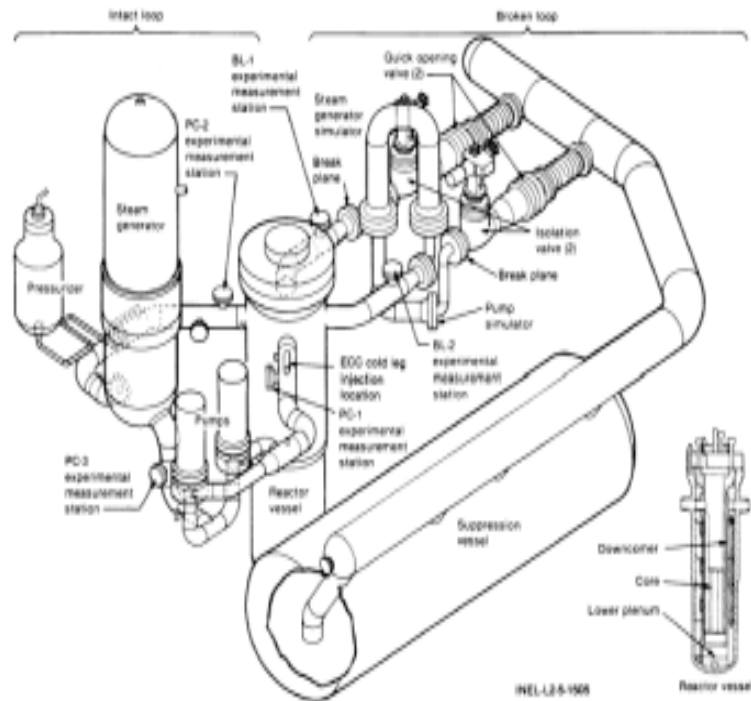


Figure A-1. Axonometric projection of LOFT system.

L2-5 test : 16/06/82

Simulation de la rupture guillotine de la
branche froide d'un réacteur nucléaire

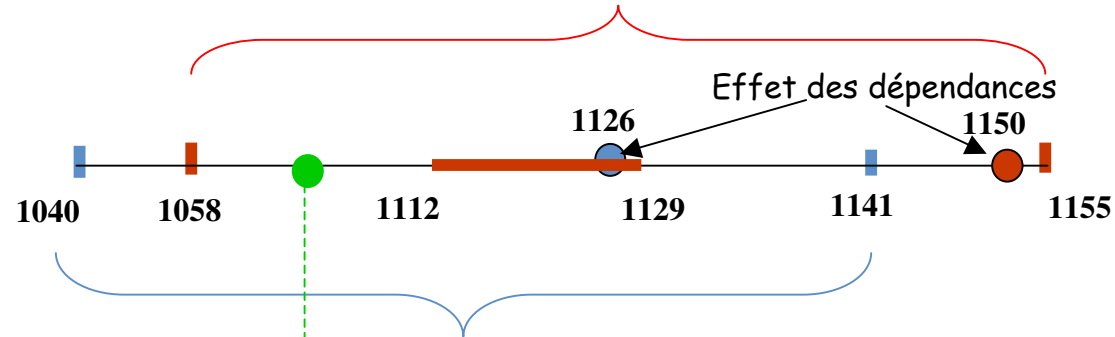
Programme OCDE : BEMUSE

CEA (France), ENUSA & UPC (Spain), GRS
(Germany), IRSN (France), JNES (Japan),
KINS (Korea) NRI (Czech Republic), PSI
(Switzerland), TAEK (Turkey), Università Degli
Studi di Pisa (Italy)

3.2) Exemple en sûreté nucléaire

Effet du choix de la densité de probabilité en supposant une dépendance épistémique

Percentile 95%

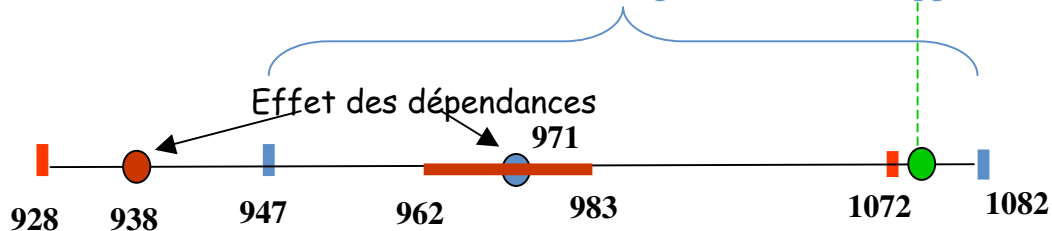


Effet du choix de la densité de probabilité en supposant une indépendance stochastique

Valeur expérimentale

Percentile 5%

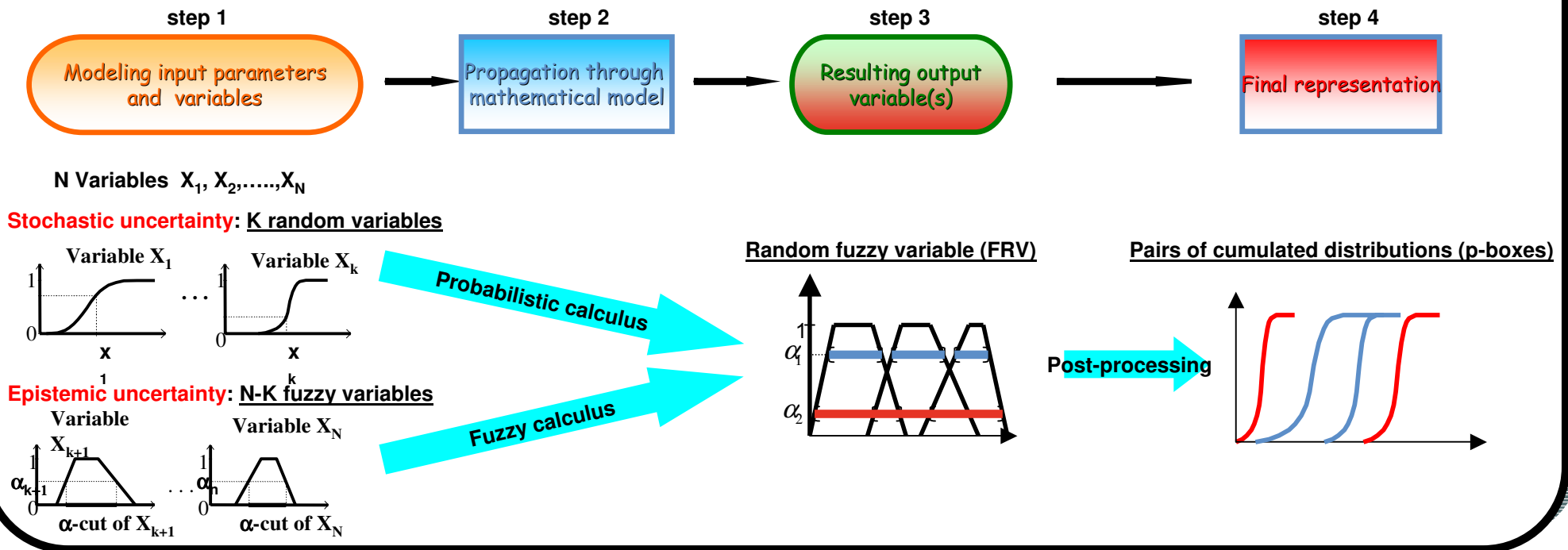
Effet du choix de la densité de probabilité en supposant une indépendance stochastique



Effet du choix de la densité de probabilité en supposant une dépendance épistémique

4) Méthode RaFu et logiciel SUNSET

Propagating stochastic and epistemic uncertainties: principle



Methodology

1. Triplet of parameter $(\gamma_S, \gamma_E, \gamma_A)$ defined by DM's specification:

- γ_S : desired response stochastic quantity
- γ_E : desired response fuzzy (epistemic) quantity
- γ_A : desired final numerical accuracy



Example of DM's specification

- γ_S : Percentile 95%
- γ_E : Hyper-cautious ($\alpha_i=0, i=K+1, \dots, N$)
- γ_A : 99% certainty to cover true value

2. Definition of sample minimal size and nature

• Associated triplet **(0.95;0;0.99)**

5) Activités R&D

- Evaluation/Validation des sources d'incertitudes:
 - Elicitation d'avis d'experts: cadre probabiliste, possibiliste,...
 - Méthodes de fusion de l'information : informativité, calibration, conjonction...
 - Problème inverse
- Propagation des incertitudes :
 - Construction de méta-modèles (temps de calcul, calcul d'intervalle)
 - Extension des techniques de propagation d'incertitude (p-boxes, clouds, dépendances)
- Analyse et synthèse des résultats :
 - Méthodes de restitution de l'information
 - Analyse de sensibilité