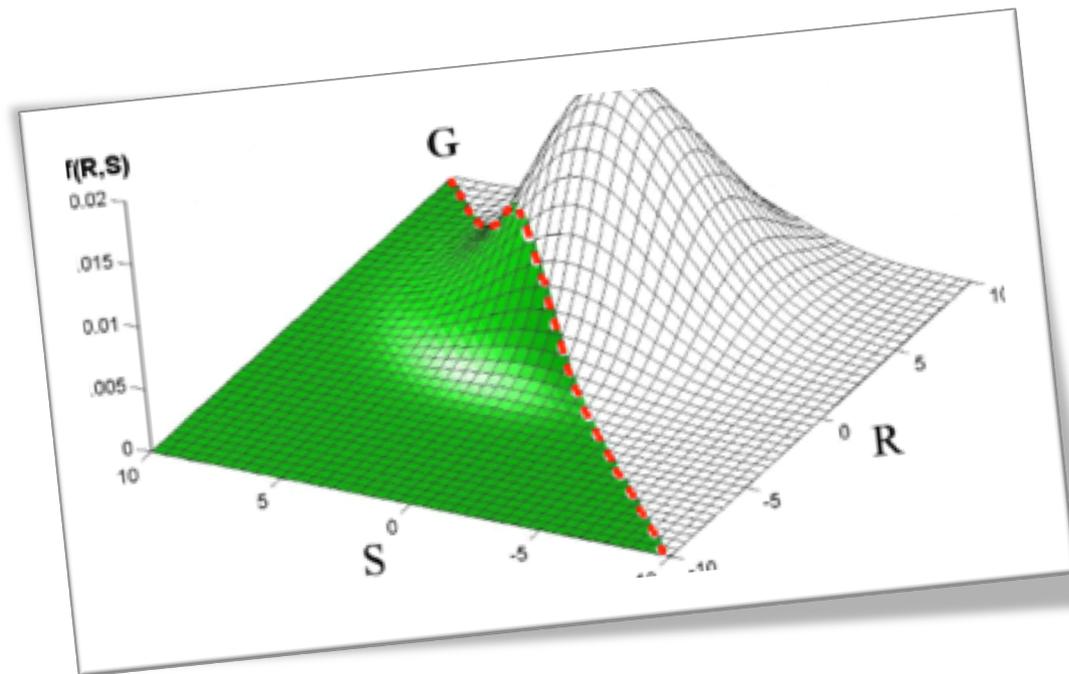
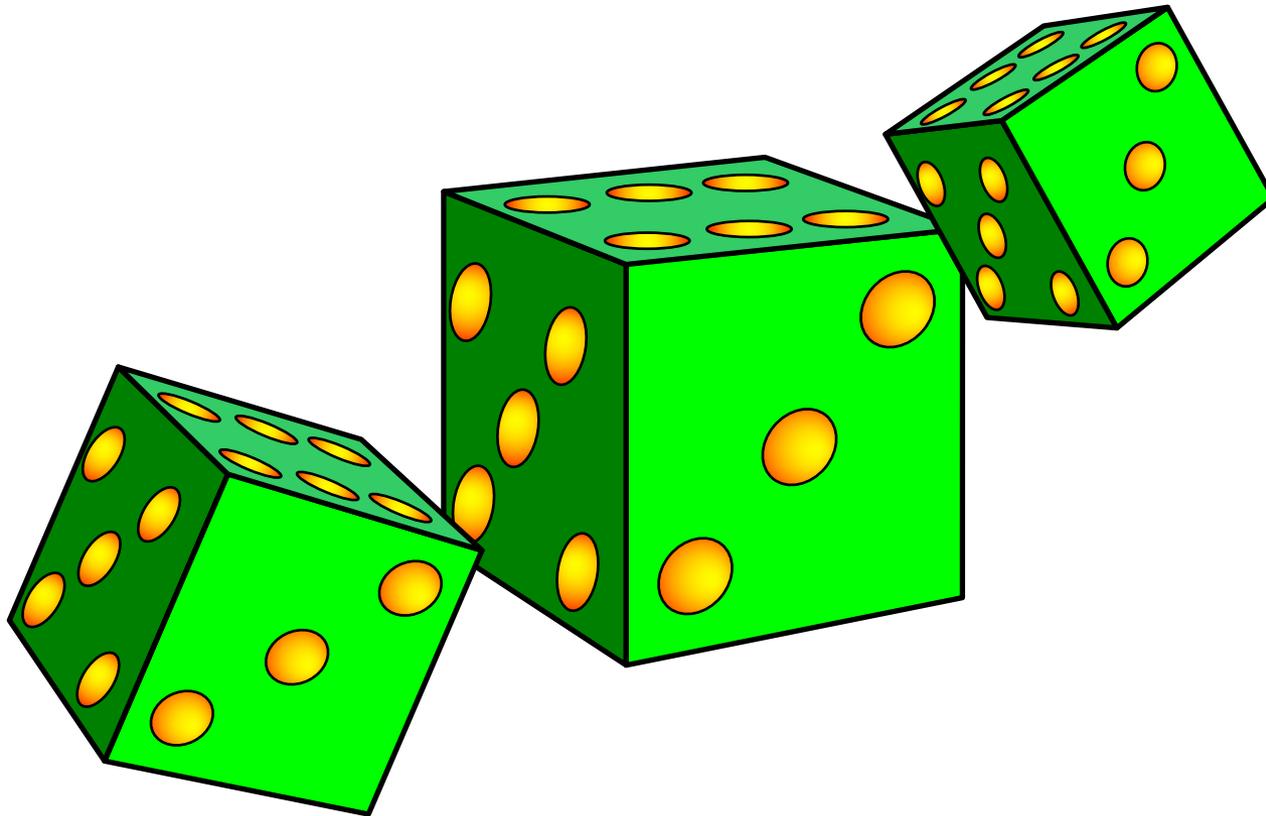


Approche mécano-fiabiliste

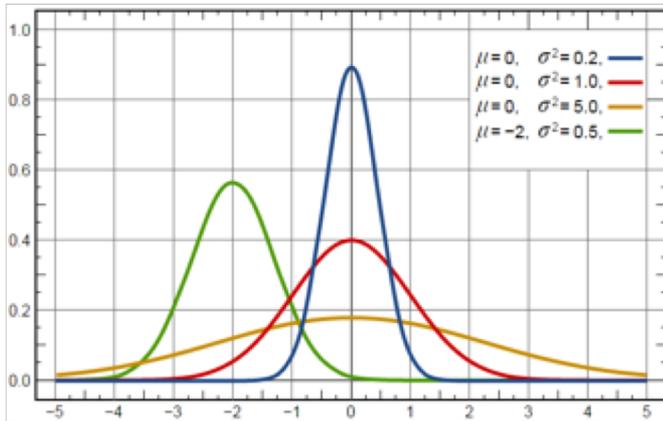
L. Guillaumat



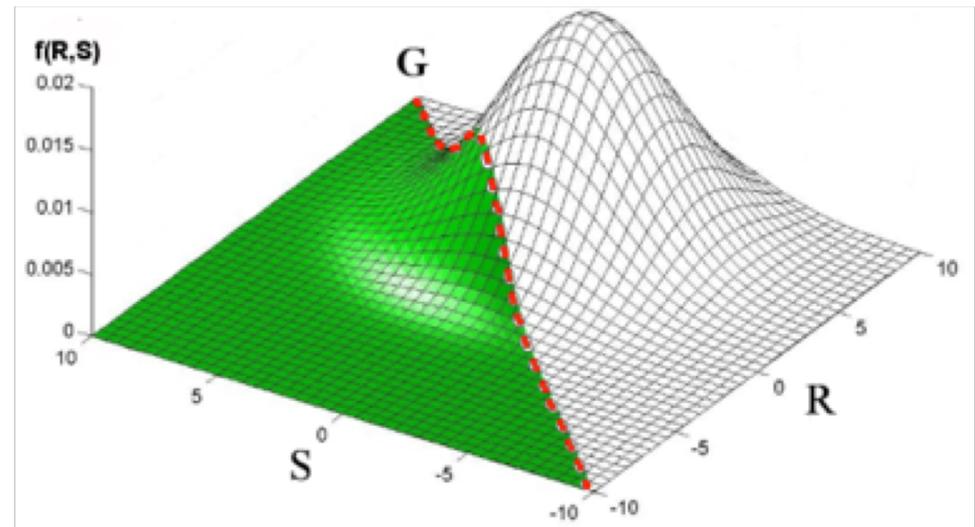
1 S'intéresser à l'incertain



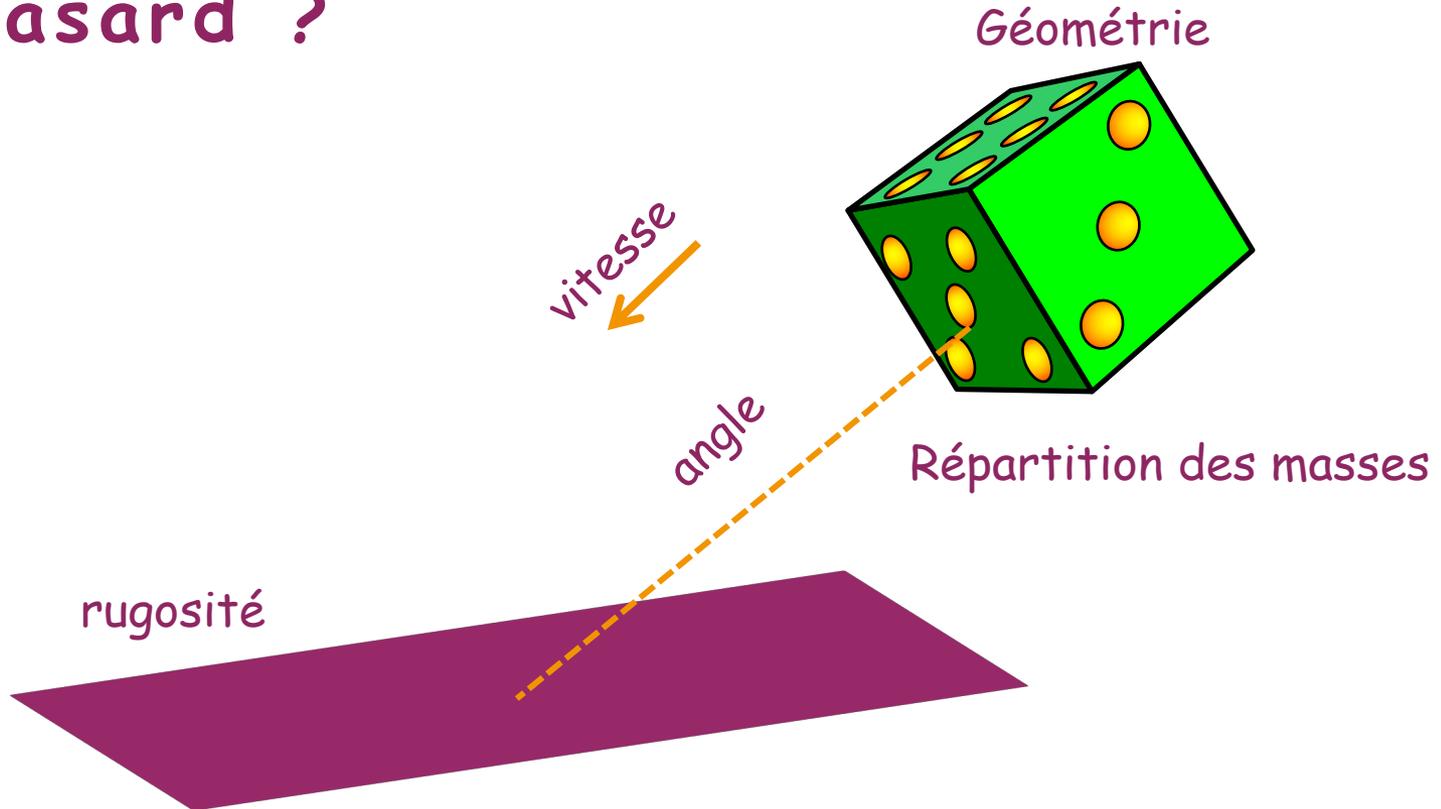
Intégrer la variabilité dans les modèles



Cette méthode est bien adaptée au matériaux composites car il présentent une variabilité naturelle.
Idem pour la fatigue.



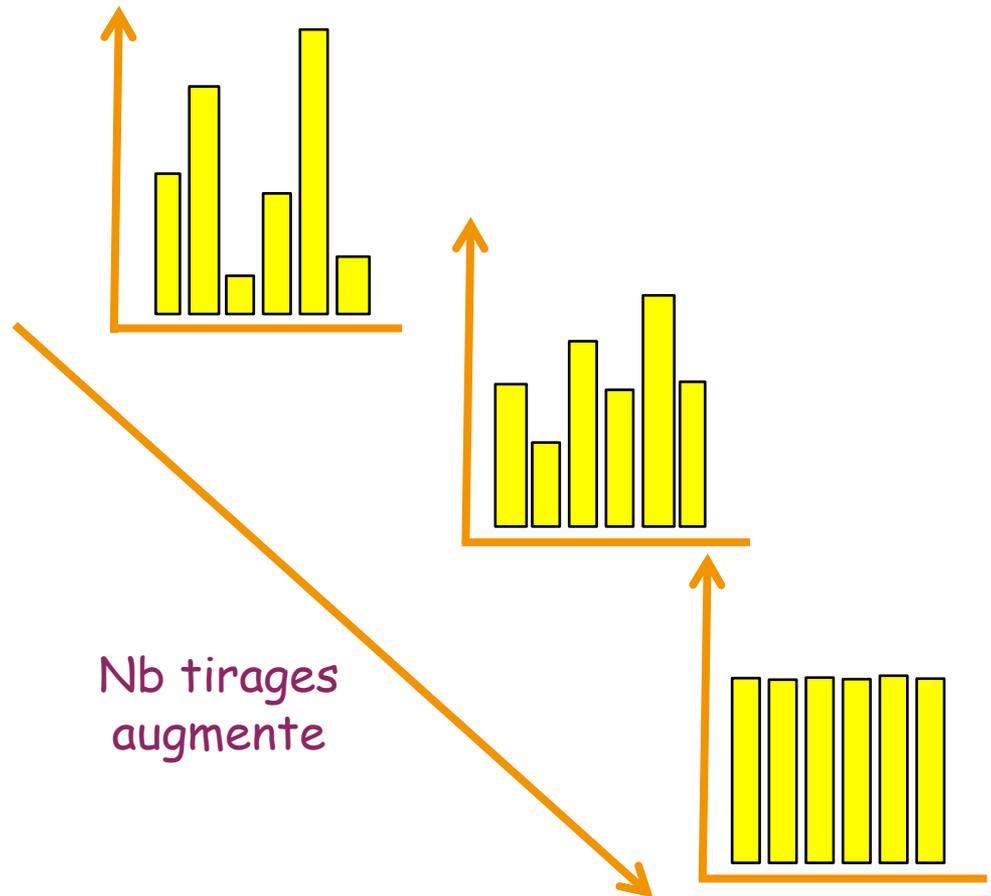
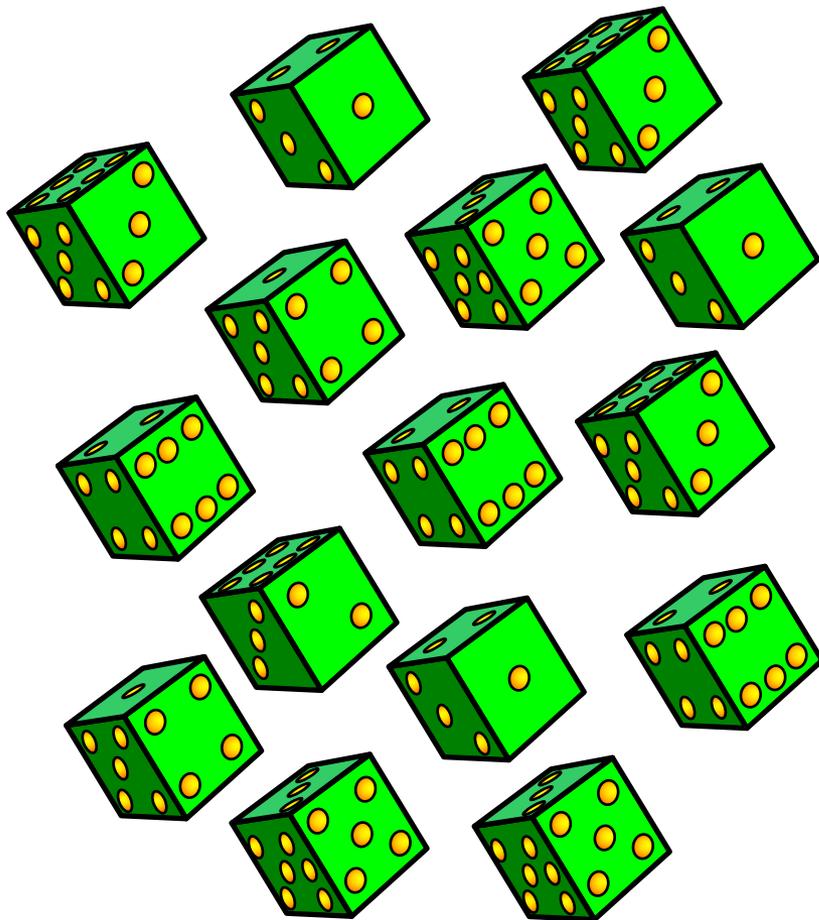
Pur hasard ?



Trop de paramètres, souvent inconnus
Impossibilité à décrire le système

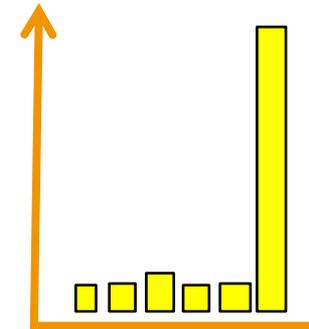
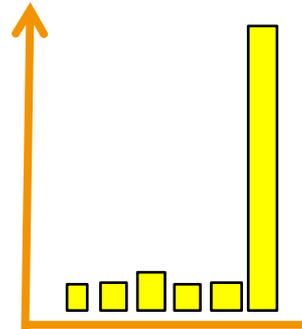
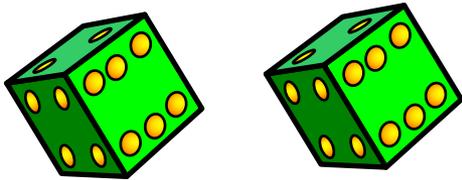
1.2 Est-ce vraiment incertain ?

Approche pragmatique : on recommence l'observation un grand nombre de fois

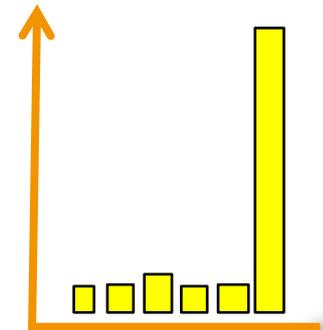


1.2 Est-ce vraiment incertain ?

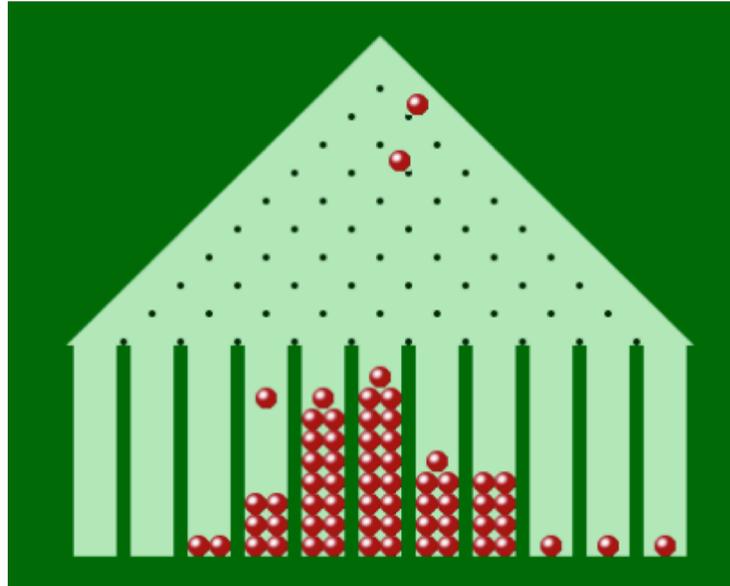
Attention au trucage, l'incertain à donc des règles :
équiprobabilité



Nb tirages
augmente



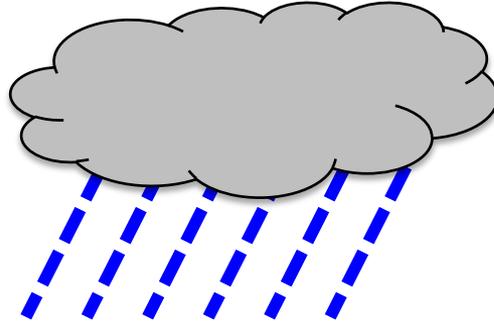
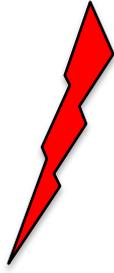
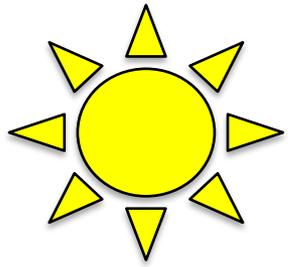
La planche de GALTON



Loi binomiale \Rightarrow Loi de Gauss
Si connaissance de tous les paramètres ?

1.3 Facteurs influents

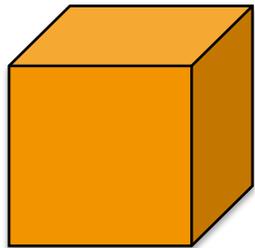
Aléas internes et externes au système



Conditions climatiques



Facteur humain



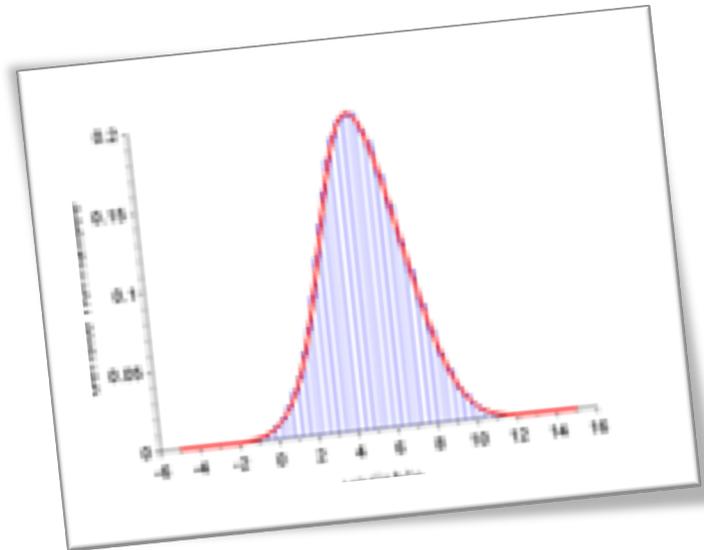
(E , n , G , σ , ...)

Propriétés matériaux



Chargement mécanique

2 Approche Mécano-Fiabiliste



Systeme à n fonctions

AMDEC

m modes de défaillance/fonction

Analyse des modes de défaillances, étude de leurs effets et criticité

Modèle physique pour chaque mode

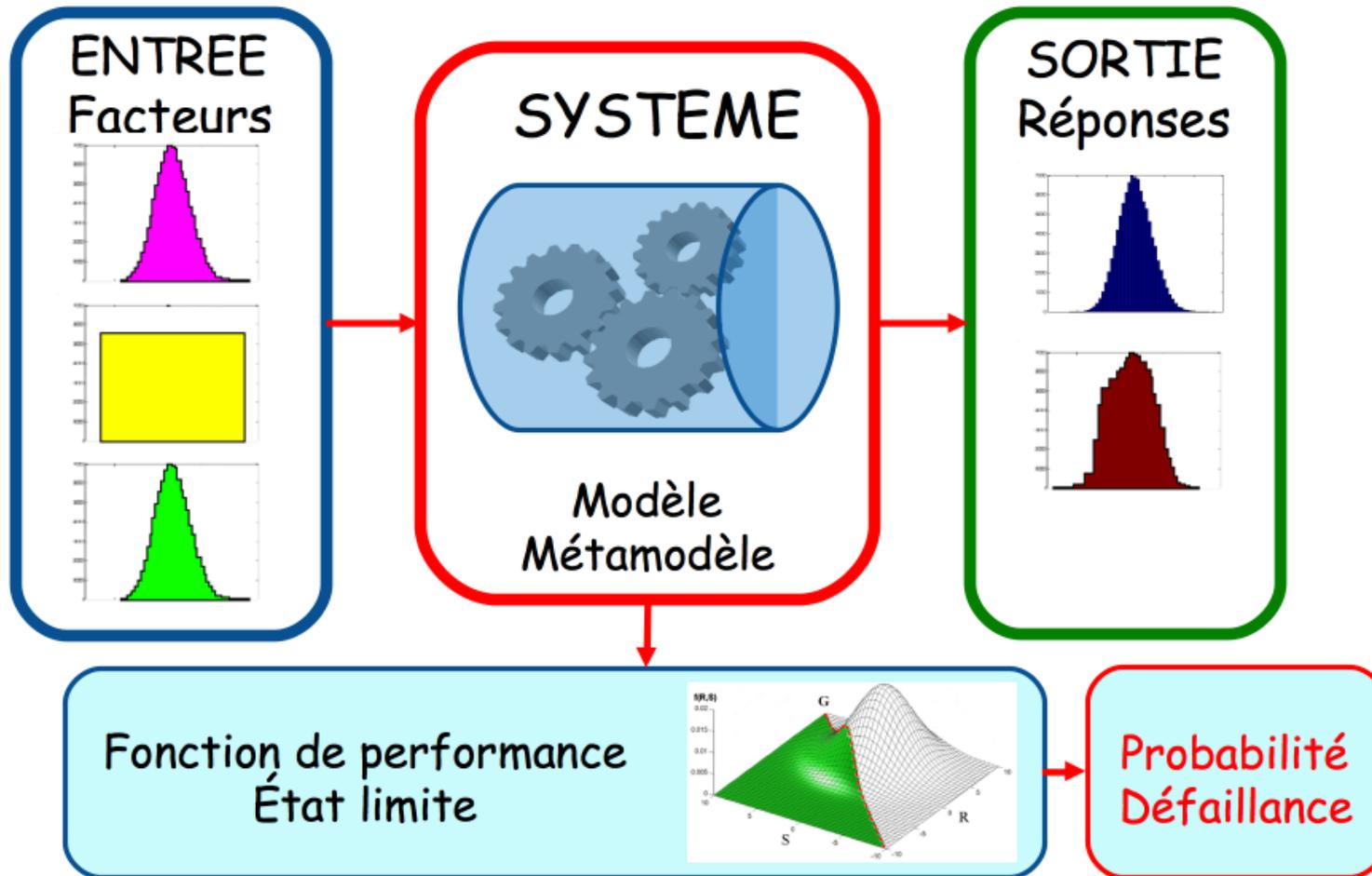
Analytique, éléments finis, ...

Déterministe

Valeurs moyennes, limites, ...

Probabiliste

Variables aléatoires, distributions, ...



Base du calcul : comparer le potentiel du système à sa sollicitation !

On parle de méthode contrainte - résistance.

Ces deux mots doivent être considérés au sens large et non seulement en mécanique.

Il faut donc construire une fonction dite de performance :

$$G = R - S$$

Les étapes d'une approche fiabiliste :

1 - Définir le **modèle mécanique** (AMDEC) ;

2 - Définir les **données probabilistes**, ou variables de conception ;

3 - Choisir le **scénario de défaillance** (dimensionnant pour la structure)
⇒ définition de la **fonction de performance** $G = R - S$:

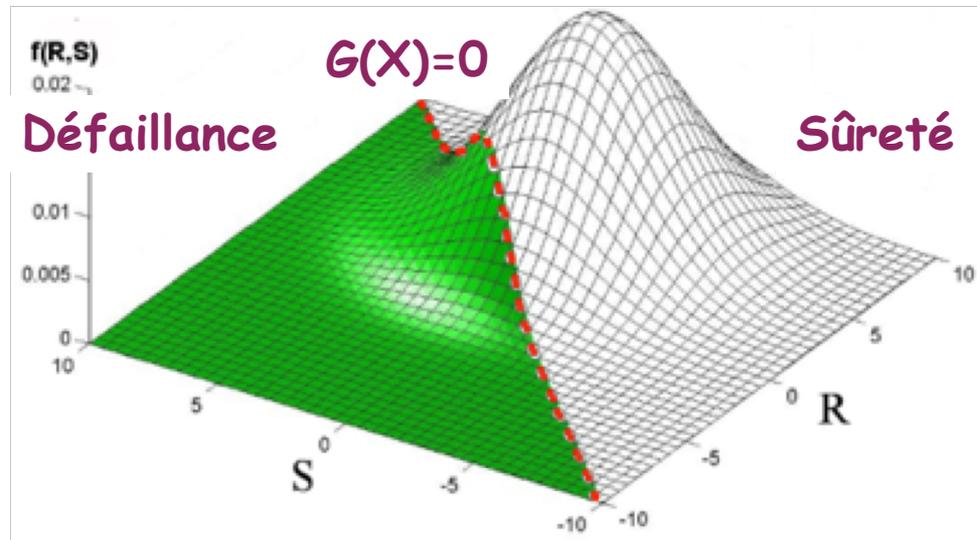
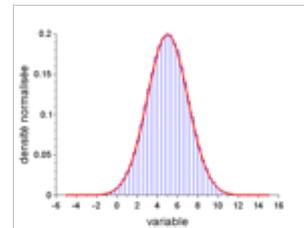
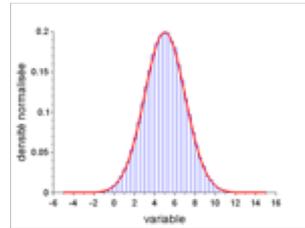
- ❖ Surface d'état-limite
- ❖ Domaine de sûreté D_s
- ❖ Domaine de défaillance D_f

4 - Effectuer les **calculs de probabilité** ;

5 - **Analyser les résultats**, étude de sensibilité.

2.3 Fonction d'état limite

$$G(X) = R(X_1, \dots, X_i) - S(X_{i+1}, \dots, X_n)$$



Densité conjointe de probabilité

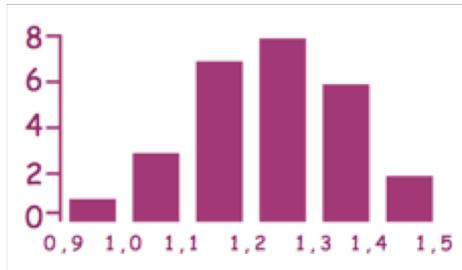
1^{er} moyen pour estimer la probabilité de défaillance :

Calcul analytique => rarement possible !!

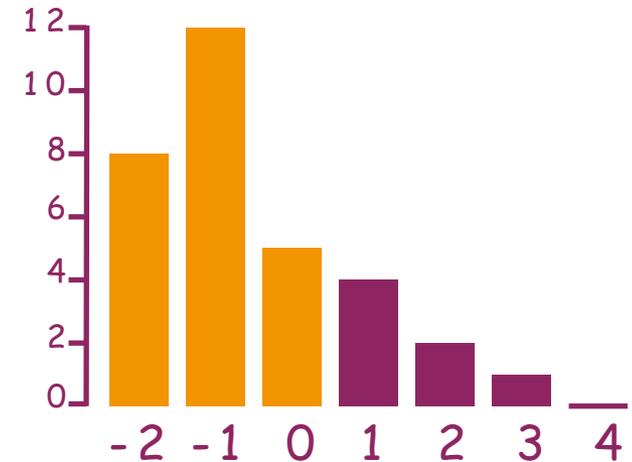
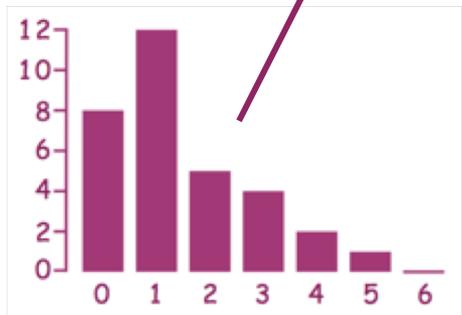
$$P[G(X) > 0] = \int_{G(X) > 0} f_X(X) dX_1 \dots dX_n$$

2^{ème} moyen pour estimer la probabilité de défaillance :

Tirages aléatoires des variables
 $10^{-n} \Rightarrow 10^{n+2}$ tirages
Temps de calculs !
Couplage avec surfaces de réponses

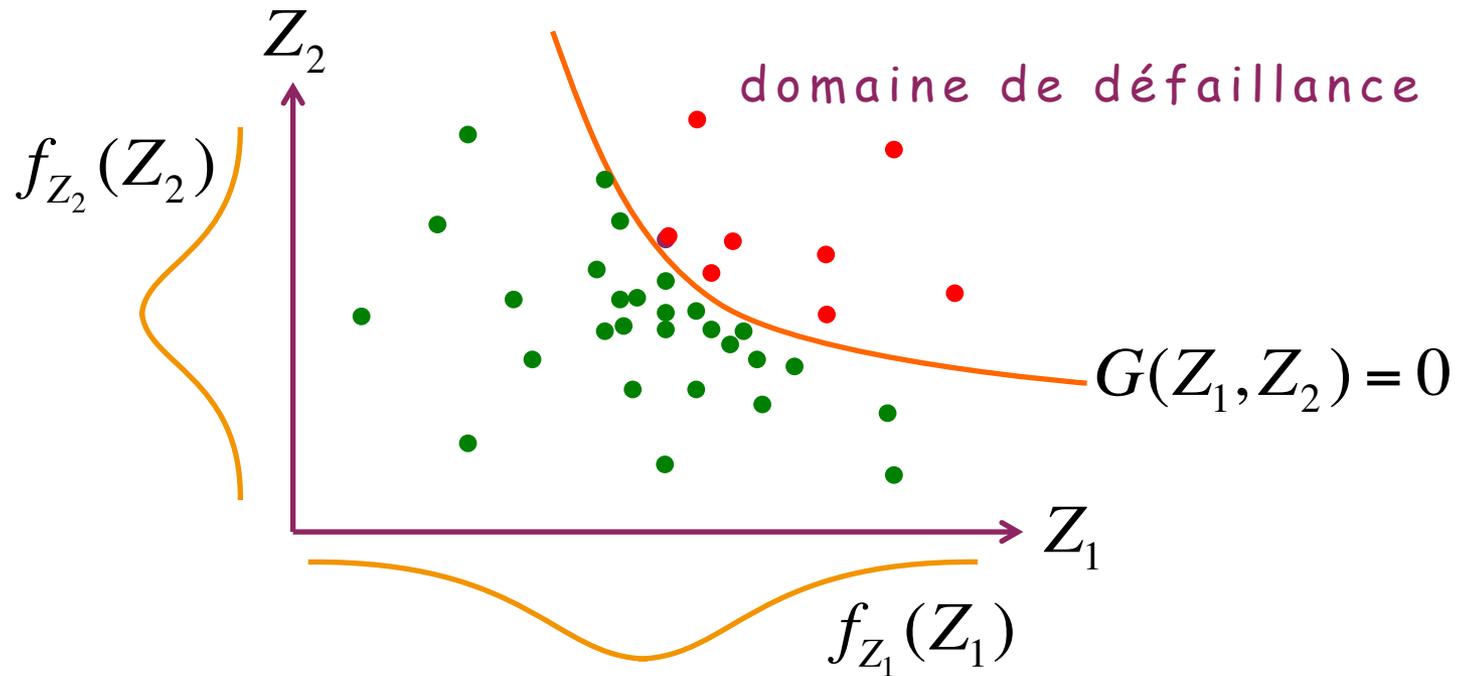


$$G(X) = R(X_1, \dots, X_i) - S(X_{i+1}, \dots, X_n)$$

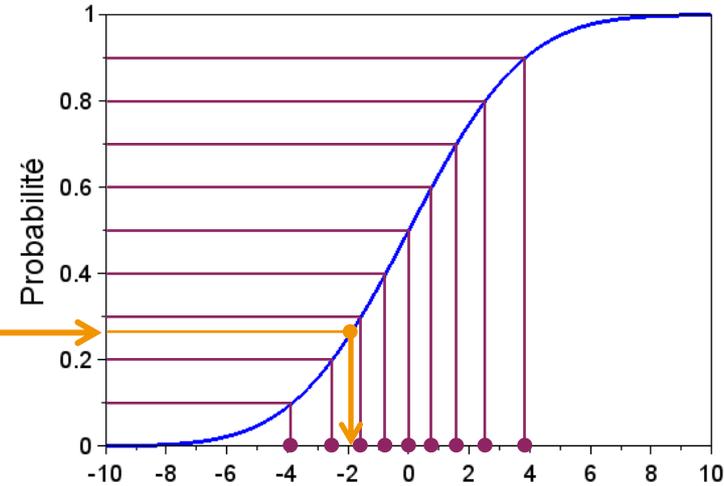
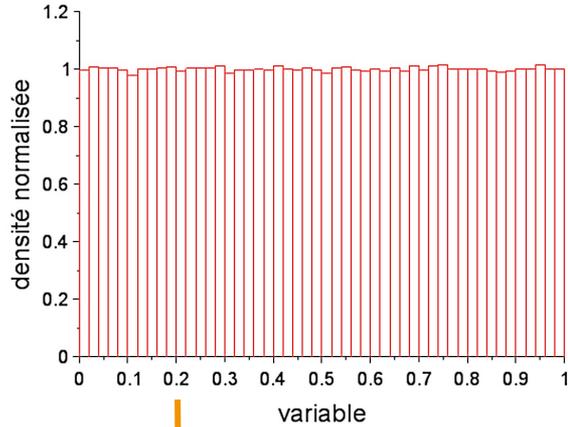


$$G(X) \leq 0 \Rightarrow P_f$$

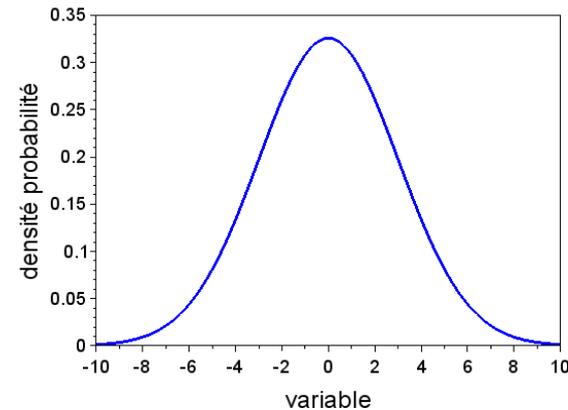
La simulation directe consiste, pour estimer la probabilité de défaillance, à couvrir l'ensemble du domaine par des tirages aléatoires et à compter le nombre de tirage dans le domaine de défaillance :



Principe de la méthode

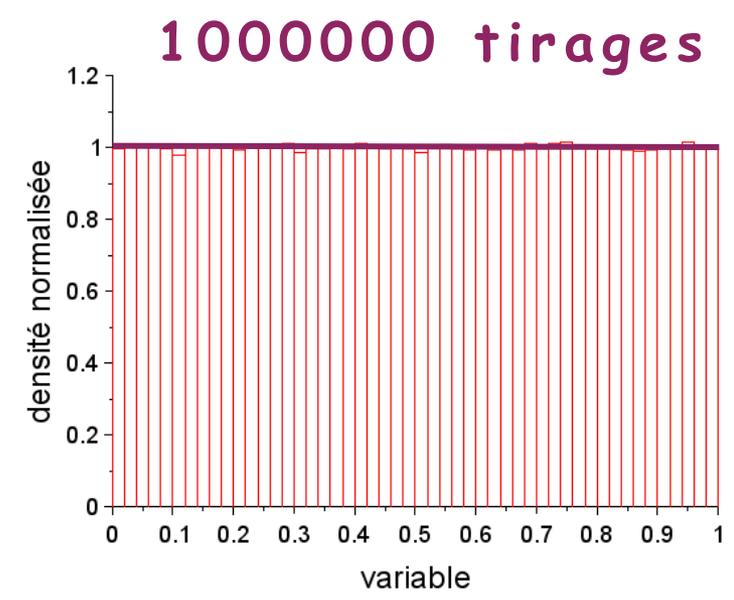
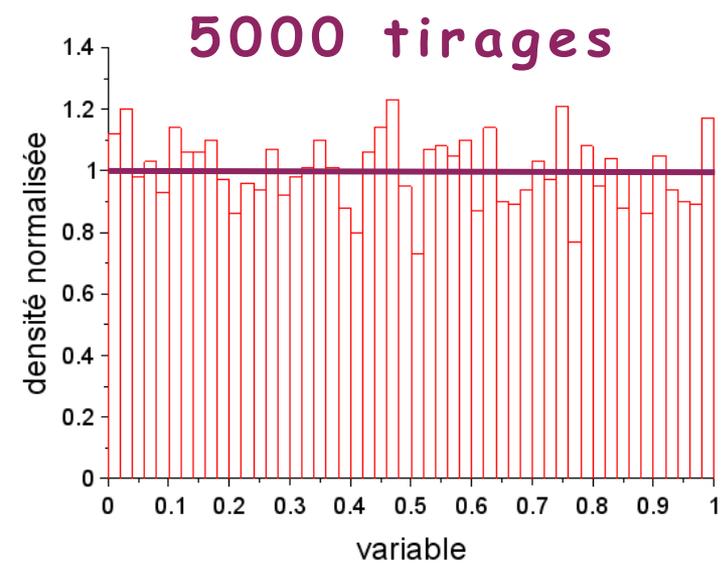
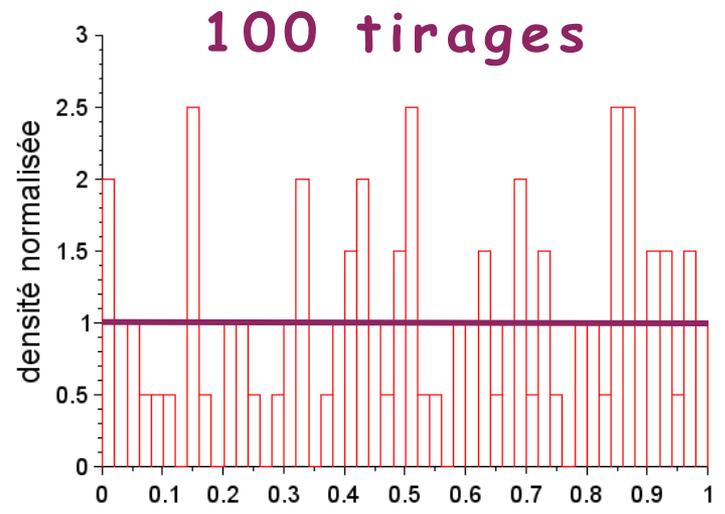


Tirages équidistants
Fonction inversible



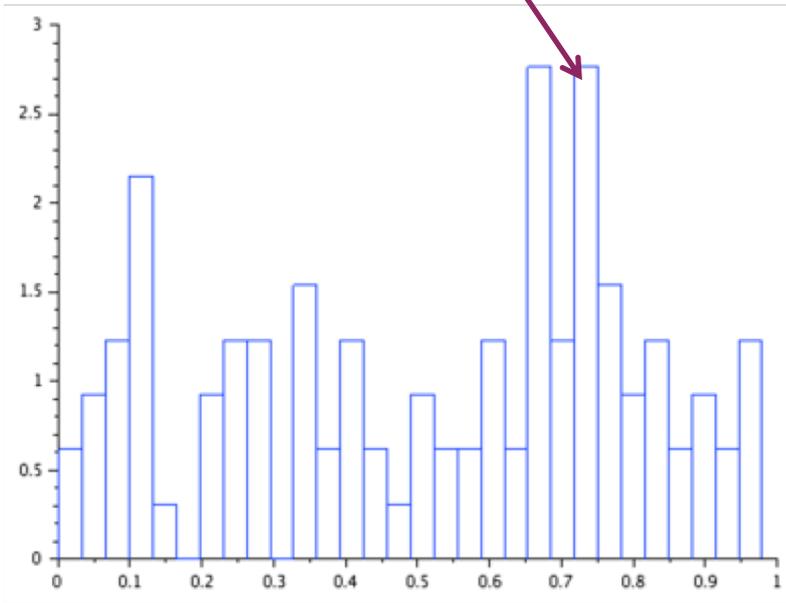
2.5 Méthodes de Monté-Carlo

Générateur nombre aléatoire classique

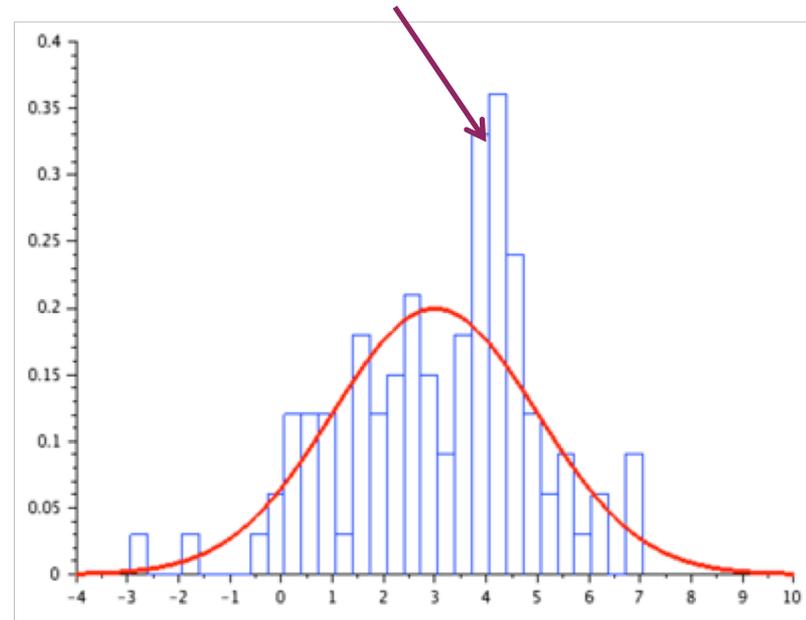


Tirages équidistants avec la loi uniforme

100 tirages



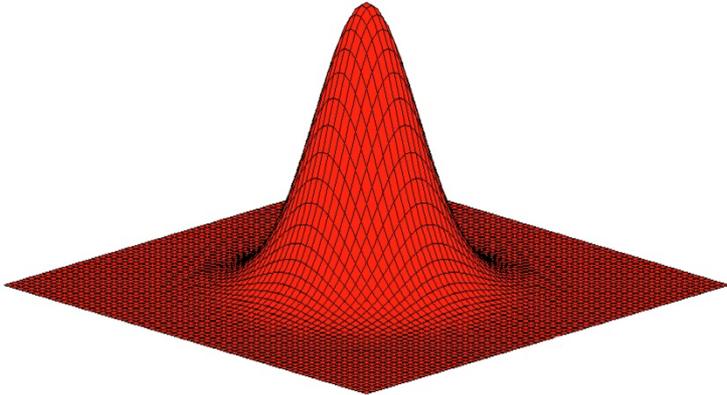
Tirage loi uniforme



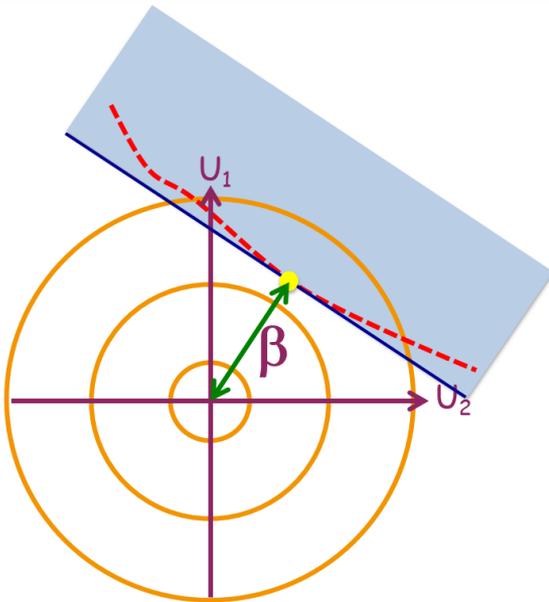
Résultats gaussiens

Déséquilibre vers $P=0,7 \Rightarrow$ valeur de la v.a. ≈ 4

3^{ème} moyen pour estimer la probabilité de défaillance :

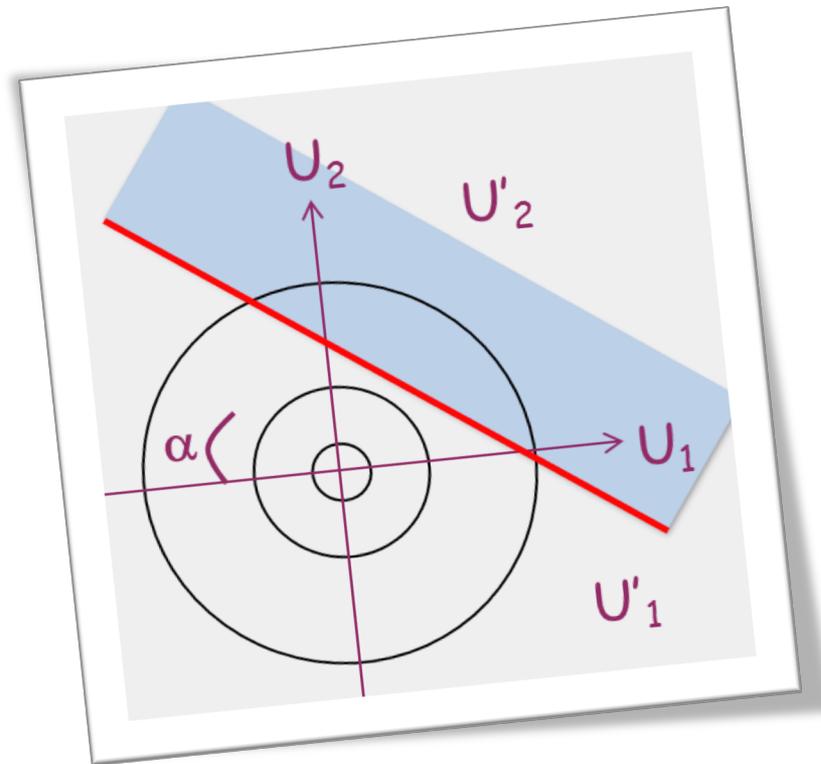


- Méthode d'approximation
- Temps de calcul beaucoup plus court
- Pas d'estimation de l'erreur (aveugle)
- Accès aux sensibilités



$$P = \phi(-\beta)$$

3 Méthode FORM/SORM



FORM - SORM : comparaison avec Monté-Carlo

1^{er} cas :

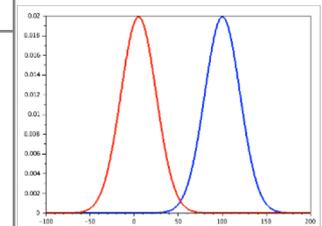
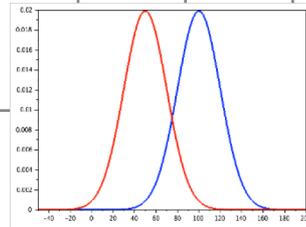
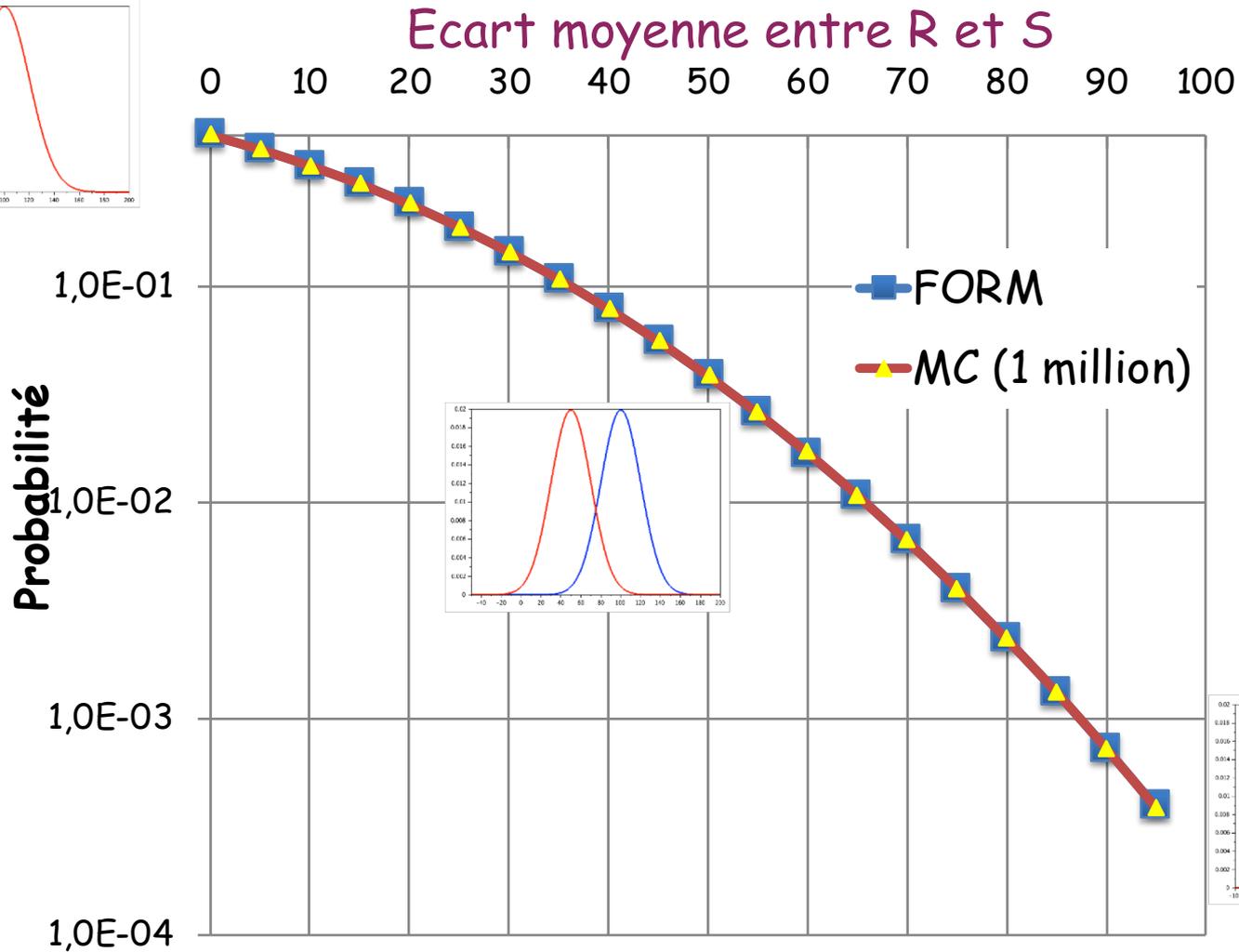
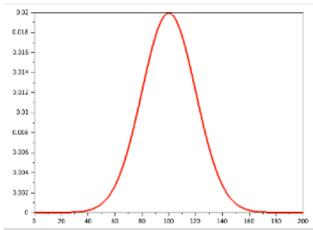
$$G=R-S$$

R et S deux gaussiennes

Moyenne : R=100 et S variable de 100 à 5 par pas de 5

Ecart type de 20

FORM - SORM : comparaison avec Monté-Carlo



FORM - SORM : comparaison avec Monté-Carlo

1^{er} cas :

$$G=R-S$$

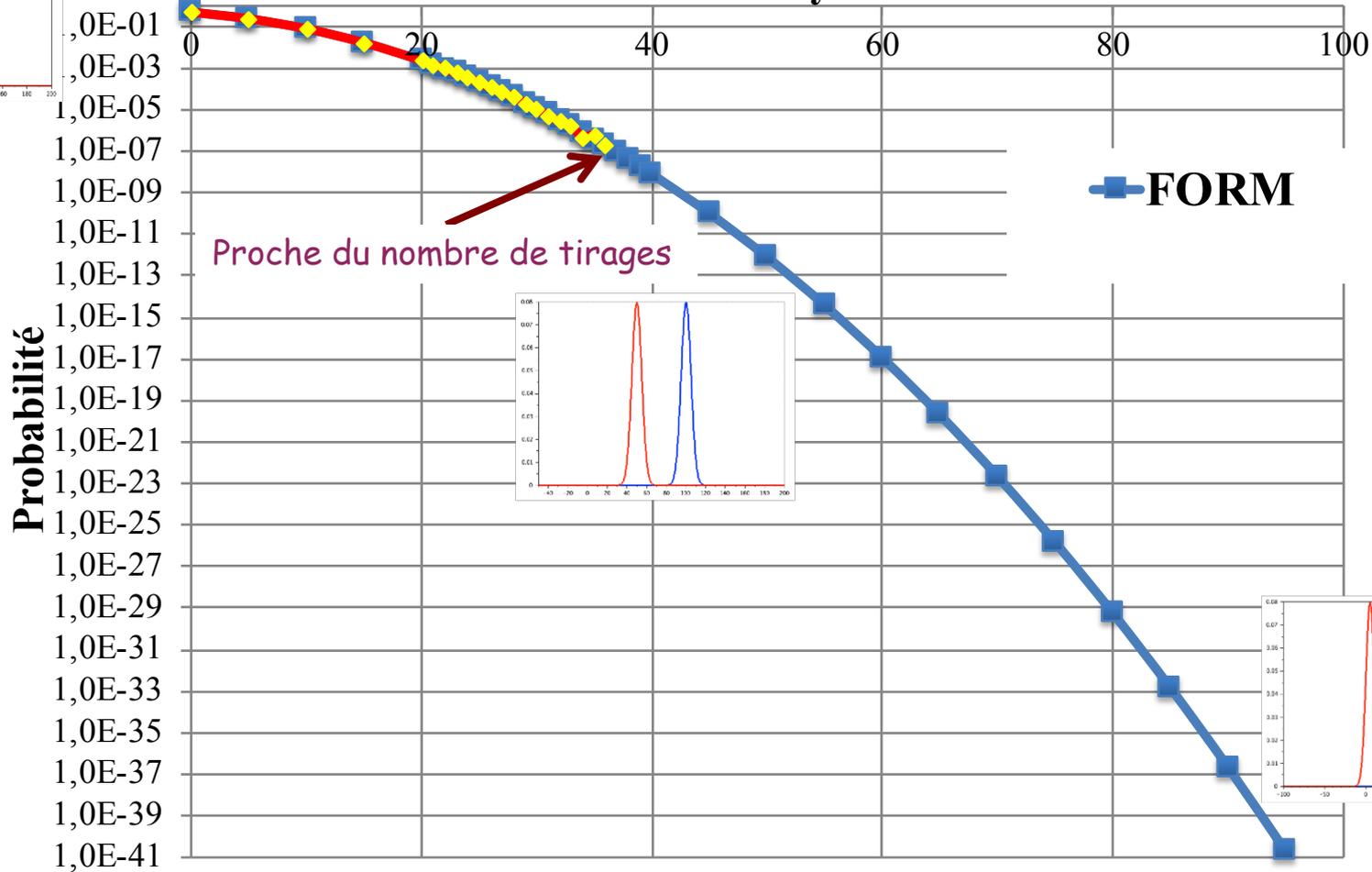
R et S deux gaussiennes

Moyenne : R=100 et S variable à partir de 100

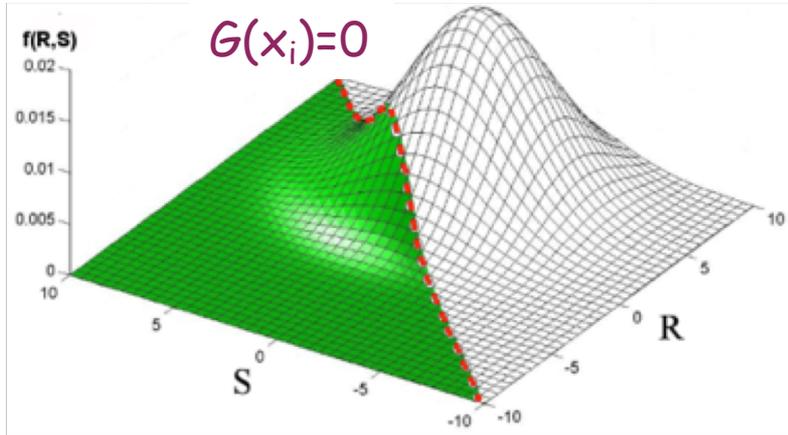
Ecart type de 5

FORM - SORM : comparaison avec Monté-Carlo

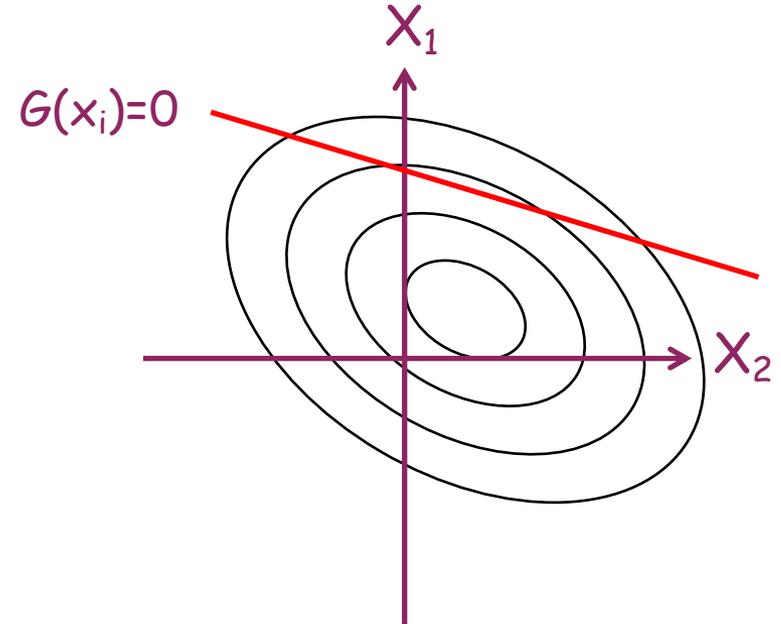
Ecart entre moyenne R et S



Cas d'une gaussienne à deux dimensions



Espace physique



$$P' = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_2} \exp \left(-\frac{1}{2} \left(\frac{(X_1 - \bar{X}_1)^2}{\sigma_1^2} + \frac{(X_2 - \bar{X}_2)^2}{\sigma_2^2} \right) \right)$$

Se ramener toujours dans mes mêmes conditions => transformation de l'espace

Cas d'une gaussienne à deux dimensions

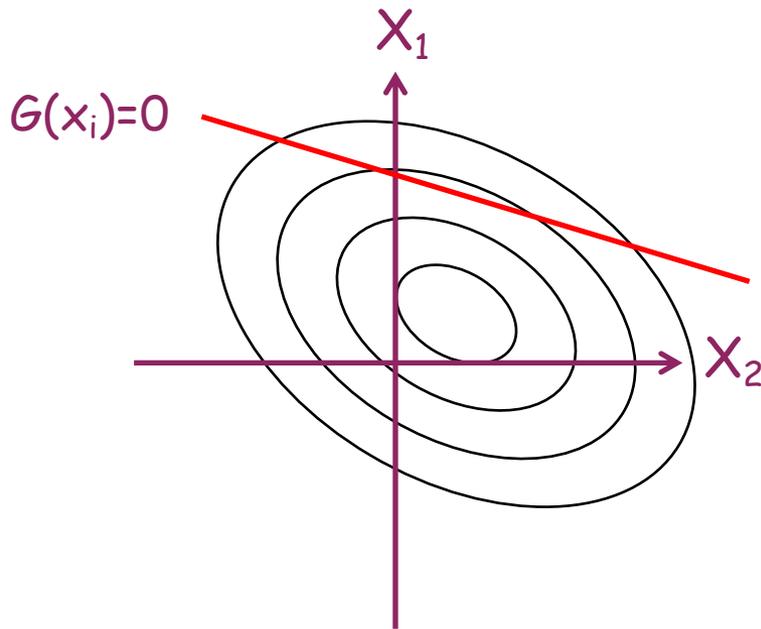
$$\partial P = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_2} \exp \left(-\frac{1}{2} \left(\frac{(X_1 - \bar{X}_1)^2}{\sigma_1^2} + \frac{(X_2 - \bar{X}_2)^2}{\sigma_2^2} \right) \right)$$

Condition 1 : se mettre dans un espace standard : gaussiennes centrées réduites (Changement de variable) et indépendantes :

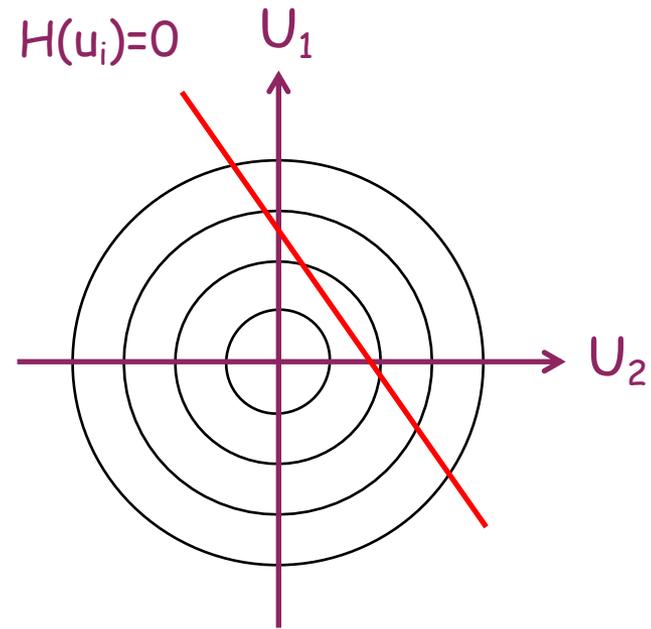
$$U_1 = \frac{X_1 - \bar{X}_1}{\sigma_1} \quad \Leftrightarrow \quad \bar{U}_1 = 0 \quad \text{et} \quad \sigma_{U_1} = 1$$

$$\partial P' = \frac{1}{2 \cdot \pi} \exp \left(-\frac{1}{2} (U_1^2 + U_2^2) \right) \Rightarrow \text{Équation d'un cercle}$$

First Order Reliability Method

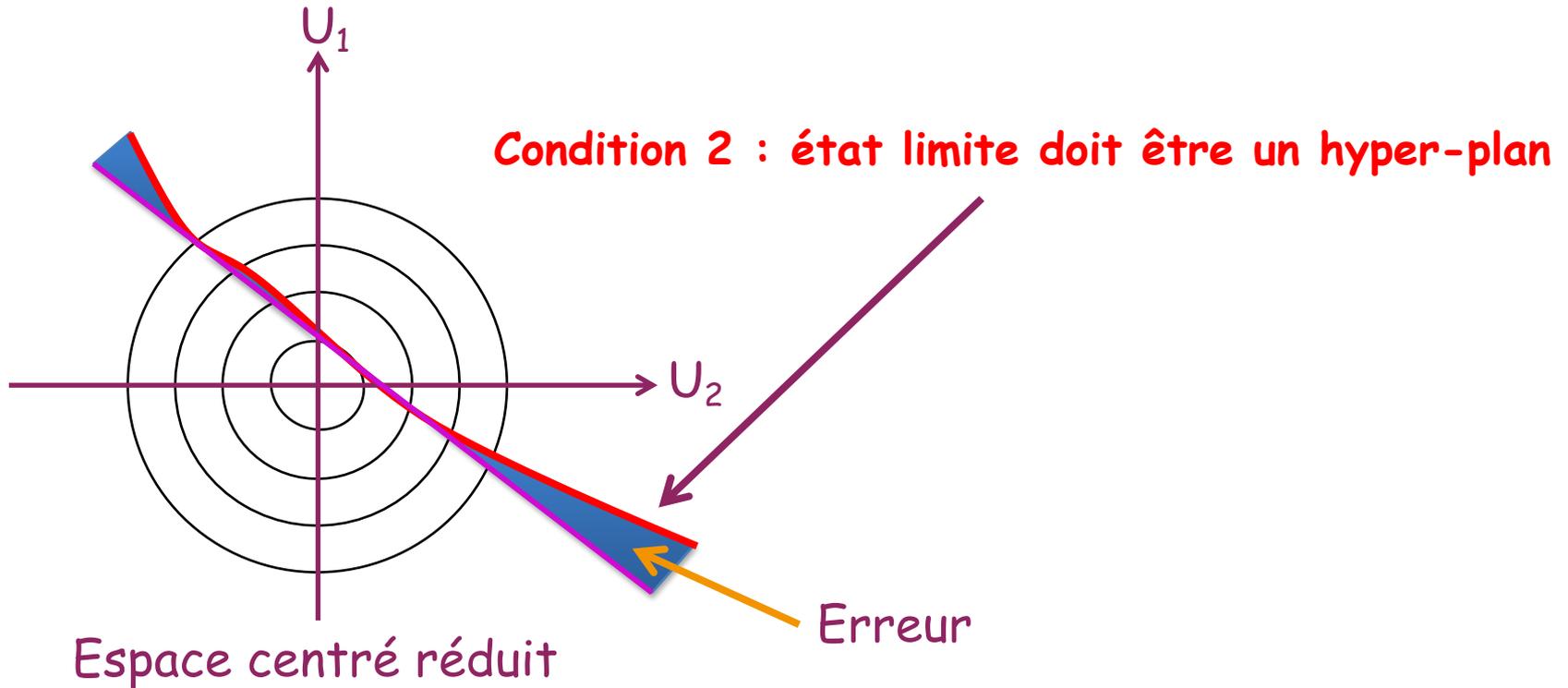


Espace physique



Espace centré réduit

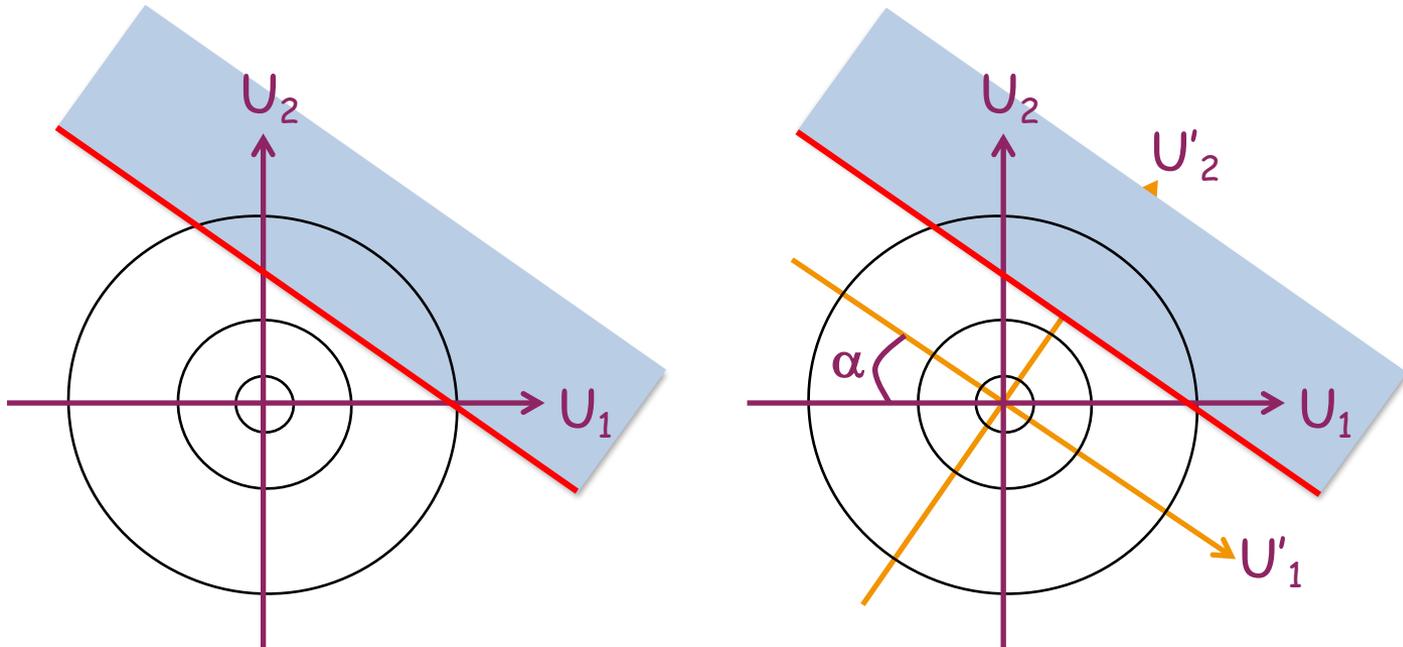
First Order Reliability Method



Calcul de la probabilité de défaillance :

$$P = \frac{1}{2.\pi} \int_{\sigma_1 U_1 - \sigma_2 U_2 + \bar{X}_1 - \bar{X}_2 \leq 0} \exp\left(-\frac{1}{2}(U_1^2 + U_2^2)\right). dU_1 . dU_2$$

Faire un changement de repère pour mettre l'un des axes parallèle à l'état limite => intégration sur un rectangle.



Fonction d'état limite dans l'espace physique : $G(R, S) = R - S = 0$

Etape 1 - Changement de variables :

$$U_1 = \frac{R - \bar{R}}{\sigma_R} \quad U_2 = \frac{S - \bar{S}}{\sigma_S}$$

Etape 2 - Écriture de G dans l'espace centré réduit :

$$H(U_1, U_2) = (U_1 \cdot \sigma_R + \bar{R}) - (U_2 \cdot \sigma_S + \bar{S}) = 0$$

Etape 3 - Rotation du repère :

$$\begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} U'_1 \\ U'_2 \end{pmatrix}$$

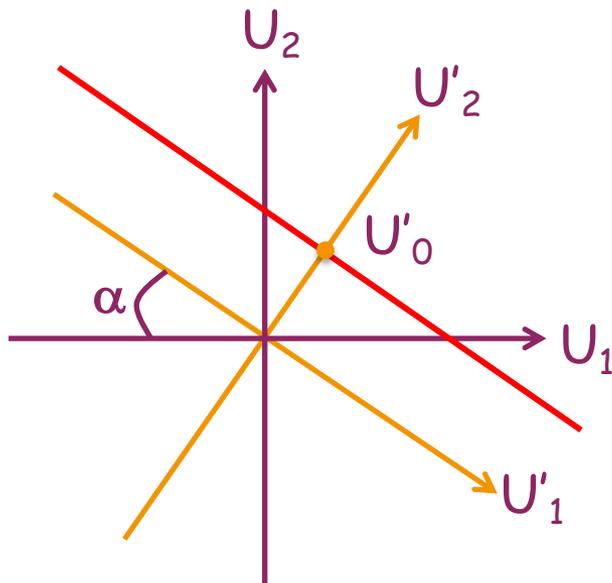
$$G(U'_1, U'_2) = (\sigma_R \cos(\alpha) - \sigma_S \sin(\alpha)) \cdot U'_1 - (\sigma_R \sin(\alpha) + \sigma_S \cos(\alpha)) \cdot U'_2 + \bar{R} - \bar{S} = 0$$

$$G(U_1', U_2') = (\sigma_R \cos(\alpha) - \sigma_S \sin(\alpha)) \cdot U_1' - (\sigma_R \sin(\alpha) + \sigma_S \cos(\alpha)) \cdot U_2' + \bar{R} - \bar{S} = 0$$

Equation générale du type : $a \cdot U_1' + b \cdot U_2' + c = 0$

$$a = 0$$

$$\frac{\sin(\alpha)}{\cos(\alpha)} = \tan(\alpha) = \frac{\sigma_R}{\sigma_S}$$



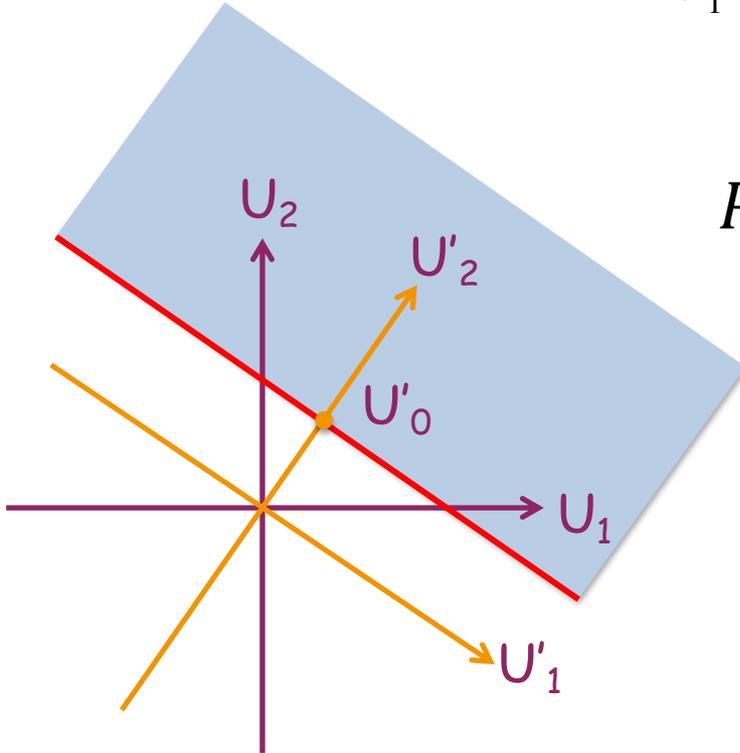
$$G(U_1', U_2') = -(\sigma_R \sin(\alpha) + \sigma_S \cos(\alpha)) \cdot U_2' + \bar{R} - \bar{S} = 0$$

$$U_2' = \frac{\bar{R} - \bar{S}}{(\sigma_R \sin(\alpha) + \sigma_S \cos(\alpha))} = U_0'$$

3.2 Démonstration

Le déterminant du jacobien de la matrice rotation = 1

$$dU'_1 \cdot dU'_2 = dR \cdot dS$$



$$P = \frac{1}{2\pi} \left[\left(\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{1}{2}(U'_1)^2} dU'_1 \right) \left(\int_{U'_0}^{+\infty} e^{-\frac{1}{2}(U'_2)^2} dU'_2 \right) \right]$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{1}{2}x^2} dx = \sqrt{2\pi}$$

$$P = \frac{1}{2\pi} \left[\left(\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{1}{2}(U'_1)^2} dU'_1 \right) \left(\int_{U'_0}^{+\infty} e^{-\frac{1}{2}(U'_2)^2} dU'_2 \right) \right]$$
$$= \sqrt{2\pi}$$

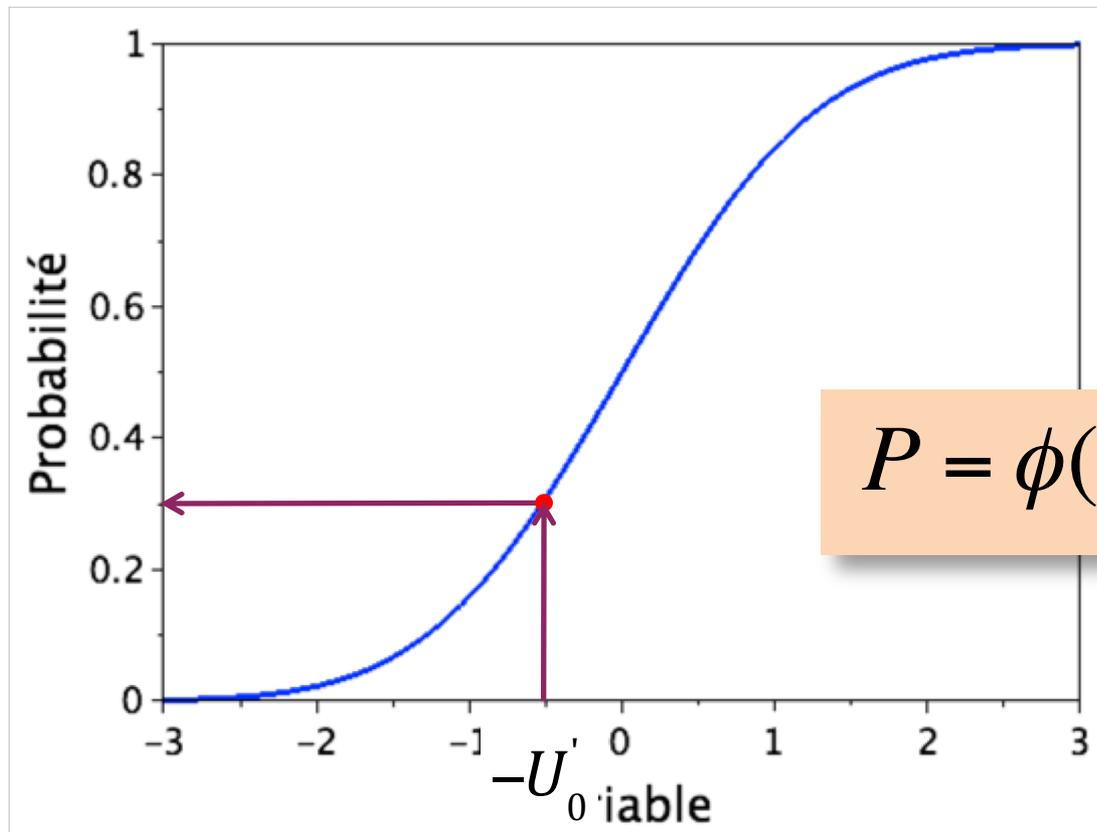
$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left(\int_{-\infty}^{-U'_0} e^{-\frac{1}{2}(U'_2)^2} dU'_2 \right) = \Phi(-U'_0)$$

Notion d'indice de fiabilité !

U'_0 est la plus proche distance entre l'origine et l'état limite.

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left(\int_{-\infty}^{-U'_0} e^{-\frac{1}{2}(U'_2)^2} dU'_2 \right) = \Phi(-U'_0)$$

Fonction de répartition de la gaussienne centrée réduite



Fonction de répartition de la gaussienne centrée réduite

| x | 0,00 | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,04 |
|-----|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0,0 | 0,50000 | 0,50399 | 0,50798 | 0,51197 | 0,51595 |
| 0,1 | 0,53983 | 0,54380 | 0,54776 | 0,55172 | 0,55567 |
| 0,2 | 0,57926 | 0,58317 | 0,58706 | 0,59095 | 0,59483 |
| 0,3 | 0,61791 | 0,62172 | 0,62552 | 0,62930 | 0,63307 |
| 0,4 | 0,65542 | 0,65910 | 0,66276 | 0,66640 | 0,67003 |
| 0,5 | 0,69146 | 0,69497 | 0,69847 | 0,70194 | 0,70540 |
| 0,6 | 0,72575 | 0,72907 | 0,73237 | 0,73565 | 0,73891 |
| 0,7 | 0,75804 | 0,76115 | 0,76424 | 0,76730 | 0,77035 |
| 0,8 | 0,78814 | 0,79103 | 0,79389 | 0,79673 | 0,79955 |
| 0,9 | 0,81594 | 0,81859 | 0,82121 | 0,82381 | 0,82639 |
| 1,0 | 0,84134 | 0,84375 | 0,84614 | 0,84849 | 0,85083 |
| 1,1 | 0,86433 | 0,86650 | 0,86864 | 0,87076 | 0,87286 |
| 1,2 | 0,88493 | 0,88686 | 0,88877 | 0,89065 | 0,89251 |
| 1,3 | 0,90320 | 0,90490 | 0,90658 | 0,90824 | 0,90988 |
| 1,4 | 0,91924 | 0,92073 | 0,92220 | 0,92364 | 0,92507 |

3.3 Application 1

Application : tige en traction



L'état limite est définie par : $G = \sigma_{\text{résistance}} \cdot A - F$

F : moyenne = 70MN ; écart type = 15MN

$\sigma_{\text{résistance}}$: moyenne = 272,72MPa ; écart type = 16,36MPa

La section de la tige est de 0,42m²

Les distributions sont supposées gaussiennes.

Quelle est la probabilité de défaillance ?

Rappel :

La distance entre une droite d'équation $a.x + b.y + c = 0$ et un point $A(x_A, y_A)$

$$d = \frac{a.x_A + b.y_A + c}{\sqrt{a^2 + b^2}}$$

3.3 Application 1

Fonction de répartition de la gaussienne centrée réduite

| | | | | | | | | | | |
|-----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1,6 | 0,94520 | 0,94630 | 0,94738 | 0,94845 | 0,94950 | 0,95053 | 0,95154 | 0,95254 | 0,95352 | 0,95449 |
| 1,7 | 0,95543 | 0,95637 | 0,95728 | 0,95818 | 0,95907 | 0,95994 | 0,96080 | 0,96164 | 0,96246 | 0,96327 |
| 1,8 | 0,96407 | 0,96485 | 0,96562 | 0,96638 | 0,96712 | 0,96784 | 0,96856 | 0,96926 | 0,96995 | 0,97062 |
| 1,9 | 0,97128 | 0,97193 | 0,97257 | 0,97320 | 0,97381 | 0,97441 | 0,97500 | 0,97558 | 0,97615 | 0,97670 |
| 2,0 | 0,97725 | 0,97778 | 0,97831 | 0,97882 | 0,97932 | 0,97982 | 0,98030 | 0,98077 | 0,98124 | 0,98169 |
| 2,1 | 0,98214 | 0,98257 | 0,98300 | 0,98341 | 0,98382 | 0,98422 | 0,98461 | 0,98500 | 0,98537 | 0,98574 |
| 2,2 | 0,98610 | 0,98645 | 0,98679 | 0,98713 | 0,98745 | 0,98778 | 0,98809 | 0,98840 | 0,98870 | 0,98899 |
| 2,3 | 0,98928 | 0,98956 | 0,98983 | 0,99010 | 0,99036 | 0,99061 | 0,99086 | 0,99111 | 0,99134 | 0,99158 |
| 2,4 | 0,99180 | 0,99202 | 0,99224 | 0,99245 | 0,99266 | 0,99286 | 0,99305 | 0,99324 | 0,99343 | 0,99361 |
| 2,5 | 0,99379 | 0,99396 | 0,99413 | 0,99430 | 0,99446 | 0,99461 | 0,99477 | 0,99492 | 0,99506 | 0,99520 |
| 2,6 | 0,99534 | 0,99547 | 0,99560 | 0,99573 | 0,99585 | 0,99598 | 0,99609 | 0,99621 | 0,99632 | 0,99643 |
| 2,7 | 0,99653 | 0,99664 | 0,99674 | 0,99683 | 0,99693 | 0,99702 | 0,99711 | 0,99720 | 0,99728 | 0,99736 |
| 2,8 | 0,99744 | 0,99752 | 0,99760 | 0,99767 | 0,99774 | 0,99781 | 0,99788 | 0,99795 | 0,99801 | 0,99807 |
| 2,9 | 0,99813 | 0,99819 | 0,99825 | 0,99831 | 0,99836 | 0,99841 | 0,99846 | 0,99851 | 0,99856 | 0,99861 |
| 3,0 | 0,99865 | 0,99869 | 0,99874 | 0,99878 | 0,99882 | 0,99886 | 0,99889 | 0,99893 | 0,99896 | 0,99900 |
| 3,1 | 0,99903 | 0,99906 | 0,99910 | 0,99913 | 0,99916 | 0,99918 | 0,99921 | 0,99924 | 0,99926 | 0,99929 |
| 3,2 | 0,99931 | 0,99934 | 0,99936 | 0,99938 | 0,99940 | 0,99942 | 0,99944 | 0,99946 | 0,99948 | 0,99950 |
| 3,3 | 0,99952 | 0,99953 | 0,99955 | 0,99957 | 0,99958 | 0,99960 | 0,99961 | 0,99962 | 0,99964 | 0,99965 |
| 3,4 | 0,99966 | 0,99968 | 0,99969 | 0,99970 | 0,99971 | 0,99972 | 0,99973 | 0,99974 | 0,99975 | 0,99976 |

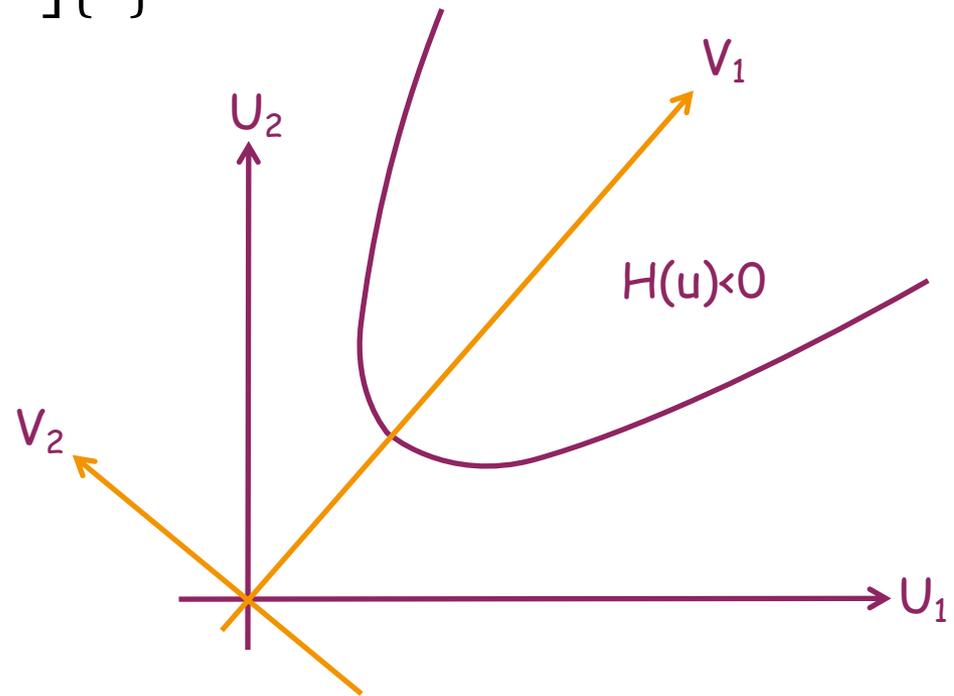
3.4 Application 2

Soit l'état limite suivant :

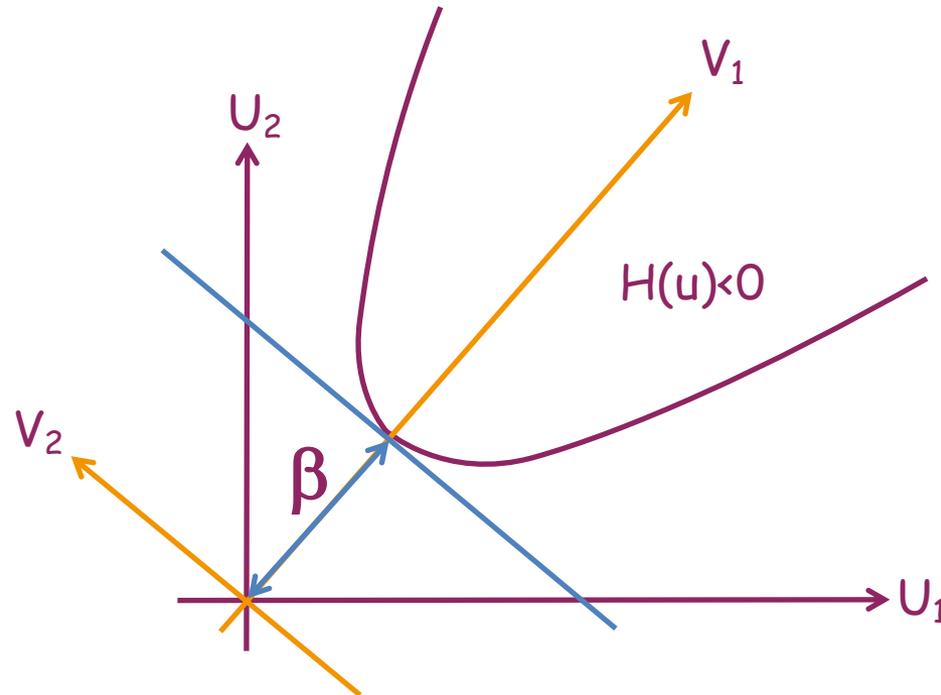
$$H(u_1, u_2) = u_1^2 - 2\sqrt{3}u_1u_2 + 3u_2^2 - 2\sqrt{3}u_1 - 2u_2 + 12$$

Changement de variables $\{u\} = [R]\{v\}$

$$[R] = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$



3.4 Application 2



$$H(v_1, v_2) = 4v_1^2 - 4.v_2 + 12 = 0$$

3.4 Application 2

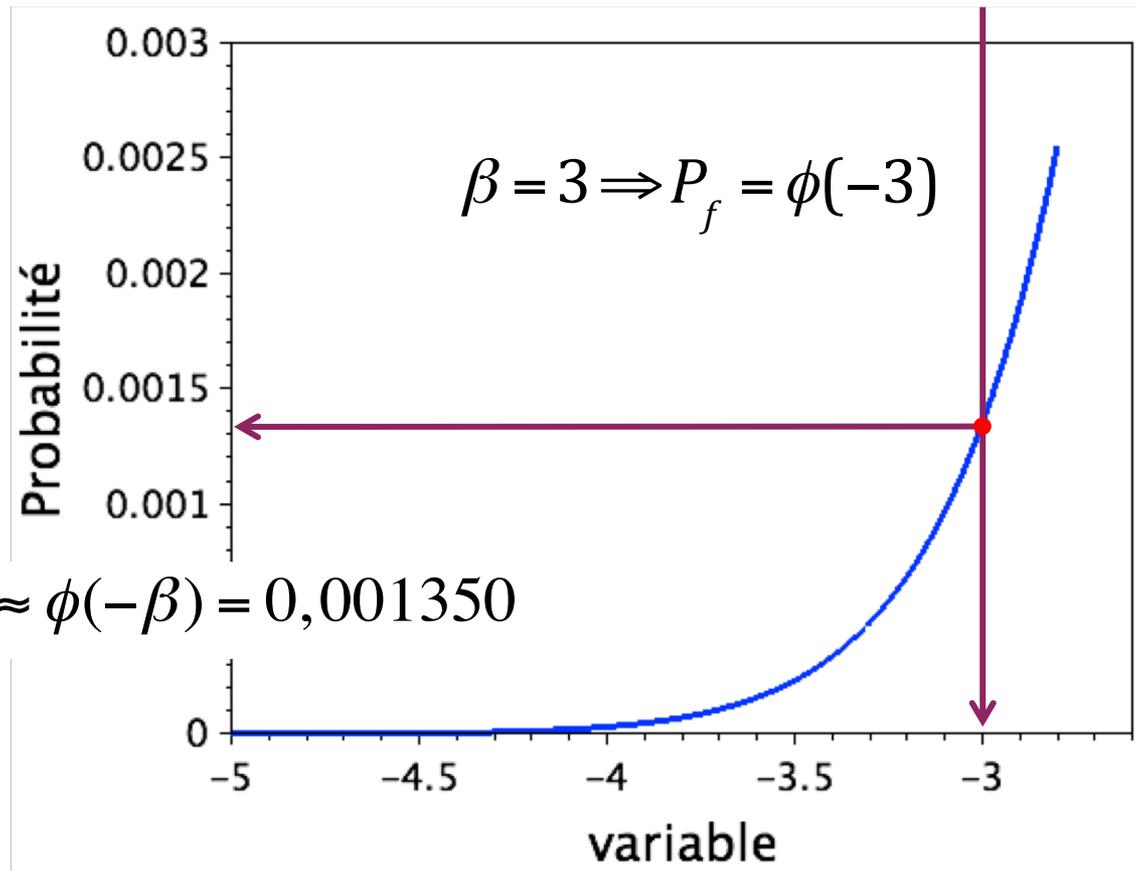
$$\beta = 3$$

| | | | | | | | | | | |
|-----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1,6 | 0,94520 | 0,94630 | 0,94738 | 0,94845 | 0,94950 | 0,95053 | 0,95154 | 0,95254 | 0,95352 | 0,95449 |
| 1,7 | 0,95543 | 0,95637 | 0,95728 | 0,95818 | 0,95907 | 0,95994 | 0,96080 | 0,96164 | 0,96246 | 0,96327 |
| 1,8 | 0,96407 | 0,96485 | 0,96562 | 0,96638 | 0,96712 | 0,96784 | 0,96856 | 0,96926 | 0,96995 | 0,97062 |
| 1,9 | 0,97128 | 0,97193 | 0,97257 | 0,97320 | 0,97381 | 0,97441 | 0,97500 | 0,97558 | 0,97615 | 0,97670 |
| 2,0 | 0,97725 | 0,97778 | 0,97831 | 0,97882 | 0,97932 | 0,97982 | 0,98030 | 0,98077 | 0,98124 | 0,98169 |
| 2,1 | 0,98214 | 0,98257 | 0,98300 | 0,98341 | 0,98382 | 0,98422 | 0,98461 | 0,98500 | 0,98537 | 0,98574 |
| 2,2 | 0,98610 | 0,98645 | 0,98679 | 0,98713 | 0,98745 | 0,98778 | 0,98809 | 0,98840 | 0,98870 | 0,98899 |
| 2,3 | 0,98928 | 0,98956 | 0,98983 | 0,99010 | 0,99036 | 0,99061 | 0,99086 | 0,99111 | 0,99134 | 0,99158 |
| 2,4 | 0,99180 | 0,99202 | 0,99224 | 0,99245 | 0,99266 | 0,99286 | 0,99305 | 0,99324 | 0,99343 | 0,99361 |
| 2,5 | 0,99379 | 0,99396 | 0,99413 | 0,99430 | 0,99446 | 0,99461 | 0,99477 | 0,99492 | 0,99506 | 0,99520 |
| 2,6 | 0,99534 | 0,99547 | 0,99560 | 0,99573 | 0,99585 | 0,99598 | 0,99609 | 0,99621 | 0,99632 | 0,99643 |
| 2,7 | 0,99653 | 0,99664 | 0,99674 | 0,99683 | 0,99693 | 0,99702 | 0,99711 | 0,99720 | 0,99728 | 0,99736 |
| 2,8 | 0,99744 | 0,99752 | 0,99760 | 0,99767 | 0,99774 | 0,99781 | 0,99788 | 0,99795 | 0,99801 | 0,99807 |
| 2,9 | 0,99813 | 0,99819 | 0,99825 | 0,99831 | 0,99836 | 0,99841 | 0,99846 | 0,99851 | 0,99856 | 0,99861 |
| 3,0 | 0,99865 | 0,99869 | 0,99874 | 0,99878 | 0,99882 | 0,99886 | 0,99889 | 0,99893 | 0,99896 | 0,99900 |
| 3,1 | 0,99903 | 0,99906 | 0,99910 | 0,99913 | 0,99916 | 0,99918 | 0,99921 | 0,99924 | 0,99926 | 0,99929 |
| 3,2 | 0,99931 | 0,99934 | 0,99936 | 0,99938 | 0,99940 | 0,99942 | 0,99944 | 0,99946 | 0,99948 | 0,99950 |
| 3,3 | 0,99952 | 0,99953 | 0,99955 | 0,99957 | 0,99958 | 0,99960 | 0,99961 | 0,99962 | 0,99964 | 0,99965 |
| 3,4 | 0,99966 | 0,99968 | 0,99969 | 0,99970 | 0,99971 | 0,99972 | 0,99973 | 0,99974 | 0,99975 | 0,99976 |

$$P_{f_FORM} \approx \phi(-\beta) = 0,001350$$

3.4 Application 2

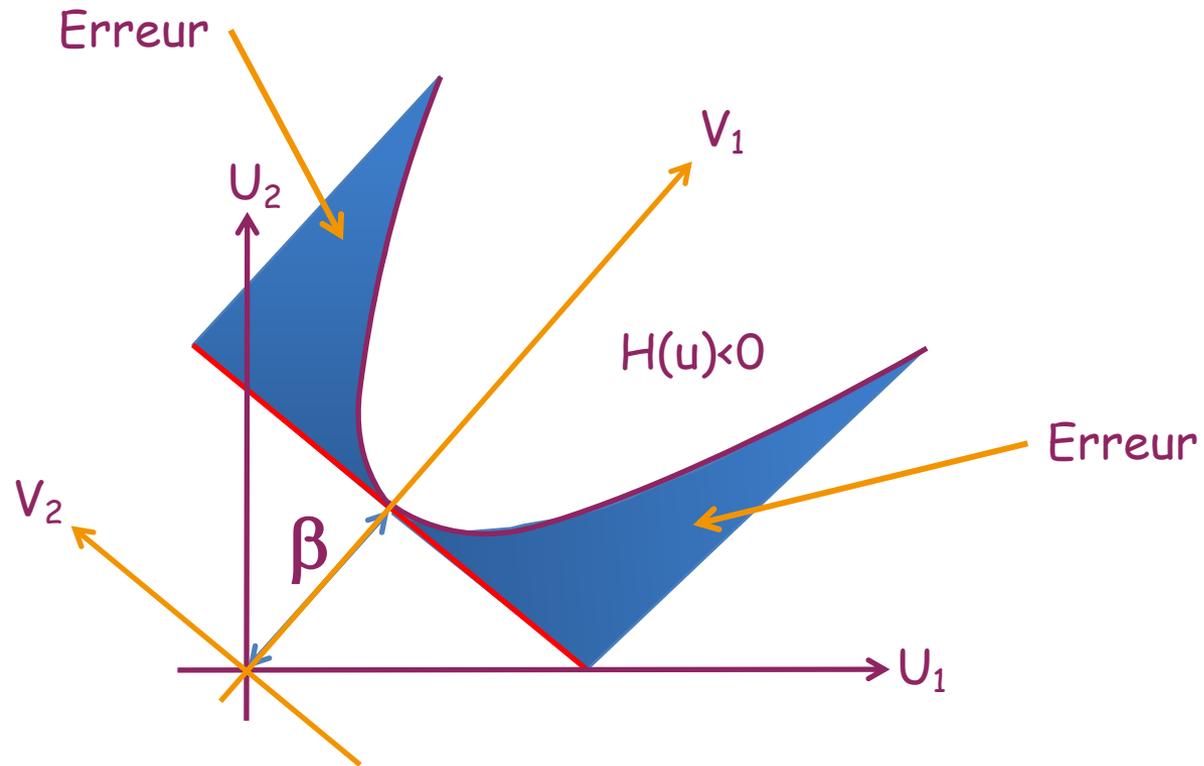
$$H(v_1, v_2) = 4v_1^2 - 4.v_2 + 12 = 0 \Rightarrow v_2 = v_1^2 + 3$$



$$P_{f_FORM} \approx \phi(-\beta) = 0,001350$$

3.4 Application 2

Problème : la fonction n'est pas un hyper-plan !

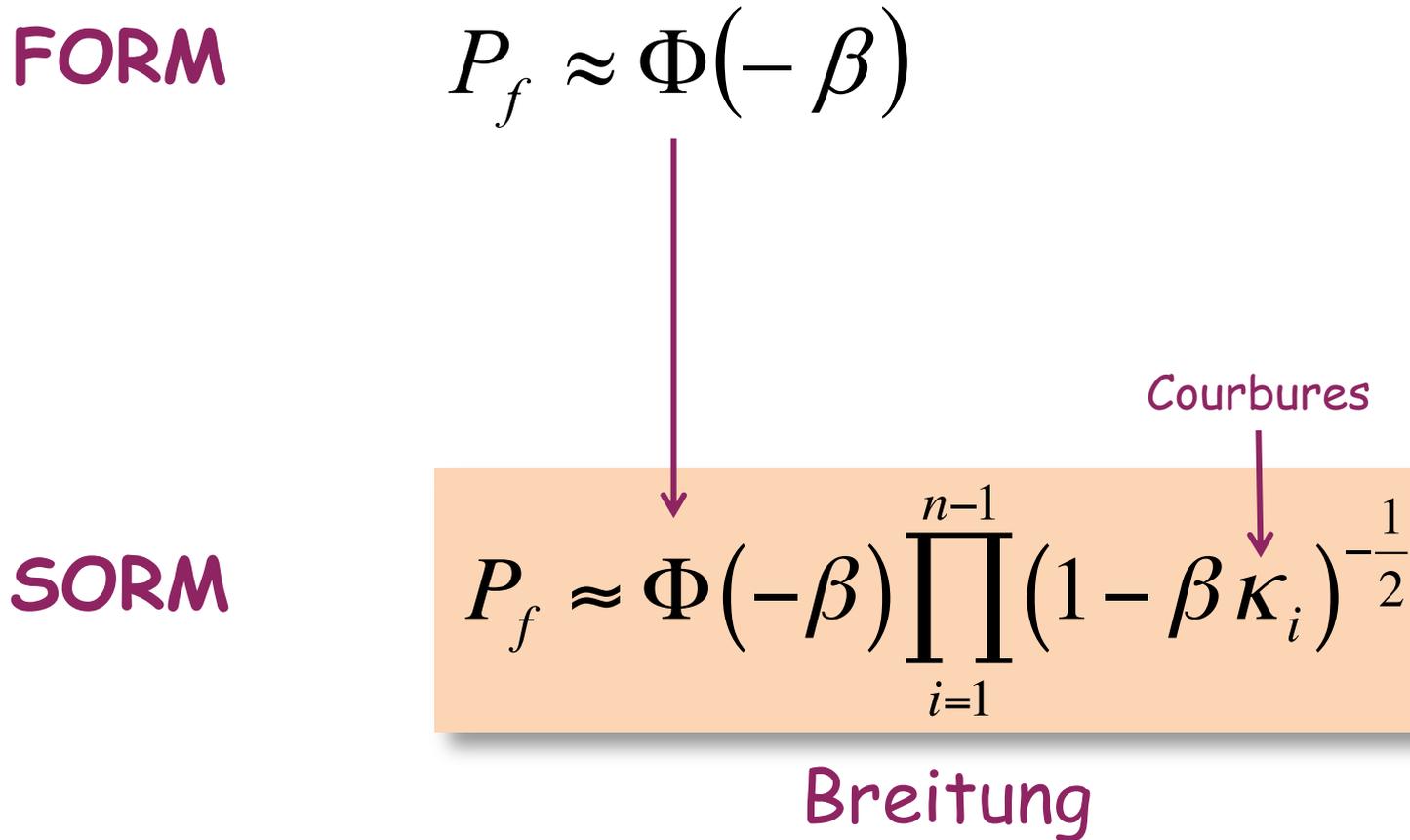


Second Order Reliability Method

FORM

$$P_f \approx \Phi(-\beta)$$

SORM


$$P_f \approx \Phi(-\beta) \prod_{i=1}^{n-1} (1 - \beta \kappa_i)^{-\frac{1}{2}}$$

Breitung

3.4 Application 2

Courbures principales : $\lambda_1 = 0, \phi_1 = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} \\ 1 \\ \frac{1}{2} \end{bmatrix}$ $\lambda_2 = 0, \phi_2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \\ -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ 1 \end{bmatrix}$

Résultat FORM

$$P_{f_FORM} \approx \phi(-\beta) = 0,001350 \text{ soit } \beta = 3$$

Formule de Breitung

$$P_{f_SORM} = \phi(-\beta) \frac{1}{\sqrt{1+\kappa\beta}} = 0,00051 \Leftrightarrow \beta = 3,285$$

Intégration analytique

$$P_{analytique} = 0,000483 \text{ soit } \beta = 3,3$$

Intégration analytique

$$P_{analytique} = 0,000483 \text{ soit } \beta = 3,3$$

Vérification par l'approche de Monté-Carlo

1 million de tirages 10 fois :

0.00047

0.000472

0.000452

0.000477

0.000503

0.000497

0.000464

0.000489

0.000512

0.000513

Moyenne : 0,000484

Cas de variables indépendantes

Si la variable X_i ne suit pas une loi normale il est possible de définir la transformation T en écrivant l'égalité des probabilités pour les deux variables x_i et u_i (d'où isoprobabiliste) :

$$x_i \xrightarrow{T} u_i \text{ définie par : } \Phi(u_i) = F_{x_i}(x_i)$$

$$x_i \xrightarrow{T} u_i = \Phi^{-1}(F_{x_i}(x_i))$$

Si F_{x_i} est inversible pour tout x_i , la transformation inverse s'écrit :

$$u_i \xrightarrow{T^{-1}} x_i = F_{x_i}^{-1}(\Phi(u_i))$$

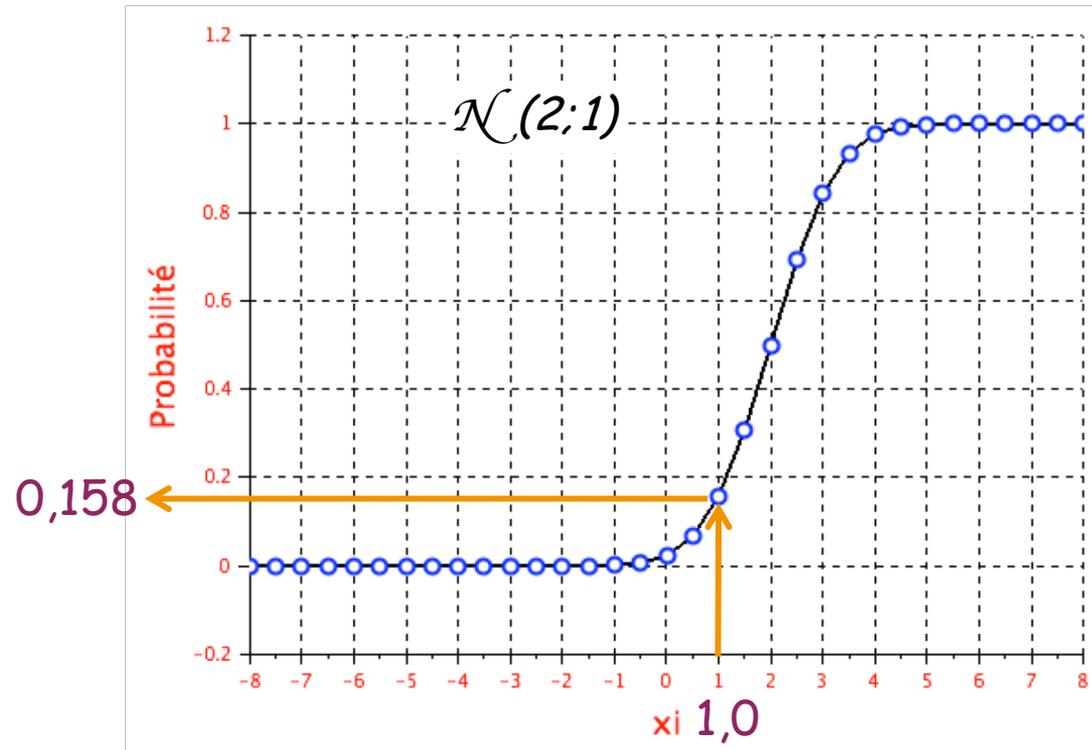
Cas de variables indépendantes

Exemple simple avec la transformation gaussienne point par point :

Gaussienne : moyenne=2 ; $\sigma=1$

1^{ère} étape

$X_i \rightarrow$ Probabilité



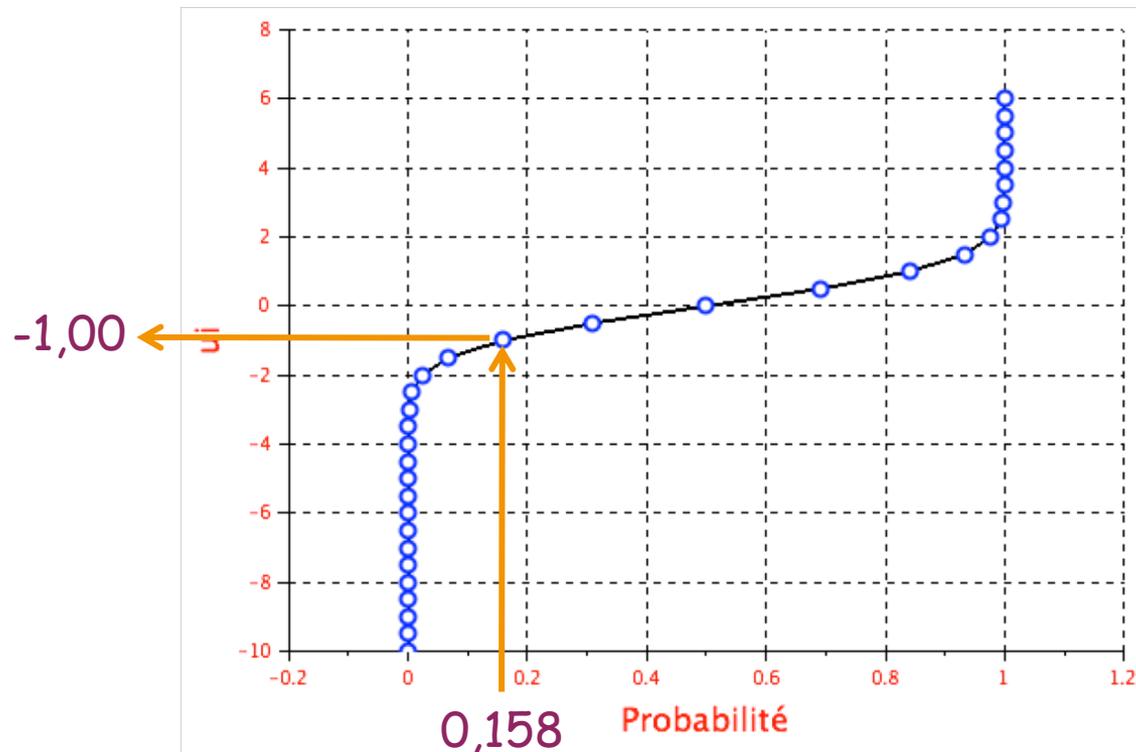
Cas de variables indépendantes

Exemple simple avec la transformation gaussienne point par point :

Gaussienne : moyenne=2 ; $\sigma=1$

2^{ème} étape

$\mathcal{N}(0,1) \rightarrow u_i$



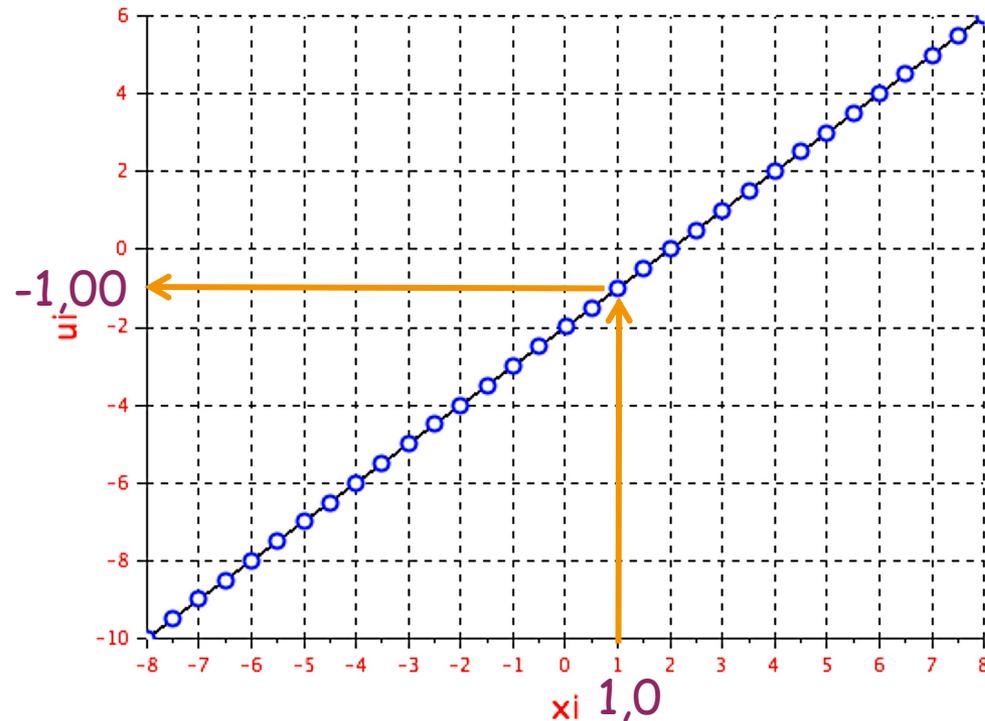
Cas de variables indépendantes

Exemple simple avec la transformation gaussienne point par point :

Gaussienne : moyenne=2 ; $\sigma=1$

3^{ème} étape

Détermination de la loi entre u_i et x_i



Cas de variables indépendantes

Exemple simple avec la transformation du gaussienne point par point :

Gaussienne : moyenne=2 ; $\sigma=1$; $x=1$

$$x_i \rightarrow u_i = \frac{x_i - m_{x_i}}{\sigma_i}$$


Cas de variables indépendantes

Exemple avec la loi uniforme point par point :

Loi uniforme : limite inférieure = 2, supérieure = 8

