

LA FIABILITE EN MECANIQUE

Ce tutoriel est basé sur le cours

« fiabilité en mécanique » que

Jean-Claude LIGERON

a enseigné de nombreuses années

Le GTR M2OS a rendu ce cours disponible
sur le site de l'IMdR

LA FIABILITE EN MECANIQUE

Fiabilité en mécanique : les fondamentaux

Bases méthodologiques et statistiques

Méthode contrainte-résistance

Fiabilité des structures

Modélisation – méthodes FORM - SORM

Pièces particulières

Banques de données

Un exemple de mise en œuvre (pont roulant)

Pour en savoir plus ...

FIABILITE PRÉVISIONNELLE EN MECANIQUE

Les fondamentaux

Un peu d'histoire

Pendant des siècles la construction d'ouvrage s'est appuyée sur l'expérience et la transmission du savoir de « spécialistes »

On construisait pour l'éternité

Milieu du 19^{ème} siècle :

introduction de la notion de marge de sécurité

bases de calcul des structures : 1819 - Navier

1864 - Maxwell

1878 - Castigliano



naissance de la démarche déterministe et utilisation des facteurs de sécurité

Un peu d'histoire

FIN XIXème s. Accidents dans les ascenseurs à chaînes des puits de mines
Approche **"intuitive"** systèmes série / système redondant (chaînes / câbles)

DEBUT XX e **Extension des chemins de fer**
Rupture de "boîtes à essieux"
Première approche de la **"fiabilité" des roulements**

1926 Mayer propose de considérer chaque paramètre incertain entrant dans le calcul des structures comme une variable aléatoire caractérisée par valeur moyenne et variance



Premières approches « probabilistes » d'une fiabilité qui ne dit pas encore son nom

1939 Weibull développe une théorie statistique sur la résistance mécanique des structures mécaniques

1940 Etudes de **"Fiabilité" en avionique**
Application par le DoD des premières techniques élémentaires de la **fiabilité à l'électronique** des avions J47, d'après les travaux de SHEWART

Un peu d'histoire

- 1956 RADC publie "Reliability Factors for Ground Electronic Equipment"
- 1961 MIL HDBK 217 A
- 1965 BARLOW-PROSCHAN : "Mathematical theory of Reliability"
GNEDENKO-BELIAEV-SOLOVIEV (traduit en 1969)
- 1969 SCHWOB et PEYRACHE : "Traité de Fiabilité"

Prise en compte des spécificités de la fiabilité en mécanique

- ✓ phénomènes de vieillissement et d'usure
- ✓ absence de normalisation et de standardisation
- ✓ sources de données limitées
- ✓ niveau de décomposition
- ✓ affaire de mécaniciens
- ✓ calculs
- ✓ modes de défaillance

1974 MARCOVICI – LIGERON « Utilisation des Techniques de Fiabilité en Mécanique »

1975 Dimitri Kecegioglu anime un stage de fiabilité en mécanique ADERA/AFCICQ/AFNOR

Un peu d'histoire

Dimensionnement des structures industrielles fondé sur
une démarche réglementaire et codifiée



Démarche couronnée de succès ?

Comment se placer à l'optimum de sûreté et d'économie ?

Un peu d'histoire

Il s'agit de se protéger :

contre la méconnaissance des propriétés réelles des matériaux ;
des simplifications adoptées dans les modèles de dégradation mécanique ;
des limitations des méthodes de calcul numériques

COMPARAISON ELECTRONIQUE MECANIQUE

ATTRIBUTS	ELECTRONIQUE	MECANIQUE
• Mode de défaillance	• Simple	• Complexe
• Facteurs de contrainte	• Prédicibles	• Difficiles à prédireprécisément
• Burn-in	• Économiquement justifiable	• Trop cher
• λ constant	• Applicable pour de longues durées	• Applicable pour de courtes durées
• λ croissant	• Obsolescence, vieillissement	• Arrive très tôt
• Durée de vie	• Courte due à l'obsolescence	• Longue
• Test de vie	Bon marché et efficace	• Difficile et cher
• Maintenance	• Remplacement	• Réparation et remplacement
• Données de fiabilité	• Nombreuses	• Très peu de bonnes données

Limites d'une démarche déterministe

Ne plus considérer les paramètres comme des valeurs fixes mais comme des variables aléatoires caractérisées par leur densité de probabilité

La sécurité des constructions est un problème de probabilité

Pas de prise en compte du caractère aléatoire des actions et des résistances

Coefficient de sécurité basé sur l'expérience et l'intuition :
décision arbitraire et forfaitaire

Démarche déterministe → Démarche probabiliste

Comment concevoir des structures incluant la notion de risque calculé ?



Risque évalué sous la forme d'une probabilité et non plus sous la forme d'un jugement de type binaire, le dimensionnement est acceptable ou pas

Démarche déterministe → Démarche probabiliste

But :

Maîtriser les incertitudes et quantifier leur influence sur la probabilité de défaillance P_f

Calculer les coefficients partiels de sécurité

Sécurité probabiliste des structures : 3^{ème} congrès de l'AJPC, Liège, 1948

Marcel PROT, Robert LEVI, Jean DULHEL

Intérêts de la démarche probabiliste

Traitement clair des incertitudes

Évaluer une probabilité quantifiée de la défaillance de la structure

Liaison implicite entre le coefficient de sécurité et le niveau de fiabilité

Étude de sensibilité : coefficients partiels de sécurité



Recherche du meilleur compromis coût-calcul

Outil de comparaison



Prolongement rationnel de l'approche déterministe

Intérêts de la démarche probabiliste

Aide au diagnostic : évaluation de la durée de vie résiduelle des matériels

On compare une probabilité de défaillance calculée à une valeur limite qui traduit le niveau de dégradation acceptable

Étude de sensibilité et aide à la décision : optimisation du matériel et des scénarios de maintenance

Amélioration des outils déterministes de conception : dossiers de conception plus réalistes

Comparaison des codes déterministes de conception et des calculs réglementaires

Intérêts de la démarche probabiliste

Introduction de l'incertitude dans :

- les inspections,
- la maintenance,
- les réparations,
- les remplacements.

LA FIABILITE PREVISIONNELLE

Les méthodes de
fiabilité prévisionnelle
ont pour objectif de produire des
estimations a priori
de la fiabilité de dispositif,
appropriées aux
mécanismes de défaillance
susceptibles de les affecter.

LA FIABILITE PREVISIONNELLE

Ces estimations peuvent être utilisées

en phase de conception

pour démontrer que la fiabilité prévisionnelle est meilleure que la
fiabilité allouée, ou

en exploitation

lorsque l'on souhaite par exemple
améliorer la sûreté d'une installation ou
en étendre la durée de fonctionnement.

LA FIABILITE PREVISIONNELLE ... EN MECANIQUE ?

Développées initialement pour les **systèmes électroniques**, ces méthodes ont été fondées à l'origine sur l'hypothèse que le **taux de défaillance des composants est constant** pendant leur période d'utilisation.

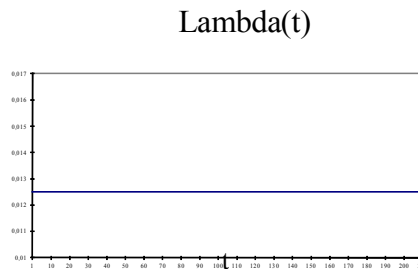
Si cette hypothèse peut permettre de prendre en compte (avec précautions) des composants mécaniques simples, produits en grand nombre, susceptibles d'un mode de défaillance simple, elle n'est en général pas applicable aux systèmes à dominante « mécanique » pour lesquels les **modes de défaillance (rupture, déformation, grippage, bruyance...)** liés à la fatigue, à l'usure et **au vieillissement** apparaissent dès le début du cycle d'utilisation.

LA FIABILITE PREVISIONNELLE EN MECANIQUE

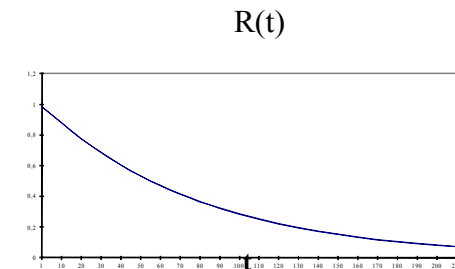
Taux de défaillance

Fiabilité

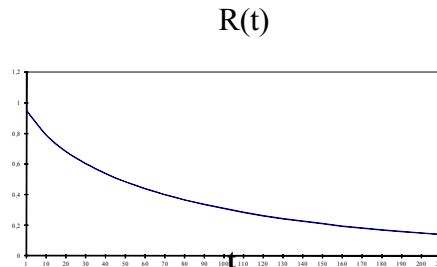
constant



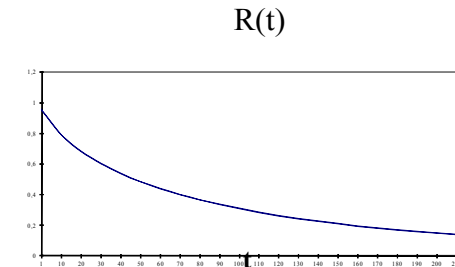
phénomène
aléatoire



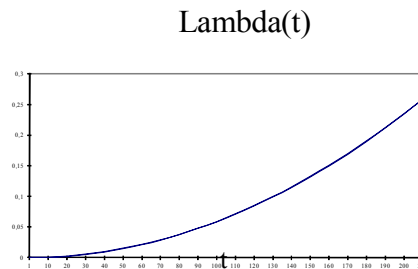
décroissant



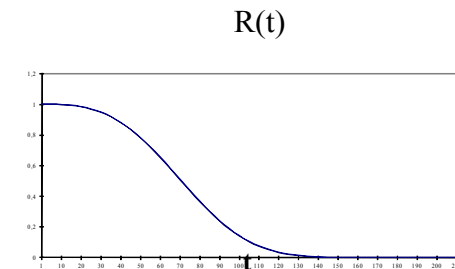
défaillances de
jeunesse



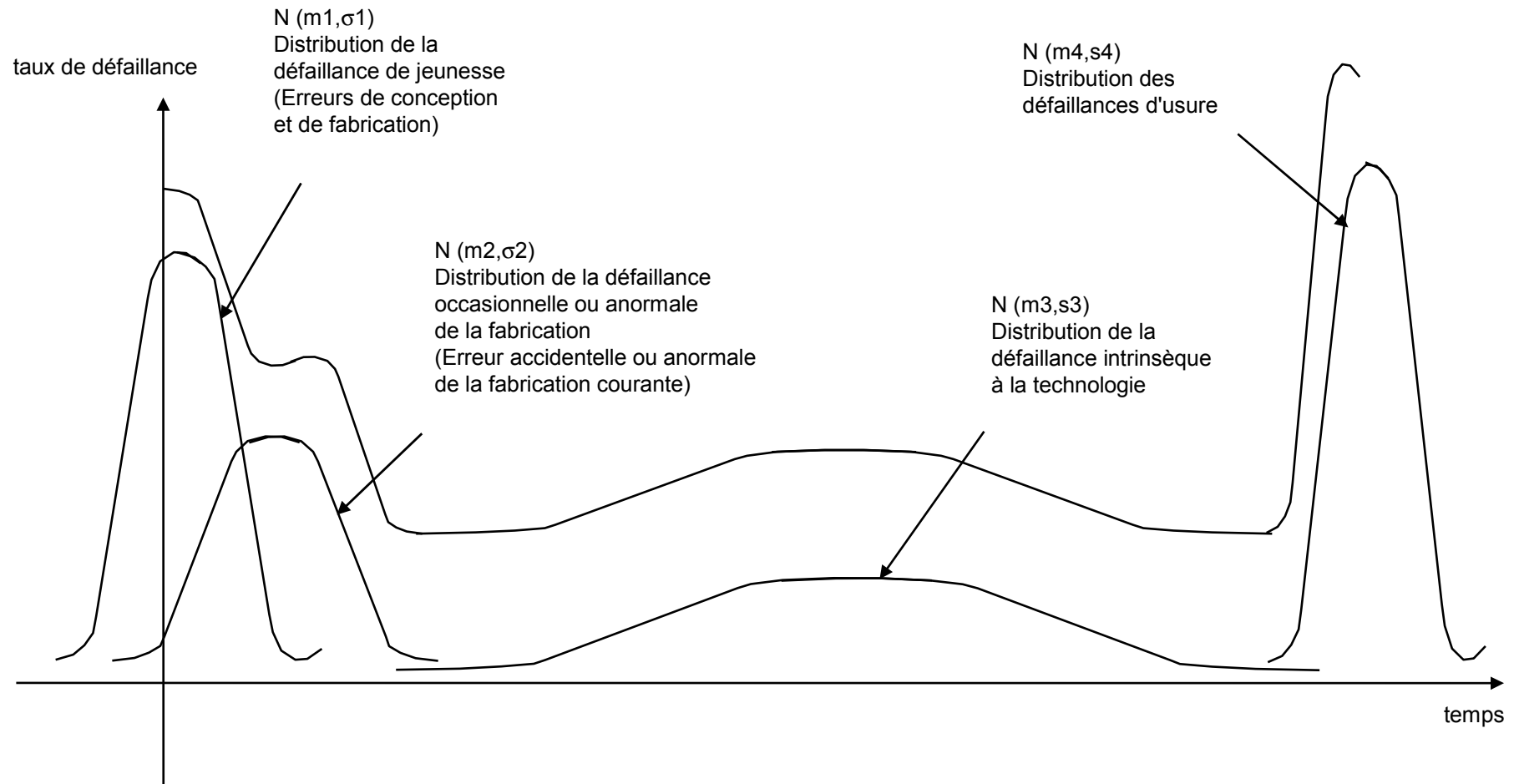
croissant



défaillances de
vieillesse, usure

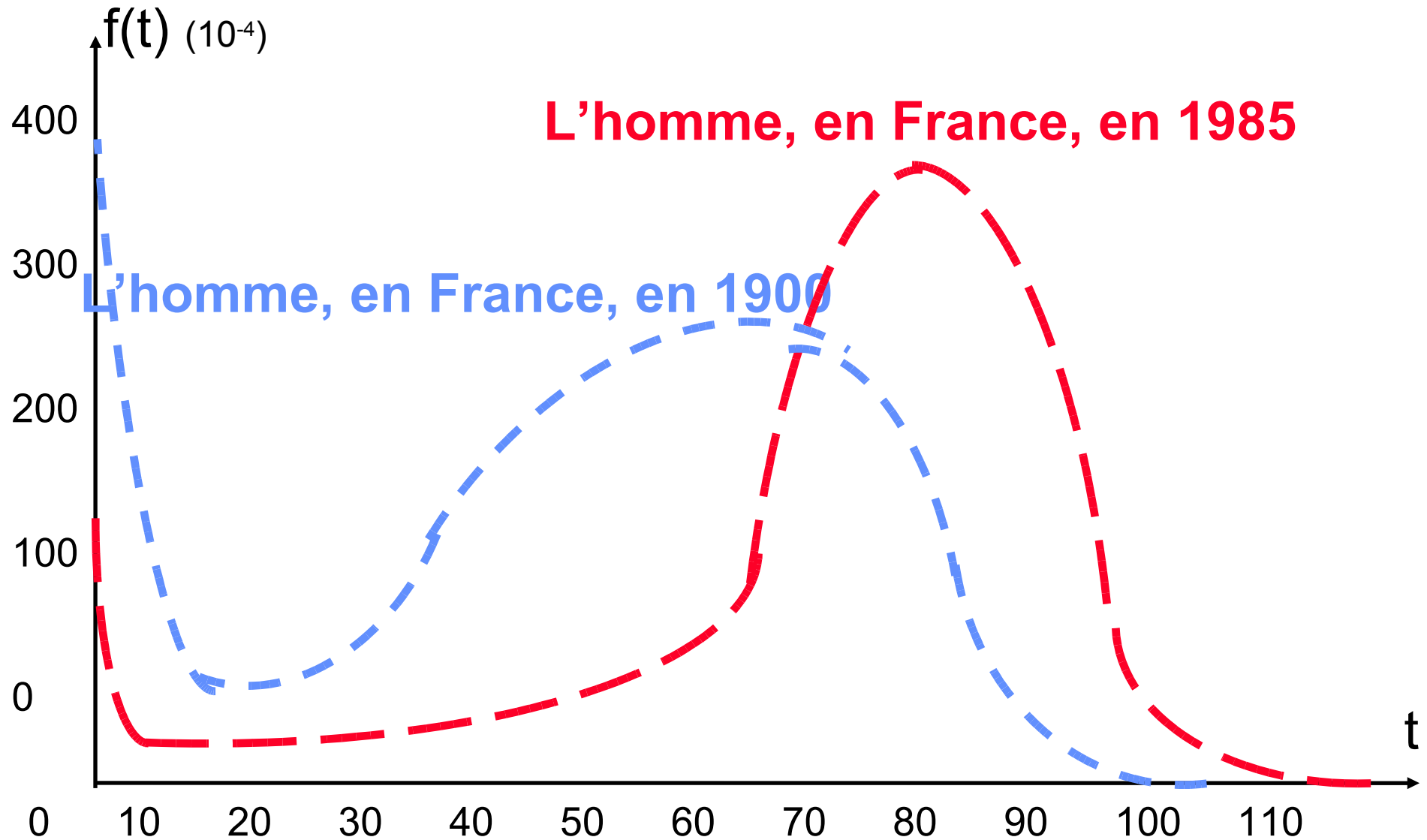


LA FIABILITE PREVISIONNELLE ... EN MECANIQUE ?



**Décomposition de la courbe en baignoire représentant les distributions du
taux de défaillance du produit durant son cycle de vie**

LA FIABILITE PREVISIONNELLE EN MECANIQUE



LA FIABILITE PREVISIONNELLE EN MECANIQUE

Objectif de la

« Fiabilité en Mécanique »

mettre à disposition des concepteurs

un ensemble de méthodes d'estimation de la fiabilité prévisionnelle

juste nécessaires,

prenant en compte les

mécanismes réels de défaillance

adaptées à chaque cas particulier.

Évaluation de fiabilité des structures

Les études de niveau 0 :

Valeur des paramètres fixes : démarche déterministe

Les études de niveau 1 :

Variabilité des paramètres caractérisée par les 2 premiers moments (lois normales)

Les études de niveau 2 :

Variabilité des paramètres quelconques : calcul d'un indice de fiabilité (méthodes FORM/SORM)

Les études de niveau 3 :

Optimisation du dimensionnement, de l'inspection, de la maintenance et le déclassement des structures en fonction de critères économiques ou subjectifs

FIABILITE PRÉVISIONNELLE EN MECANIQUE

Bases Statistiques

LOIS STATISTIQUES UTILISEES

- Loi exponentielle

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x}, E(x) = \frac{1}{\lambda}, \quad (x) = \frac{1}{\lambda^2}$$

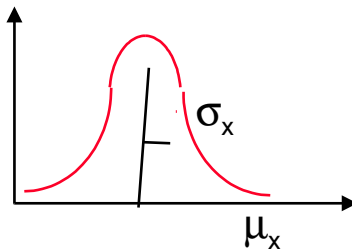
- Loi binomiale

- Lois discrète (succès ou échec)
- Exploitation essais (bon ou mauvais)

Probabilité (k défaillances sur n essais) = $C_n^k p^k (1-p)^{n-k}$

p : proportion défectueuse

- Loi normale

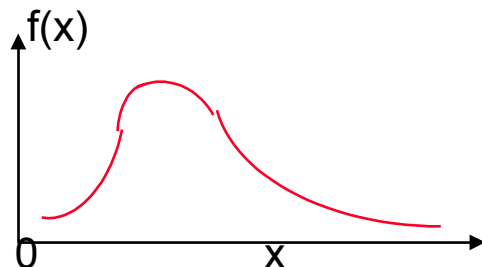


- Incertitudes sur mesures, fabrications
- Phénomènes de fatigue (Wohler)
- Forme limite loi binomiale
- Tests statistiques aisés

$$F(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2 \Pi}} e^{-\frac{(x - \mu_x)^2}{2 \sigma_x^2}}$$

39

- Loi log normale



- y = ln x normale
- Mortalités et durées de réparation

LOIS STATISTIQUES UTILISEES (suite)

- Loi de Gamma

- Techniques bayésiennes

- Loi de Poisson

- $$f(x) = \frac{\chi^\alpha e^{-\chi / \beta}}{\beta^{\alpha+1} \Gamma(\alpha + 1)}$$

$\alpha = 0$: loi exponentielle

α entier : loi de Poisson

- Nombre d'incidents sur un parc important

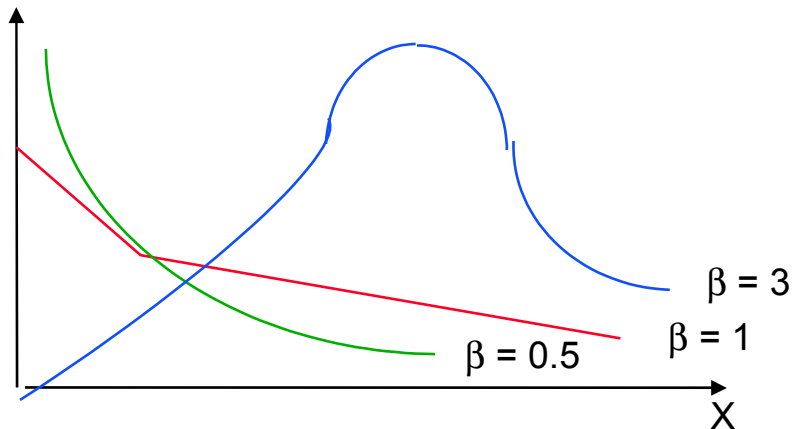
- Probabilité ($x = k$) = $\frac{m^k}{k!} e^{-m}$ avec $m = \lambda t$

- $E(\alpha) = V(\chi) = m$

LOIS STATISTIQUES UTILISEES (suite)

- Loi de Weibull

f(X)



souple

roulements, engrenages, etc ...

$$f(x) = \frac{\beta}{\eta} \left[\frac{x - \gamma}{\eta} \right]^{\beta - 1} \cdot \text{Exp} - \left[\frac{x - \gamma}{\eta} \right]^{\beta}$$




$$f(x) = \frac{\beta}{\eta} \left[\frac{x - \gamma}{\eta} \right]^{\beta - 1} \cdot \text{Exp} - \left[\frac{x - \gamma}{\eta} \right]^{\beta}$$

- la fiabilité, proportion de non défaillants à un instant donné, s'écrit :

$$R(t) = \exp\left(-\left(\frac{t - \gamma}{\eta}\right)^{\beta}\right)$$

Quelques rappels sur la loi de Weibull ...

- fonction continue à 3 paramètres d'un emploi très souple :
 - β : paramètre de forme,
 - suivant sa valeur, on détermine dans quelle phase du cycle de vie du matériel on se trouve.

	Taux de défaillances	Phase du cycle de vie
$\beta < 1$		jeunesse, déverminage
$\beta = 1$		maturité, vie utile
$\beta > 1$		vieillessement, usure

- la loi de Weibull couvre les cas limites
 - $\beta = 1 \Rightarrow$ loi exponentielle
 - $\beta > 3.5 \Rightarrow$ loi normale

CHOIX DES LOIS STATISTIQUES A UTILISER

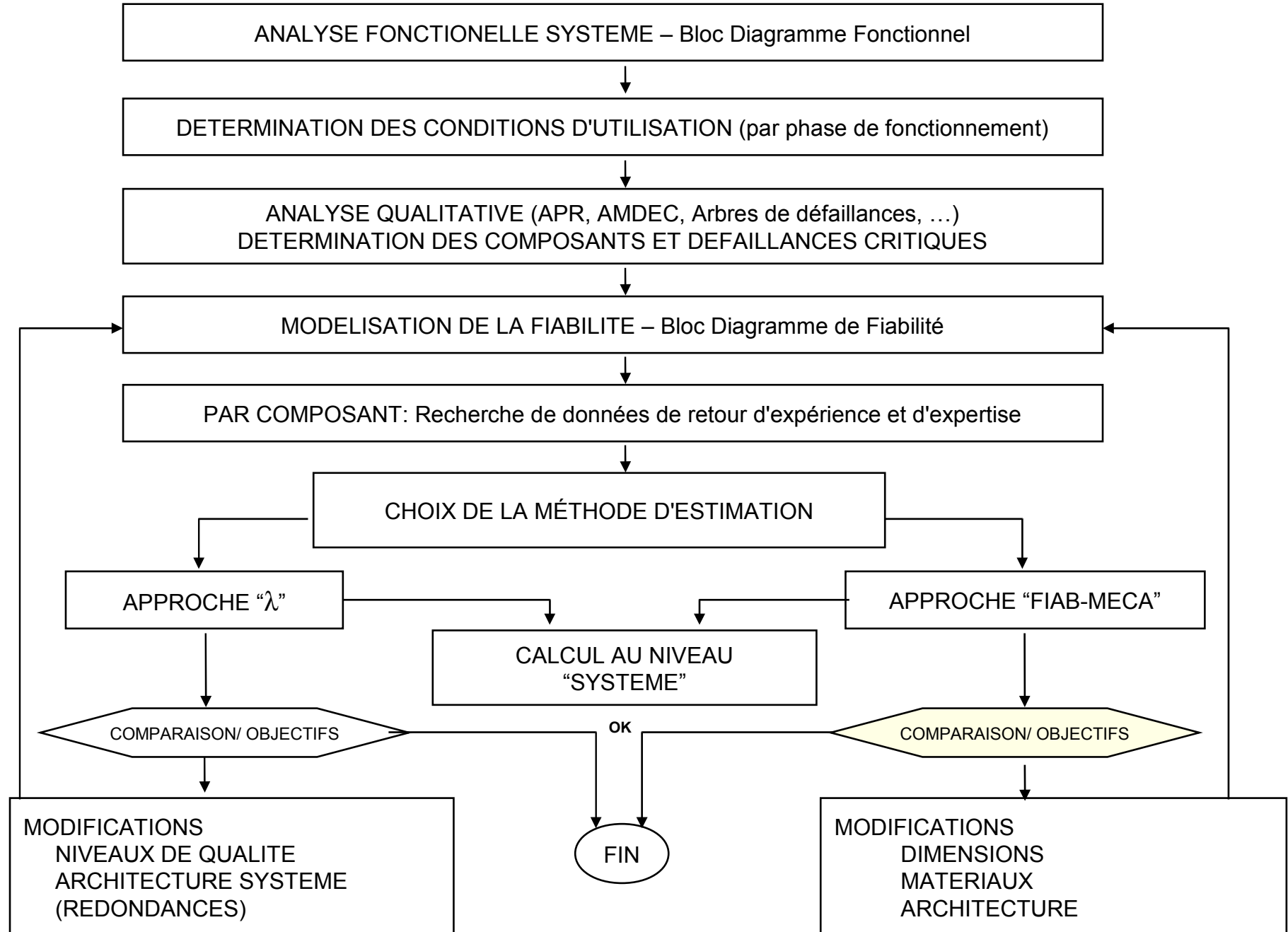
- Dans la plupart des cas, le choix d'un modèle se fait en fonction :
 - du paramètre à estimer :

Paramètres	Exemple de lois utilisées
Proportion pour un système non réparable	loi binomiale
Taux cumulé pour un système réparable	loi de Poisson
Temps de bon fonctionnement ou de défaillance	lois normale, exponentielle, de Weibull

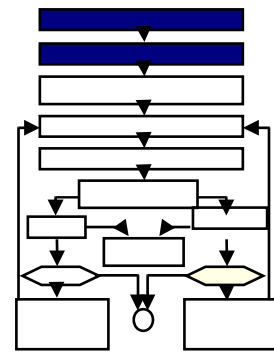
- de la capacité du modèle à décrire le maximum de cas possibles.

FIABILITE PRÉVISIONNELLE EN MECANIQUE

La méthodologie



ANALYSE FONCTIONNELLE SYSTEME



DEFINIR

Le besoin et les objectifs

La mission

Les limites du système

Les conditions de succès ou d'échec

ENTREES

Spécifications techniques et fonctionnelles

Dossiers de plans et de calculs

SORTIES

Graphe de mission

Modes nominaux, dégradés, catastrophiques

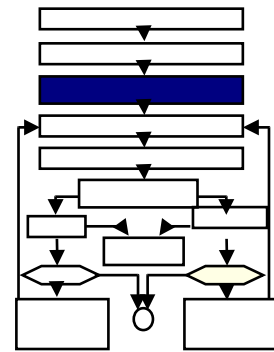
Blocs diagrammes fonctionnels

Composants critiques

Choix méthode de calcul

Axes de recherche des données

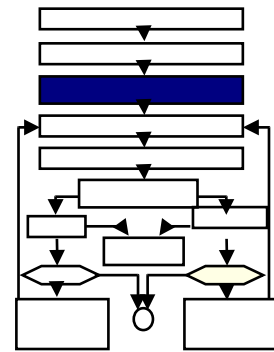
ANALYSE QUALITATIVE



Failure Modes Effects and Criticality Analysis

Analyse des Modes de Défaillance de leurs Effets et de leur Criticité

Entrées	Modes de défaillance composants Échelle de criticité
Sorties	Liste des causes des défaillances Conséquences au niveau système sur la réussite de la mission



ANALYSE QUALITATIVE

MECANISMES DE DEFAILLANCE

CORROSION : PIQUES, CONTRAINTES, CAVITATION, ATTAQUES
CHIMIQUES, EROSION, GALVANIQUE

FRETTAGE : FATIGUE, USURE, CORROSION

FLAMBAGE

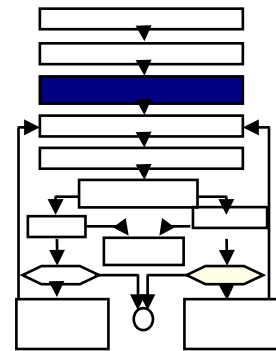
FATIGUE : THERMIQUE, CYCLES ELEVES, CYCLES FAIBLES, SURFACE

BRINELLING, ECAILLAGE

USURE : IMPACT, ADHESIVE, FRETTAGE,

FRAGILE

COMBINEES FATIGUE ET FLAMBAGE



ANALYSE QUALITATIVE

MECANISMES DE DEFAILLANCE (suite)

CHOC THERMIQUE

RELAXATION THERMIQUE

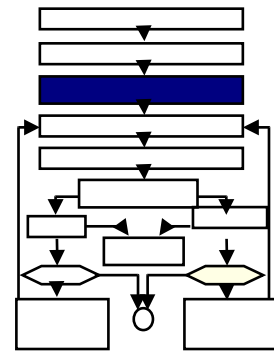
STRESS CORROSION

DEFORMATION ELASTIQUE

COMBINEE EFFORT TEMPERATURE

RADIATION

FATIGUE ACOUSTIQUE



ANALYSE QUALITATIVE

MECANISMES PHYSIQUES DE DEFORMATION

DEFORMATION ELASTIQUE : NIVEAU ATOMIQUE

DEFORMATIONS PERMANENTES ELASTIQUES OU
VISCOPLASTIQUES = NIVEAU CRISTALLIN

GLISSEMENTS ET MACLAGE

DISLOCATIONS

LES RUPTURES

RUPTURE FRAGILE = LIAISONS INTER ATOMIQUES

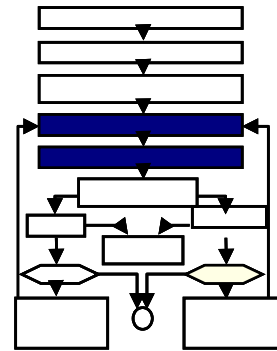
RUPTURE DUCTILE = DEFAUTS CRISTALLINS

RUPTURE PAR FATIGUE

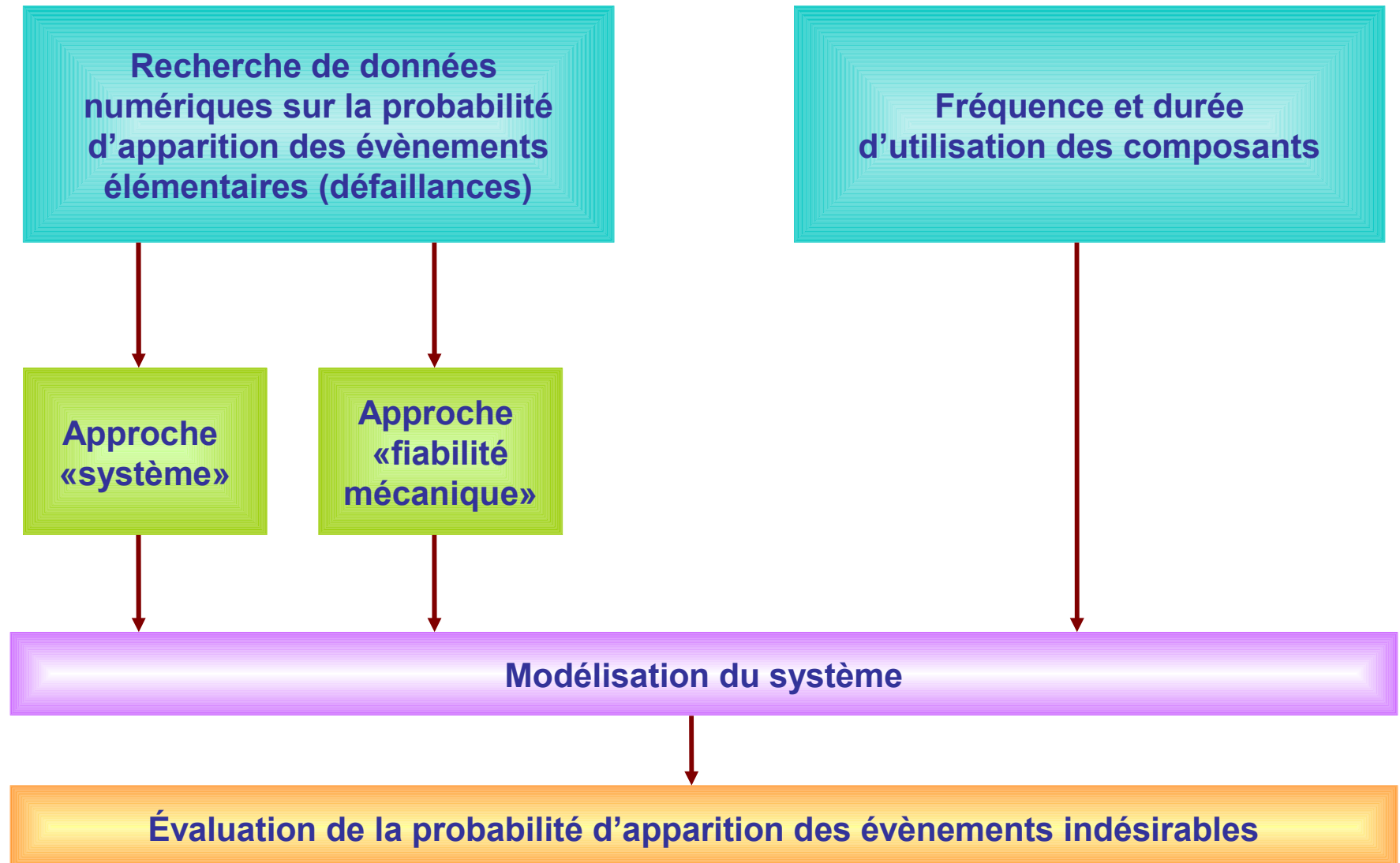
PHASE D'ACCOMMODATION

PHASE D'AMORCAGE

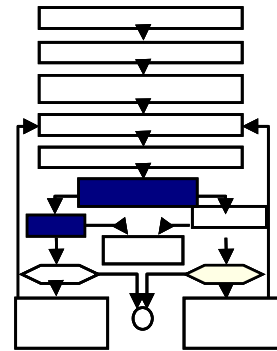
PHASE DE CROISSANCE



ANALYSE QUANTITATIVE



APPROCHE TYPE « SYSTEME »



Données de fiabilité sur les composants

Taux de défaillance en fonctionnement

Taux de défaillance à l'arrêt

Proba de défaillance à la sollicitation

Sources : littératures spécialisées

Enquêtes

Précautions :

Connaissance de l'échantillon de référence

Technologie du composant

Conditions d'utilisation

Connaissance intervalle de confiance

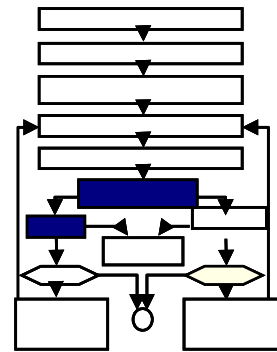
Données sur l'utilisation du système

Environnement

Fréquence et durée d'utilisation

Sources : Spécifications

Exploitants



APPROCHE TYPE « SYSTEME »

ETUDE QUALITATIVE DU TYPE :

AMDEC

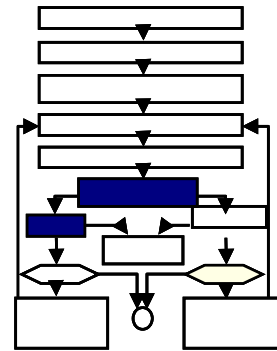
ANALYSE FONCTIONNELLE

ARBRE DE DEFAILLANCE

CALCULS PRELIMINAIRES



"COMPOSANTS CRITIQUES"



APPROCHE TYPE « SYSTEME »

CALCUL DE LA PROBABILITE D'APPARITION DES EVENEMENTS INDESIRABLES

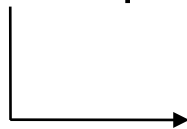
Hypothèses : taux de défaillance λ constant

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\lambda t} \approx \lambda t$$

Moyens de calculs

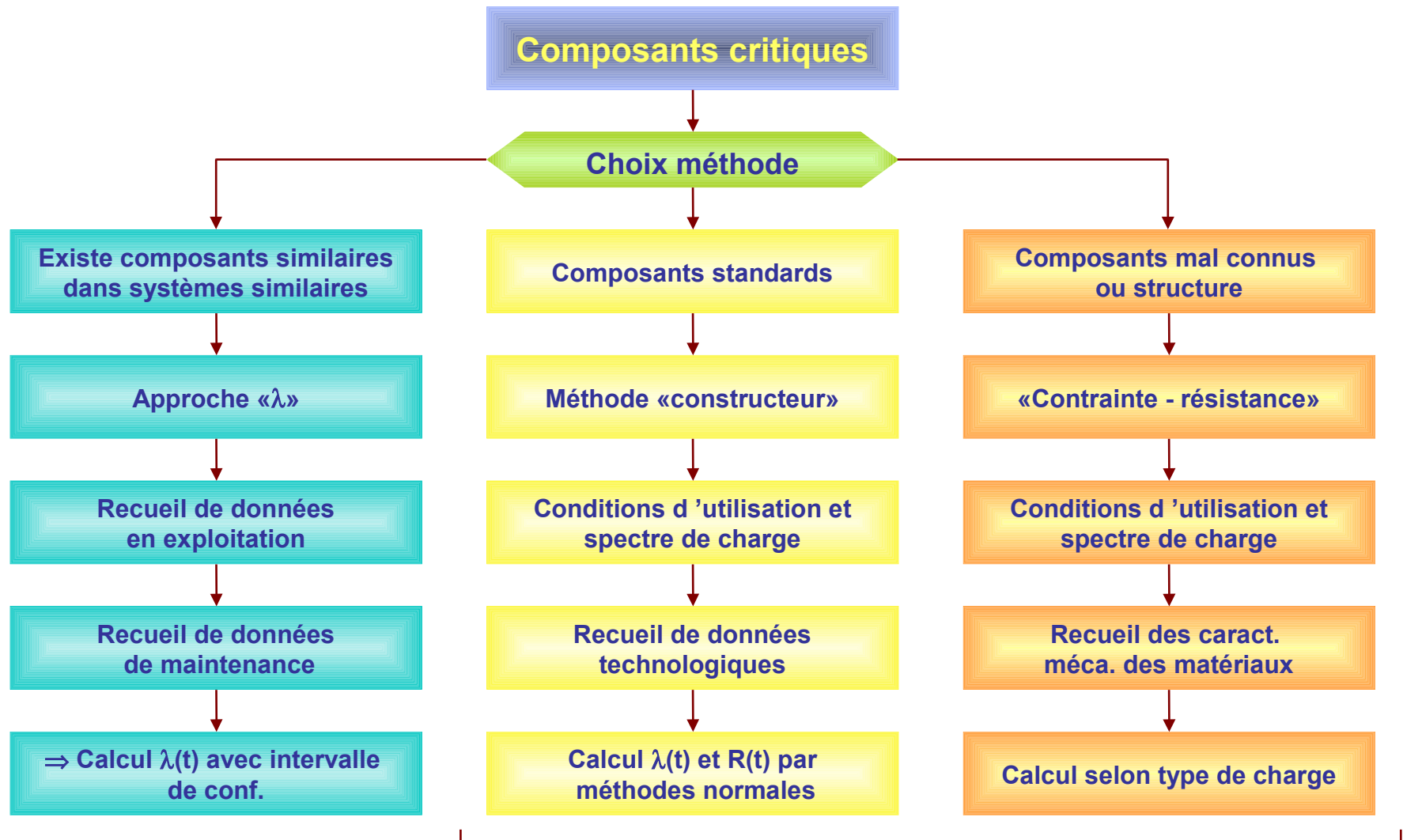
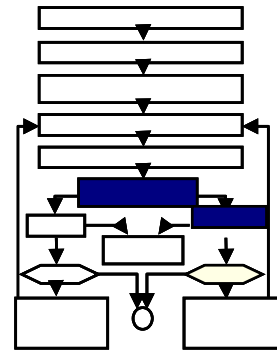
Manuels

Informatiques



Intervalles de confiance sur les résultats

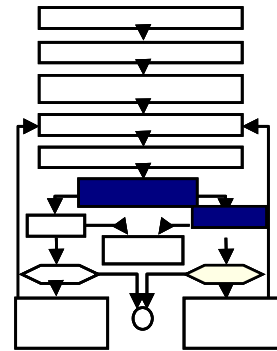
APPROCHES DE LA «FIABILITE EN MECANIQUE»



Calculs de Résistance des Matériaux nécessaires

APPROCHE «FIABILITE EN MECANIQUE»

DETERMINATION DES CONTRAINTES



Décomposition du système en sous-système et composants
(niveau de décomposition)

Contraintes

- mécaniques
- usure et érosion
- corrosion
- thermiques

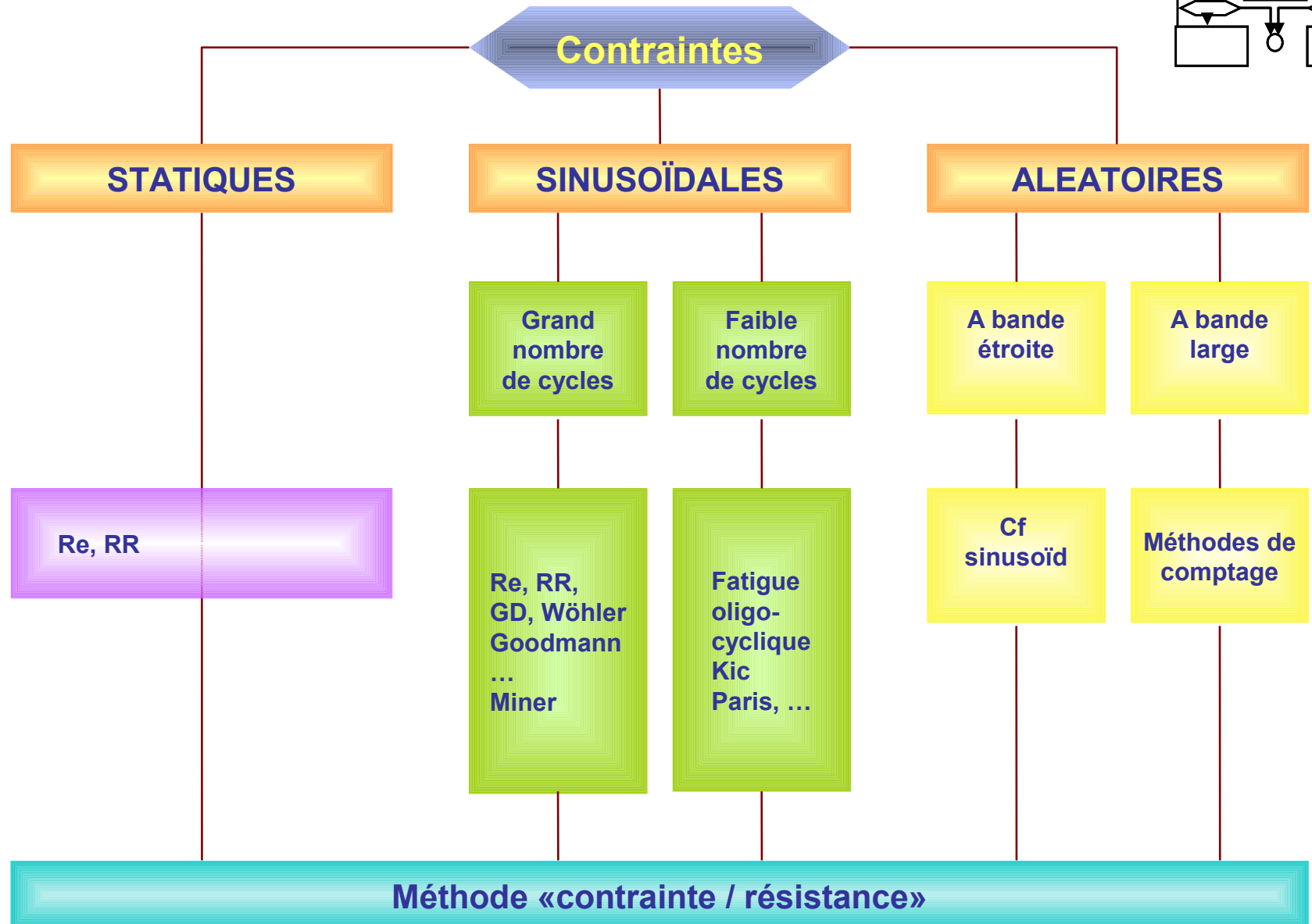
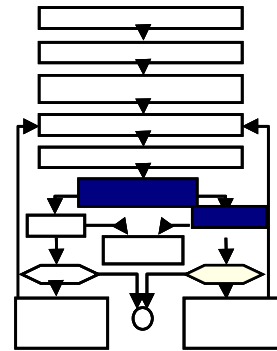
Détermination par:

- calculs
- mesures

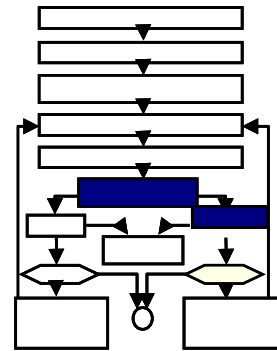
Distribution statistique

Outils : Résistance des Matériaux
Outils Informatiques (CAO)
Techniques d'essais
Exploitations statistiques

APPROCHE «FIABILITE EN MECANIQUE»



APPROCHE «FIABILITE EN MECANIQUE»



DETERMINATION DE LA RESISTANCE A LA CONTRAINTE DES ELEMENTS

Lois de survie des éléments soumis à :

fatigue

usure

Distribution statistique de la résistance à la contrainte

Composants "standardisés »

(roulements, bagues, engrenages) : lois de survie

sinon

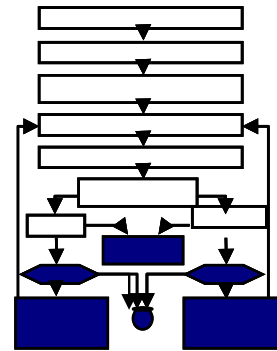
théorie de la fatigue

mécanique de la rupture

données en exploitation

essais

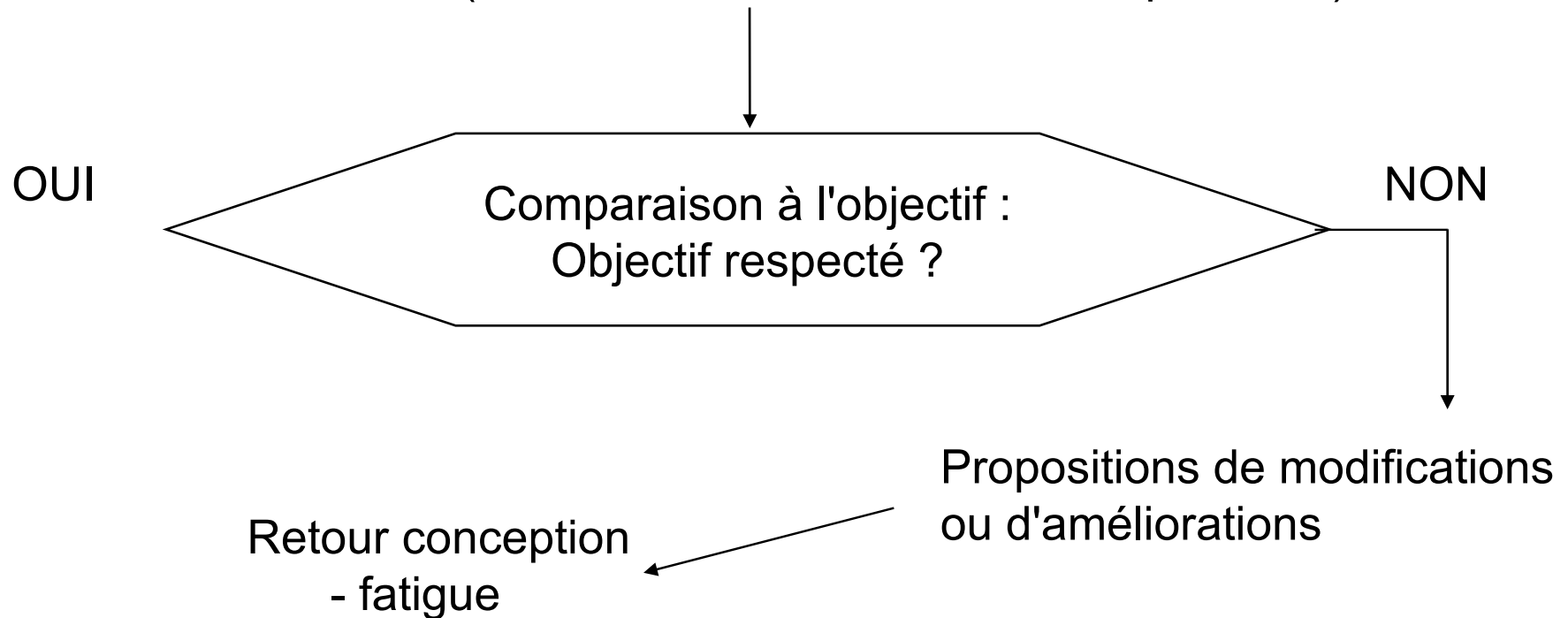
tables de données



INTEGRATION DES RESULTATS AU NIVEAU SYSTEME

Entrées : Études au niveau composant

Sorties : Fiabilité (et éventuellement Sécurité - Disponibilité)



ANALYSE D'UNE DEFAILLANCE

Erreur humaine proprement dite :

- oubli
- négligence
- étourderie
- etc

Erreur humaine due aux contraintes extérieures :

- manque de temps
- mauvaise condition de travail
- qualification inadaptée
- etc

Erreur humaine
ou faute

L'entité est différente de ce qu'elle doit être vis
à vis de la fonctionnalité visée

Faiblesse ou défaut
potentiel

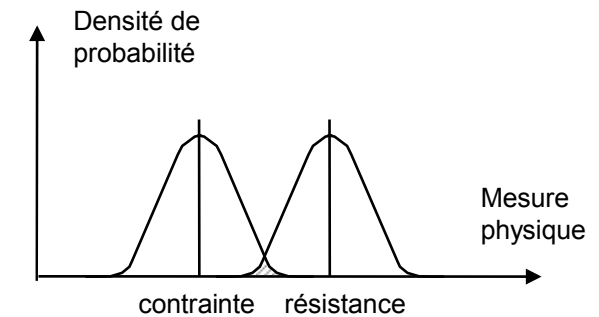
Certaines fonctions ne peuvent pas être
réalisées pour un profil ou contrainte
d'utilisation donné

Défaillance

Rencontre de 2 conditions :

- l'entité est dans un état de faiblesse et
- le profil ou contrainte d'utilisation
correspond à celui qui engendre la faiblesse

Une défaillance n'est pas
systématiquement aperçue par l'utilisateur



*Interaction entre le produit et l'environnement
La probabilité de défaillance est figurée par la zone
hachurée à l'intersection des deux surfaces*

Statistiquement, une panne est engendrée
par 2,5 défaillances

Panne

ERREURS HUMAINES

4 PHASES :

Identification

Investigation

Actions correctives

Vérification

PRATIQUES

Prévenir les erreurs de connexions

Éduquer sur les erreurs possibles

Obtenir des informations sur systèmes similaires

Concevoir des systèmes prenant en considération l'erreur humaine

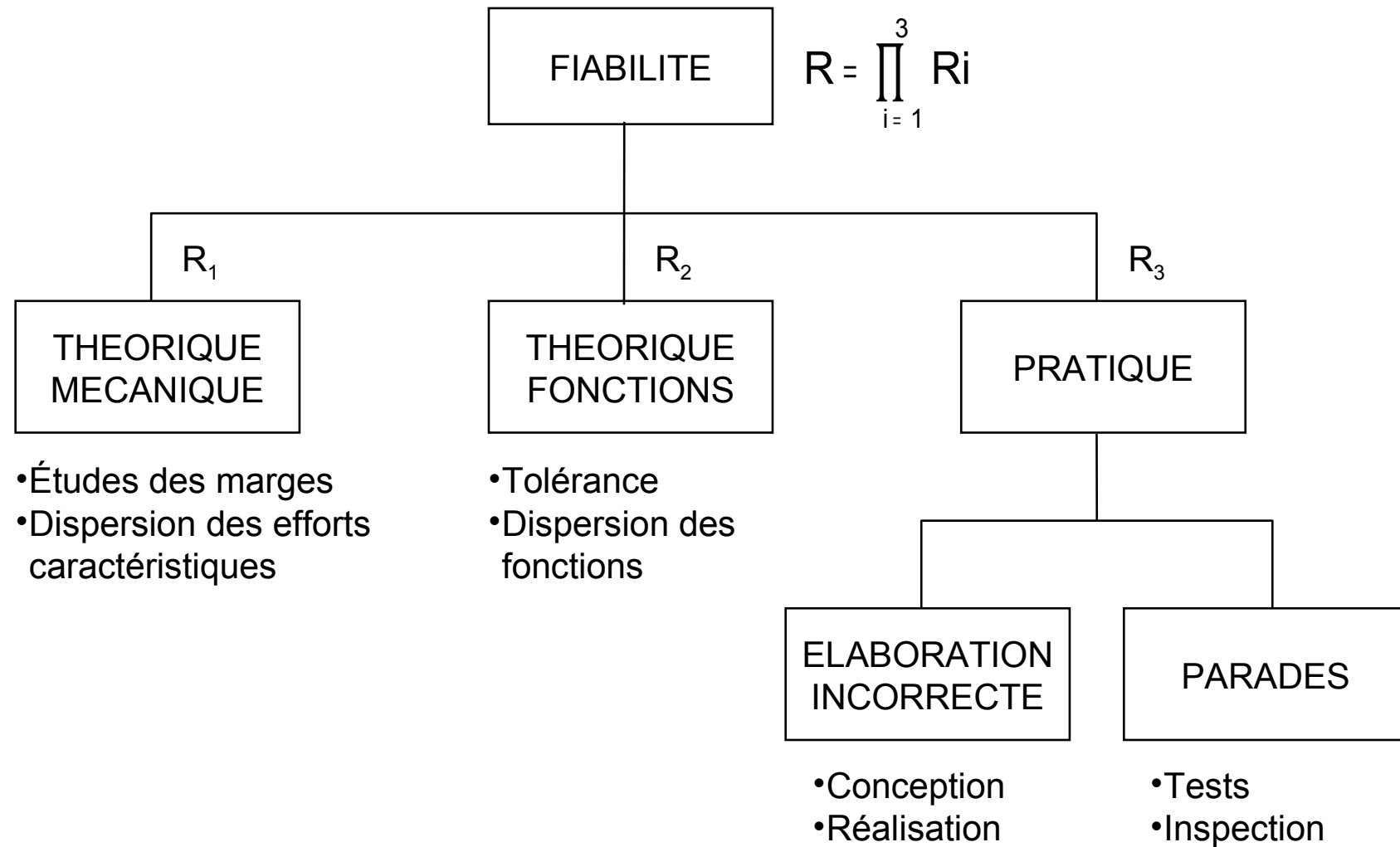
Se souvenir que l'humain n'est pas très fiable

PROPOSED SET OF TYPICAL FAILURE CAUSE POSSIBILITIES

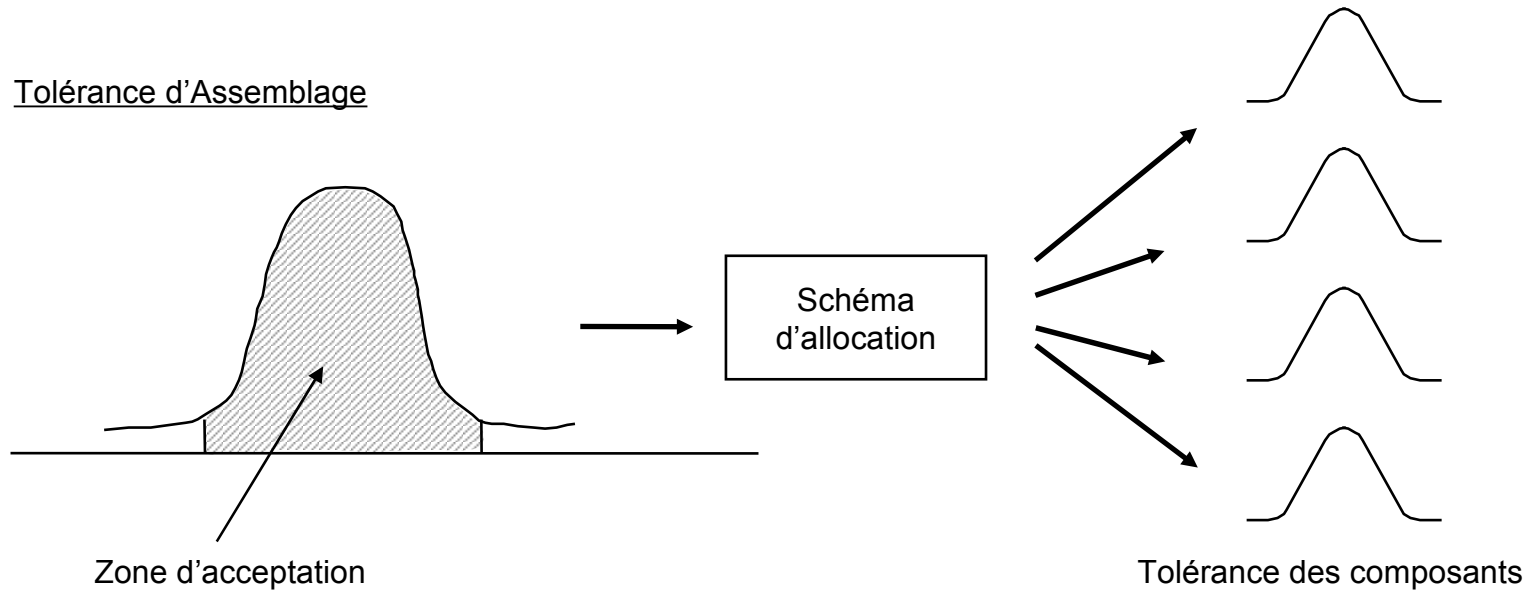
CAUSES		REF.	PROBABILITIES
Design	Incorrect design w.r.t mechanical environment	C1	10^{-3}
	Incorrect design w.r.t the selection of a functional parameter	C2	$2 \cdot 10^{-2}$
	Incorrect design w.r.t thermal environment	C3	$5 \cdot 10^{-3}$
	Incorrect design w.r.t ground environment	C4	$5 \cdot 10^{-3}$
Realisation	Material not compliant with the definition		
	metallic	C_5^1	10^{-2}
	composite, bonding	C_5^2	10^{-1}
	Incorrect machining	C6	$3 \cdot 10^{-3}$
	Incorrect thermal treatment	C7	10^{-3}
	Incorrect surface treatment	C8	$5 \cdot 10^{-3}$
	Incorrect assembly	C9	$3 \cdot 10^{-3}$
	Incorrect adjustment	C10	10^{-2}
	Degraduation during handling, storage, integration, ...	C11	10^{-3}
	No respect of storage conditions, of life time limitations, ...	C12	$3 \cdot 10^{-3}$
	Incorrect realization of a manufacturing process	C13	$5 \cdot 10^{-3}$
	Typical realization "human error"	C14	$3 \cdot 10^{-3}$

PROPOSED SET OF TYPICAL SOLUTION FAILURE POSSIBILITIES

SOLUTION		REF.	PROBABILITIES
Testing	Qualification testing structural aspects	S1	$2 \cdot 10^{-2}$
	Qualification testing functional aspects	S2	$5 \cdot 10^{-2}$
	Acceptance testing structural aspects	S3	$5 \cdot 10^{-2}$
	Acceptance testing function aspects	S4	10^{-1}
	Development testing	S5	$5 \cdot 10^{-2}$
Inspection / Analysis	Incoming inspection	S6	metallic $5 \cdot 10^{-3}$, composite, bonding, ... $5 \cdot 10^{-2}$
	Dimensional inspection	S7	$5 \cdot 10^{-2}$
	Surface treatment inspection	S8	$5 \cdot 10^{-2}$
	Heat treatment inspection	S9	$5 \cdot 10^{-2}$
	Manufacturing process inspection	S10	$5 \cdot 10^{-2}$
	Visual inspection	S11	$5 \cdot 10^{-3}$, when explicitly required
	Integration inspection	S12	$5 \cdot 10^{-3}$, when explicitly required
	Establishment of a procedure	S13	$5 \cdot 10^{-2}$
	Check by analysis	S14	$5 \cdot 10^{-2}$
	Typical manufacturing inspection	S15	$5 \cdot 10^{-2}$



ALLOCATION DE TOLERANCES POUR ASSEMBLAGES MECANQUES



- Définition d'une fonction de coût/tolérance

$$\text{Coût} = A \cdot f(B \cdot T)$$

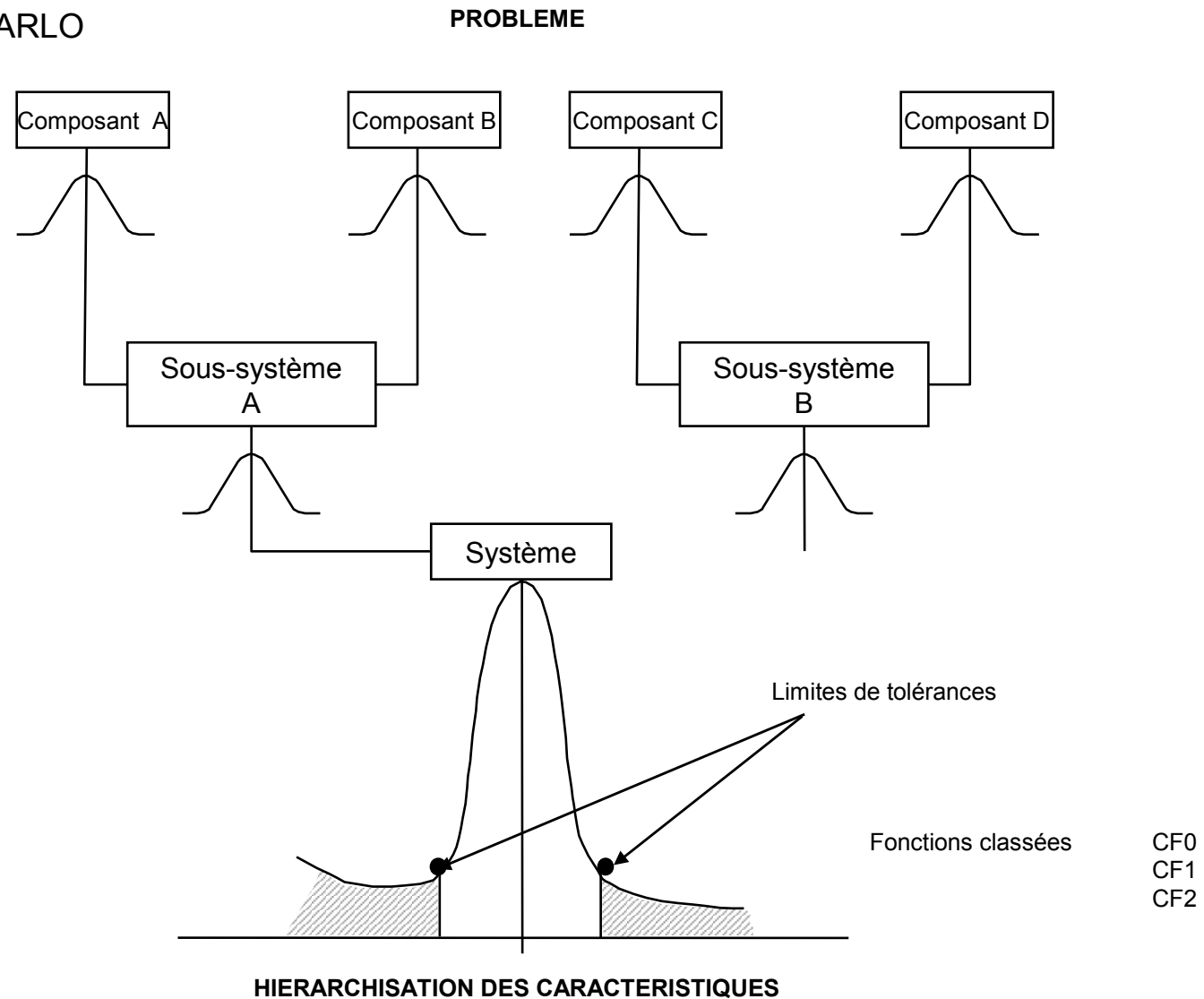
A = coûts fixes

B = coût pour obtenir T

- Méthodes de programmation linéaire
- Méthodes de programmation non linéaire avec contraintes

ANALYSE DES VARIATIONS

1. PIRE CAS
2. RMS
3. MONTE-CARLO

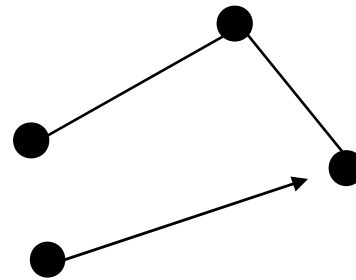


SYSTEME

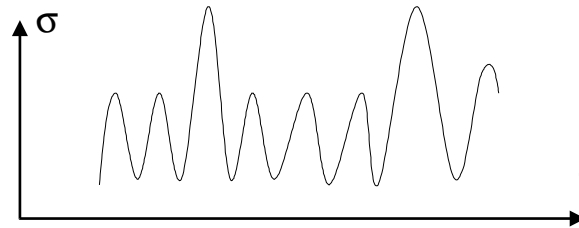
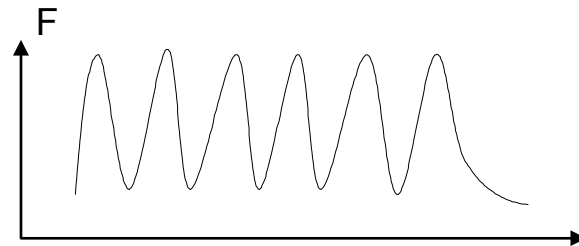
SOLLICITATIONS

CONTRAINTES

MATERIAUX



ENVIRONNEMENT



OBJECTIF

R_e, R_m, K_{lc}, χ

FIABILITE PRÉVISIONNELLE EN MECANIQUE

Comparaison des méthodes

METHODE UNIFIEE D'APPROCHE PROBABILISTE DES SYSTEMES MECANIQUES

L'approche des «Fiabilistes-Système».

L'approche des «Mécaniciens».

Méthodes communes d'analyse qualitative.

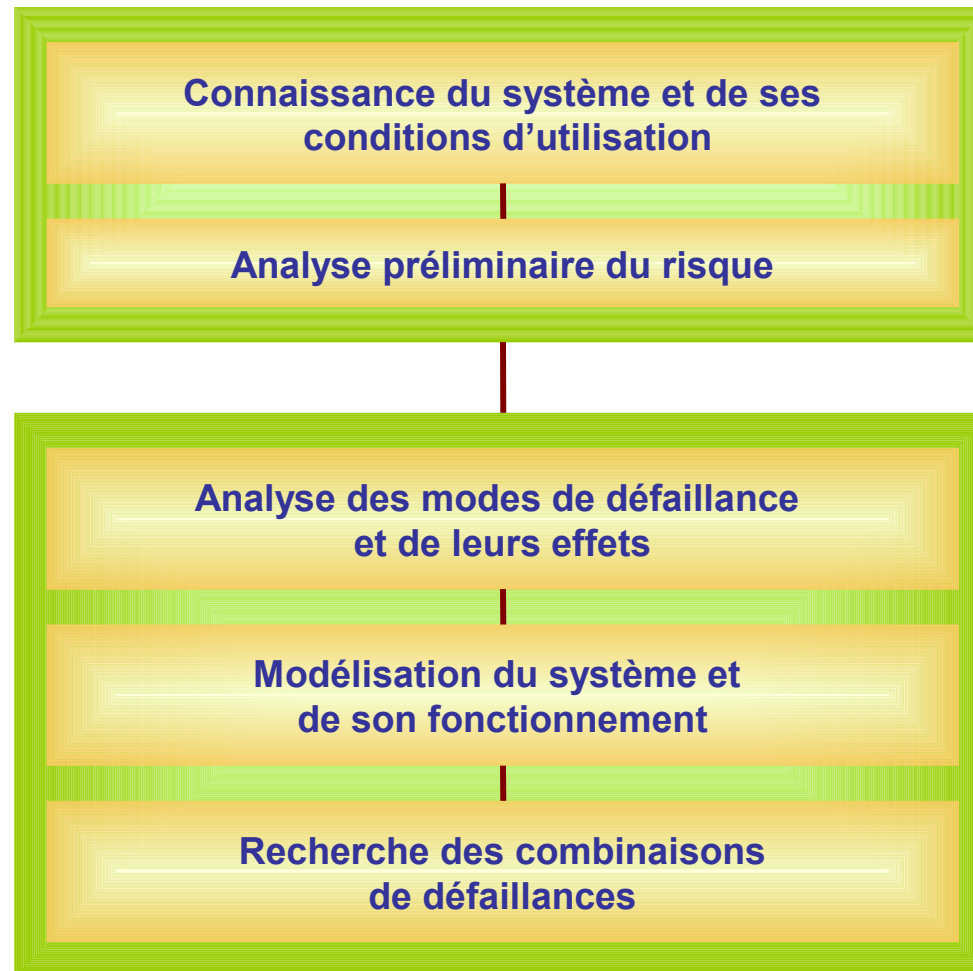
Intérêts et limites des deux approches.

Richesse d'une approche «unifiée».

Exemple d'application dans le domaine nucléaire.



POINTS COMMUNS AUX DEUX APPROCHES : ANALYSE QUANTITATIVE



Approche "système"	Approche "Fiabilité mécanique"
<ul style="list-style-type: none">- dialogue difficile avec les B. E. mécaniques+ Approche rapide si données disponibles mais- Risques d'erreurs si données mal interprétées+ Moyen de comparaison facilitant les discussions au niveau "projet"	<ul style="list-style-type: none">+ Rapports aisés avec B. E. (même langage)- Calculs longs et coûteux limités aux composants critiques+ Moyen d'optimisation de la conception au niveau du composant

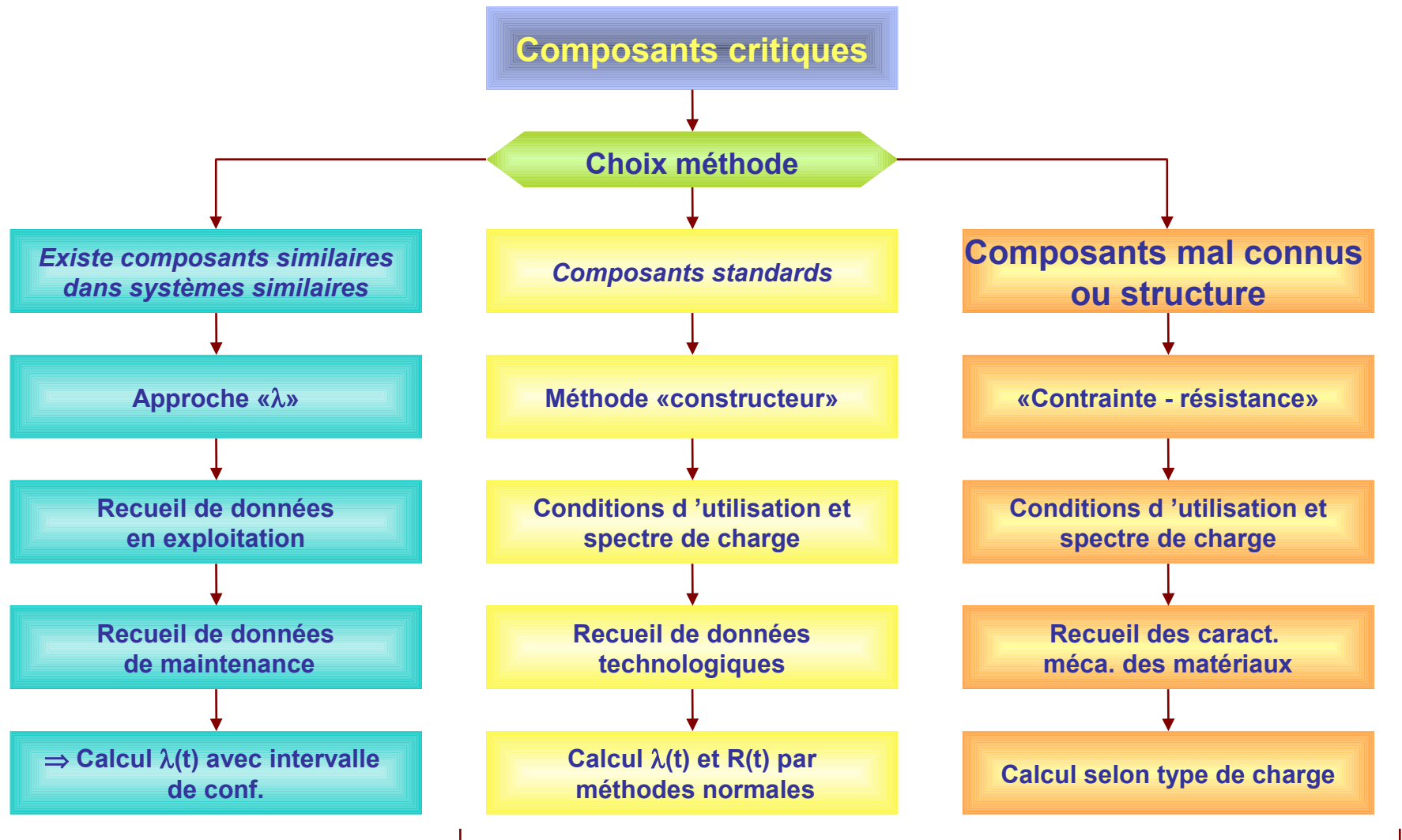
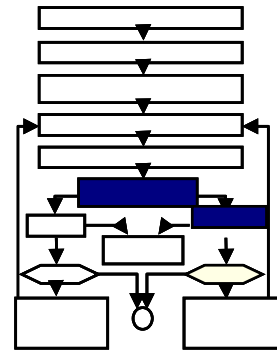
Approche "système"	Approche "Fiabilité mécanique"
<p>TAUX DE DEFAILLANCE CONSTANT</p> <ul style="list-style-type: none"> + Simplicité des calculs - Non prise en compte des phénomènes d'usure, fatigue, ... + Méthode éprouvée 	<p>PROB DE DEFAILLANCE DEPENDANT DU NOMBRE DE CYCLES APPLIQUES</p> <ul style="list-style-type: none"> - Complexité des calculs + Prise en compte usure et fatigue - Parfois aux confins de la recherche
<p>NON APPLICABLE AUX PIECES DE STRUCTURE</p> <ul style="list-style-type: none"> - Limitée à arguments qualitatifs 	<p>APPLICABLES AUX PI7CES DE STRUCTURE</p> <ul style="list-style-type: none"> + Évaluation de la proba de rupture
<ul style="list-style-type: none"> + Applicable par des généralistes + Synthèse de technologies différentes - Ne privilégie pas les composants soumis à la charge 	<ul style="list-style-type: none"> - Nécessite des connaissances de mécanicien - Méthode purement applicable à la mécanique + Importance donnée aux composants soumis à la charge

Approche "système"	Approche "Fiabilité mécanique"
<p>TAUX DE DEFAILLANCE "moyen"</p> <ul style="list-style-type: none"> - Composant non individualisé - Conditions d'utilisation de l'échantillon de référence - Modes de défaillance de l'échantillon de référence + Prise en compte "impondérables" (modes communs) - Ne permet pas de juger les modifications de dimensionnement + Comparaison aisée des modifications d'architecture 	<p>PROB DE DEFAILLANCE CALCULEE</p> <ul style="list-style-type: none"> + Composant individualisé + Conditions d'utilisation réelles - Modes de défaillance limités à rupture, usure, déformation, ... - Composant supposé parfaitement conforme aux plans + Prend en compte le dimensionnement réel
<p>DONNEES DISPONIBLES SUR S/SYSTEME</p> <ul style="list-style-type: none"> - Ne tient pas compte du détail de chaque composant + Permet de limiter le niveau d'analyse 	<p>ANALYSE AU NIVEAU DU COMPOSANT</p> <ul style="list-style-type: none"> + Exhaustivité de l'analyse au niveau du composant - Possibilité de manque de données

FIABILITE PRÉVISIONNELLE EN MECANIQUE

La méthode contrainte/résistance

APPROCHE «FIABILITE EN MECANIQUE»



LA METHODE "CONTRAINTE-RESISTANCE"

OBJECTIF

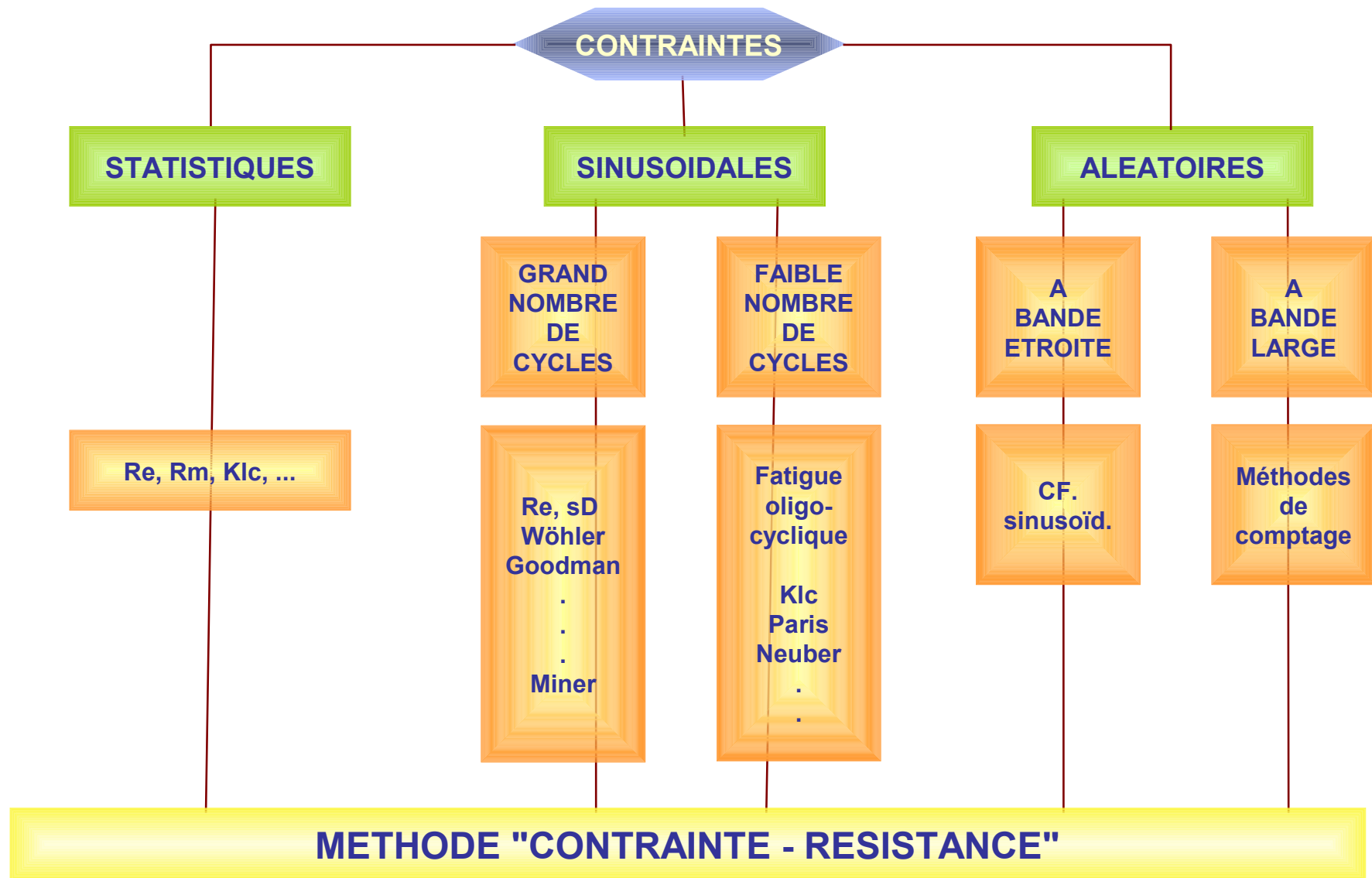
Évaluer la fiabilité d'une pièce mécanique soumise à des CONTRAINTES.

Cette fiabilité s'exprime par la **PROBABILITÉ** que,
sur l'ensemble de la mission,
la **CONTRAINTE** mécanique subie en tout point de la
pièce
reste **INFÉRIEURE À LA RÉSISTANCE** de la pièce..

LA METHODE "CONTRAINTE-RESISTANCE"

La méthode est fondée sur l'application des
TECHNIQUES DE CALCUL DE PIÈCES MÉCANIQUES
pour chaque type de contrainte subie :

- contraintes statiques,
- fatigue à grand nombre de cycles,
- fatigue oligocyclique,
- usure,
- ...

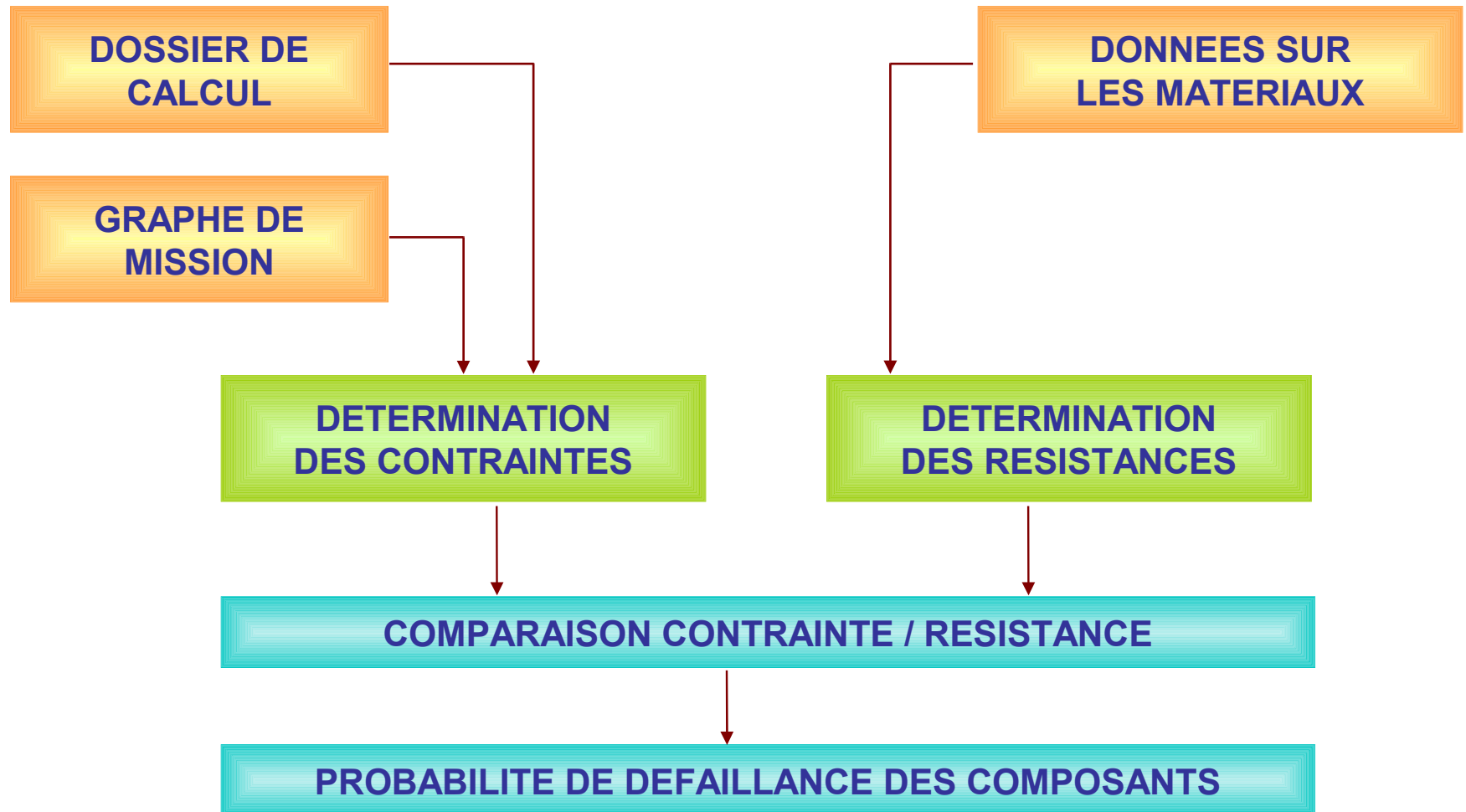


LA METHODE "CONTRAINTE-RESISTANCE"

La méthode consiste à décrire de manière **statistique**:

- le **cycle de contraintes appliquées**, en y intégrant autant que possible les contraintes « exceptionnelles » (pics de contraintes) et les **aléas** prévisibles liés à la mission,
- les **caractéristiques statistiques de résistance du matériau** correspondant à chaque type de contrainte appliquée (résistance à la rupture, limite élastique, limite de fatigue, facteur K de fissuration...), en prenant en compte les **aléas liés au matériau** (hétérogénéités, vieillissement, ..), **à la réalisation et au montage** de la pièce (usinage, traitements thermiques, assemblage, ...), **aux facteurs externes** (température, humidité, ...).

LA METHODE "CONTRAINTE-RESISTANCE"



CONTRAINTE ET RESISTANCE

VALEURS DE RESISTANCE A LA CONTRAINTE

Données nécessaire :

- limite d'élasticité
- charge à la rupture
- limite de fatigue
- module de Young, de Poisson
- K_t , q , etc ...

si possible
sous forme
distributionnelle

Sources :

- données fabricant
- travaux Tucson
- Metal Handbook (AMS)
- MIL HDBK 5B
- essais

FACTEURS DE SECURITE

- 1) $SF = \frac{US}{WS}$
 $WS = \text{CONTRAINTE DE TRAVAIL}$
 $US = \text{RESISTANCE MAXIMUM}$
- 2) $SF = \frac{MSL}{NSL}$
 $MSL = \text{CHARGE MAXIMUM}$
 $NSL = \text{CHARGE NORMALE}$
- 3) $SF = \frac{MS}{ML}$
 $MS = \text{RESISTANCE MOYENNE}$
 $ML = \text{CHARGE MOYENNE}$
- 4) $SF = \frac{YS}{WS}$
 $YS = \text{LIMITE ELASTIQUE}$
 $WS = \text{CONTRAINTE DE TRAVAIL}$

$$5) \quad SF = \frac{DS}{MNS}$$

DS = CONTRAINTE DE DOMMAGE (LIMITE DE FATIGUE)
MNS = CONTRAINTE MAXIMUM CONNUE

$$6) \quad FSg = F_{ol} \cdot F_{ld} \cdot F_{su}$$

FSg = APPLICABLE AUX ENGRENAGES
Fol = CORRECTION DE SURCHARGE
Fld = CORRECTION DE DISTRIBUTION DE CHARGE
Fsu = FACTEUR DE SECURITE USUEL

$$7) \quad FS = \pi^3 \prod_{i=1}^3 f_i$$

f₁ = FACTEUR DE CHOC
f₂ = FACTEUR D'ELASTICITE
f₃ = MARGE REELLE DE SECURITE

$$f1 + \frac{S_{sh}}{S_g} = \frac{\text{Contrainte générée par le choc}}{\text{Contrainte normale}}$$

$$f2 + \frac{US}{EL} = \frac{\text{Résistance maximum}}{\text{Limite élastique}}$$

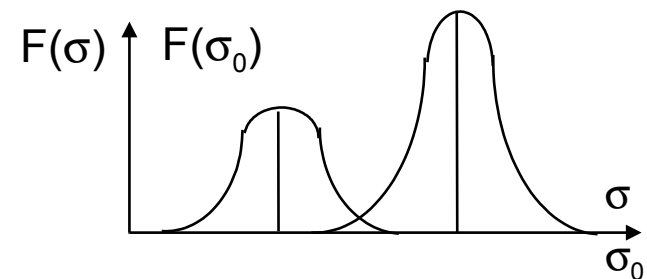
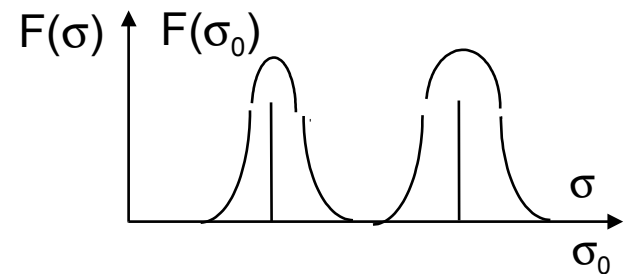
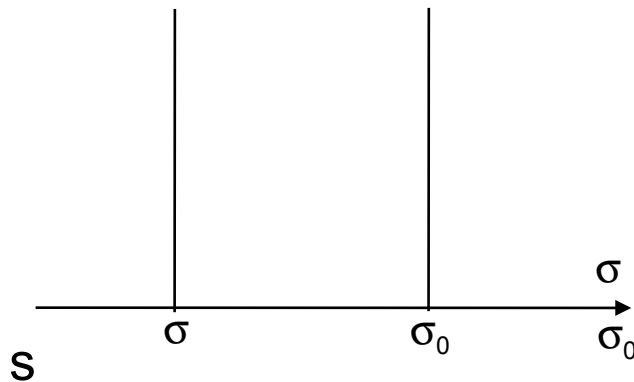
FIABILITE EN MECANIQUE

ASPECTS DETERMINISTES - ASPECTS PROBABILISTES

Contrainte appliquée
 σ $F(\sigma)$

Résistance à la contrainte
 σ_0 $F(\sigma_0)$

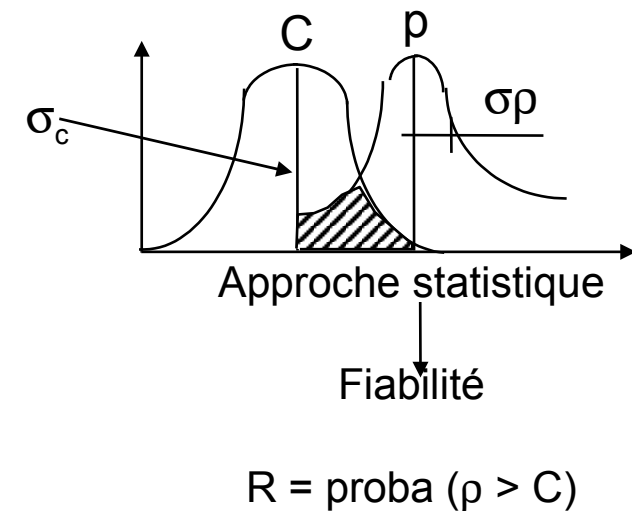
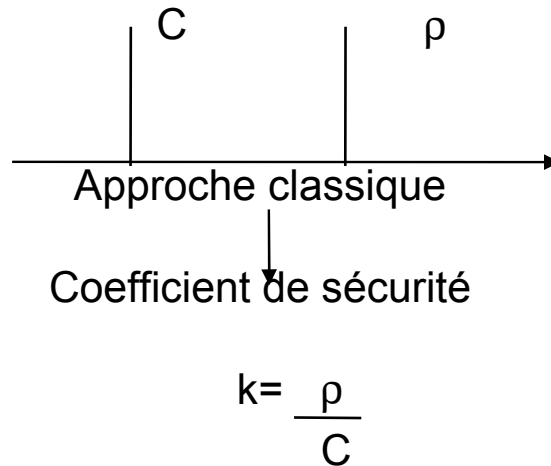
Facteur de sécurité $S = \frac{\sigma_0}{\sigma}$



COMPARAISON "CONTRAINTE ET RESISTANCE"

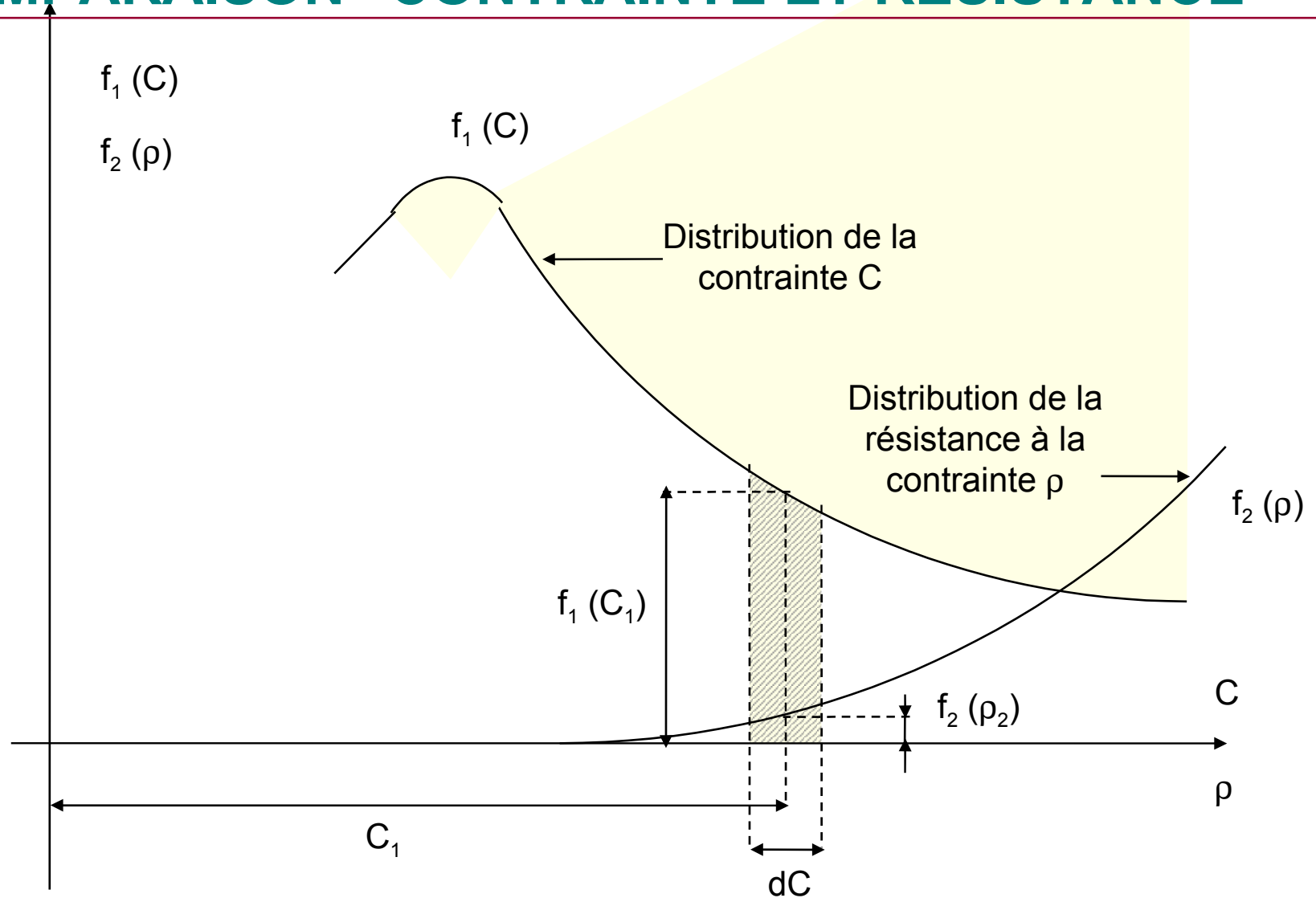
Entrées : Contrainte C et résistance par composant
Loi de survie et réparation résistance

Sorties : Loi de fiabilité du composant



Outils : Algèbre des V.A.
Simulation de Monte-Carlo
Méthode R / C
Transformée de Mellin
Dérivées partielles

COMPARAISON "CONTRAINTE ET RESISTANCE"



COMPARAISON "CONTRAINTE ET RESISTANCE"

La probabilité d'une contrainte C_1 est égale à la surface de l'élément différentiel dC , soit :

$$\text{Prob} \left\{ C_1 - \frac{dC}{2} \leq C_1 \leq C_1 + \frac{dC}{2} \right\} = f_1(C_1) dC$$

La probabilité d'une résistance à la contrainte p supérieure à C_1 est :

$$\text{Prob}(p > C_1) = \int_{C_1}^{\infty} f_2(p) dp$$

La probabilité d'avoir une contrainte C , et d'y résister est donc le produit des deux possibilités, c'est la fiabilité relative à la possibilité d'une contrainte C_1 , soit :

$$dR = f_1(C_1) dC \int_{C_1}^{\infty} f_2(p) dp$$

La fiabilité est la probabilité que la résistance à la contrainte p soit supérieure à toutes valeurs possibles de C , soit :

$$R = \int_{-\infty}^{+\infty} dR = \int_{-\infty}^{+\infty} f_1(C) \left(\int_{-\infty}^{+\infty} f_2(p) dp \right) dC$$

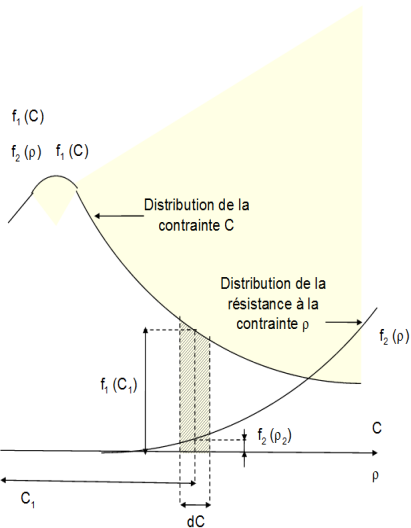
$$R = \int_{-\infty}^{+\infty} f_1(C) \left(\int_C^{+\infty} f_2(p) dp \right) dC$$

On aurait pu raisonner de la même façon en considérant une résistance à la contrainte p_2 et la probabilité que la contrainte appliquée doit inférieure.

On aurait alors :

$$dR = f_2(p_2) dp \int_{-\infty}^{p_2} f_1(C) dC, \text{ soit:}$$

$$R = \int_{-\infty}^{+\infty} f_2(p) \left(\int_C^p f_1(C) dC \right) dp$$



"CONTRAINTE ET RESISTANCE" : « CAS D'ÉCOLE »

contrainte C et résistance ρ sont distribuées selon des LOIS NORMALES de caractéristiques respectives

$$(\mu_C ; \sigma_C) \text{ et } (\mu_\rho ; \sigma_\rho),$$

la variable $X = \rho - C$ suit une loi normale

$$\text{de moyenne } (\mu_X = \mu_\rho - \mu_C)$$

$$\text{de variance } (\sigma_X^2 = \sigma_\rho^2 + \sigma_C^2).$$

Au delà du coefficient de sécurité $k = \mu_C / \mu_\rho$
on peut alors calculer la fiabilité de la pièce:

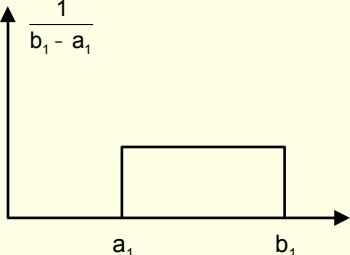
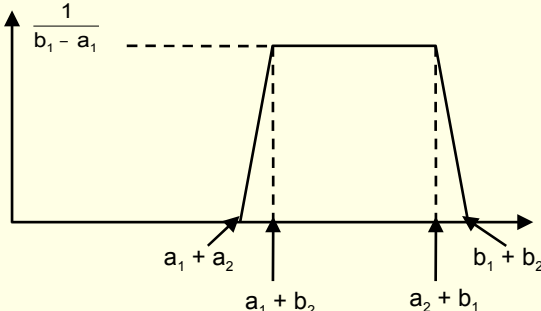
$$R = \text{Prob}(X > 0).$$

"CONTRAINTE ET RESISTANCE" : AUTRES CAS

il est nécessaire de faire appel à des techniques statistiques plus élaborées pour comparer contrainte et résistance :

- algèbre des variables aléatoires,
- simulation de Monte Carlo,
- transformées de Mellin,
- méthodes d'approximation
(FORM/SORM – First / Second Order Reliability Methods).

AUTRES TRANSFORMATIONS

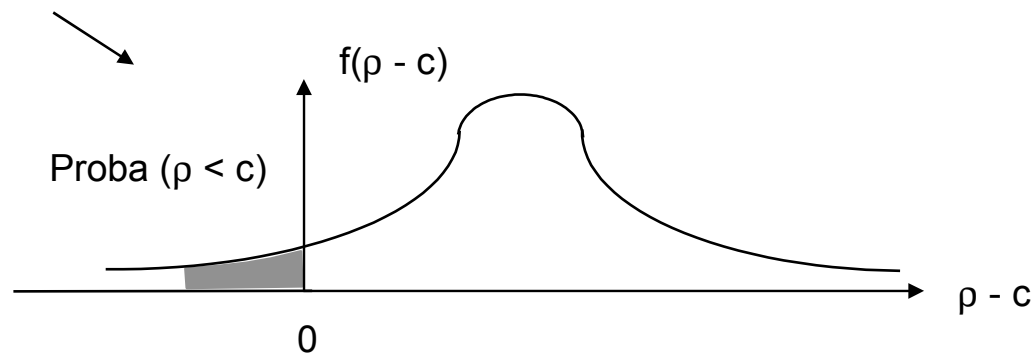
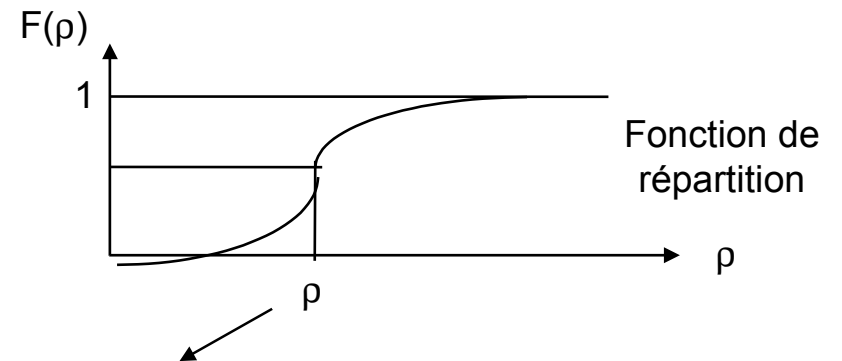
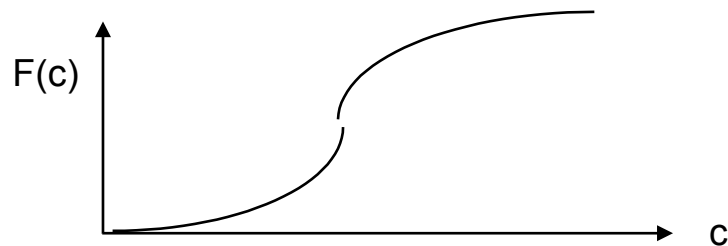
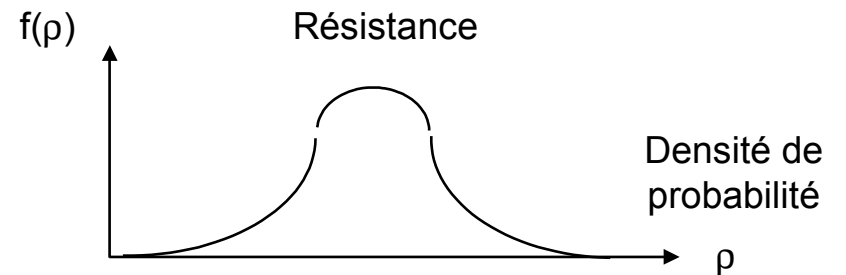
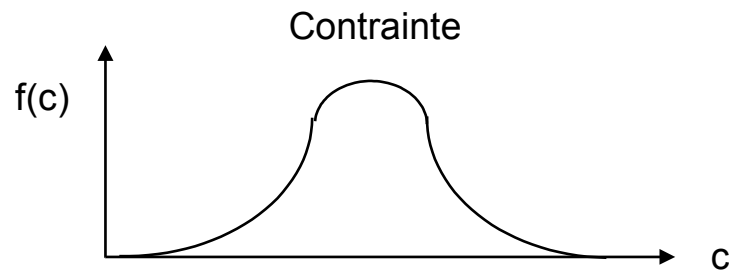
Transf. z	Distributions d'origine	Distributions finale
$Z = X_1 + X_2 \dots X_n$	Toute normales suivant $N(u_i, \sigma_i)$	Normales suivant : $N\left(\sum_i u_i, \sqrt{\sum_i \sigma_i^2}\right)$
$Z = X_1 + X_2$	Uniformes dans (a_1, b_1) et (a_2, b_2) 	$u_z = \frac{a_1 + a_2 + b_1 + b_2}{2}$ $\sigma_z^2 = \frac{(b_1 + a_1)^2 + (b_2 - a_2)^2}{12}$ Distribution trapézoïdale Soit $(b_1 - a_1) < (b_2 - a_2)$ on obtient : 
$Z = X_1 + X_2 \dots X_n$	Distributions exponentielles indépendantes de même paramètres β	Distributions Gamma $f(Z) = \frac{1}{\beta^{\alpha+1} \Gamma(\alpha+1)} Z^{\alpha} e^{-Z/\beta}$ avec $\alpha = n - 1$
$Z = X_1 + X_2 \dots X_n$	Distributions Gamma de même β et de paramètres $a_1, a_2 \dots a_n$	Distributions Gamma de même β et $\alpha = a_1 + a_2 + \dots a_n + (n - 1)$

MOYENNES ET DISPERSIONS DE FONCTIONS DE VARIABLES ALEATOIRES

Z	U_Z	$V(Z) = \sigma_Z^2$	Observations
a X	a U_X	$a^2 \sigma_X^2$	a = constante
X + a	$U_X + a$	σ_X^2	a = constante
X - Y	$U_X - U_Y$	$\sigma_X^2 + \sigma_Y^2 + 2 r \sigma_X \sigma_Y$	V.A. dépendantes
		$\sigma_X^2 + \sigma_Y^2$	V.A. indépendantes
X . Y	$U_X U_Y + r \sigma_X \sigma_Y$ $U_X U_Y$	$U_X^2 \sigma_Y^2 + U_Y^2 \sigma_X^2 + \sigma_X^2 \sigma_Y^2 + r^2 \sigma_X^2 \sigma_Y^2 + 2 r U_X . U_Y \sigma_X \sigma_Y$ $U_X^2 \sigma_Y^2 + U_Y^2 \sigma_X^2 + \sigma_X^2 \sigma_Y^2$	V.A. dépendantes Normales V.A. indépendantes Normales
X^2	$U_X^2 + \sigma_X^2$	$4 U_X^2 \sigma_X^2 + 2 \sigma_X^4$	
X / Y	U_X / U_Y $(U_X / U_Y) + (U_X \sigma_Y / U_Y^2)(r \sigma_X \sigma_Y / U_X U_Y)$	$U_X^2 \sigma_Y^2 + U_Y^2 \sigma_X^2 / U_Y^4$ $U_X^2 / U_Y^2 (\sigma_X^2 / U_X^2 + \sigma_Y^2 / U_Y^2 - 2 r \sigma_X \sigma_Y / U_X U_Y)$	V.A. dépendantes Formules très approchées V.A. indépendantes Formules très approchées
$X^{1/2}$	$(U_X^2 - \sigma_X^2 / 2)^{1/4}$	$U_X - (2 / \sigma_X - \sigma_X^2 / 2)^{1/2}$	
$\prod_{i=1}^n X_i$	$\prod_{i=1}^n U_{X_i}$	$\prod_{i=1}^n (U_{X_i}^2 + \sigma_{X_i}^2) - \prod_{i=1}^n U_{X_i}^2$	V.A. indépendantes

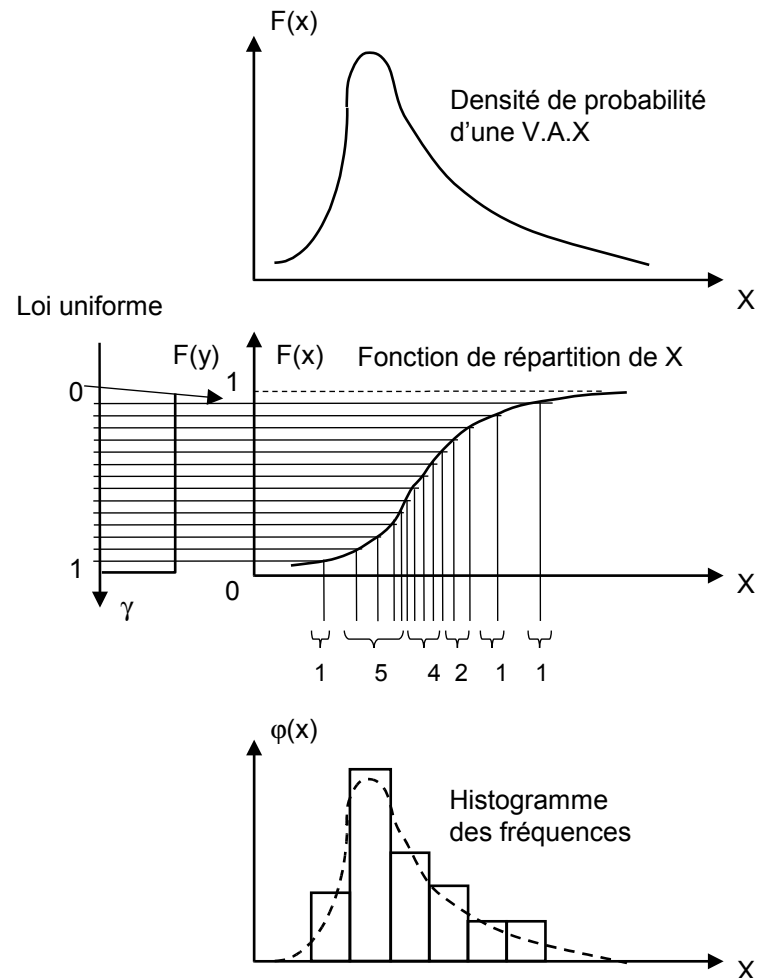
Comparaison contrainte/résistance

Méthode de simulation de Monte-Carlo



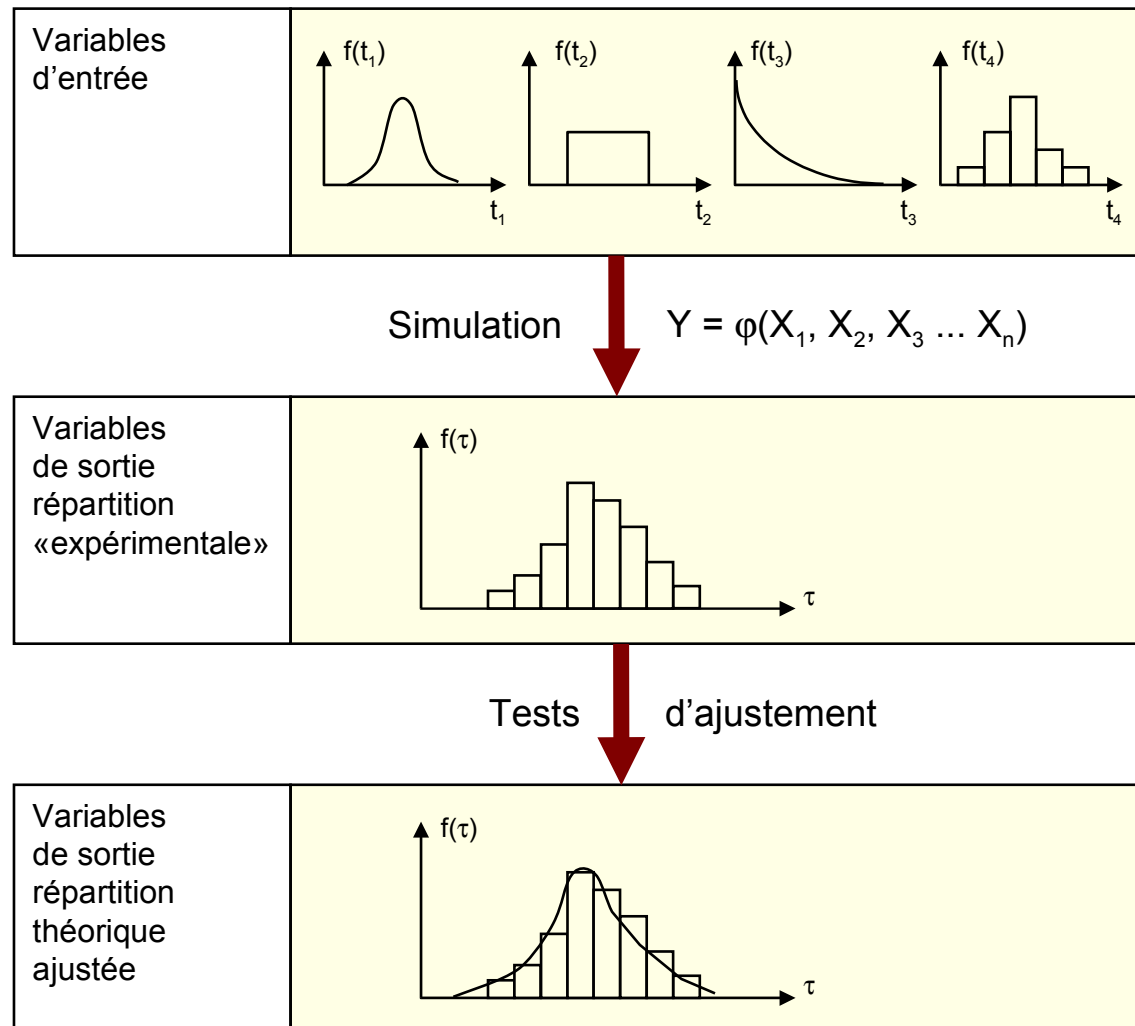
GENERATIONS DES VARIABLES ALEATOIRES

$X = \text{V.A.}$, fonction de répartition ($F(x) = \text{Prob} [X \leq x] \rightarrow Z = F(X) = \text{V.A.}$ uniforme sur $[0,1]$
car $F(z) = \text{Prob} [Z \leq z] = \text{Prob} [F(X) \leq F(x)] = \text{Prob} [X \leq x] = z$
si $Y = \text{V.A.}$ uniforme sur $[0,1]$ $x_i = F^{-1}(y_i)$ suit la loi de fonction de répartition F .

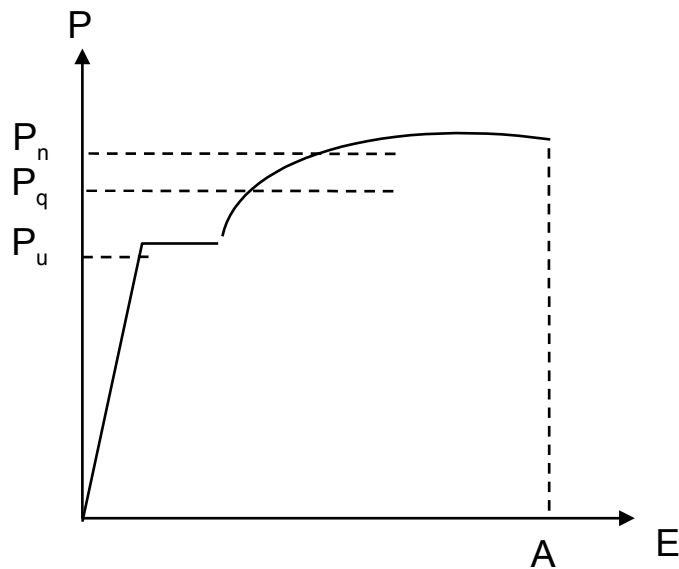


Comparaison contrainte/résistance

Méthode de simulation de Monte-Carlo



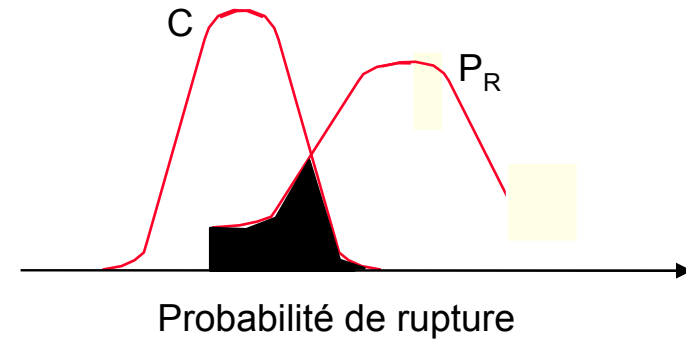
CONTRAINTE ET RESISTANCE LES CONTRAINTES STATIQUES



Incertitudes sur
la contrainte C

Incertitudes sur la résistance P

- Environnement
- Tolérances de montage d'usinage
- Traitements thermiques
- Hétérogénéités
- Etc.



CONTRAINTE ET RESISTANCE

LES CONTRAINTES DE FATIGUE

Matériau soumis à des cycles de contrainte



création et progression de fissures amorcées
aux défauts de la matière (pailles, soufflures, ...)



Fragilisation, "fatigue"

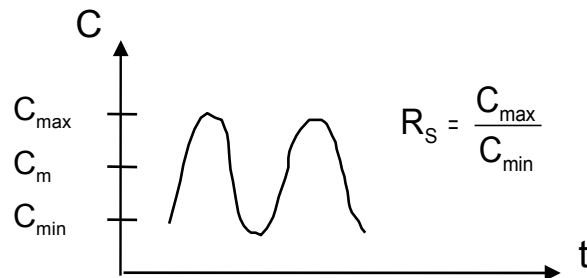
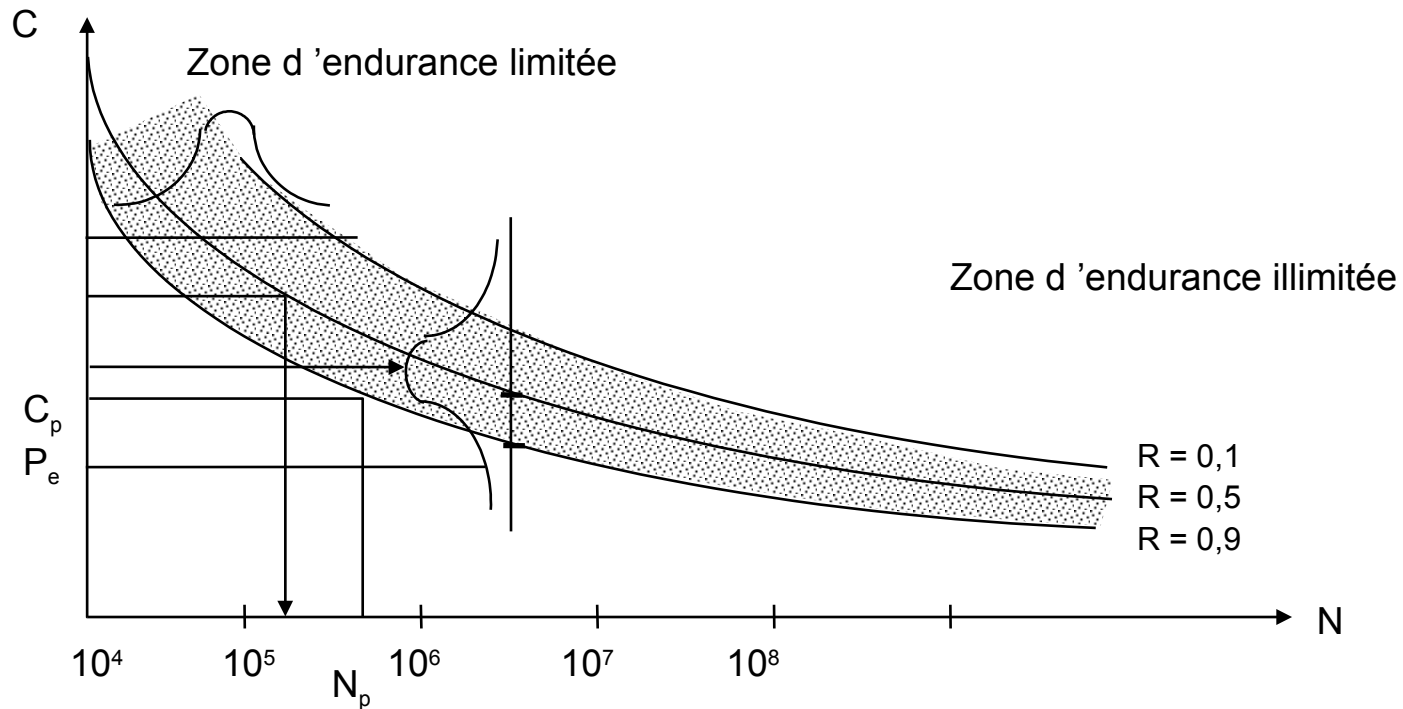


rupture au bout d'un certain nombre de cycles
pour des contraintes $<$ limite d'élasticité

ESSAIS DE FATIGUE

Éprouvettes soumises à des efforts cycliques
au niveau C_i Rupture à N_i cycles
Courbes d'endurance
(S.N)

CONTRAINTE ET RESISTANCE COURBE D'ENDURANCE



Sollicitation

- alternées $R_{sx} = 1$
- répétées $R_s = \begin{cases} 0 \\ \infty \end{cases}$
- ondulées $C_m \neq 0$

CONTRAINTE ET RESISTANCE COURBE D'ENDURANCE

BASTENAIRE

Zone	Endurance	Interm	Élevées
Distribution N	1/N Normale censurée	Interm	Log N Normale
Courbes	1/N f de (c - pe)	$C - p_e = A (N+B)^m$	Log N f(linéaire) de c
Distribution C	Normale	Normale	Normale

CONTRAINTE ET RESISTANCE COURBE D'ENDURANCE

Expression de la courbe de Wohler

$$N = K(c - \rho_e)^n \quad \text{Weibull}$$

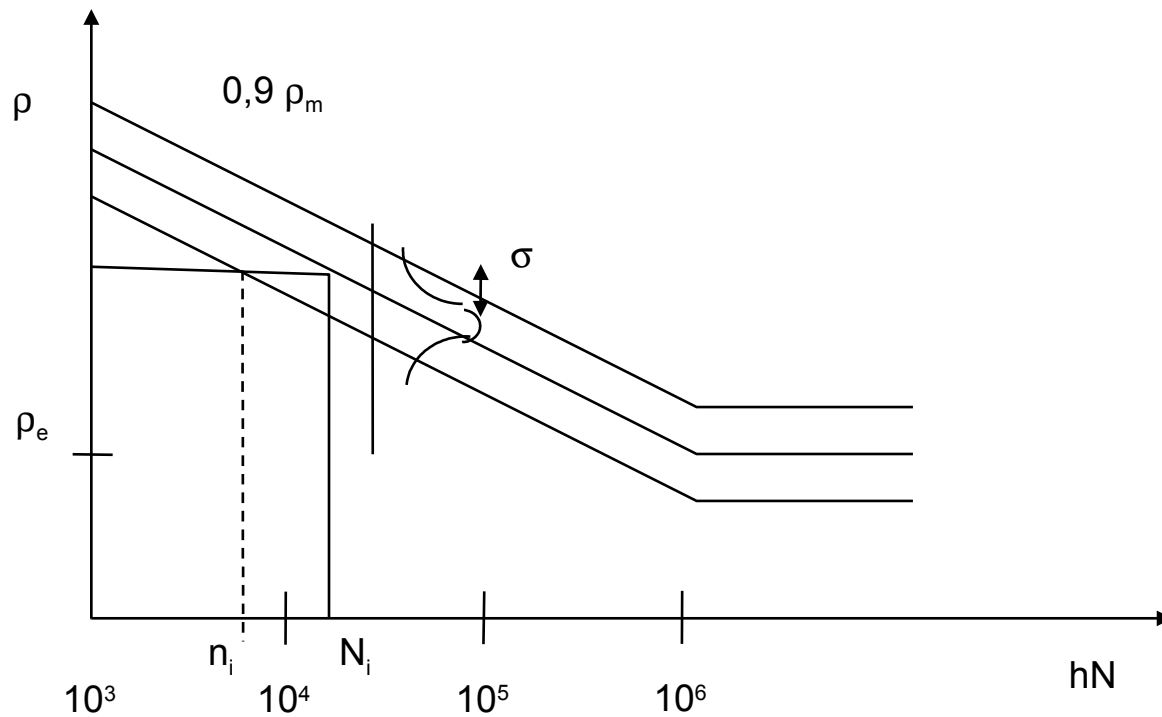
$$\text{Log } N = a - bc \quad \text{Wohler}$$

$$\text{Log } N = a - b \text{ Log } C \quad \text{Basquin}$$

$$\text{Log } N = a - b \text{ Log}(c - \rho_e) \quad \text{Stromeyer}$$

$$N1 = \frac{A}{c - \rho_e} e^{-(c_1 - \rho_e)} \quad \text{Bastenaire}$$

CONTRAINTE ET RESISTANCE COURBE D'ENDURANCE



Butot - Lieurade

$$\rho'_e = 0,41 \rho_m + 2A \text{ (N/mn}^2\text{)}$$

$$\sigma \approx 0,08 \rho'_e$$

$$\rho_e = K_a \cdot K_b \cdot K_c \dots \rho'_e$$



Éprouvette lisse en flexion rotative

CONTRAINTE ET RESISTANCE LIMITE D'ENDURANCE

$$p_e = K_a.K_b.K_c.K_d.K_e \dots p'_e$$

p'_e = limite d'endurance sur éprouvette lisse

K_a = effet d'échelle $K_a = 1$ $1 < 7,5 \text{ mm}$

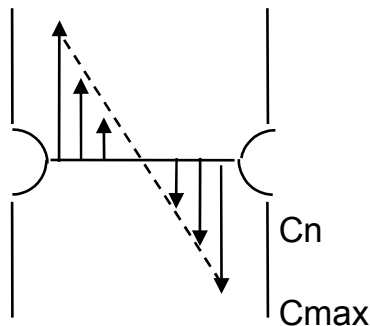
$0,95$ $7,5 < d < 50$

$0,75$ $d > 50 \text{ mm}$

K_b = effet de surface

K_c = effet de température

K_e = effet d'entaille

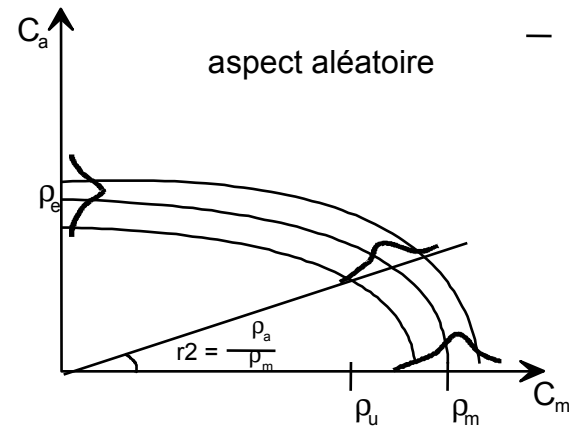
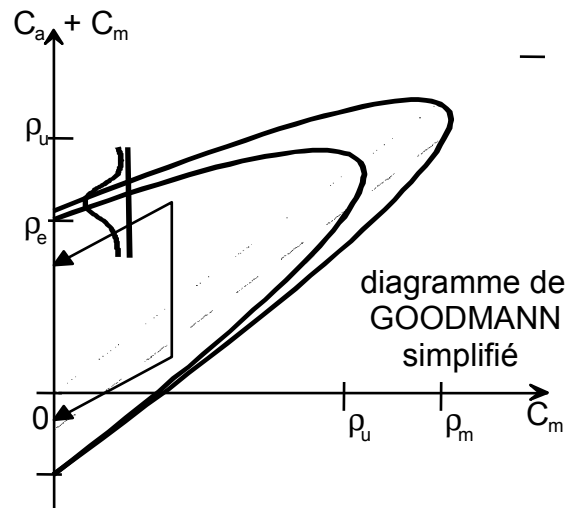
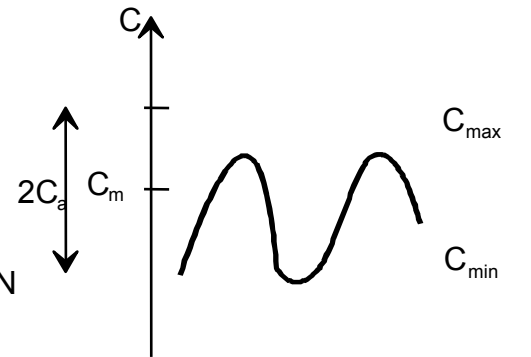
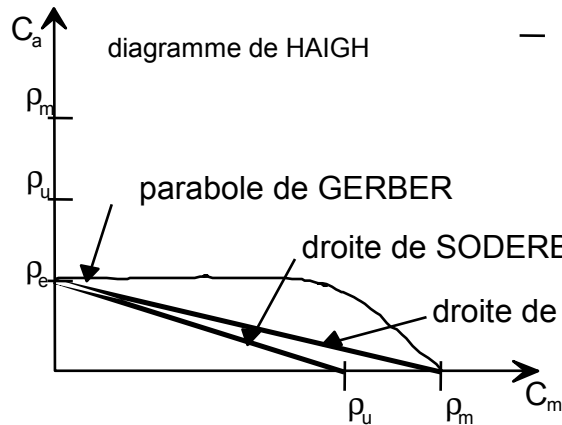


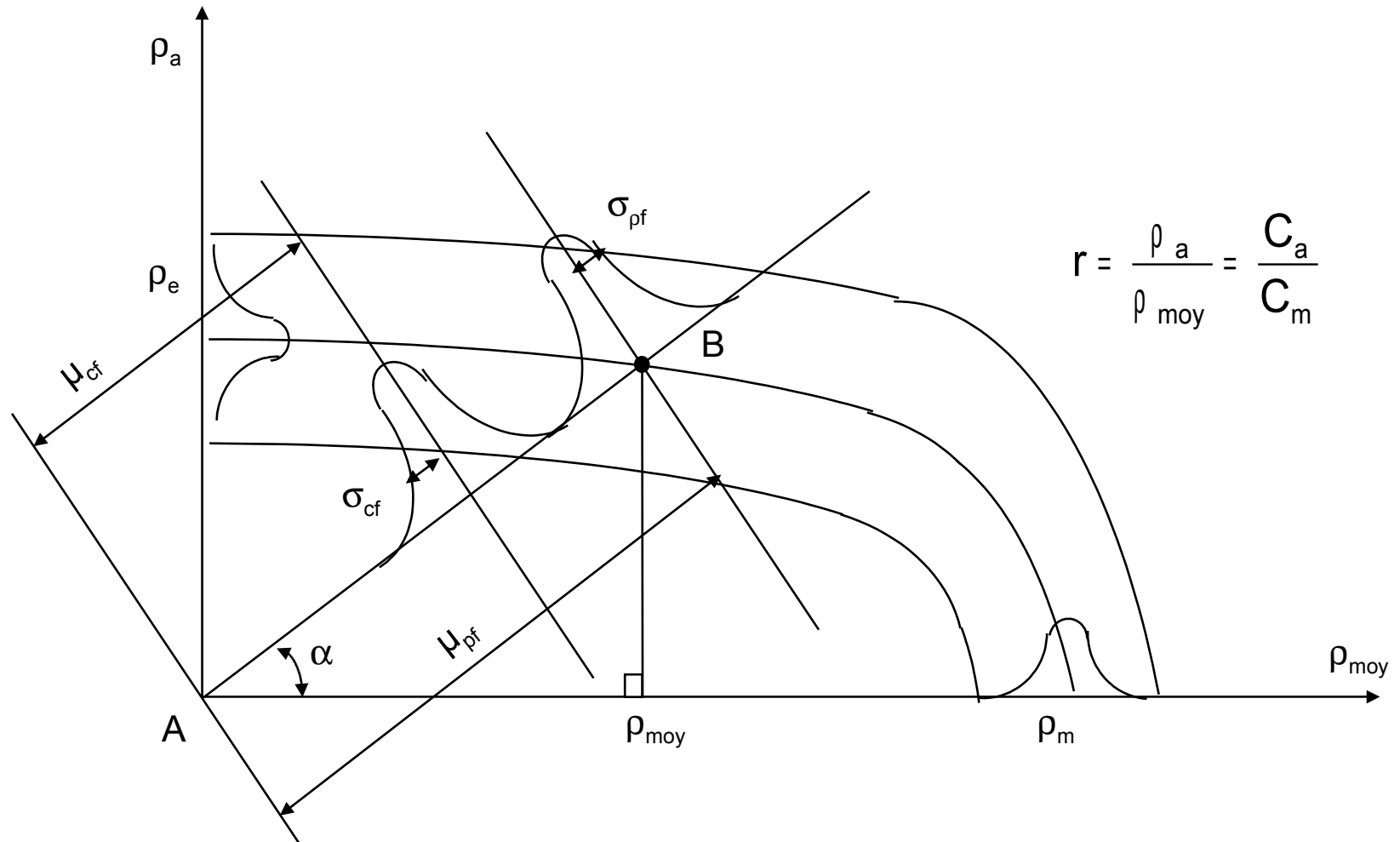
$$K_t = \frac{C_{\max}}{C_n} \quad \begin{array}{l} \text{(concentration de contraintes)} \\ \text{(NEUBER)} \end{array}$$

$$K_n = \frac{p_e}{p_{en}} \quad f = \frac{K_n - 1}{K_t - 1}$$

K_r = effets divers (corrosion, radiations....) $K_e = 1 / K_n$

FATIGUE DIAGRAMMES DIVERS





CRITERES DE RUPTURE

Saint Venant

σ_e = traction

σ_e = compression

σ_e = cisssion

Comp \longrightarrow $\sigma'_e = \frac{\sigma_e}{\nu}$

Cis. \longrightarrow $\tau_e = \frac{\sigma_e}{1 + \nu}$

Coulomb Tresca

Comp \longrightarrow $\sigma'_e = \sigma_e$

Cis. \longrightarrow $\tau_e = \frac{\sigma_e}{2}$

Rankine

Cis. \longrightarrow $\tau_e = \sigma_e$

Von Mises

Comp \longrightarrow $\sigma'_e = \sigma_e$

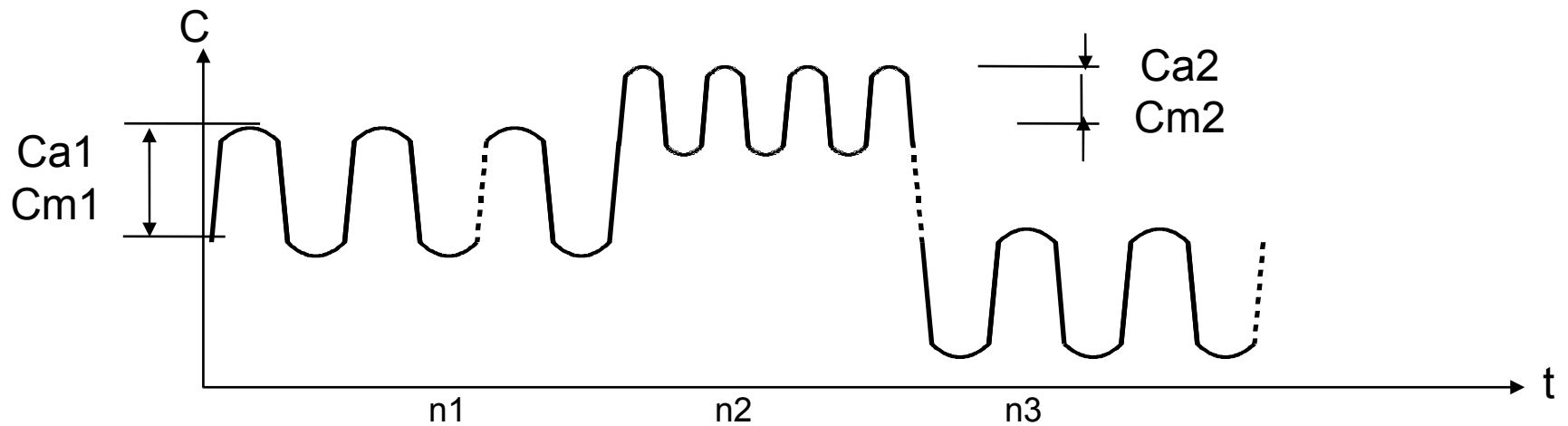
Cis. \longrightarrow $\tau_e = \frac{\sigma_e}{\sqrt{3}}$

Torre Stassi

Bahuaud - Dang Van

Cis. \longrightarrow $\tau_e = \sqrt{\frac{\sigma_e \sigma_e}{3}}$

CAS DES CONTRAINTES SINUSOIDALES



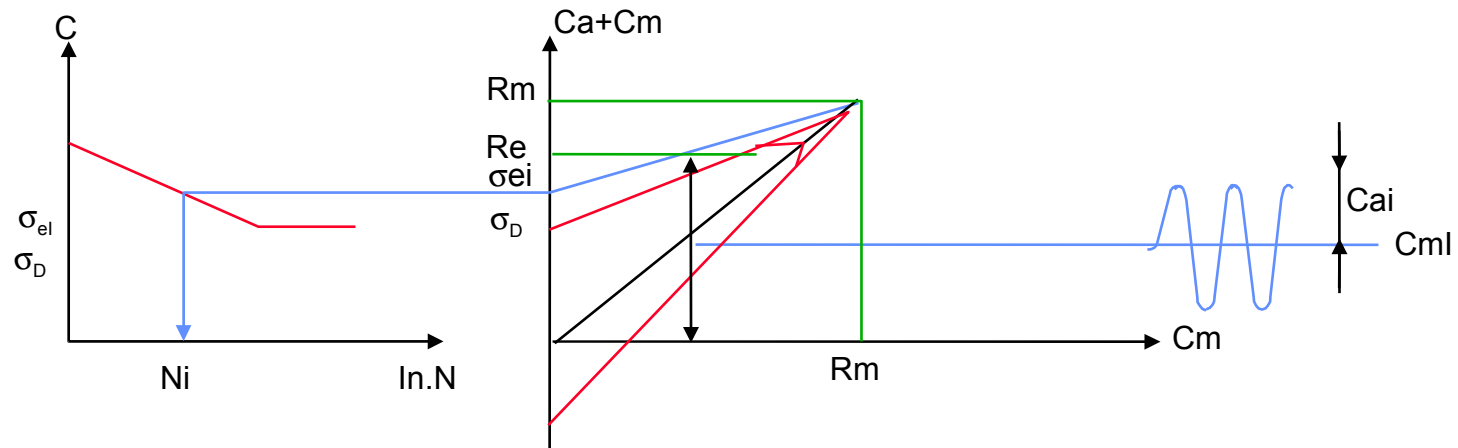
- 1 TRANSFORMER LES CONTRAINTES COMBINEES EN CONTRAINTE UNIAXIALE

Critères de	Saint Vénant Tresca Von Misés Dang.Van	(traction maxi) (cisaillement maxi) (énergie de distorsion maxi)
-------------	---	--

- 2 TRANSFORMER CHAQUE NIVEAU DE CONTRAINTES A MOYENNE NON NULLE EN CONTRAINTE EQUIVALENTE A MOYENNE NULLE

Diagrammes de	Goodmann Haigh
---------------	-------------------

3 CALCULER LE NOMBRE DE CYCLES LIMITE A PARTIR DE LA COURBE DE WOHLER DU MATERIAU



4 CALCUL DU DOMMAGE CUMULE

Loi de MINER $d = \sum$

$$\frac{n_i}{N_i}$$

Loi de HENRY $d = \sum$

$$\left[\frac{n_i}{N_i} \left(1 + \left(1 - \frac{n_i}{N_i} \right) \right) \right]$$

5 COMPARAISON AU DOMMAGE LIMITE (I)

LE DOMMAGE

C1 \Rightarrow Dommage indépendant des niveaux de chargement : MINER

C2 \Rightarrow Dommage dépendant des niveaux de chargement : SHANLEY, VALURI, ...

C3 \Rightarrow Dommage avec interaction : CORTEN-DOLAN

LE DOMMAGE

MINER $D = \sum \frac{n_i}{N_i} = 1$

- ne tient pas compte de l'effet d'ordre d'application
- pas d'effet pour un niveau inférieur à la limite d'endurance

HENRY $D = \frac{n}{N} \left[1 + \alpha \left(1 - \frac{n}{N} \right) \right]$ $\alpha = \rho_e (C - \rho_e)$

SHANLEY $D = \text{EXP} \left(- \frac{1}{K_1 K_2} \sigma N (1 - \beta) \right)$ 3 paramètres (K1, K2, X)
données par 3 points
de la courbe de Wohler

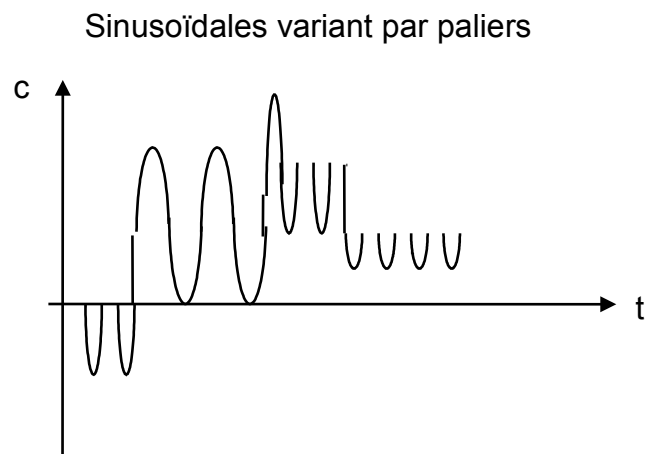
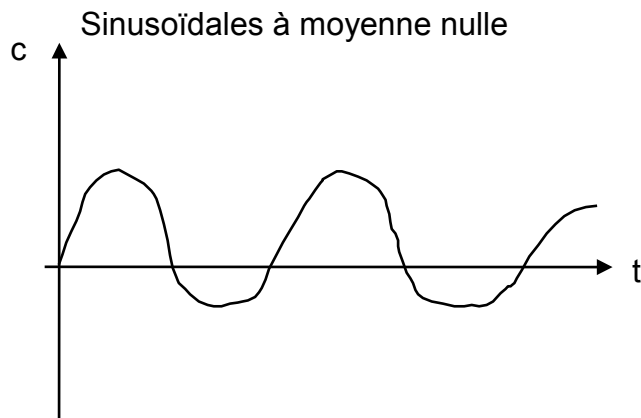
Cette loi donne :

- une vie plus courte que MINER pour des niveaux décroissants
- une vie plus longue que MINER pour des niveaux croissants

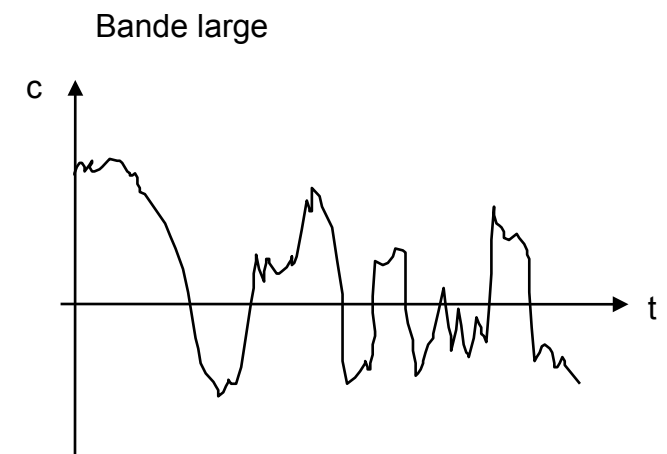
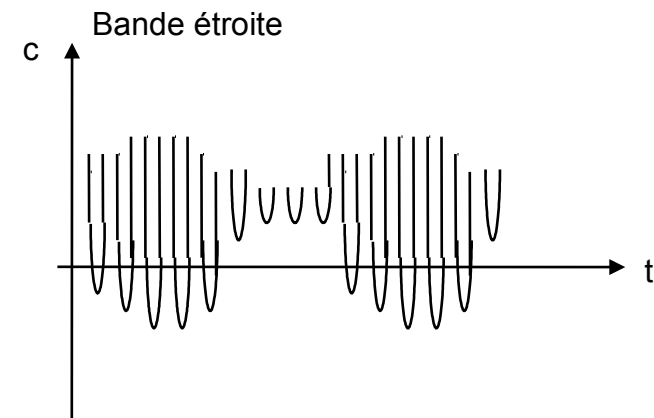
CORTEN et DOLAN $N_g = \frac{N_1}{\alpha_1 + \alpha_2 \left(\frac{C^2}{C^1} \right)^d + \alpha_3 \left(\frac{C^3}{C^1} \right)^d + \dots}$

FIABILITE EN FONCTION DU NOMBRE DE CYCLES

DETERMINISTES



ALEATOIRES



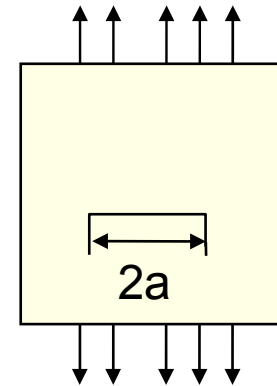
CAS DES PIÈCES FISSURÉES

Application de la mécanique de la rupture

État de contraintes du voisinage de la fissure caractérisé par

$$K_I = \alpha \sigma \sqrt{2\pi a}$$

$$\sigma_{tj} = K_I \frac{f_{l,j}(0)}{\sqrt{2\pi r}}$$



Valeur critique du matériau K_{IC}

Vitesse de propagation de la fissure : $\frac{da}{dN} = c(\Delta K)^m$ (loi de Paris)

Application à la fiabilité

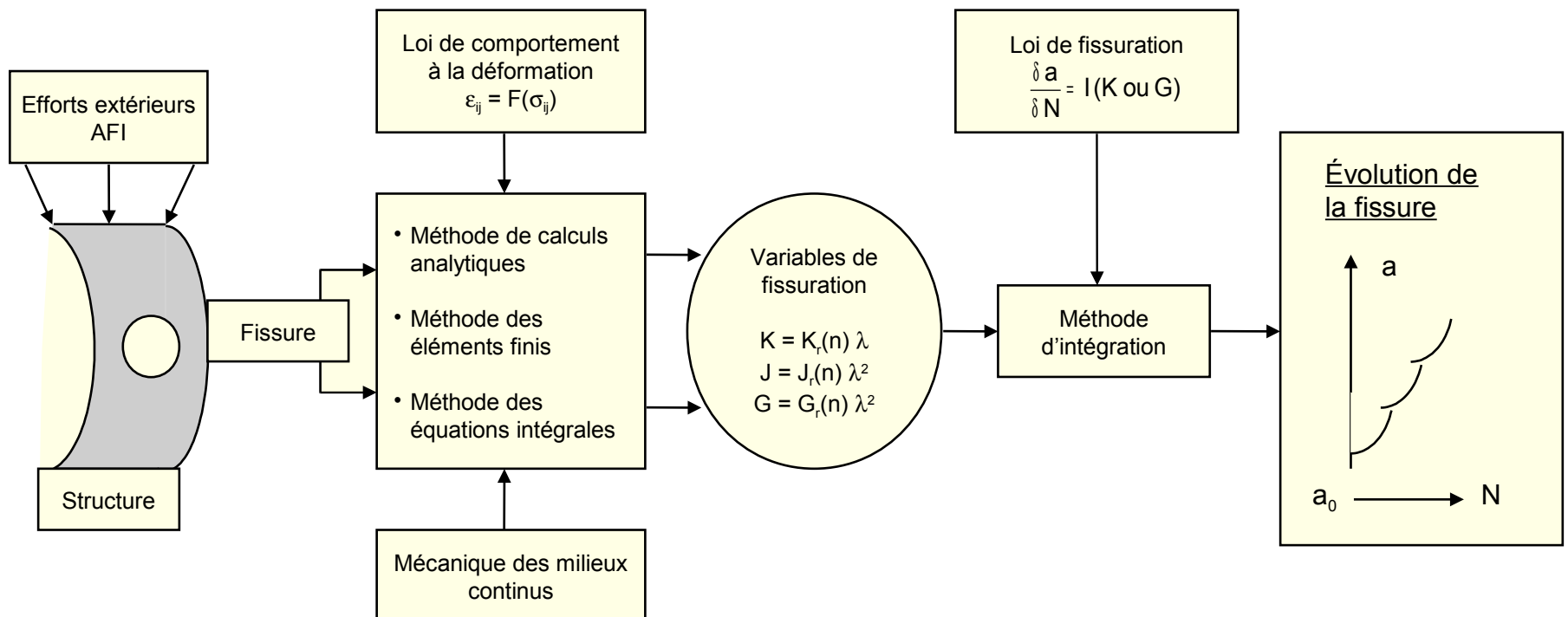
Nombre de cycles à rupture

$$N_f = \left[a_o^{\frac{m}{2}-1} \cdot A \cdot C \cdot \alpha^m \cdot \Delta C^m \right]^{-1}$$

CAS DES PIÈCES FISSURÉES

Application de la mécanique de la rupture

Organigramme d'un problème de prévision d'évolution de fissure



DOMMAGE SOUS CHARGE ALEATOIRE

$$C_{eq} = \left[\frac{1}{\sigma_e^2} \int_0^\infty C_i^{\alpha+1} e^{-\frac{C_i}{\sigma_e}} dc_i \right]$$

$$E[D] = \frac{N_0 T}{2K} \cdot (\sqrt{2\sigma})^\alpha \Gamma\left(1 + \frac{\alpha}{2}\right)$$

$$\sigma[D]^2 = \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 + 2 \sum_{\substack{i,j \\ i \neq j}}^n \rho_{ij} \sigma_{di} \sigma_{dj}$$

N_0 = Nombre moyen par unité de temps de passage à zéro du signal

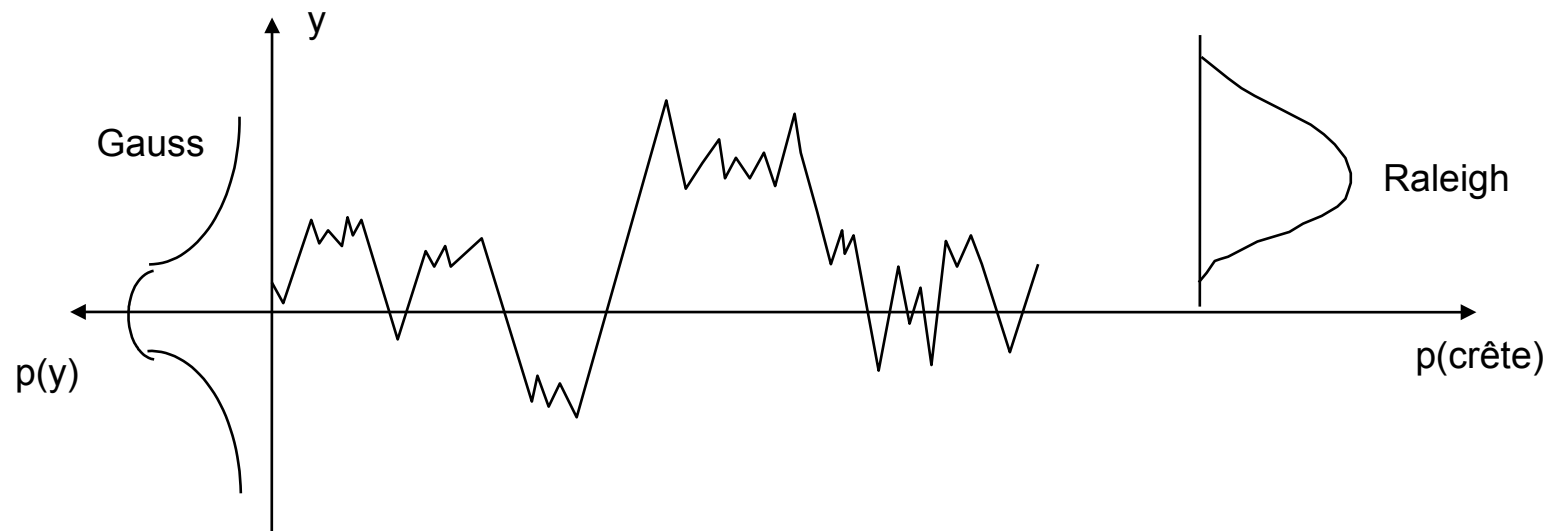
CAS DES CONTRAINTES ALEATOIRES A BANDE ETROITE

$$d = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{n(\sigma)}{N(\sigma)} d\sigma$$

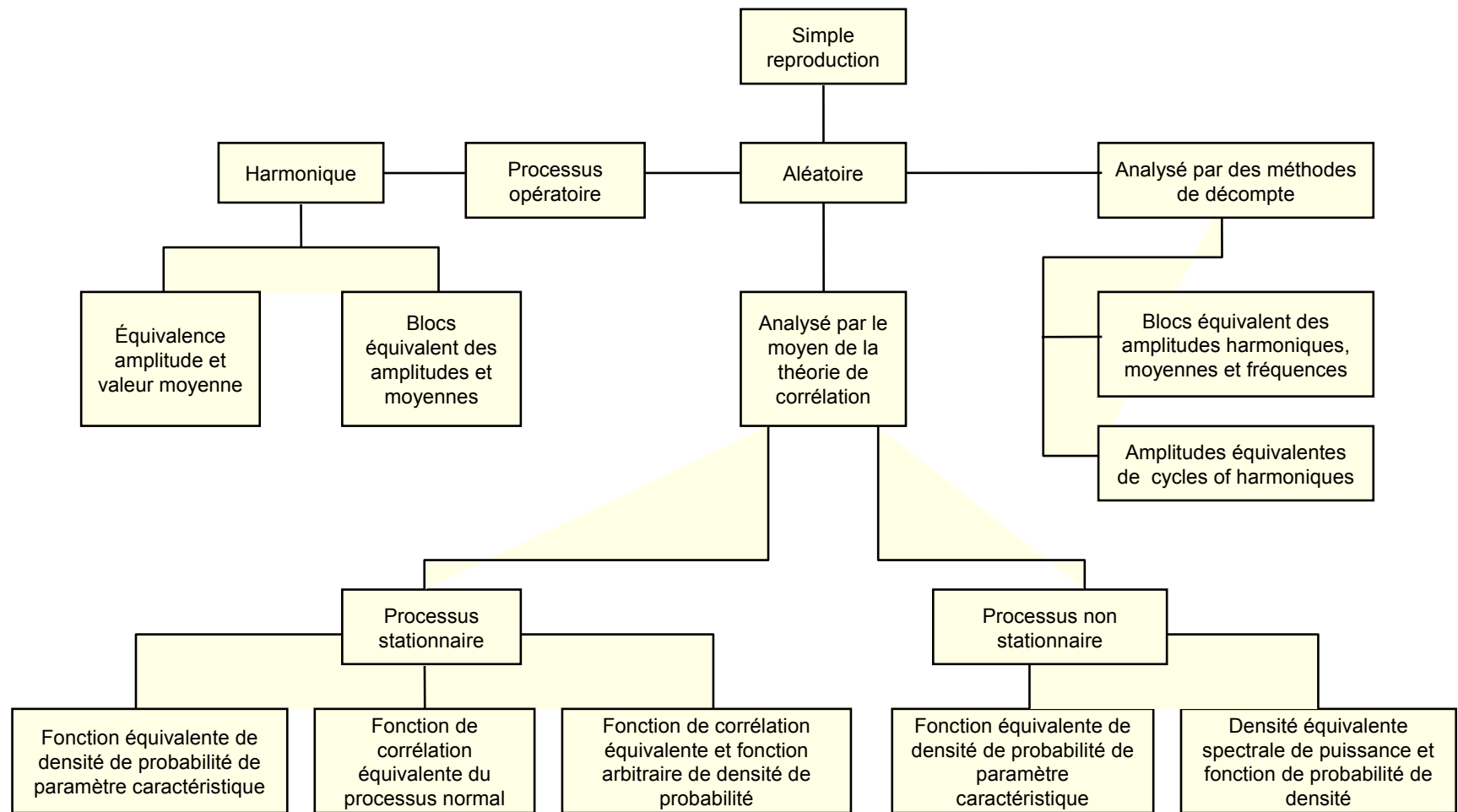
CAS DES CONTRAINTES ALEATOIRES A BANDE LARGE

Méthodes de comptage, par exemple

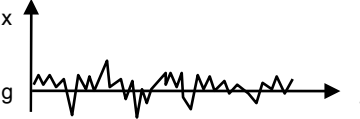
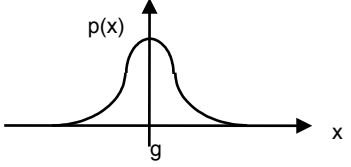
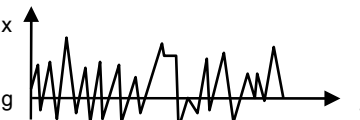
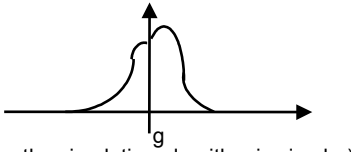
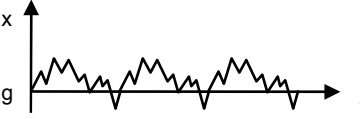
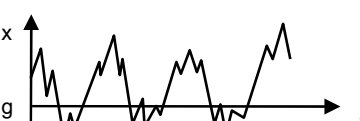
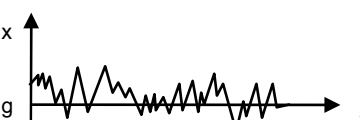
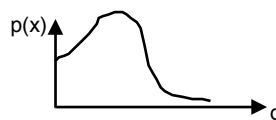
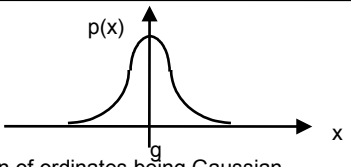

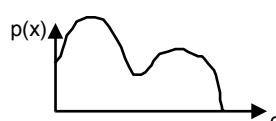
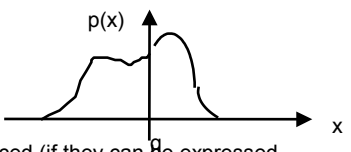
- comptage des pics
- comptage des cycles moyens



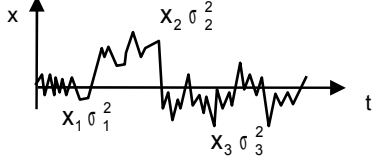
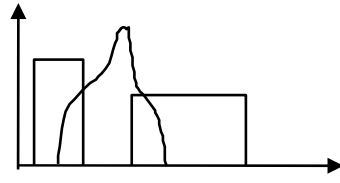
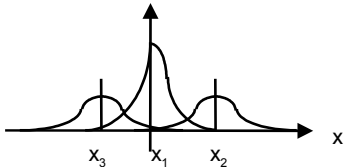

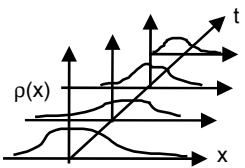
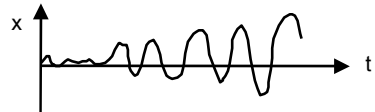
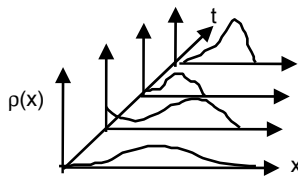
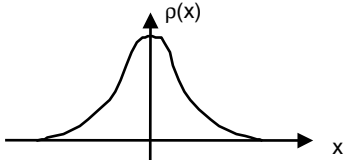
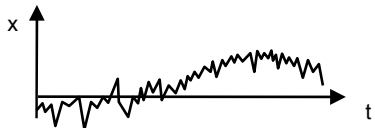
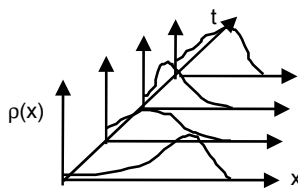
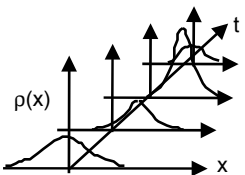

POSSIBILITES DE SIMULATION DU PROCESSUS OPERATOIRE ALEATOIRE



VARIOUS POSSIBILITIES FOR SIMULATING RANDOM PROCESSES ON THE BASIS OF CORRELATION THEORY CHARACTERISTICS

Type of process	Example of simulated process	Power spectral density	Probability density function of ordinates
Stationary Gaussian (with Gaussian probability density function)	 <p>From all statistical characteristics only the Gaussian probability density function is reproduced</p>	Not simulated	
Stationary with an arbitrary probability density function	 <p>From all statistical characteristics only the probability density function is reproduced (if it has an analytical form, the simulation algorithm is simpler)</p>	Not simulated	
Stationary Gaussian (with Gaussian probability density function)	 <p>From all statistical characteristics only the transition probability density matrix, characterizing transitions between two or more successive ordinates, is reproduced</p>	Not simulated	Not simulated
Stationary with an arbitrary probability density function of peaks	 <p>From all statistical characteristics only the probability density function of local peaks (envelopes) is reproduced</p>	Not simulated	Not simulated
Stationary Gaussian with an arbitrary power spectral density	 <p>From all statistical characteristics only the power spectral density is reproduced the probability density function of ordinates being Gaussian</p>		
Stationary with an arbitrary power spectral density and an arbitrary probability density function	 <p>From all statistical characteristics both the power spectral density and probability density function are reproduced (if they can be expressed analytically the simulation algorithm is simpler)</p>		

VARIOUS POSSIBILITIES FOR SIMULATING RANDOM PROCESSES ON THE BASIS OF CORRELATION THEORY CHARACTERISTICS

Type of process	Example of simulated process	Power spectral density	Probability density function of ordinates
Part-by-part stationary	 <p>Individual partial stationary sections of a non-stationary process are simulated according to previous algorithms (simulation of $\rho(x)$ or $S(a)$ or both of them)</p>		
Non-stationary with an analytical probability density function of ordinates	 <p>From all statistical characteristics only the analytical time-dependent probability density function of ordinates is reproduced (the corresponding power spectral density usually represents white noise)</p>	Not simulated	
Non-stationary Gaussian with a given power spectral density	 <p>From all statistical characteristics only the analytical time-dependent power spectral density is reproduced, the probability density function of ordinates being Gaussian (time-dependent or time-independent)</p>		
Non-stationary with an arbitrary power spectral density in an arbitrary probability density function of ordinates	 <p>From all statistical characteristics both time-dependent power spectral density and probability density function of ordinates are reproduced</p>		
Special		Depending on circumstances	Depending on circumstances

FIABILITE PRÉVISIONNELLE EN MECANIQUE

FATIGUE OLIGOCYCLIQUE

FATIGUE OLIGOCYCLIQUE

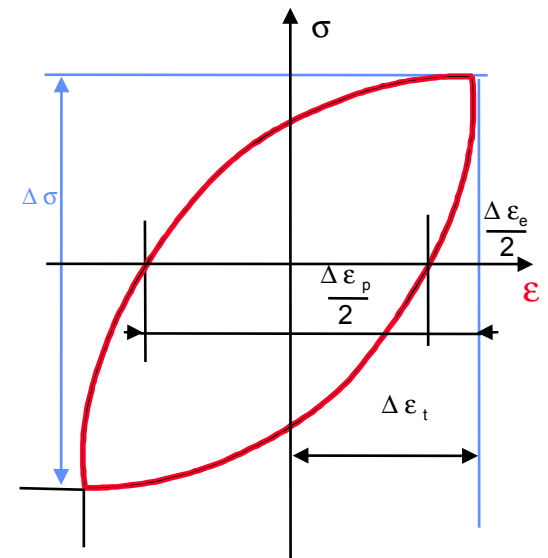
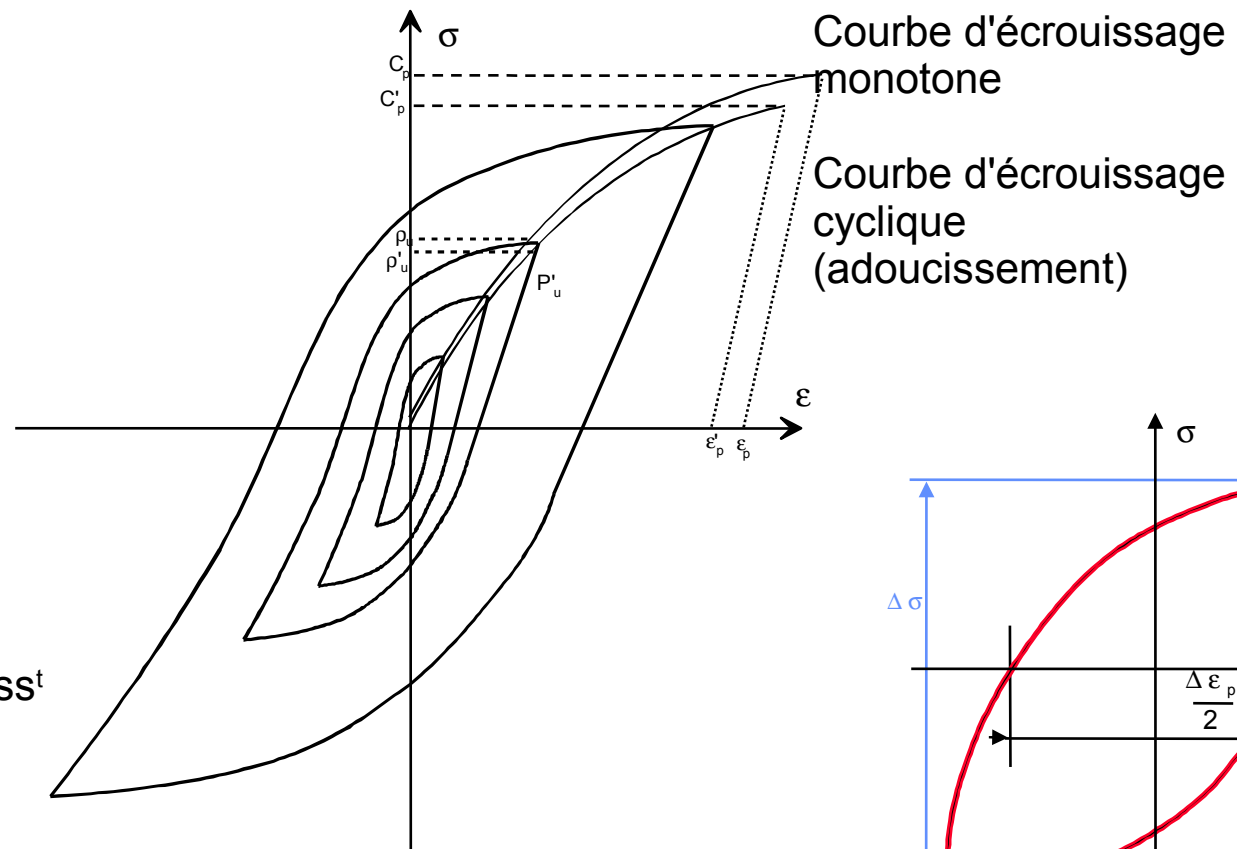
Loi d'écrouissage cyclique

$$\frac{\Delta \sigma}{2} = K' \left(\frac{\Delta \varepsilon_p}{2} \right)^{n'}$$

$$\frac{\Delta \sigma}{2} = K \left(\frac{\varepsilon_t}{2} \right)^n$$

$$\left. \begin{array}{l} n < 0,1 \\ \frac{\rho_m}{\rho_n} < 1,2 \end{array} \right| \text{adouciss}^t$$

$$\left. \begin{array}{l} n \geq 0,1 \\ \frac{\rho_m}{\rho_n} > 1,4 \end{array} \right| \text{durciss}^t$$



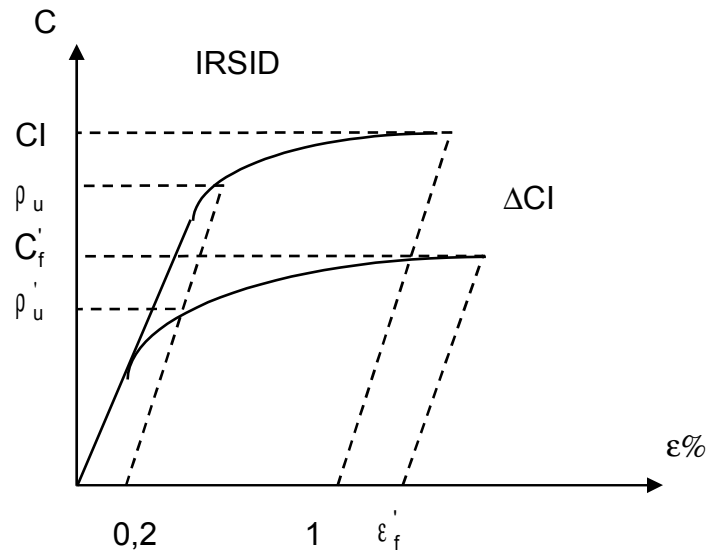
FATIGUE OLIGOCYCLIQUE

Adoucissement $\frac{\rho_m}{\rho_u} < 1.2$ ou $n < 0.1$

Adoucissement $\frac{CI}{\rho_u} < 1.3$

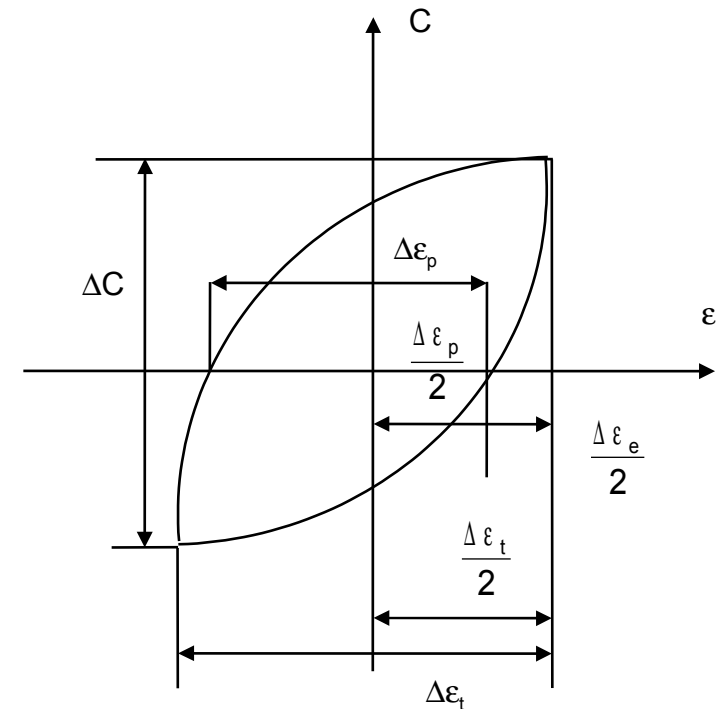
Durcissement $\frac{\rho_m}{\rho_u} < 1.4$

Durcissement $\frac{CI}{\rho_u} > 1.5$

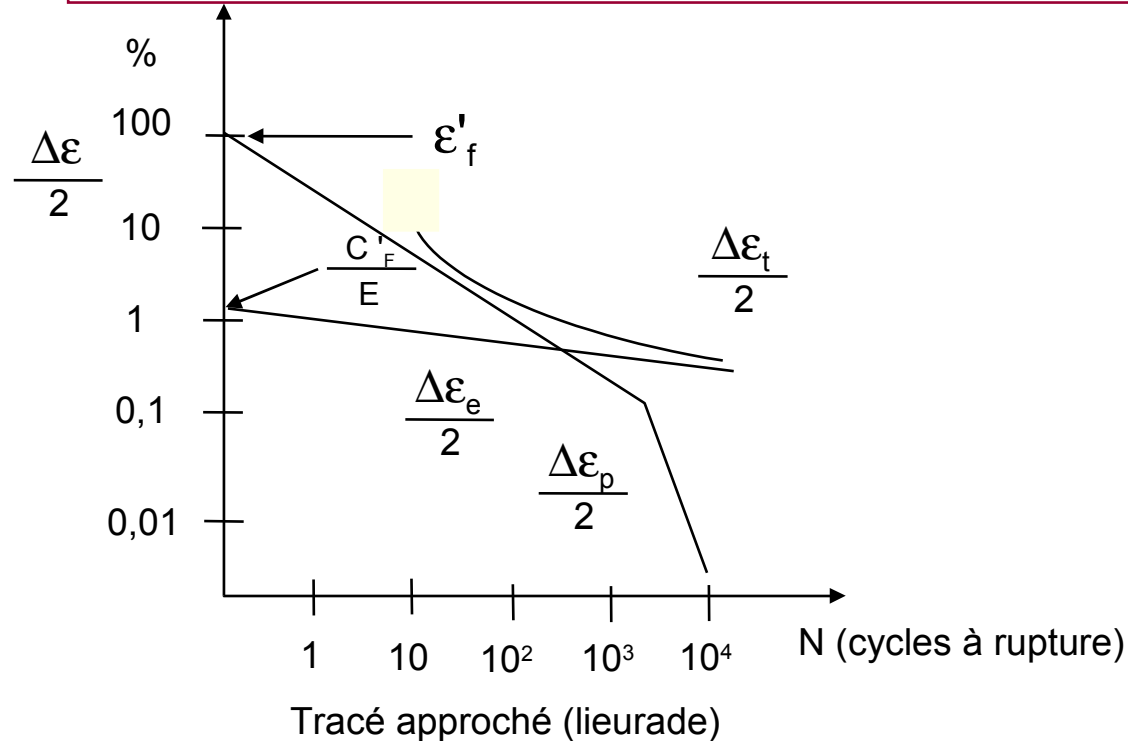


Statique $\frac{\Delta C}{2} = K \left(\frac{\Delta \varepsilon}{2} \right)^n$

Dynamique $\frac{\Delta C}{2} = K' \left(\frac{\Delta \varepsilon_p}{2} \right)^{n'}$



RESISTANCE A LA FATIGUE COURBES DE MANSO-COFFIN



(ductilité)

$$1) \frac{\Delta \epsilon_p}{2} = \epsilon'_f (2N)^{-C} \quad (\text{MANSO})$$

$$2) \frac{\Delta \epsilon_e}{2} = C'_f (2N)^b \quad (\text{BASQUIN})$$

$$10^7 \text{ cycles : } \sigma_D = E \cdot \frac{\Delta \epsilon_e}{2} = 0.41 \rho_m + 2A$$

$$1/2 \text{ cycle } \frac{C'_f}{E'} = \frac{C_f}{E}$$

$$10^3 \text{ cycles : } \frac{\Delta \epsilon_p}{2} = 0.01 - \frac{\Delta \epsilon_e}{2}$$

$$1/2 \text{ cycle } \epsilon'_f = \epsilon_f$$

FATIGUE OLIGOCYCLIQUE

Lois de Manson-Coffin

$$\begin{aligned} \frac{\Delta \varepsilon_e}{2} &= \frac{C'_f}{E} (2N)^b \\ \frac{\Delta \varepsilon_p}{2} &= \varepsilon'_f (2N)^{C_2} \end{aligned} \quad \rightarrow \quad \frac{\Delta \varepsilon_t}{2} = \frac{\Delta \varepsilon_e}{2} + \frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = \frac{C'_f}{E} (2N)^b + \varepsilon'_f (2N)^{C_2}$$

C'_f = coefficient de résistance en fatigue

C_f = contrainte vraie à rupture

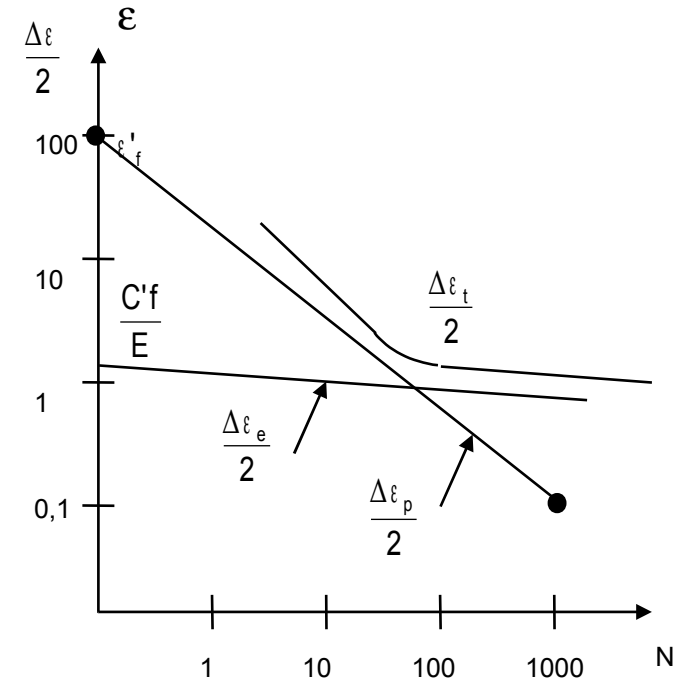
ε'_f = coefficient de ductilité en fatigue

ε_f = déformation vraie à rupture

Relation énergétique

$$W_f = C_3 (2N)^a \quad \Delta W = 2Ca \quad \Delta \varepsilon_p \left(\frac{1-n'}{1+n'} \right)$$

1) Ca = Amplitude de la boucle d'hystérésis



PARAMETRES DE FATIGUE OLIGOCYCLIQUE

Énergie dissipée

déformation plastique \longleftrightarrow mouvement des dislocations
contrainte cyclique \longleftrightarrow résistance à leur avancement



$W(\text{déformation/cycle}) = \text{mesure du dommage par fatigue}$
Résistance à la fatigue = capacité à absorber et diffuser W



$$W_f = N \cdot W \quad \begin{matrix} W = AN^{a-1} \\ W_f = AN^a \end{matrix} \quad (a = 0,15)$$

$$\begin{aligned} W &= \Delta C \cdot \Delta \varepsilon_p \frac{1-n'}{1+n'} \\ b &= n'(a-1) / (1+n') \\ c &= (a-1) / (1+n') \end{aligned} \quad \left| \quad \begin{matrix} \\ \\ \end{matrix} \right. \quad \text{(HALFORD)}$$

APPROXIMATION DES COURBES

Méthode IRSID

Droite élastique

$$\text{à } 10^7 \text{ cycles} \quad \frac{\Delta \varepsilon_e}{2} = \frac{0.41 \rho_m + 2A}{E} \quad A = \text{allongement}$$

$N = 1/2 \text{ cycle}$ $C'_f = C_f = \text{contrainte vraie à rupture}$

Droite plastique

$$\text{à } N = 10^3 \text{ cycles} \quad \Delta \varepsilon_p = 0.01 - \frac{\Delta \varepsilon_e}{2}$$

$\text{à } 2N = 1$ $\varepsilon'_f = \varepsilon_f = \text{déformation vraie à rupture}$

APPROXIMATION DES COURBES

Relations énergétiques

$$W_f = 3.2 N^{0.15} \quad W_f = \Delta W \cdot N = \text{énergie totale à rupture}$$

$$\Delta W = 3.2 N^{0.85} \quad \Delta W = \text{énergie par cycle mesurée sur boucle}$$

Durée de vie

$$N = 2600 \left[\frac{1 + n'}{K' \cdot (1 - n')} \right]^{1/0.85} \cdot \left(\frac{\Delta \varepsilon_p}{2} \right)^{-(1+n')/0.85}$$

ε'_f et C'_f très proches de ε_f et C_f

$$\varepsilon_f = \log \frac{100}{100 - Z} \quad Z = \text{striction en } \varepsilon_0$$

$$C_f = \frac{F_f}{S_f} \quad \frac{\text{charge à rupture}}{\text{section finale}}$$

$$\text{Relation de MORROW : } b = -n'/(1 + 5n') \quad C_2 = -1/(1 + 5n')$$

$$\text{Relation de TOMKINS : } b = -n'/(1 + 2n') \quad C_2 = -1/(1 + 2n')$$

$$\text{Relation de HALFORD : } n' \cdot (a - 1) / (1 + n') \quad C_2 = (a - 1) / (1 + n')$$

BIBLIOGRAPHIE SUR L'APPROCHES R/C

SHWOB et PEYRACHE	Traité et fiabilité	ED. MASSON
BAZOVSKY	Théorie et pratique de la sûreté de fonctionnement	ED. DUNOD
MARCOVICI et LIGERON	Utilisation des technique de fiabilité en mécanique	ED. LAVOISIER
LIGERON	La fiabilité en mécanique	ED. DESFORGES
HAUGEN	Probabilistic approach to design	ED. WILEY AND SONS
SHIGLEY	Mechanical engineering design	ED. MC GRAW HILL
CAZAUX, POMEY et RABBE	La fatigue des métaux	ED. DUNOD
BATHIAS et BAILON	La fatigue des matériaux et des structures	ED. MALOINE
BARTHELEMY	Notions pratiques de mécanique de la rupture	ED. EYROLLES