

# **COURS DE MAINTENANCE**

**Frédéric TOMALA**

# **ENSEIGNANT**

**Frederic Tomala**

**Enseignant - Chercheur en gestion des risques**

**Département Management des Systèmes**

**HEI Hautes Études d'Ingénieur**

**Bureau : A607**

# OBJECTIFS DU COURS

## **Description et objectifs du cours :**

Donner aux étudiants une connaissance globale de la maintenance industrielle

## **Pré-requis associés :**

- Connaissance de l'industrie
- Connaissance des lois statistiques (Normale, exponentielle,...)

## **Total : 14 heures**

- Cours : 8 heures
- Travaux Dirigés : 6 heures

# PLAN DU COURS (1)

## Chapitre 1 : Introduction à la maintenance :

- Enjeux économiques de la maintenance
- Métiers de la maintenance
- Missions de la maintenance
- Activités de la maintenance

# PLAN DU COURS (2)

## Chapitre 2 : Définition des principaux concepts de la maintenance :

- La maintenance
- La terotechnologie
- L'entretien
- La fiabilité
- La maintenabilité
- La disponibilité
- La panne
- La défaillance
- La réparation
- Le dépannage
- Le diagnostic
- La GMAO

# PLAN DU COURS (3)

## **Chapitre 3 : Organisation de la fonction maintenance**

- Les interfaces de la maintenance
- L'organisation de la maintenance

## **Chapitre 4 : Les coûts en maintenance**

- Les coûts de maintenance
- Les coûts de défaillances
- Le coût moyen de fonctionnement d'un équipement

## **Chapitre 5 : Politiques de maintenance**

- La maintenance corrective
- La maintenance préventive
- Les différents niveaux de maintenance

# PLAN DU COURS (4)

## **Chapitre 6 : Méthodes et outils mathématiques pour la mise en œuvre des actions de maintenance**

- Modèles de fiabilité : utilisation des lois statistiques
- Taux de défaillance
- Sûreté de fonctionnement

## **Chapitre 7 : Outils méthodologiques pour l'analyse des comportements**

- Définition
- Processus d'analyse
- L'AMDEC
- Les arbres de défaillances

# PLAN DU COURS (5)

## **Chapitre 8 : Outils logiciels pour la maintenance (GMAO : Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur)**

- Notion générale de MAO
- Les fonctions d'une GMAO

## **Chapitre 9 : La TPM (Total Productive Maintenance)**

- Définitions
- L'utilisation efficace des machines
- La maintenance autonome
- Mise en œuvre de la TPM

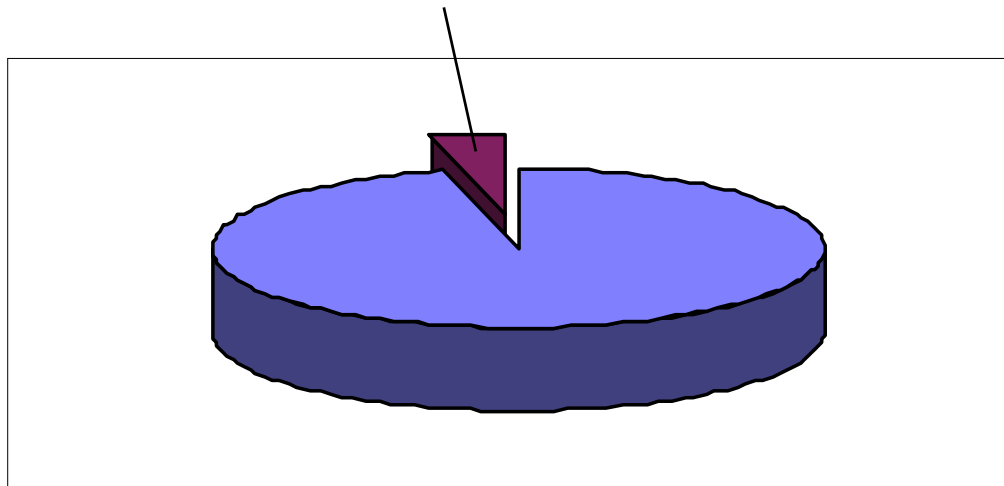


# **Chapitre 1 : Introduction à la maintenance**

# ENJEUX ECONOMIQUES (1)

**640 Milliards d'euros de chiffre d'affaire dans l'industrie**

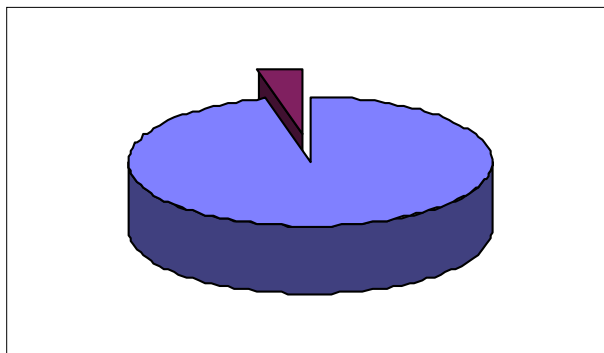
**4% : 25 Milliards d'euros consacrés à la maintenance**



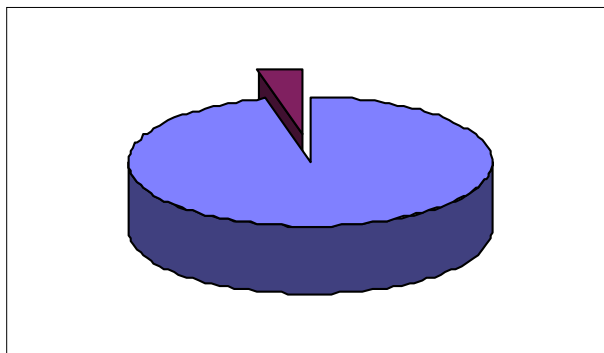
**6 milliards sont  
sous-traités**

**Part maintenance dans le secteur immobilier - tertiaire :  
18 Milliards d'euros**

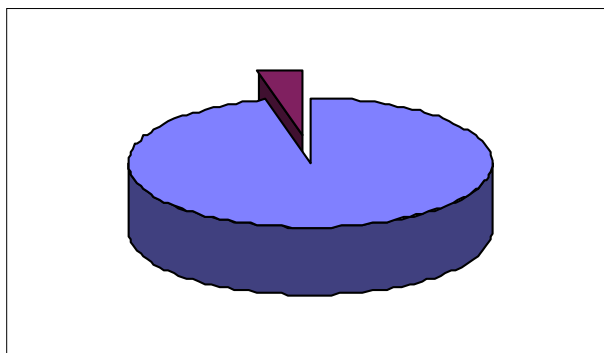
# ENJEUX ECONOMIQUES (2)



**10,4 % pour  
l'industrie automobile**



**11,6 % pour  
l'industrie pétrolière**

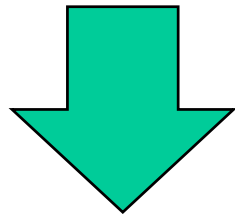


**12,9 % pour  
l'industrie du ciment**

# ENJEUX ECONOMIQUES (3)

**Plus de 450 000 emplois de qualifications élevées**

**10 000 diplômés par an**



**Bac professionnels,  
BTS, DUT,  
école d'ingénieurs**

**Sociétés de maintenance**

# ENJEUX ECONOMIQUES (4)

## Analyse qualitative

- Offres d'emploi provenant de filières industrielles très diverses
- Offres “ à l'exportation ” assez nombreuses (Afrique, Pays de l'Est...)
- Demande d'une polyvalence technique flagrante, sur une base de formation électro-mécanique (froid, automatisme, robotique...)
- Palette ouverte de fonctions (travaux neufs, SAV, gestion de l'énergie, environnement...)
- Sensibilisation à l'aspect économique appréciée : investissements, budgets, suivi des dépenses...

# ENJEUX ECONOMIQUES (5)

## Principales raisons de l'évolution du marché de la maintenance

- Automatisation, complexification et usage intensif des équipements de production
  - il y a 20 ans, un atelier de production mécanique = 20 machines, 20 conducteurs, un régleur et un agent d'entretien.
  - Aujourd'hui: une ligne de production pilotée par 2 ouvriers de production et maintenue par 2 techniciens.
- Les équipements sont plus onéreux, et ont des phases d'amortissement raccourcies.
- Les temps d'indisponibilité sur un process sont économiquement plus critiques que sur un parc de machines qui ne sont pas en ligne, certains coûts d'arrêts étant prohibitifs.

# LES METIERS DE LA MAINTENANCE (1)

## Exemples de postes offerts aux débutants

- **Responsable entretien et maintenance** : un jeune ingénieur aura pour mission de diriger une équipe d'une dizaine de personnes pour les études et la réalisation en vue de la maintenance et de l'amélioration d'équipements.
- **Responsable maintenance dans la filiale d'un grand groupe** : responsabilité d'une vingtaine de personnes avec gestion du budget et mise en œuvre d'un plan de maintenance préventive.
- **Chef d'entretien** : prise en charge de l'entretien et des travaux neufs, de la rationalisation des équipements et de la mise en place de la MAO sur plusieurs sites.

# LES METIERS DE LA MAINTENANCE (2)

## Exemples de postes offerts aux cadres expérimentés

- **Responsable entretien - travaux neufs** : il dirige la mise en place de la maintenance préventive et la restructuration totale des chaînes de fabrication et de l'automatisation, et assure la gestion de la sous-traitance.
- **Chef de département maintenance industrielle dans une société de service spécialisée en maintenance** : il entretient les relations avec la clientèle existante, procède aux chiffrages, organise et suit les travaux, encadre le personnel d'exécution.
- **Ingénieur études de maintenance** : il prépare les dossiers techniques et procédures de maintenance et réalise les audits de maintenance chez les clients.



# LES METIERS DE LA MAINTENANCE (3)

## Exemples de postes en secteurs spécifiques (1)

- **Dans le secteur bancaire** : chef de projet monétique : il est responsable du suivi informatique du projet monétique : maintenance et évolution du produit.
- **Dans les transports** : responsable du parc des véhicules, il dirige et anime les équipes des ateliers d'entretien et de réparation du matériel et supervise la gestion du magasin de pièces détachées.

# LES METIERS DE LA MAINTENANCE (4)

## Exemples de postes en secteurs spécifiques (2)

- **Dans les sociétés de services :**
  - ***Consultant qualité maintenance*** : il assure la formation à l'assurance qualité appliquée à la maintenance, élabore des procédures, développe et met en œuvre les plans qualité et réalise des actions pédagogiques,
  - ***Ingénieur conseil en fiabilité et automatismes industriels*** : conception et mise en œuvre de projets d'études, choix de concepts d'instrumentation et de contrôle commande, mise en œuvre des solutions retenues (architectures de réseaux, fournisseurs, montage...).

# LES MISSIONS DE LA MAINTENANCE (1)

## Mission Globale de la maintenance

**Diminution du rapport suivant :**

$$\frac{\text{dépenses de maintenance}}{\text{quantité et qualité de service rendu}}$$

# **LES MISSIONS DE LA MAINTENANCE (2)**

## **Conservation du potentiel fonctionnel**

Les éléments maintenus constituent des outils pouvant assurer diverses fonctions (production, fabrication, activités commerciales, services,...)

Ces fonctions ne peuvent perdurer que grâce à une maintenance régulière, et dont le rendement doit être optimum.

- Dans ce cadre, la fonction maintenance est responsable:
  - du diagnostic permanent des équipements et installations en apportant les remèdes aux dégradations constatées,
  - de la réparation et de la remise en état de l'élément lorsqu'elles se révèlent nécessaires,
  - de la réalisation des travaux neufs d'installation ou d'aménagement jugés opportuns.

# LES MISSIONS DE LA MAINTENANCE (3)

## – **Exploitation de l'infrastructure technique**

La fourniture d'énergie et la distribution des fluides constituent généralement un domaine pris en charge par la fonction maintenance.

## – **Gestion patrimoniale**

La conservation de la valeur du patrimoine, voire son augmentation, est souvent liée à la qualité de la maintenance.

## – **Aspects commerciaux**

La qualité de l'entretien des équipements d'une entreprise contribue activement à l'image de celle-ci.

# LES MISSIONS DE LA MAINTENANCE (4)

## – Respect de l'environnement

La maintenance est souvent responsable de la lutte contre les nuisances, de l'évacuation des déchets et autres effluents, et du traitement des eaux usées.

## – Respect de la réglementation et sécurité

- La protection des individus contre les accidents fait l'objet de nombreux textes légaux qui sont nécessairement complétés par des prescriptions et des actions de mise en conformité exécutées généralement par la maintenance.
- Les établissements recevant du public sont notamment soumis à des dispositions légales entraînant l'installation d'équipements de sécurité dont l'entretien doit être assuré et garanti.

# LES MISSIONS DE LA MAINTENANCE (5)

## – Amélioration des conditions de travail

La maintenance des équipements de confort et des outils de travail contribue pour une large part à l'ambiance sociale des entreprises.

## – Optimisation des dépenses

Les coûts de maintenance représentent des postes de plus en plus importants pour une entreprise, difficiles à gérer car entrant souvent dans la catégorie des frais généraux. Un suivi détaillé de ces coûts et de leurs causes s'avère nécessaire pour les maîtriser.

# **Chapitre 2 : Définition des principaux concepts de la maintenance**



# MAINTENANCE / ENTRETIEN (1)

## Maintenance (Norme AFNOR X 60-010)

Ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé.

## Entretien

Historiquement, il existe une opposition de sens entre les termes Maintenance et Entretien

ENTRETIEN	MAINTENANCE
- Dépanner, réparer	- Prévenir, optimiser le coût de possession
- Subir le matériel	- Maîtriser
- Tâche ingrate : période estivale, improductif	- Outils spécifiques : fiabilité, , GMAO...
- Activité de faible priorité : faible qualification, responsabilité limitée, exploitation prioritaire	- Valorisation du métier : participation aux études, à la conception, à l'installation et à l'amélioration

# MAINTENANCE / ENTRETIEN (2)

## Définition actuelle de l'entretien :

Ensemble des travaux ayant pour but de maintenir dans leur état initial des ouvrages ou équipements existants, sans changer leur usage ou leur fonction. L'entretien peut s'avérer nécessaire plusieurs fois pendant la durée de vie, il limite ainsi les risques de désordre ou de pannes (composante préventive de la maintenance).

# FIABILITE

## (Norme AFNOR X 60-500)

- **Aptitude** d'un équipement à accomplir une fonction requise dans des conditions données, pendant un intervalle de temps donné.
  - On suppose en général que l'entité est en état d'accomplir la fonction requise au début de l'intervalle de temps donné,
  - Le concept de fiabilité est traduit souvent dans la pratique comme l'aptitude d'une entité à avoir une faible fréquence de défaillance.
- **R(t)** : Probabilité que l'entité accomplisse une fonction requise dans des conditions données, pendant un intervalle de temps donné (0, t).

# MAINTENABILITE

## (Norme AFNOR X 60-500)

- Aptitude d'un équipement à être maintenu ou rétabli dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, avec des procédures et des moyens prescrits.
- $M(t)$  : pour une entité utilisée dans des conditions données d'utilisation, probabilité pour qu'une opération donnée de maintenance puisse être effectuée sur un intervalle de temps donné  $(0, t)$ , lorsque la maintenance est assurée dans des conditions données et avec l'utilisation de procédures et moyens prescrits.

# DISPONIBILITE

## (Norme AFNOR X 60-500)

- Aptitude d'une entité à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données, à un instant donné ou pendant un intervalle de temps donné, en supposant que la fourniture des moyens extérieurs nécessaires soit assurée.
- $D(t)$  : Probabilité qu'une entité soit en état de disponibilité dans des conditions données, à un instant donné en supposant que la fourniture des moyens extérieurs nécessaires soit assurée.

# PANNE / DEFAILLANCE

## – Panne

Inaptitude d'une entité à accomplir une fonction requise.

## – Défaillance (Norme AFNOR X 60-010)

Altération ou cessation de l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise.

# REPARATION / DEPANNAGE

## – Réparation

La réparation consiste en la remise en état, de façon durable, dans le but de supprimer ou de réduire les conséquences de la vétusté, de l'usure ou du désordre, d'un équipement n'assurant plus dans des conditions acceptables la fonction qui est la sienne.

## – Dépannage

Action sur un équipement en panne, en vue de le remettre en état de fonctionnement, au moins provisoirement. Compte tenu de l'objectif, un dépannage peut s'accommoder de résultats provisoires et de conditions de réalisation " hors norme " et, dans ce cas, sera suivi de réparation.

# DIAGNOSTIC

Analyse d'un ensemble de facteurs ou de symptômes, visant à établir l'état d'un élément ou les causes d'un éventuel désordre constaté, afin de choisir les mesures à prendre pour y remédier.

Examen permettant d'apprécier l'état d'usure d'un composant, afin de déterminer les opérations de maintenance à exécuter, ou la durée de vie restante.



# GMAO

## **GMAO (Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur)**

Système informatique permettant la gestion des moyens nécessaires à la maintenance et la gestion de la mise en œuvre de ces moyens. Une GMAO doit donc permettre :

- D'établir l'inventaire des éléments à maintenir,
- De gérer les interventions de maintenance préventive et corrective sur le plan de la programmation technique et sur le plan financier,
- De gérer les stocks et les achats,
- De faire un historique des interventions,
- De gérer les entreprises sous-traitantes ou co-traitantes,
- D'apprécier l'état global de santé des éléments maintenus,
- De prévoir leur remplacement en fonction des durées de vie théoriques et des interventions.

# **Chapitre 3 : Organisation de la fonction maintenance**

# RELATIONS ENTRE MAINTENANCE ET AUTRES FONCTIONS DE L'ENTREPRISE

## **Le service maintenance :**

Est responsable du maintien du bon fonctionnement technique de tous les moyens de production (machines, outils, moyens de contrôle, commandes, équipement de manipulation, engins de transport).

Pour mener à bien cette tâche, la fonction maintenance doit être en concertation régulière avec d'autres fonctions de l'entreprise :

# RELATIONS ... (2)

**La fonction « études et travaux neufs » pour :**

- l'information des programmes d'investissements,
- l'étude de l'installation,
- les études de fiabilité et de maintenabilité,
- la standardisation du matériel,
- la documentation technique des constructeurs,
- le choix des entreprises de travaux neufs,
- la réception technique du matériel.

# RELATIONS ... (3)

## **La fonction « méthodes et fabrication » pour :**

- les consignes d'utilisation, de conduite et de surveillance du matériel,
- le taux d'utilisation du matériel,
- le niveau de sécurité du matériel et du personnel de fabrication.

## **La fonction « achats » pour :**

- émettre et faire respecter le cahier des charges et les spécifications techniques de qualité nécessaires,
- les problèmes de garantie,
- obtenir le dossier technique adapté aux besoins de la fonction maintenance, en particulier la documentation technique.

# RELATIONS ... (4)

## **La fonction « financière » pour :**

- les relations économiques entre amortissement et maintenance,
- les cycles de révision économiques du matériel,
- la décision de remplacement

## **La fonction « gestion des stocks de fournitures et pièces de rechange » pour :**

- le catalogue magasin,
- l'implantation et le classement du magasin,
- le choix de la méthode de gestion,
- la réduction du coût de possession des stocks

## **La fonction « normalisation » pour :**

- le catalogue magasin,
- la réduction du coût de possession des stocks,
- la nomenclature des équipements.

# RELATIONS ... (5)

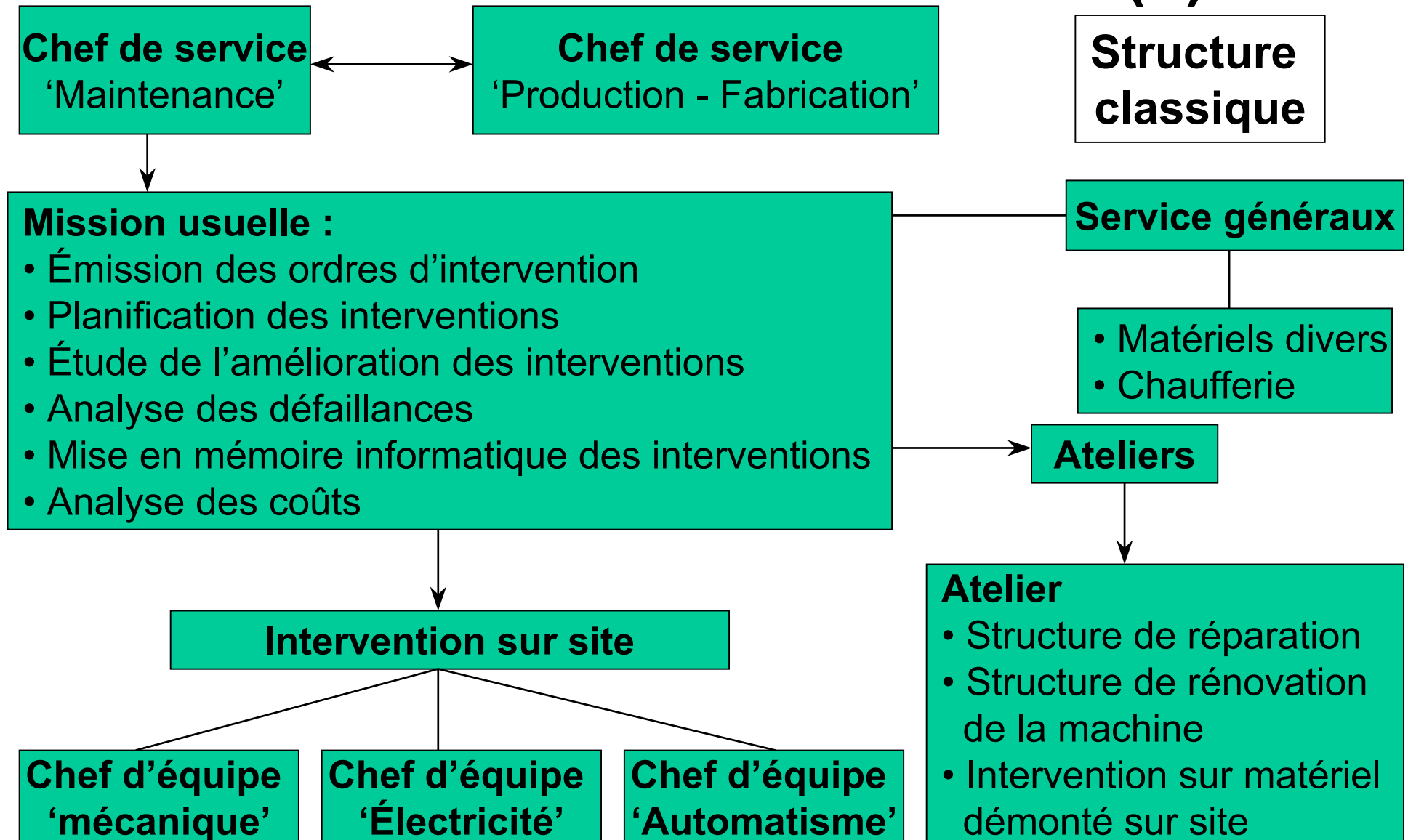
**La fonction « gestion des ressources humaines » pour :**  
la gestion prévisionnelle du personnel, avec en particulier son niveau de qualification, l'évolution des carrières, permutations, promotions, départs, embauches, formation,...

**La fonction « sécurité » pour :**  
la sécurité du personnel et du matériel (organisation du travail, aménagement des postes de travail, prévention intégrée...)

**La fonction « informatique » pour :**  
le système et les moyens d'information.

**La fonction « métrologie » pour :**  
la gestion des moyens de mesure.

# ORGANISATION DE LA FONCTION MAINTENANCE (1)





# ORGANISATION (2)

## Niveaux d'intégration (1)

### **Activité directement intégrée sous la responsabilité de «l'homme » production :**

- Dans ce cas, ce dernier devra être particulièrement attentif dans ses choix et dans son raisonnement, à avoir une vue globale de son activité et à considérer sa responsabilité maintenance à égalité avec sa responsabilité production. Il sera donc conduit à analyser les problèmes importants sous les deux aspects avant de faire le choix optimal qui s'impose.
- Souvent les PMI sont organisées ainsi.

# ORGANISATION (3)

## Niveaux d'intégration (2)

### **Activité maintenance distincte, mais ayant un responsable chargé d'activités complémentaires**

- Dans ce cas, un homme ou une petite équipe aura la responsabilité de l'ensemble des fonctionnalités maintenance.
- PMI assez importantes, ou petites unités décentralisées de groupes importants.
- Structure fortement répandue en maintenance hospitalière et de grands ensembles (hôtels, bâtiments publics...)

### **Activité maintenance distincte et structurée**

- Unités importantes de production de masse ou process.
- Maintenance centralisée ou décentralisée.

# ORGANISATION (4)

## Avantages centralisation / décentralisation de la maintenance

CENTRALISATION	DECENTRALISATION
Standardisation des matériels et des méthodes facilitée,	Facilité de constitution d'équipes polyvalentes,
Uniformisation des procédures, des codifications des systèmes de gestion de l'information,	Facilité des contacts maintenance-production,
Utilisation des investissements lourds (en outillage) facilitée,	Amélioration de la motivation et de la responsabilité du personnel de maintenance,
Optimisation de l'emploi des ressources plus aisée,	Incitation à la " fixation " de la compétence,
Suivi budgétaire global plus rapide	Meilleure mise en œuvre de la TPM (Total Productive Maintenance).

# ORGANISATION (5)

## **Documentation relative au matériel :**

**Le dossier technique** : il comprend tous les renseignements et documents qui concernent un même type de machine :

- Éléments d'identification : désignation du type, constructeur, caractéristiques générales, liste des machines du même type, fiche technique,
- Répertoire des documents classés dans le dossier,
- Synthèse des modifications effectuées sur ces machines.
- Nomenclature de la machine
- Instructions de maintenance

**Le dossier historique** : Il comprends tous les renseignements et documents concernant la vie d'une machine :

- les modifications, y compris les améliorations de maintenance,
- les commandes extérieures,
- les ordres de travaux
- les rapports d'expertise ou d'incident,
- la fiche historique

# ORGANISATION (6)

**La fiche historique**, relative à chaque machine, regroupe les informations concernant les interventions de maintenance effectuées :

- numéro d'ordre des travaux
- date d'exécution,
- nature et désignation du travail
- temps passé,
- coût de l'intervention,
- durée d'arrêt due à l'intervention,
- nombre d'unités d'usage ou d'heures de fonctionnement

# ORGANISATION (7)

## Documentation relative aux travaux :

**La demande de travail (DT)** : elle émane le plus souvent d'un responsable production qui la dirige vers le responsable de maintenance qui l'enregistre,

**L'ordre de travail (OT)** : c'est la fiche d'ordonnancement qui comporte tous les éléments relatifs à la programmation et au lancement (dates, délais, matières et outillages, éléments de sécurité),

**Le bon de travail (BT)** : il constitue l'interface « méthodes / réalisation ». Tous les éléments relatifs à la quantification et à la qualification du travail y figurent, de façon à permettre la valorisation du bon (estimation du coût de maintenance).

# ORGANISATION (8)

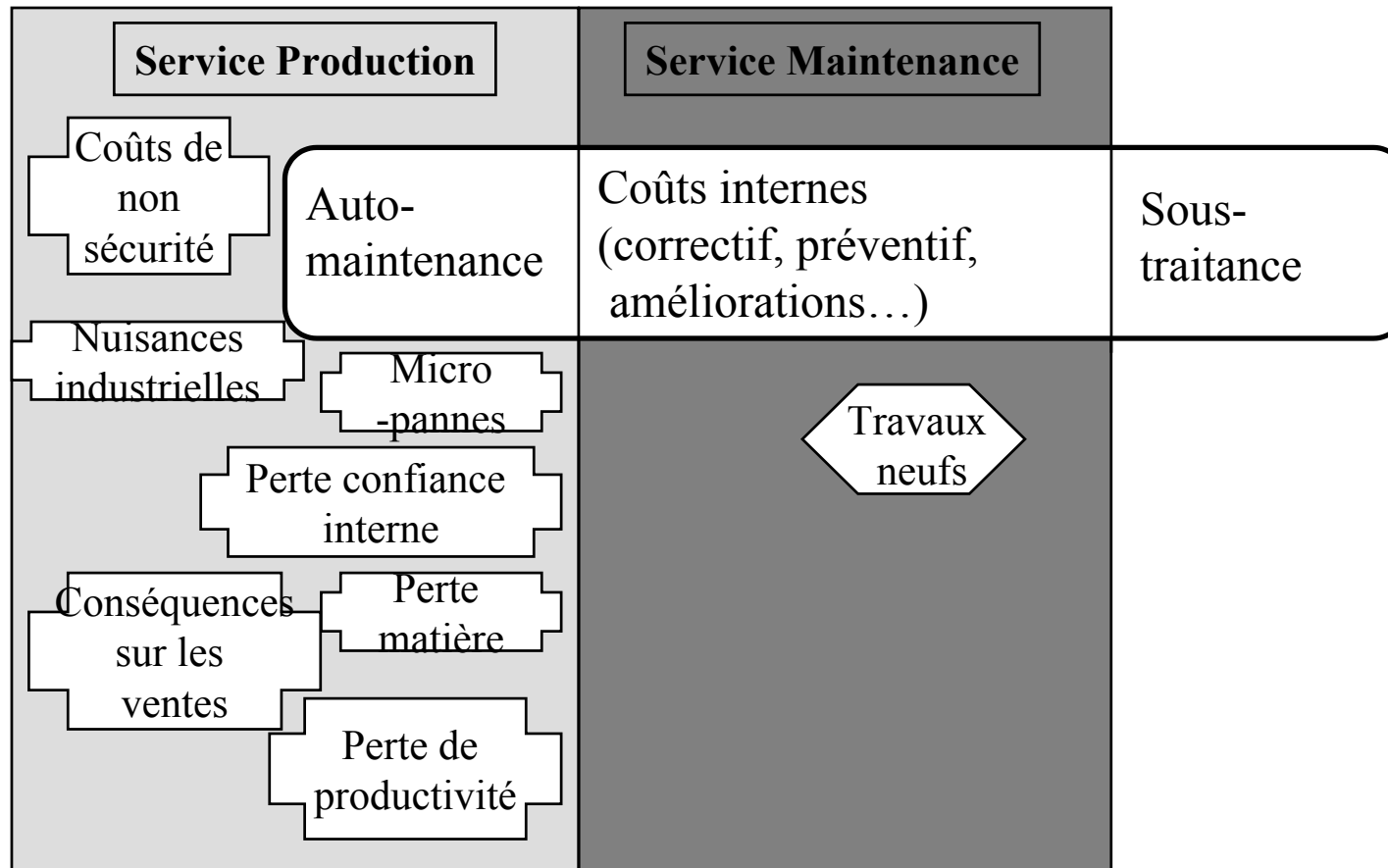
Les trois fiches précédentes ne sont valables que si le travail à faire ne comporte qu'une seule phase (ensemble d'opérations confiées à un même ouvrier ou une même équipe, dont le début et la fin sont bien définis, et dont le contenu est contrôlable).

Elles sont le plus souvent regroupées sur un carnet à souche dont le numéro d'OT est pré imprimé.

# **Chapitre 4 : Les coûts en maintenance**



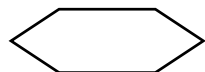
# LES COÛTS EN MAINTENANCE (1)



Coûts directs de la fonction Maintenance



Coûts indirects de la **fonction** Maintenance



Coûts **annexes** du **service** Maintenance

# LES COÛTS EN MAINTENANCE (2)

On peut associer aux dépenses relatives à la maintenance deux catégories de causes :

## **Les causes directes :**

- Coûts des interventions curatives donnant suite à des désordres ou pannes,
- Coûts des activités préventives destinées à préserver les équipements des dégradations.

## **Les causes indirectes :**

- Coûts de production supplémentaires : surconsommations de consommables, coûts de non qualité (retouches) dus aux fonctionnements défectueux ou aux mauvais réglages,
- Pertes de production : produits non fabriqués pendant les périodes d'indisponibilité des équipements, mécontentement de la clientèle...

# LES COÛTS EN MAINTENANCE (3)

Le suivi des coûts relatifs à la maintenance nécessite la mise en place d'une comptabilité adéquate, et la connaissance de certains éléments, notamment :

## **Pour le calcul des coûts directs :**

- les temps passés,
- les taux horaires des intervenants,
- les pièces et équipements de rechange (et leurs prix (PMP, LIFO, FIFO)),

## **Pour le calcul des coûts indirects :**

- les temps d'indisponibilité des éléments et leurs motifs,
- les « pertes de production » engendrées par ces arrêts :  
déclassements de produits, diminution de la clientèle,  
dédommagements...
- les coûts d'amortissement des équipements.

# LES COÛTS EN MAINTENANCE (4)

A partir de ces données, le responsable de maintenance sera en mesure de calculer, pour tous ses équipements :

- le coût de maintenance,
- le coût de défaillance,
- le coût global de possession (ou coût moyen de fonctionnement).

# LES COÛTS DIRECTS (1)

## **A/ Main d'œuvre interne et outillage**

Obtenus à partir des temps passés et des taux horaires de la main d'œuvre, lesquels sont calculés et réajustés périodiquement et prennent en compte les salaires et charges, l'amortissement du matériel utilisé et un pourcentage des frais généraux.

## **B/ Achats et sorties de magasin**

Prix des pièces de rechange, des consommables, et de remise en état de pièces ou d'ensembles pour échanges standards.

# LES COÛTS DIRECTS (2)

## **C/ Main d'œuvre externe**

Toute la main d'œuvre n'appartenant pas au personnel de l'entreprise mais y travaillant au forfait, en régie (travaux réalisés par un sous-traitant, dont la facturation est fondée sur le nombre d'heures passées et le remboursement du prix des matériaux utilisés), en dépense contrôlée, ou en fonction de toute autre clause contractuellement convenue entre l'entreprise et un contractant.

## **D/ Frais généraux**

Ils comprennent tous les salaires et charges du personnel ne travaillant pas directement sur les interventions (cadres, préparateurs, magasiniers, comptable, gestionnaires ...) et tous les frais matériels indirects (locaux, chauffage, énergie, fluides, imprimés, matériel administratif...).

# LES COÛTS INDIRECTS (1)

## Coûts de défaillance / Coûts d'indisponibilité

La connaissance des coûts de la maintenance ne suffit pas pour apprécier son efficacité.

Le coût le plus utile à connaître pour juger de l'efficacité de la maintenance sera celui qui intègre aux dépenses de maintenance toutes les pertes et manques à gagner induits : c'est le coût de défaillance.

On considérera qu'il y a défaillance, non seulement en cas d'indisponibilité totale de l'élément à maintenir, mais aussi pour tout cas de réduction en quantité ou en qualité du service assuré par celui-ci.

# LES COÛTS INDIRECTS (2)

**Le coût de défaillance comprend notamment les éléments suivants :**

## **Salaires et charges sociales du personnel exploitant non utilisé :**

La perte peut être entière si le personnel est totalement inactif, partielle si le personnel est employé à un travail secondaire, ou entrer dans la catégorie des coûts de maintenance s'il exécute lui même tout ou une partie des interventions de maintenance

## **Coût d'amortissement de l'élément défaillant :**

Si la défaillance engendre une interruption de la production du produit ou du service attendu, on peut considérer que le coût d'amortissement horaire est perdu puisqu'il ne pourra être intégré dans aucune rémunération de la part de la clientèle.



# LES COÛTS INDIRECTS (3)

## **Pertes de production :**

### **Trois cas peuvent se présenter :**

- la fabrication ou le service fournit ne subissent pas de conséquences de la défaillance et aucune perte n'est à comptabiliser,
- la reprise du travail est impossible et la perte est totale s'il s'agit de la production d'un service, et partielle s'il s'agit d'un produit (le produit semi-œuvré pouvant alors éventuellement resservir comme matière première et il y a perte uniquement sur la valeur ajoutée).
- le produit peut ne pas être réutilisable et la perte est totale (coût matière première et valeur ajoutée).

Les pertes de production peuvent aussi être dues à la baisse de qualité ou aux retards de livraison nécessitant des rabais ou portant préjudice à l'image de marque de l'entreprise, pouvant entraîner la perte de clientèle.

# LES COÛTS INDIRECTS (4)

## **Charges fixes et frais généraux:**

Tout ralentissement de production entraîne une augmentation du coût unitaire des éléments produits car les charges fixes et frais généraux existent quel que soit le niveau de production.

# COÛT MOYEN DE FONCTIONNEMENT : CMF (1)

**RAPPEL : MISSION DE LA MAINTENANCE :**

**REDUIRE LE RAPPORT:**

$$\frac{\text{dépenses de maintenance}}{\text{quantité et qualité de service rendu}}$$

**SOLUTION :**

Utilisation d'un indicateur de performance qui informe, de façon synthétique, sur la manière dont l'ensemble des coûts plus ou moins directement liés à la maintenance est réduit et dont le service rempli est augmenté.

# CMF (2)

Le Coût Moyen de Fonctionnement (CMF), donné par la totalité des dépenses effectuées sur l'équipement divisée par le service rendu, est cet indicateur.

Le coût moyen de fonctionnement permet de fixer la date de renouvellement d'un matériel par une étude économique.

Il peut également servir à faire un choix lorsque, à la suite d'un grave incident sur un matériel, il faut décider entre une réparation coûteuse et un remplacement. Ceci suppose d'estimer le montant des dépenses de maintenance et la valeur de revente, mais donne un renseignement suffisamment précis.

# CMF (3)

Les dépenses comprennent le prix d'achat et les frais d'installation, de raccordement...jusqu'à la mise en service, puis les dépenses de fonctionnement (énergie, graissage, outillage, fluides employés et toutes les dépenses autres que la maintenance), et enfin les dépenses de maintenance.

**PA1** : Prix d'achat du premier équipement, PA2 celui du second

**DF1** : Dépenses de fonctionnement du premier équipement, DF2 celles du second

**DM1** : Dépenses de maintenance du 1er équipement, DM2 celles du 2ème

**RV1** : Valeur de revente du 1er équipement, RV2 celle du 2ème

**N** : quantité de service rendu (en heures, quantités produites, km...)

# CMF (4)

Le service rendu peut se chiffrer en heures de marche, kilomètres parcourus, quantité de produits fabriqués, loyers perçus...

## Calcul du Cmf :

**Coût moyen de fonctionnement en usure normale :**

$$C_{mf} = \frac{PA1 + DF1 + DM1 - RV1}{N}$$

# CMF (5)

**Coût moyen de fonctionnement si un incident se produit :**

$$C_{mf} = \frac{PA1 + DF1 + DM1 - RV1 + \text{Coût réparation}}{N}$$

**Ce coût doit être comparé au C<sub>mf</sub> si on remplace l'équipement, c'est à dire :**

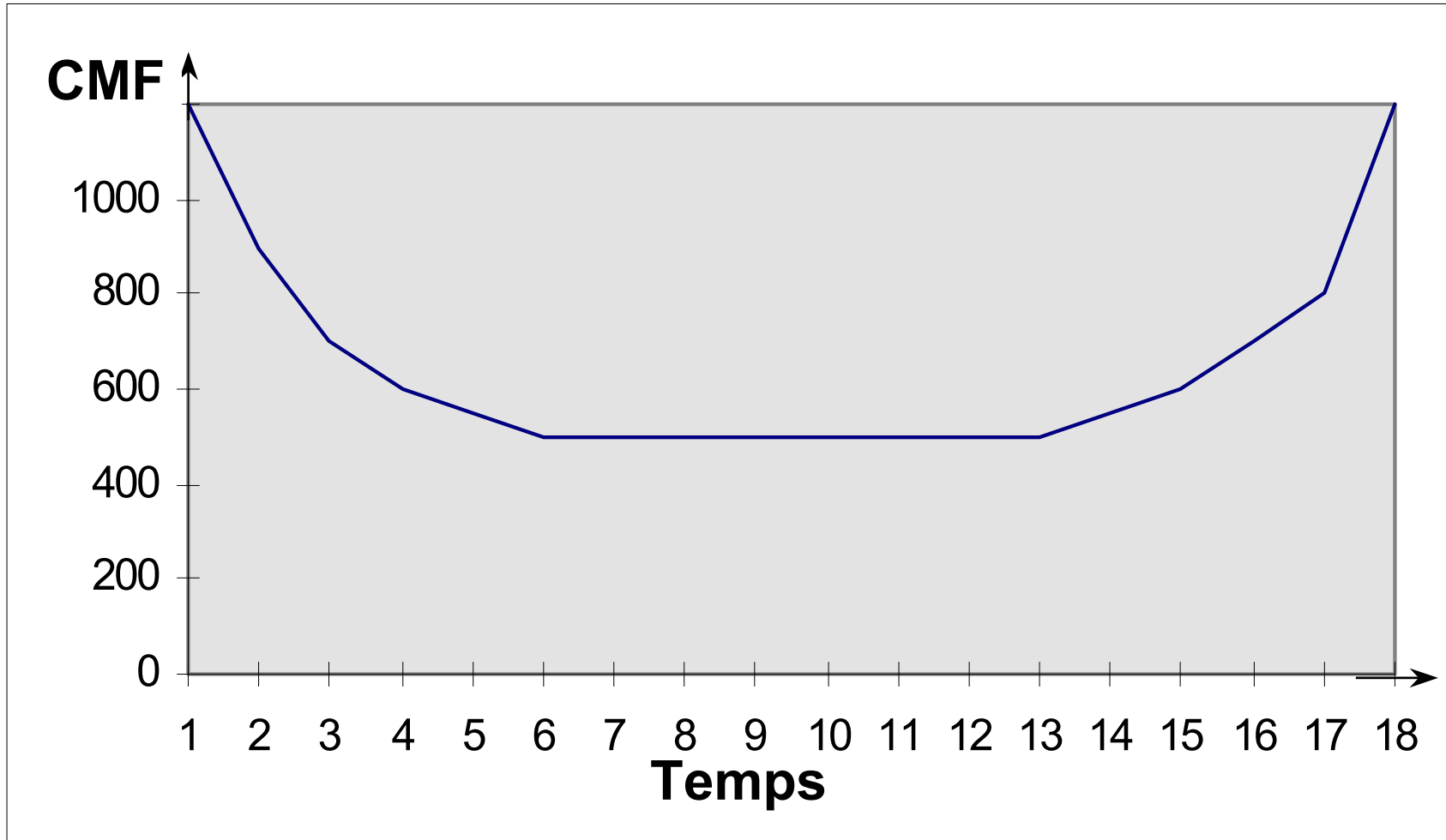
$$C_{mf} = \frac{PA1 + DF1 + DM1 + PA2 + DF2 + DM2 - RV2}{N}$$

**Remarque :** Tous ces calculs étant faits à Euros constants ou actualisés.

Le quotient obtenu pour tout équipement décroît dans les premières années, passe par un minimum pour recroître ensuite en raison de l'augmentation progressive des dépenses de maintenance et de la diminution de la valeur résiduelle de l'équipement.

# CMF (6)

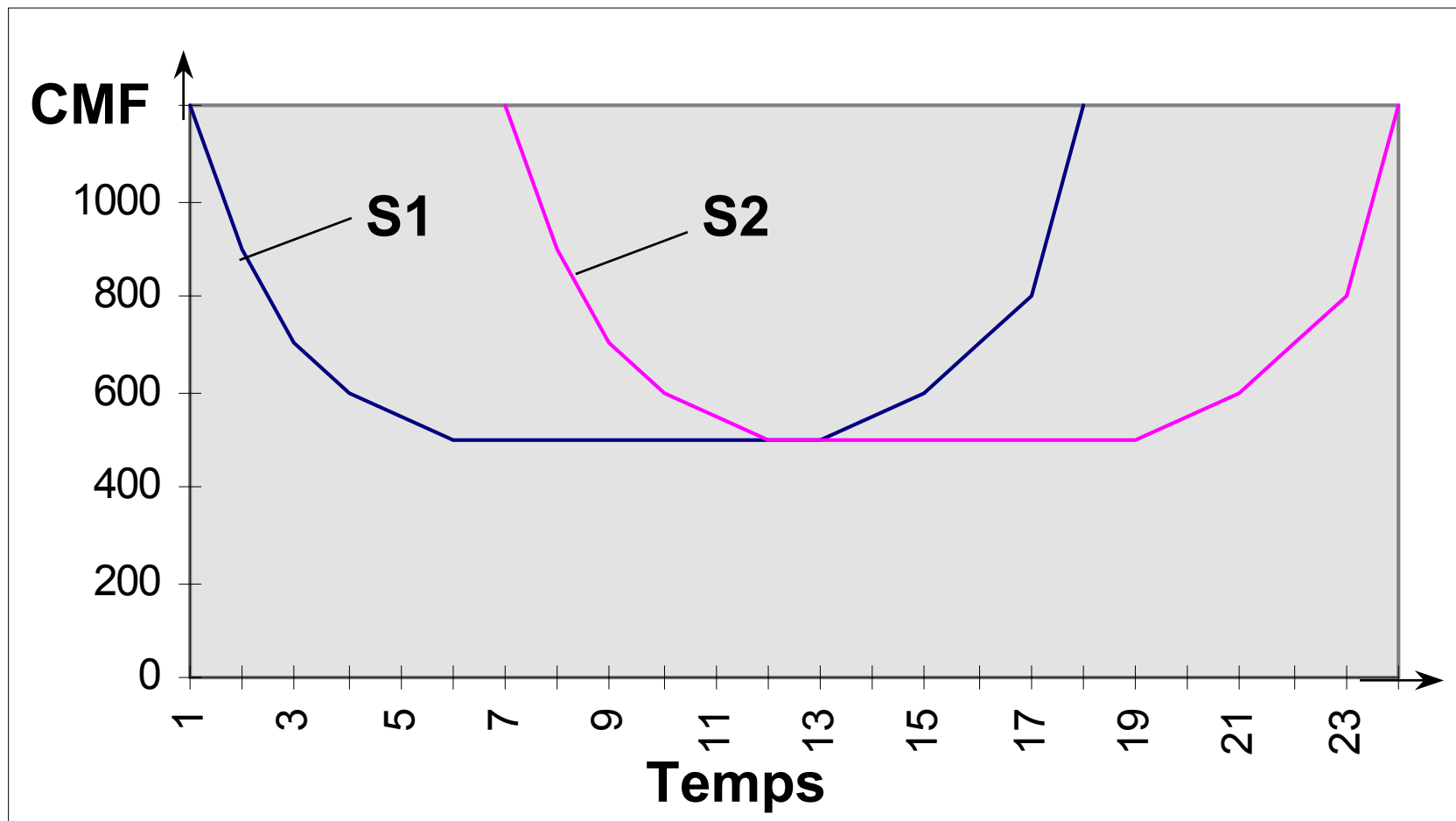
## Courbe CMF





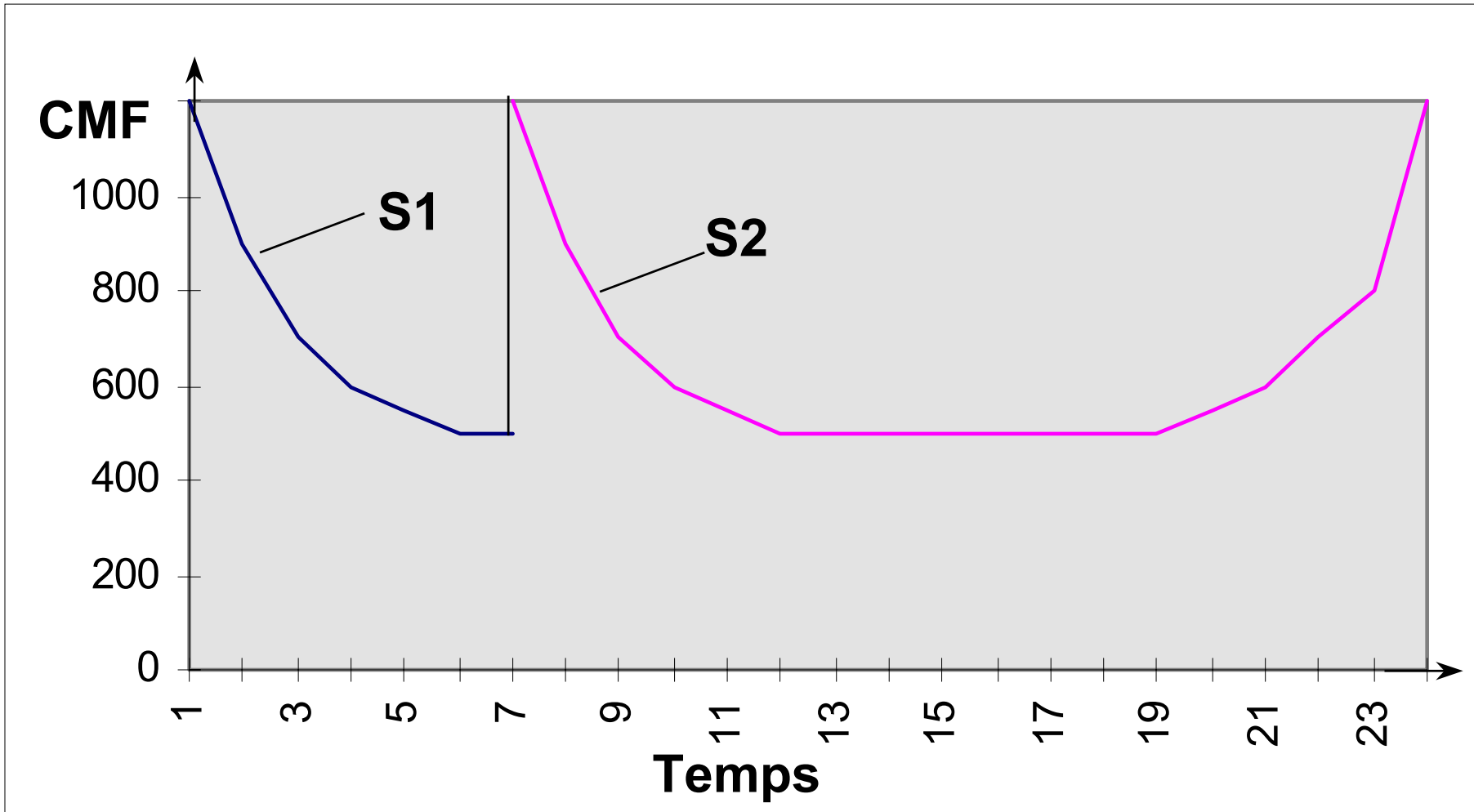
# CMF (7)

## Courbe CMF(2)



# CMF (8)

## Courbe CMF(3)





# ACTUALISATION DES COÛTS (1)

Le cycle de vie d'un élément maintenu peut s'étaler sur des années, voire des dizaines d'années. Se pose donc le problème de l'actualisation, visant à tenir compte de l'évolution des valeurs monétaires au cours du temps.

Il existe 3 façons de comparer les coûts présents et futurs :

## 1) En prix actuels et constants :

**Hypothèse de base** : les prix resteront égaux aux prix actuels ou aux prix d'une période de référence.

Solution de facilité ne se justifiant que lorsque la période d'étude est courte ou quand les rapports entre les prix ne sont pas susceptibles de varier de façon significative.

# ACTUALISATION DES COÛTS (2)

## 2) En monnaie courante :

**Hypothèse de base** : les prix de certains éléments varient dans le temps selon des lois différentes (salaires, matières premières, technologies particulières...) mais l'unité monétaire utilisée pour les quantifier à une valeur stable.

Cette méthode est inutilisable seule car elle suppose une unité et une stabilité monétaires discutables étant donnés les phénomènes d'inflation et d'érosion monétaire.

# ACTUALISATION DES COÛTS (3)

## 3) En monnaie constante

**Hypothèse de base** : l'évolution des prix est constituée de 2 composantes :

- Une évolution générale, par exemple l'érosion monétaire : cette évolution est soumise aux aléas de la conjoncture et à l'action des pouvoirs publics,
- Des évolutions relatives des prix les uns par rapport aux autres, principalement liées à des évolutions structurelles spécifiques, telles que les progrès différenciés de productivité, les modifications de consommation etc...

# ACTUALISATION DES COÛTS (4)

Travailler en monnaie constante consiste à tenir compte de ces deux phénomènes.

L'actualisation est fondée sur les principes suivants :

Que 100 E disponibles aujourd'hui vaudront dans  $n$  année, si le taux constant d'inflation prévisionnel est de  $e$  %, une somme  $S_n$  égale à :

$$S_n = 100 \times (1 + e)^n$$

$$S_n = Vd \times (1 + e)^n$$

# ACTUALISATION DES COÛTS (4)

Qu'un équipement d'une technologie en phase d'évolution (par exemple, l'informatique), valant aujourd'hui 100 E, vaudra dans  $m$  année(s), si le taux d'évolution du prix de la technologie en question est de  $a$  %, une somme  $S_m$  égale à :

$$S_m = \frac{100}{(1 + a)^m}$$

$$S_m = \frac{Vd}{(1 + a)^m}$$



# ACTUALISATION DES COÛTS (4)

Ainsi, la valeur actuelle du coût moyen de fonctionnement au bout de  $n$  années, tenant compte du problème d'actualisation est donc égal aujourd'hui à :

$$\begin{aligned} Cmf_n &= \frac{1}{N_n} \left( \sum_{x=1}^{n1} \frac{\text{Coût d'exploitation } (1+a)^x}{(1+e)^x} \right. \\ &\quad + \sum_{x=1}^{n2} \frac{\text{Coût de maintenance } (1+b)^x}{(1+e)^x} \\ &\quad \left. + PA - \frac{RV_n}{(1+e)^n} \right) \end{aligned}$$

# ACTUALISATION DES COÛTS (4)

avec :

$N_n$  : le volume total de service rendu au bout de  $n$  années,

$RV_n$  : la valeur de revente au bout de  $n$  années ;

$n_1$  : le nombre d'années d'exploitation,

$n_2$  : le nombre d'années de maintenance ;

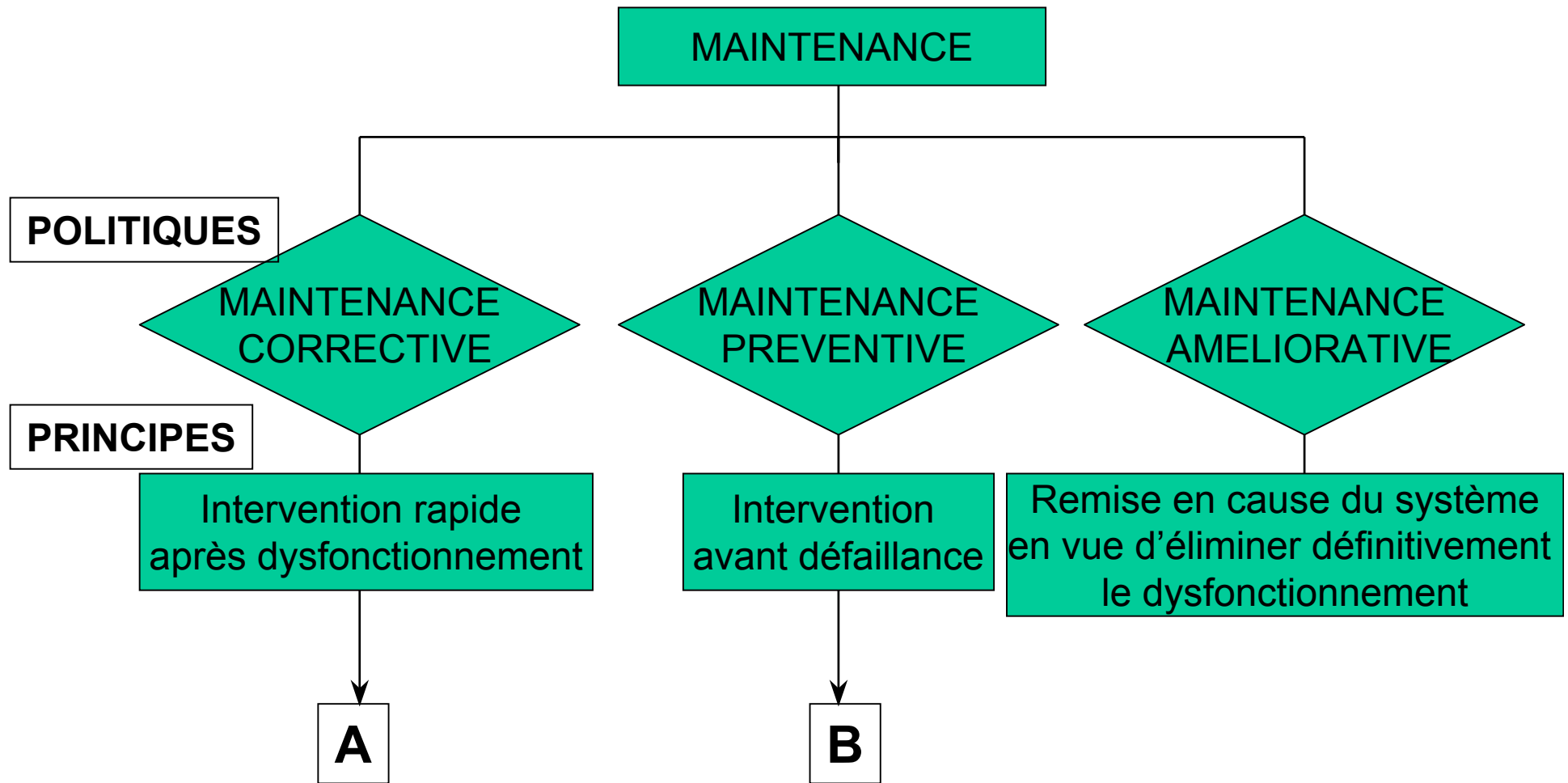
$a$  : le taux annuel d'évolution des prix de l'exploitation

$b$  : le taux annuels d'évolution des prix de la maintenance

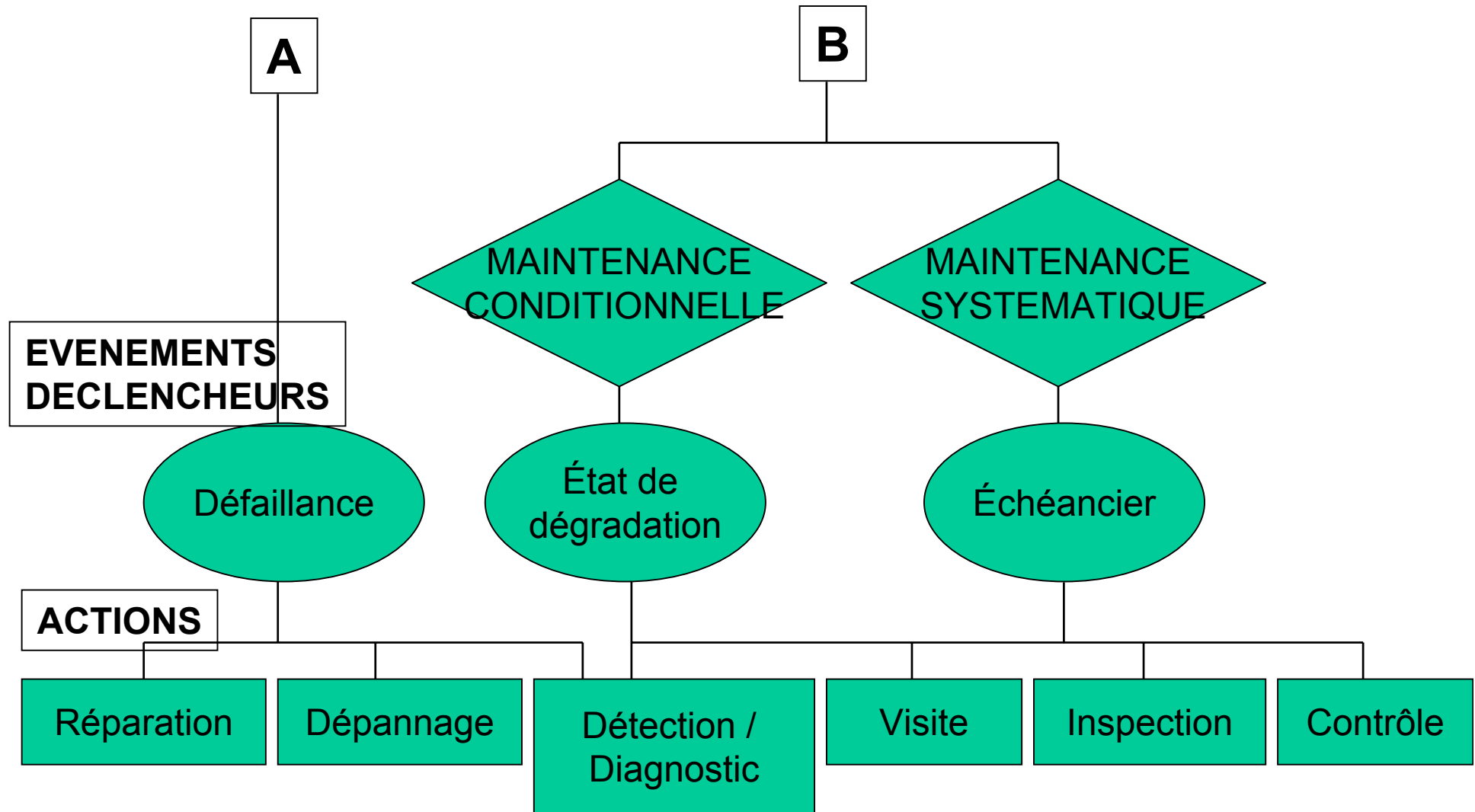
$e$  : le taux annuel d'actualisation.

# **Chapitre 5 : Politiques de maintenance**

# STRUCTURE GENERALE (1)



# STRUCTURE GENERALE (2)



# MAINTENANCE CORRECTIVE (1)

C'est l'ensemble des activités réalisées après défaillance d'un bien ou dégradation de sa fonction, afin de lui permettre d'accomplir, au moins provisoirement, une fonction requise.

Ces activités comprennent la détection/localisation de la défaillance et son diagnostic, la remise en état avec ou sans modification, et le contrôle du bon fonctionnement.

La remise en état peut prendre deux formes : le dépannage ou la réparation.

## Détection

Action de déceler au moyen d'une surveillance accrue, continue ou non, l'apparition d'une défaillance ou l'existence d'un élément défaillant.

# MAINTENANCE CORRECTIVE (2)

## Localisation

Action conduisant à rechercher précisément le ou les éléments par lesquels la défaillance se manifeste.

## Diagnostic

Identification de la cause probable de la (ou des) défaillance(s) à l'aide d'une analyse ou d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test.

Le diagnostic confirme, complète ou modifie les hypothèses faites sur l'origine et la cause des défaillances et précise les opérations de maintenance correctives nécessaires.

# MAINTENANCE CORRECTIVE (3)

## Dépannage

En dehors des défaillances imprévisibles qui guettent tout équipement, le dépannage est la méthode la plus appropriée pour :

- les équipements secondaires au fonctionnement sporadique
- les équipements à faible coût de défaillance,
- les équipements pour lesquels une méthode de maintenance plus élaborée est inadéquate : difficultés de démontage pour visites ou contrôles, matériel en fin de carrière, matériel bon marché...

Du fait du caractère imprévu de la panne, l'ordonnancement des travaux de dépannage est impossible. Cependant, on doit envisager une amélioration des conditions d'exécution, afin de faire du dépannage une méthode rationnelle et efficace.



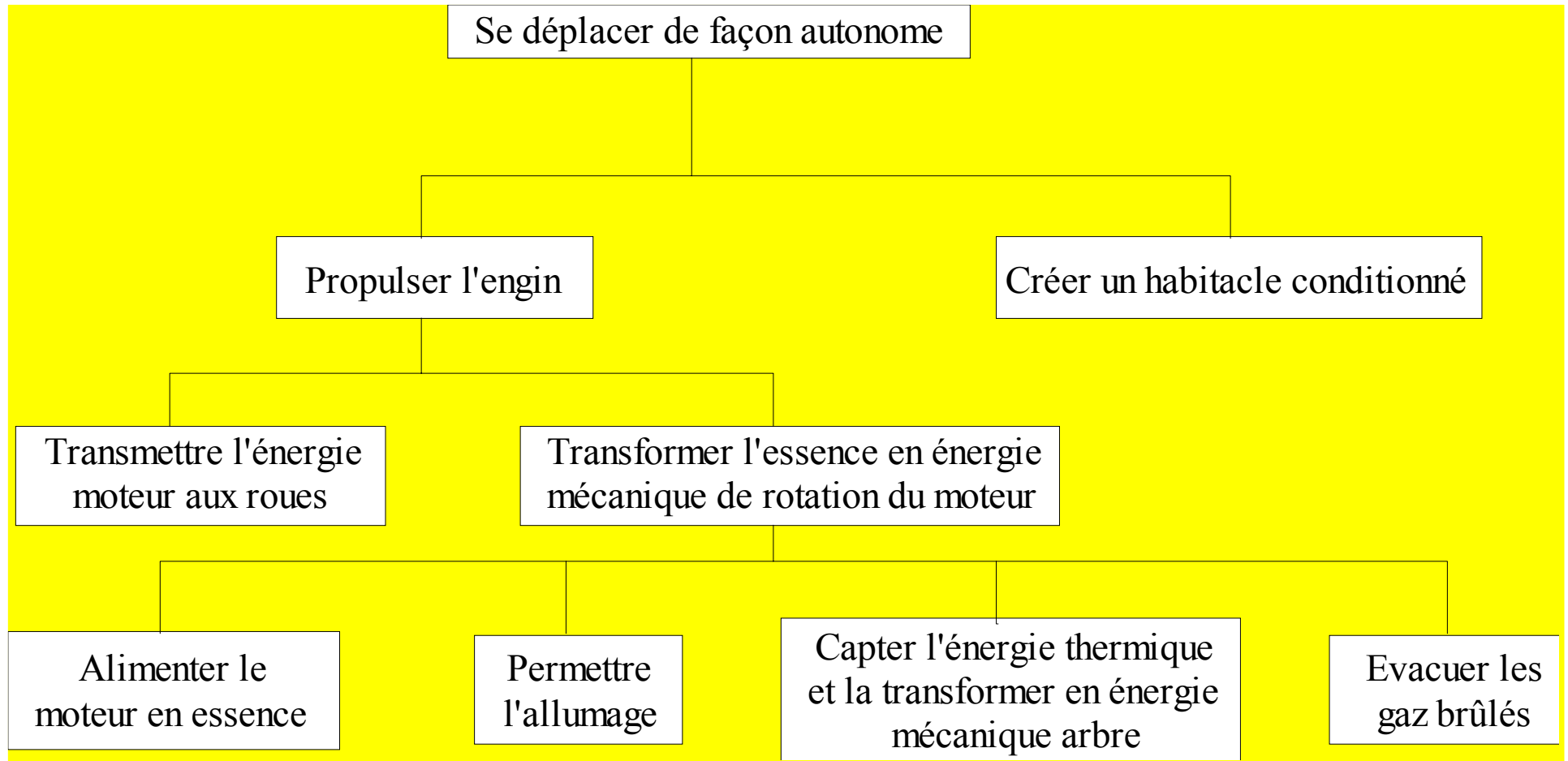
# MAINTENANCE CORRECTIVE (4)

**Se préparer au dépannage consiste donc à :**

**Être prêt à intervenir :** pour cela, le personnel doit être compétent, entraîné et équipé pour certains travaux, éventuellement spécialisé dans certains types de pannes et d'équipements, disponible, formé pour toute nouvelle technologie introduite sur le site, il doit disposer de moyens d'alerte, d'outillages et d'éléments de rechange adaptés à la demande supposée.

**Savoir où intervenir :** l'efficacité du dépannage passe par une très bonne connaissance des équipements, de leur fonctionnement, et des circonstances qui peuvent amener à la défaillance. Cette connaissance peut être améliorée par exemple en procédant à des analyses fonctionnelles des équipements, comme par exemple pour une automobile :

# MAINTENANCE CORRECTIVE (5)



# MAINTENANCE CORRECTIVE (6)

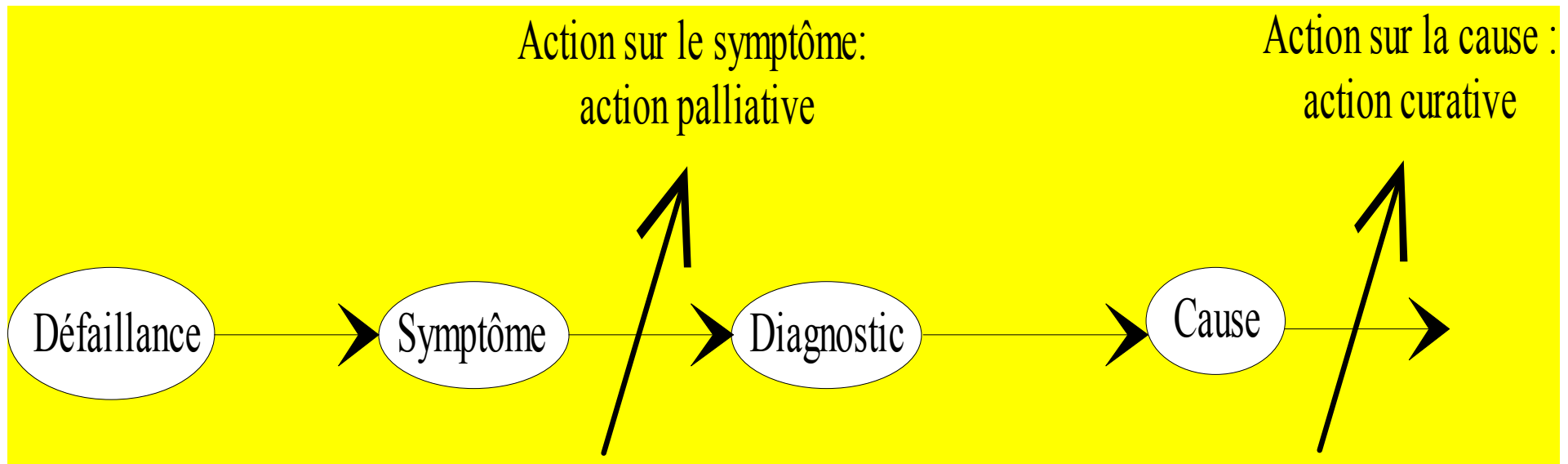
## **Savoir comment intervenir :**

Une fois la cause de la panne découverte, le problème doit être résolu le plus rapidement possible, selon la procédure la plus logique possible. Toute perte de temps due à des hésitations concernant l'ordre de démontage, toute fausse manœuvre conduisant à endommager un composant sain, peuvent être évitées si l'on dispose de documents d'aide à l'intervention guidant le personnel au cours des opérations.

L'efficacité du dépannage peut aussi être accrue par le traitement de sous-ensembles en échanges standards : afin de gagner du temps, plutôt que de réparer sur place le sous-ensemble défectueux, on le remplacera par un autre en bon état. La réparation de l'élément défaillant sera alors entreprise ultérieurement dans de bonnes conditions, en atelier.

# MAINTENANCE CORRECTIVE (7)

La détection du symptôme peut être suffisante dans une démarche de maintenance palliative, mais le diagnostic est indispensable à toute action de maintenance corrective.



# MAINTENANCE CORRECTIVE (8)

## Objectifs du dépannage et problèmes potentiels :

**Protéger les utilisateurs et le matériel** : le risque sera-t-il suffisamment réduit ? pendant combien de temps ? quelles précautions doit-on prendre ?

- **Permettre de continuer l'exploitation** : le service fournit ne sera-t-il pas dégradé ?
- **Permettre d'attendre le moment opportun** pour faire la réparation définitive : peut on décider à quel moment cette réparation définitive pourra être faite ?
- **Donner le temps** de préparer et de planifier la réparation.

# MAINTENANCE CORRECTIVE (9)

## Réparation

Elle peut prendre différentes formes :

- Réparation limitée, intervenant après panne,
- Échange standard d'un sous-ensemble,
- Remise en état de l'échange standard précédemment déposé.

La réparation permet la remise en état, **de façon durable**, d'un équipement usagé ou immobilisé à la suite d'un incident, ou dégradé, n'assurant plus dans des conditions acceptables la fonction qui est la sienne. Elle doit donc satisfaire à deux exigences :

- **Sécurité d'exploitation**
- **Fiabilité.**

# MAINTENANCE CORRECTIVE (10)

La réparation doit en outre restituer ses qualités initiales à l'équipement. Cependant, le retour aux performances initiales peut s'avérer très onéreux, et l'on se limitera lorsque c'est possible, à un niveau acceptable bien qu'inférieur à celui de l'équipement neuf.

La réparation n'est pas exclusivement une activité de maintenance corrective, elle peut intervenir :

- A la suite d'un dépannage provisoire,
- Après une visite en maintenance conditionnelle, ayant permis de déceler un risque de défaillance à venir,
- Après un arrêt programmé en maintenance systématique,
- Sur un équipement en panne ou présentant des signes de défaillance.

# MAINTENANCE PREVENTIVE (1)

C'est l'ensemble des activités réalisées selon des critères prédéterminés, dans l'intention de réduire la probabilité de défaillance d'un bien ou la dégradation d'un service rendu.

Lorsque le critère est un nombre prédéterminé d'unités d'usage (heures de fonctionnement, kilomètres parcourus, pièces produites...), on se place dans une démarche de **maintenance systématique**,

S'il est une valeur prédéterminée (un seuil) significative de l'état de dégradation du bien ou du service, on est alors dans le cas de la **maintenance conditionnelle** (appelée également maintenance selon état).



# MAINTENANCE PREVENTIVE (2)

## Maintenance conditionnelle

La maintenance conditionnelle se traduit par une surveillance des points sensibles de l'équipement, exercée au cours de visites préventives.

Ces visites soigneusement préparées, permettent d'enregistrer un degré d'usure, un jeu mécanique, une température, une pollution, ou tout autre paramètre qui puisse mettre en évidence l'imminence d'une défaillance.

## Objectifs de la maintenance conditionnelle

- Éliminer ou limiter le risque de panne, l'intervention ayant lieu avant que la dégradation n'atteigne un caractère critique (et donc, ralentir le vieillissement),
- Limiter les perturbations subies par l'utilisateur, en réalisant une meilleure préparation des interventions,
- Réduire les dépenses de maintenance en intervenant à un stade précoce des dégradations, évitant ainsi les remises en état très coûteuses.

# MAINTENANCE PREVENTIVE (3)

## Démarche générale de préparation des visites préventives:

- Déterminer en fonction de leur criticité (éléments de sécurité, d'usage courant ou de confort), de leur robustesse, et de leur coût, les éléments devant passer en maintenance conditionnelle,
- Pour chacun des équipements retenus, faire l'inventaire des composants à surveiller,
- En déduire la liste des points clés devant faire l'objet de contrôles,
- Définir les défauts possibles, préconiser les conditions de visite, les paramètres à contrôler, les valeurs limites et fixer la périodicité des visites,
- Regrouper les opérations de même périodicité en listes distinctes, afin d'établir des gammes types, ou processus de visite préventive. Ces gammes seront complétées par la liste des outillages, des instruments de contrôle, des petites fournitures et consommables, et des temps nécessaires.
- Planifier les visites préventives.

# MAINTENANCE PREVENTIVE (4)

L'appellation **Maintenance prédictive** concerne plus particulièrement la surveillance d'équipements grâce à des techniques ne nécessitant ni arrêt de production ni démontage tels que :

- le contrôle des vibrations,
- la thermographie (mesure de l'intensité des émissions de rayons infrarouges),
- la tribologie (étude dynamique des paliers lubrifiés par analyse du lubrifiant, des particules d'usure ou ferrographie),
- le contrôle des paramètres de processus (pressions, intensité électrique, vitesses...),
- l'inspection visuelle,
- le contrôle ultrasonique,
- le contrôle des émissions acoustiques,
- l'analyse des particules magnétiques...

# MAINTENANCE PREVENTIVE (5)

## Maintenance systématique

La maintenance systématique se traduit par l'exécution sur un équipement, à dates planifiées (ou à volume prédéfini d'unités d'usage atteint), d'interventions dont l'importance peut s'échelonner depuis le simple remplacement de quelques pièces jusqu'à la révision générale.

Les travaux ont un caractère systématique, ce qui suppose une parfaite connaissance du comportement de l'équipement, de ses modes et de sa vitesse de dégradation.

La maintenance systématique se pratique quand on souhaite procurer à un équipement une sécurité de fonctionnement quasi absolue en remplaçant suffisamment tôt les pièces ou organes victimes d'usure ou de dégradations.

# MAINTENANCE PREVENTIVE (6)

Cette recherche de garantie de fonctionnement conduit à remplacer des pièces dont l'usure est incomplète. C'est donc un procédé qui coûte cher et que seule la nécessité d'une sécurité de haut niveau peut justifier.

Étant donné son caractère particulier, la maintenance systématique doit être appliquée avec discernement, elle conviendra plus particulièrement :

- aux équipements dont la panne risque de provoquer des accidents graves,
- aux équipements présentant un coût de défaillance élevé,
- aux équipements soumis à la législation, c'est à dire faisant l'objet de mesures de sécurité réglementées.

L'organisation de la maintenance systématique recouvre deux aspects :

- La détermination du contenu des interventions,
- Le choix de la périodicité.

# LES DIFFERENTS NIVEAUX DE MAINTENANCE (1)

La norme X 60-010 distingue 5 degrés de maintenance, classés de manière croissante, selon la complexité des interventions à effectuer.

## **Maintenance 1<sup>er</sup> niveau**

Les actions de maintenance premier niveau sont des actions simples nécessaires à l'exploitation et réalisées sur des éléments facilement accessibles, en toute sécurité, à l'aide d'équipements de soutien intégrés au bien.

Ce sont par exemple les réglages et contrôles ou inspections nécessaires à l'exploitation, les opérations élémentaires de maintenance préventive, le remplacement d'articles consommables ou d'accessoires (fusibles, ampoules...).

Ce type d'opérations peut être effectué par l'exploitant du bien avec les équipements de soutien intégrés au bien et à l'aide des instructions d'utilisation.

# LES NIVEAUX DE MAINTENANCE (2)

## Maintenance 2<sup>ème</sup> niveau

Le deuxième niveau de maintenance concerne les actions qui nécessitent des procédures simples et/ou des équipements de soutien (intégrés ou extérieurs) d'utilisation et de mise en œuvre simples.

Ce sont par exemple les contrôles de performances, certains réglages, les réparations par échange standard de sous-ensembles dont le remplacement est aisé.

Ce type de maintenance peut être effectué par un personnel habilité avec les procédures détaillées et les équipements de soutien définis dans les instructions de maintenance.

Sont ainsi concernées par ce niveau les opérations de remplacement de pièces n'entraînant pas de démontage global de l'équipement. C'est donc un travail portant sur des éléments isolés ou des opérations de vérification de résultats tels que le contrôle des performances du matériel livré.

# LES NIVEAUX DE MAINTENANCE (3)

## **Maintenance 3<sup>ème</sup> niveau**

Le troisième niveau concerne les opérations qui nécessitent des procédures complexes et/ou des équipements de soutien, d'utilisation ou de mise en œuvre complexes.

Ce sont par exemple les réglages généraux, les opérations de maintenance systématique délicates, les réparations par échanges de composants.

Ces opérations nécessitent une approche globale du fonctionnement de l'équipement, c'est à dire la prise en compte de plusieurs éléments, de leurs interactions et de leur cohérence.



# LES NIVEAUX DE MAINTENANCE (4)

## **Maintenance 4<sup>ème</sup> niveau**

Le 4<sup>e</sup> niveau concerne les opérations dont les procédures impliquent la maîtrise d'une technologie particulière et/ou la mise en œuvre d'équipements de soutien spécialisés.

Ce sont par exemple les réparations spécialisées, les vérifications d'appareils de mesure.

## **Maintenance 5<sup>ème</sup> niveau**

Activités de rénovation ou de reconstruction dont les procédures impliquent un savoir-faire faisant appel à des techniques ou technologies particulières, des processus et/ou des équipements de soutien industriels.

# LES OUTILS DE LA MAINTENANCE

Tout comme l'intervention technique de maintenance, l'organisation et la gestion des activités de maintenance nécessitent l'emploi d'outils d'usages et de natures différentes :

**Outils mathématiques** : pour choisir les politiques de maintenance les mieux adaptées à chaque type d'équipement, déterminer les périodes d'intervention, connaître la fiabilité, maintenabilité, disponibilité... (probabilités, lois statistiques, algèbre des événements, analyses markoviennes...)

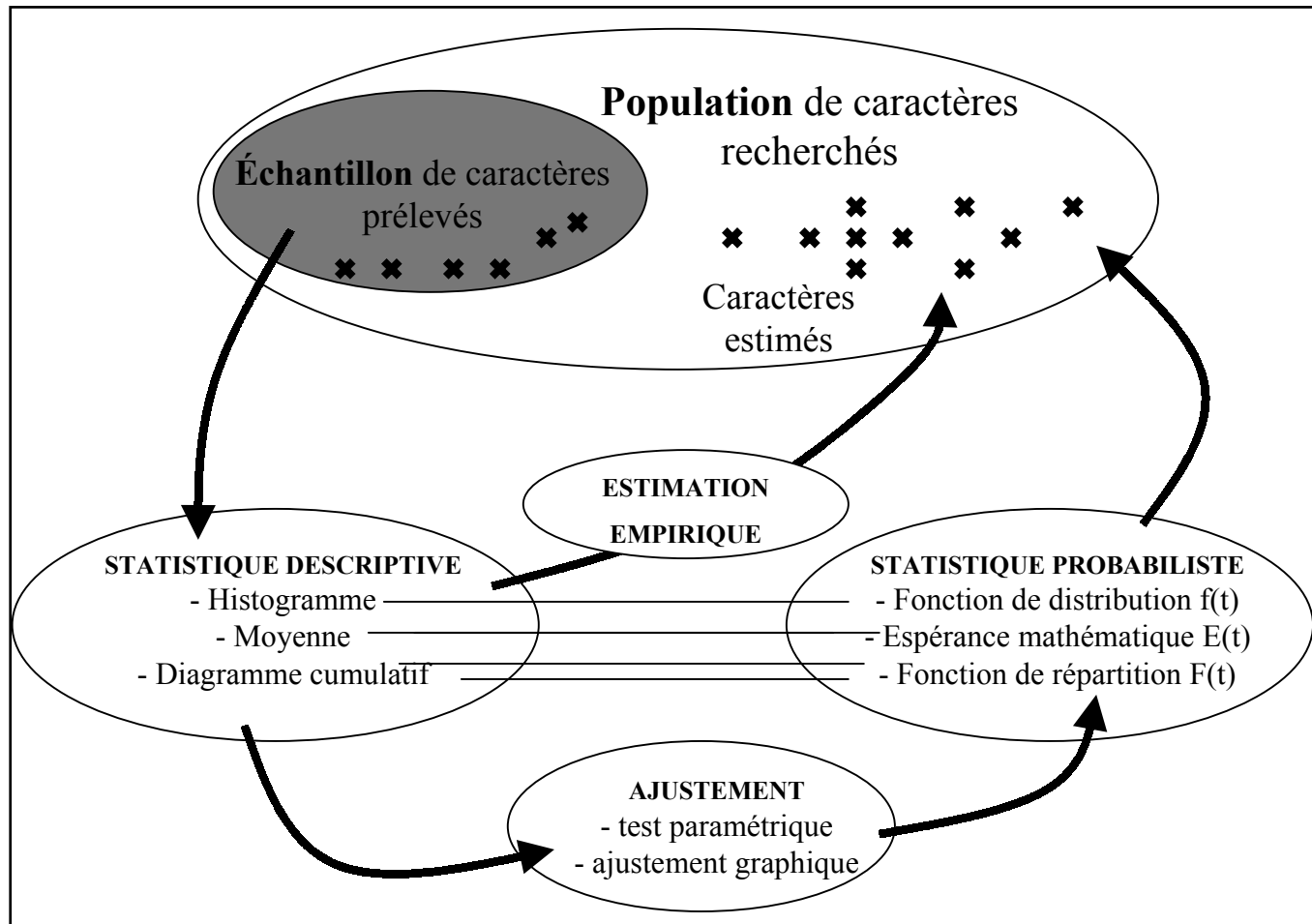
**Outils organisationnels** : pour faciliter la prise de décisions (AMDEC, Synoptiques, Logigrammes...), la mise en œuvre de la maintenance préventive (techniques de contrôle), ou l'organisation des interventions (procédures et modes opératoires)

**Outils Informatiques** : pour la gestion des éléments maintenus, des ressources utilisées et des budgets (GMAO, GTP, GTB), ou pour l'aide à la décision (Systèmes experts).

# **Chapitre 6 : Méthodes et outils mathématiques pour la mise en œuvre des actions de maintenance**

# ETUDES STATISTIQUES (1)

L'objectif des méthodes statistiques de recherche de la fiabilité est de définir, à partir d'un échantillon de certains équipements d'une même catégorie, une estimation du comportement de l'ensemble des équipements de cette catégorie.



# ETUDES STATISTIQUES (2)

## Regroupement des classes :

Si  $N > 50$ , il faut réaliser des regroupements en classes de valeur  $\Delta t$ .

Pour déterminer le nombre  $K$  de classes à créer, plusieurs règles empiriques existent :

$$K \leq \frac{N}{10} \quad \text{et} \quad K \geq 5 \quad (\text{Gnedenko})$$

$$K \approx \sqrt{N} \quad (\text{Chapouille et De Pazzis})$$

## Cas des grands échantillons $N > 50$

Intervalles de classes	Effectifs	Fréquence relative	Fréquence cumulée
$t_{i-1}, t_i$	$n_i$	$f_i = \frac{n_i}{N}$	$F_i = \frac{\sum n_i}{N} = F(t)$

# ETUDES STATISTIQUES (3)

## Cas des petits échantillons $N < 50$

TBF croissants	Effectifs	Ordre (rang)	Fréquence cumulée
$t_i$	$n_i$	$\sum n_i = i^{\text{ième}}$	$F_i = \frac{i}{N}$

**Dans ce dernier cas, une approximation de la fonction de répartition  $F(t)$  sera nécessaire :**

- **Si  $20 < N < 50$** , on utilisera l'approximation par les rangs moyens suivant la formule:

$$F(i) = \frac{i}{N + 1}$$

- **Si  $N < 20$** , on utilisera l'approximation par les rangs médians, suivant la formule:

$$F(i) = \frac{i - 0,3}{N + 0,4}$$

# ETUDES STATISTIQUES (4)

## Lois de probabilité et ajustement

L'estimation des paramètres caractéristiques du matériel (MTBF, MTTR) et des lois régissant son comportement ( $R(t)$ ,  $M(t)$ ...) passe par l'usage de lois de probabilité bien connues, possédant elles même des paramètres bien connus:

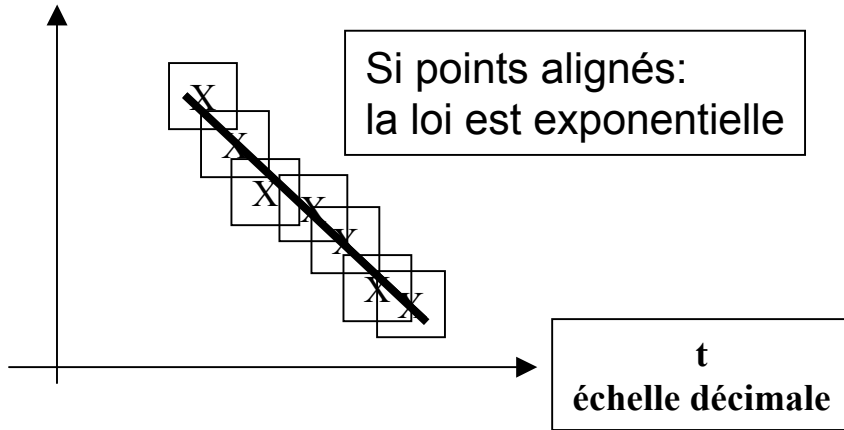
- **loi exponentielle**, dont le paramètre  $\lambda$  représente le taux de défaillance de l'équipement,
- loi **normale**, dont les paramètres sont  $m$  (moyenne) et  $\sigma$  (écart-type),
- **loi de Weibull**, dont les paramètres sont  $\beta$  (paramètre de forme),  $\eta$  (paramètre d'échelle) et  $\gamma$  (paramètre de position)

Le problème est de savoir si les valeurs relevées expérimentalement suivent bien l'une de ces lois. Pour cela, deux types de tests sont possibles:

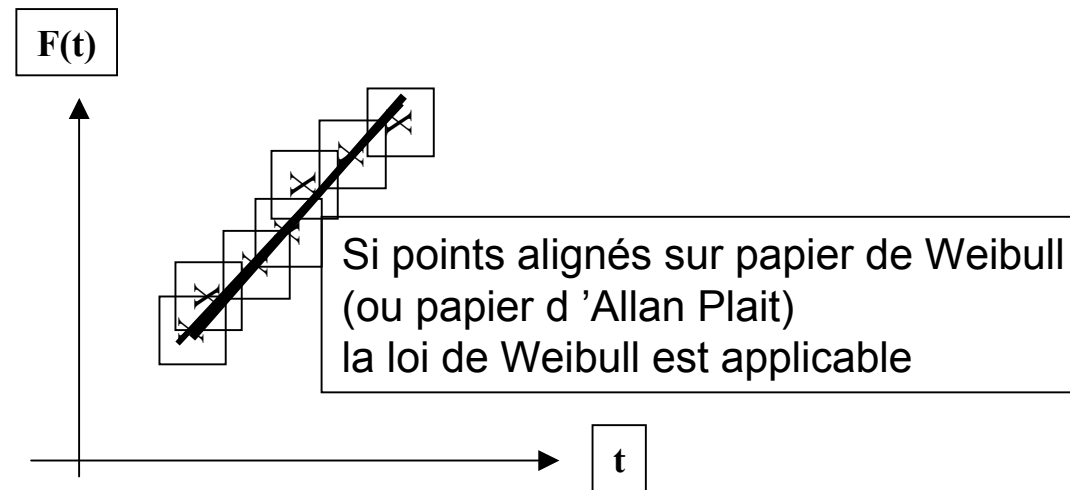
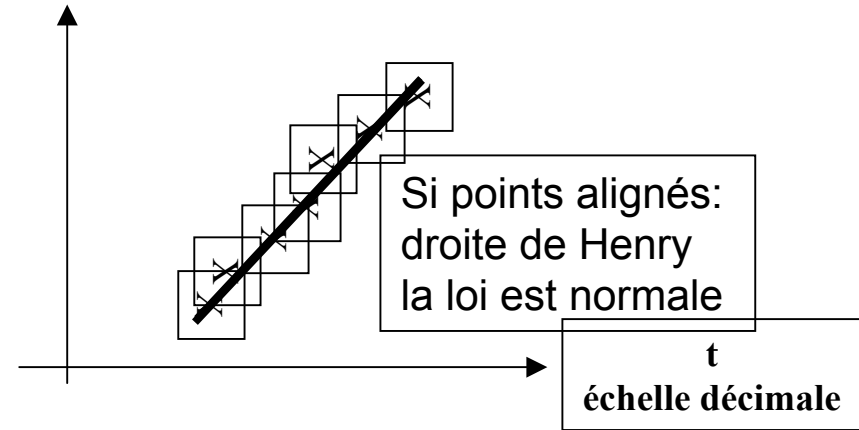
- **les tests numériques** : test du  $\chi^2$ , de Lilliefors (loi normale), de Barlett (loi exponentielle), de Mann (loi de Weibull)
- **les tests graphiques** : en plaçant les points correspondant aux valeurs expérimentales sur les papiers fonctionnels correspondant à chacune des lois, l'observation de l'alignement des points signifie une corrélation avec la loi concernée.

# ETUDES STATISTIQUES (5)

**R(t)**  
échelle logarithmique

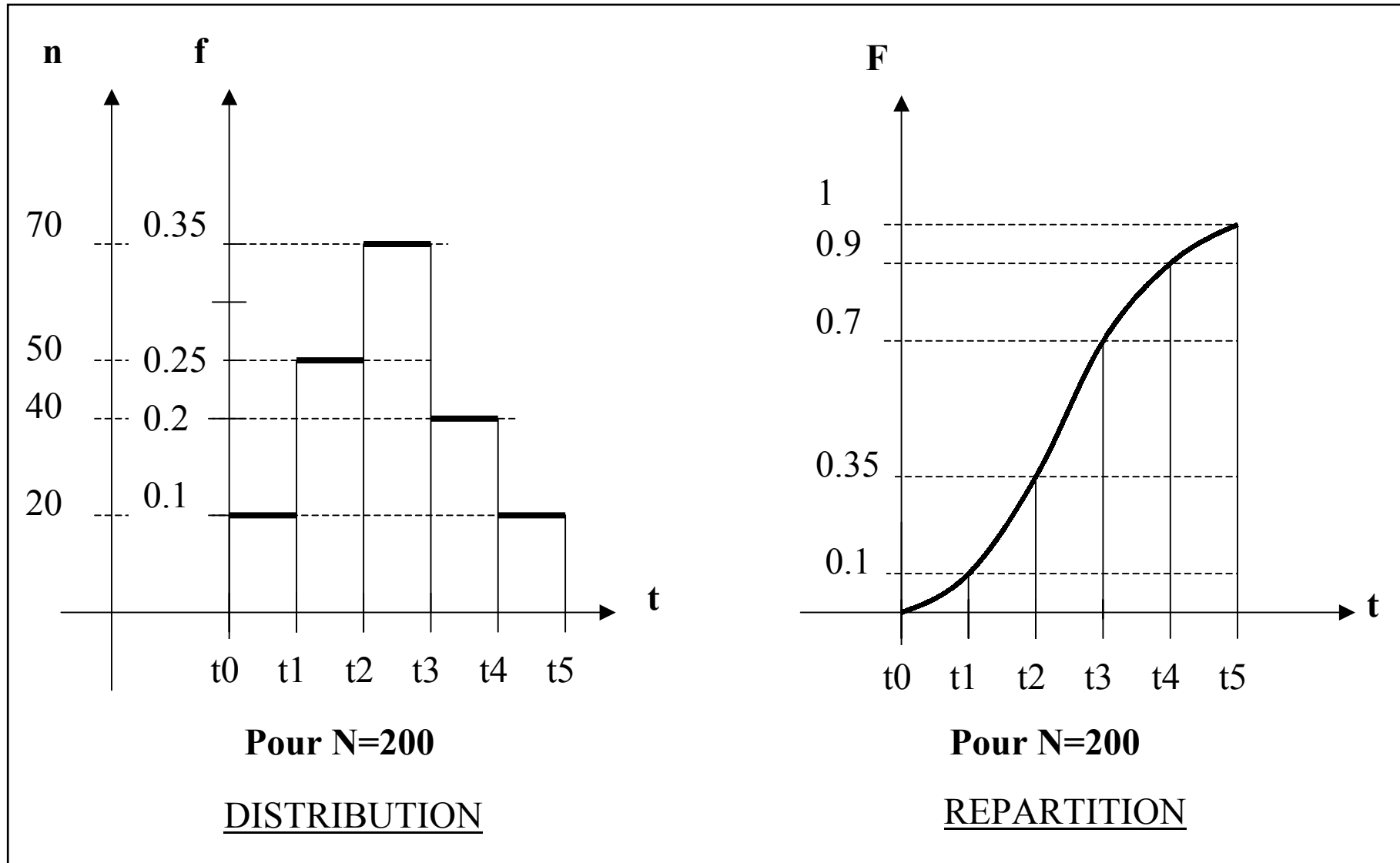


**F(t)**  
échelle gaussienne



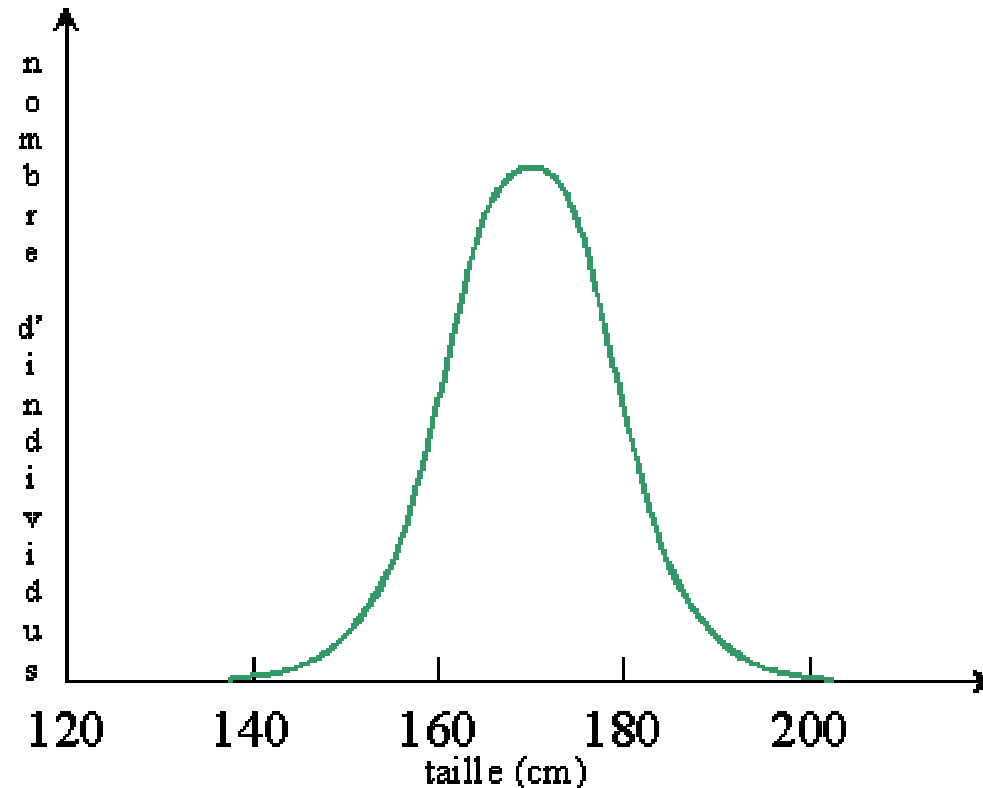


# ETUDES STATISTIQUES (6)



# ETUDES STATISTIQUES (7)

Souvent avec un échantillon important d'individus d'une population, l'histogramme devient de plus en plus régulier et se rapproche d'une courbe en cloche. On dit qu'elle suit une loi appelée loi normale.



Cette courbe est aussi appelée loi de Gauss, en l'honneur du grand mathématicien allemand Karl Friederich Gauss (1777-1855)

# ETUDES STATISTIQUES (8)

- La loi normale est la loi statistique la plus répandue et la plus utile.
- Elle représente beaucoup de phénomènes aléatoires.
- La variable  $x$  est distribuée selon une loi normale  $N(\mu, \sigma^2)$  si :

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\Pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

$\mu$  : est la moyenne

$\sigma$  : l'écart type

$n$  le nombre total d'individus dans l'échantillon

$f(x)$  le nombre d'individus pour lesquels la grandeur analysée a la valeur  $x$

**Moyenne**

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^k x_i$$

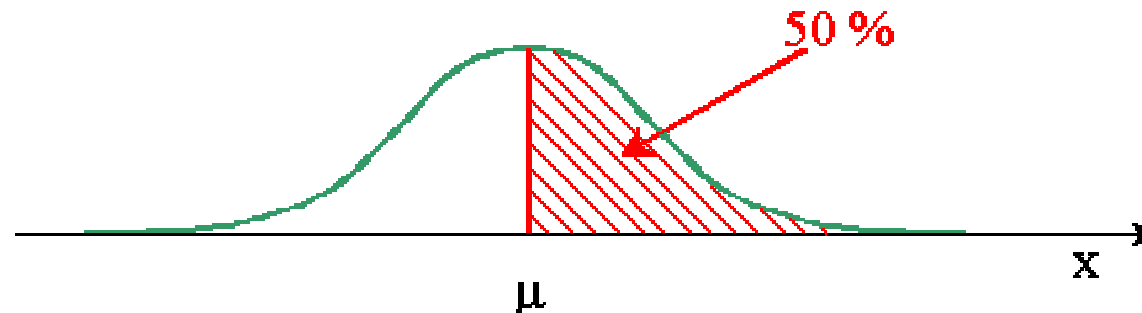
**Écart type**

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^k (x_i - \mu)^2}$$

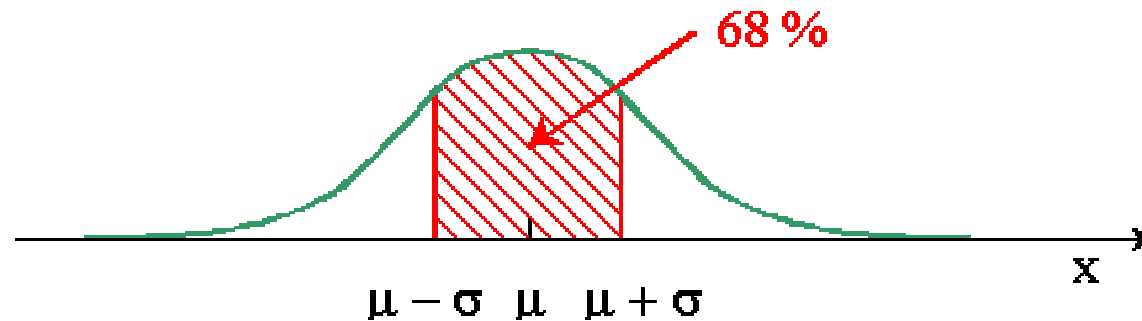
# ETUDES STATISTIQUES (9)

Lorsque la distribution des individus dans une population obéit à la loi normale, on trouve :

50 % des individus en dessous de la moyenne  $\mu$  et  
50 % au-dessus (la loi normale est symétrique)

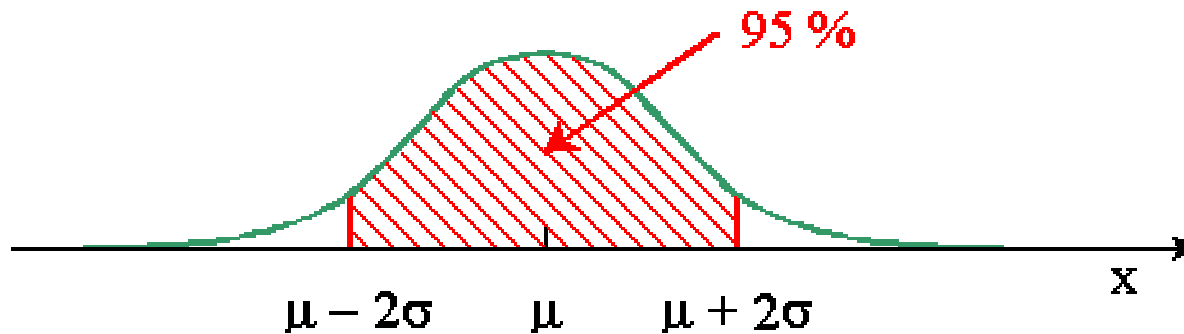


68 % des individus entre  $\mu - \sigma$  et  $\mu + \sigma$

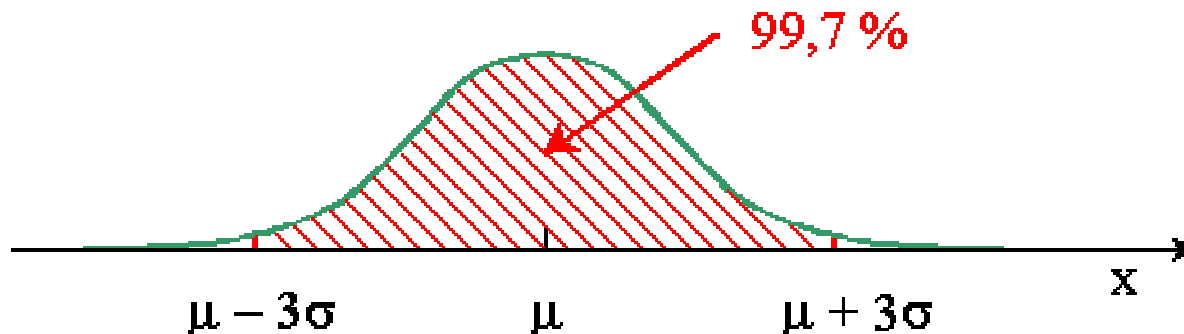


# ETUDES STATISTIQUES (10)

95 % des individus entre  $\mu - 2\sigma$  et  $\mu + 2\sigma$



99,7 % des individus entre  $\mu - 3\sigma$  et  $\mu + 3\sigma$  (il y a donc très peu de chances qu'un individu s'écarte de la moyenne de plus de  $3\sigma$  ).



# ETUDES STATISTIQUES (11)

Pour calculer les probabilités associées à la loi normale, on utilise généralement la loi normale réduite: c'est une loi normale pour laquelle  $\mu = 0$  et  $\sigma = 1$ , soit  $N(0, 1)$ .

Toute loi normale peut-être ramenée à une loi normale réduite par le changement de variable  $u = (x - \mu) / \sigma$

Utilisation : voir exemples

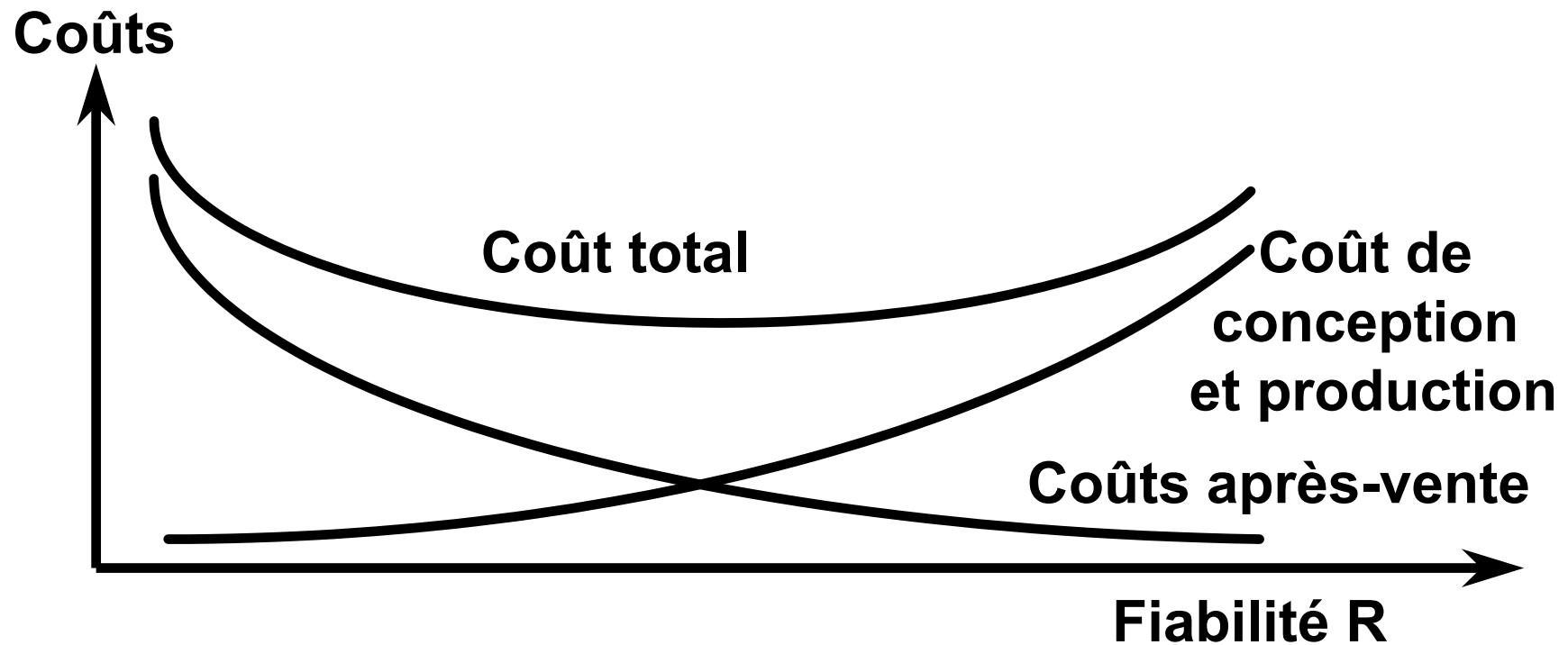
# ETUDES STATISTIQUES (12)

## Table de Laplace - Gauss : Loi normale

u	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	0.50000	0.50399	0.50798	0.51197	0.51595	0.51994	0.52392	0.52790	0.53188	0.53586
0.1	0.53983	0.54380	0.54776	0.55172	0.55567	0.55962	0.56356	0.56749	0.57142	0.57535
0.2	0.57926	0.58317	0.58706	0.59095	0.59483	0.59871	0.60257	0.60642	0.61026	0.61409
0.3	0.61791	0.62172	0.62552	0.62930	0.63307	0.63683	0.64058	0.64431	0.64803	0.65173
0.4	0.65542	0.65910	0.66276	0.66640	0.67003	0.67364	0.67724	0.68082	0.68439	0.68793
0.5	0.69146	0.69497	0.69847	0.70194	0.70540	0.70884	0.71226	0.71566	0.71904	0.72240
0.6	0.72575	0.72907	0.73237	0.73565	0.73891	0.74215	0.74537	0.74857	0.75175	0.75490
0.7	0.75804	0.76115	0.76424	0.76730	0.77035	0.77337	0.77637	0.77935	0.78230	0.78524
0.8	0.78814	0.79103	0.79389	0.79673	0.79955	0.80234	0.80511	0.80785	0.81057	0.81327
0.9	0.81594	0.81859	0.82121	0.82381	0.82639	0.82894	0.83147	0.83398	0.83646	0.83891
1.0	0.84134	0.84375	0.84614	0.84849	0.85083	0.85314	0.85543	0.85769	0.85993	0.86214
1.1	0.86433	0.86650	0.86864	0.87076	0.87286	0.87493	0.87698	0.87900	0.88100	0.88298
1.2	0.88493	0.88686	0.88877	0.89065	0.89251	0.89435	0.89617	0.89796	0.89973	0.90147
1.3	0.90320	0.90490	0.90658	0.90824	0.90988	0.91149	0.91309	0.91466	0.91621	0.91774
1.4	0.91924	0.92073	0.92220	0.92364	0.92507	0.92647	0.92785	0.92922	0.93056	0.93189
1.5	0.93319	0.93448	0.93574	0.93699	0.93822	0.93943	0.94062	0.94179	0.94295	0.94408
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

# FIABILITE (1)

- La fiabilité est une des composantes essentielles de la qualité d'un produit.
- Elle est retenue en tant que critère fondamental pour leur élaboration.
- Elle est prise en considération dès le stade de la conception.





# FIABILITE (2)

- Elle est la science des défaillances basée sur l'expérience.
- Elle a tendance à diminuer avec le nombre de ses composants.

La meilleure connaissance de la fiabilité provient de l'analyse des défaillances lorsque les produits sont en service.



Possibilité d'établir des lois statistiques sur une population importante sur un temps long à partir de données collectées en après-vente par le service maintenance.

Une des missions essentielles d'un service maintenance parfaitement géré.

Remarque : expérimentation en laboratoire

# FIABILITE (3)

**Probabilité** qu'a un bien (produit ou système) d'accomplir, de **manière satisfaisante**, une fonction requise, sous des **conditions données** et pendant une période de **temps donné**.

**Probabilité** : La fiabilité  $R = 0,92$  ( $0 \leq R \leq 1$ ) après 1000 heures signifie que le produit a 92 % de chances de fonctionner correctement pendant 1000 h.

**Manière satisfaisante** : description des critères précis (fonction de service,...)

**Sous des conditions données** : référentiel d'utilisation (humidité, vibrations, température,...)

**Temps donné** : période permettant d'évaluer les performances et d'estimer les probabilités.

# FIABILITE (4)

## Considérons :

A : un équipement mis en service à l'instant  $t = 0$ ,

X : durée de vie, la variable aléatoire continue égale au temps (ou au nombre d'unités d'usage) écoulé jusqu'à la première défaillance

F(t) : fonction de répartition de cette variable X (fonction de défaillance) : probabilité de défaillance entre (0, t)

f (t) : la fonction densité de probabilité de défaillance : probabilité de défaillance entre (t) et (t + dt).

Nous savons par définition que f, F et X sont liées par les relations suivantes :

$$F(0) = 0 \quad F(t) = \text{Pr ob}(0 \leq X \leq t) \quad \frac{dF}{dt} = f$$

# FIABILITE (5)

On note généralement  $F(t)$  la probabilité de défaillance pour une période  $t$ .

De manière complémentaire, on appelle fonction fiabilité, la fonction  $R$  définie par :

$$R(0) = 1 \quad R(t) = \text{Pr ob}(X \geq t) = 1 - F(t) \quad \lim_{\infty} R(t) = 0$$

On note  $R(t)$  la fiabilité pour une période  $t$ .

Ainsi, pour un matériel donné, on a toujours la relation :

$$R(t) + F(t) = 1$$

# TAUX DE DEFAILLANCE (1)

Soit une variable aléatoire continue de fonction densité  $f$ , de fonction de répartition  $F$  et de fonction de fiabilité  $R$ , on appelle fonction **taux de défaillance instantané** associé à la variable  $X$  (ou, par abus de langage, **taux de défaillance**) la fonction définie par la relation :

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} = - \left( \frac{\frac{d}{dt} R(t)}{R(t)} \right)$$

Exemple :  $10^{-7} < \lambda < 10^{-5}$  pour 1000 heures  
soit  $10^{-4} < \lambda < 10^{-2}$  par heure (bon niveau commercial de fiabilité)

# TAUX DE DEFAILLANCE (2)

**Données, soient :**

- $N$  = Nombre de composants total (ou population initiale)
- $N(t)$  = Nombre de composants ayant été défectueux jusqu'à l'instant  $t$
- $N_s(t)$  = Nombre de composants « survivants » à l'instant  $t$

$$R(t) = \frac{N - N(t)}{N} = \frac{N_s(t)}{N}$$

$$F(t) = \frac{N - N_s(t)}{N} = \frac{N(t)}{N}$$

$$\lambda(t) = \frac{1}{N_s} \times \frac{d(N - N_s(t))}{dt} \quad \text{or } R(t) = \frac{N_s(t)}{N} = 1 - F(t) = 1 - \frac{N - N_s(t)}{N}$$

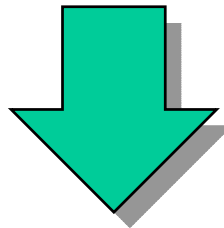
$$\text{donc } \frac{dR(t)}{dt} = -\frac{1}{N} \times \frac{d(N - N_s(t))}{dt} \quad \text{donc } \frac{d(N - N_s(t))}{dt} = -N \frac{dR(t)}{dt}$$

$$\text{et donc } \lambda(t) = -\frac{N}{N_s(t)} \times \frac{dR(t)}{dt} = -\frac{1}{R(t)} \times \frac{dR(t)}{dt}$$

# TAUX DE DEFAILLANCE (3)

Fiabilité en fonction du Taux de défaillance :

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} = - \left( \frac{\frac{d}{dt} R(t)}{R(t)} \right)$$



$$R(t) = e^{\int_0^t -\lambda(u) du}$$

# TAUX DE DEFAILLANCE (4)

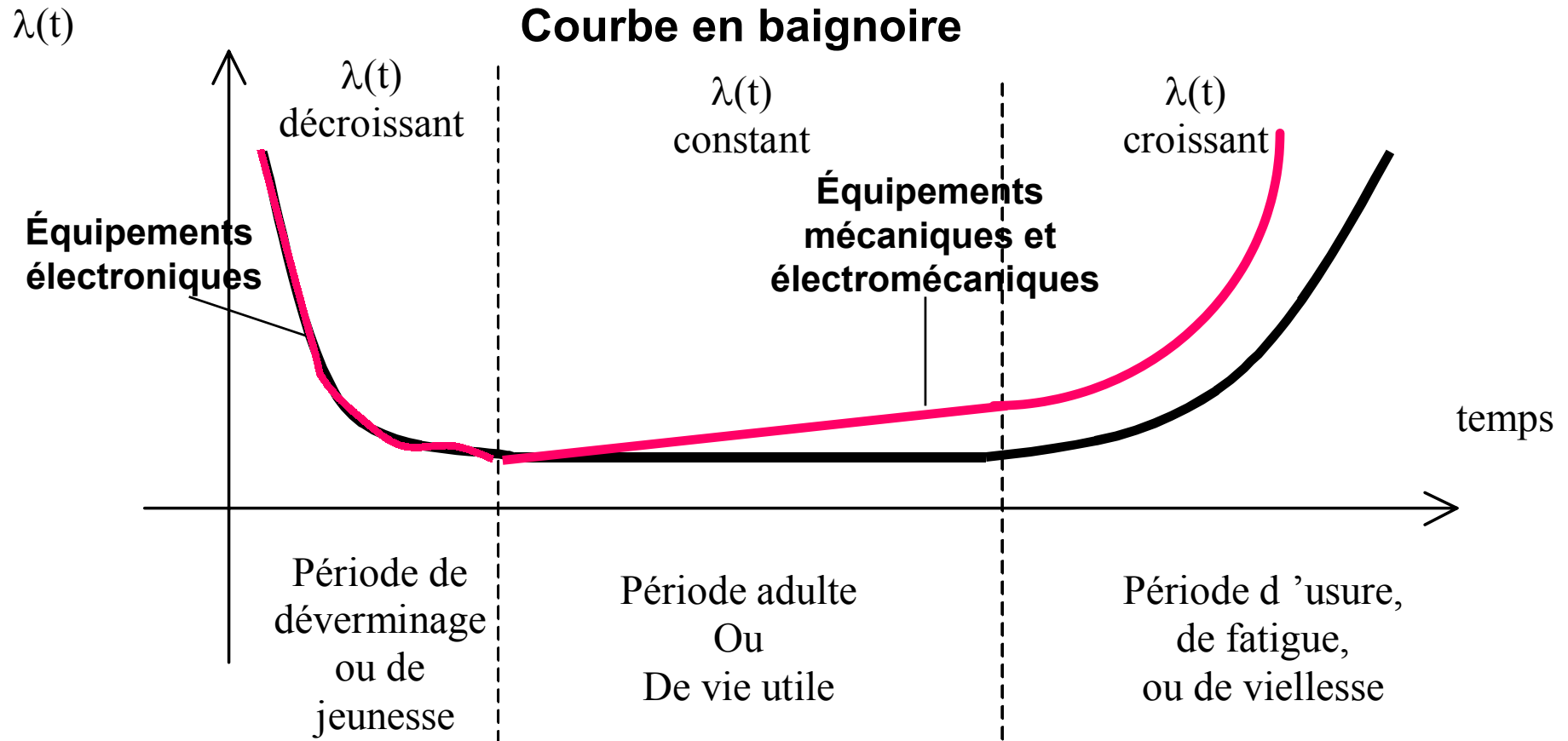
Le taux de défaillance s'interprète comme la probabilité que le matériel considéré soit défaillant dans l'intervalle  $[t, t+dt]$  sachant qu'il est encore en vie à la date  $t$ . La fonction taux de défaillance instantané exprime donc l'évolution de la probabilité conditionnelle de défaillance au cours de la vie du matériel :

**si la fonction du taux de défaillance est :**

- **décroissante** sur un intervalle alors la probabilité conditionnelle de panne diminue sur cet intervalle, on parle alors de période de jeunesse, ou de déverminage d'un matériel,
- **constante** sur un intervalle alors la probabilité d'être en panne à l'instant  $t+dt$  est indépendante de la probabilité de panne à l'instant  $t$  ; on parle alors de période adulte ou de vie utile du matériel,
- **croissante** sur un intervalle de temps, il y a une augmentation au cours du temps de la probabilité conditionnelle de panne sur cet intervalle, et donc phénomène de fatigue ou d'usure, on parle alors de période de vieillesse du matériel.



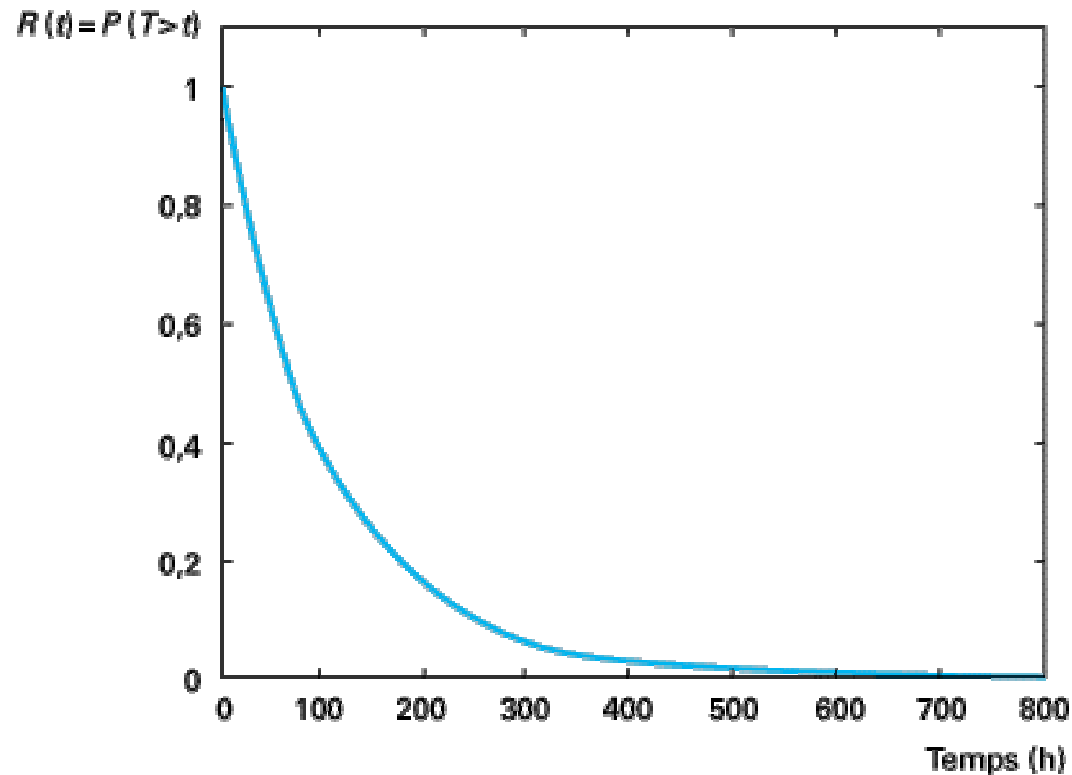
# TAUX DE DEFAILLANCE (5)



# TAUX DE DEFAILLANCE (6)

Lors de la période adulte, du fait que le taux de défaillance est constant, est la seule période pendant laquelle on peut écrire la relation :

$$R(t) = e^{\int_0^t -\lambda(u) du} \qquad R(t) = e^{-\lambda t}$$



# CONCEPTS RELATIFS A L'ETAT D'UN EQUIPEMENT (1)

## **MTBF (Mean Operating Time Between Failure)**

Temps de fonctionnement moyen entre défaillances (ou FMED).  
Moyen mnémotechnique : Moyenne des Temps de Bon  
Fonctionnement.

## **MUT (Mean Up Time)**

Temps moyen de disponibilité (TMD)

## **MDT (Mean Down Time)**

Temps moyen d'indisponibilité (ou TMI).

## **TMED (Temps Moyen Entre Défaillances)**

Il est égal à la somme du MUT et du MDT

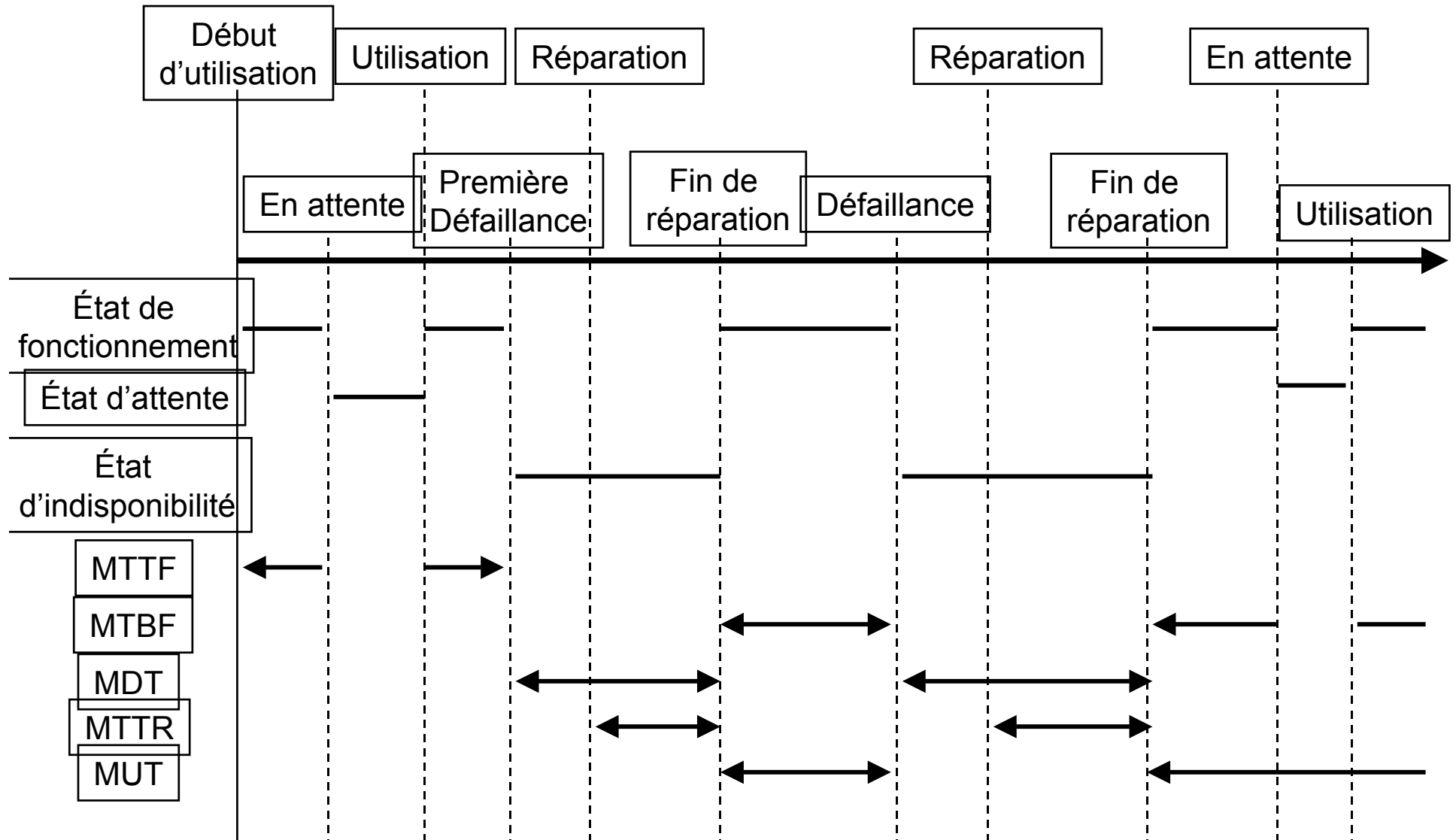
## **MTTR (Mean Time To Repair)**

Temps moyen nécessaire à la réparation

## **MTTF (Mean operating Time To first Failure)**

Durée moyenne de fonctionnement avant la première défaillance  
(ou FMAP).

# CONCEPTS RELATIFS...(2)



# TAUX DE DEFAILLANCE (7)

Lorsque le taux de défaillance instantané est considéré comme constant, une estimation ponctuelle  $m$  de  $\lambda$  est alors donnée par le nombre de défaillances par unité de temps de fonctionnement,  $1/m$  représentant alors une estimation ponctuelle du MTBF (Mean Time Between Failure)

Donc, si un composant fonctionnant pendant une période  $t$ , présente  $n$  défaillances, on a :

$$MTBF = \frac{t}{n} = \int_0^{\infty} R(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}$$

$$\lambda = \frac{\text{Nombre de défaillances}}{\text{temps cumulé de fonctionnement}}$$

$$\text{et MTBF} = \frac{\text{temps cumulé de fonctionnement}}{\text{nombre de défaillances}}$$

# TAUX DE DEFAILLANCE (8)

## Exemple 1 :

Un compresseur industriel a fonctionné pendant 8000 heures en service continu avec 5 pannes dont les durées respectives sont : 7; 22; 8,5 ; 3,5 ; 9 heures.

$$\text{MTBF} = 1590 \text{ heures}$$

$$\lambda = 6,289 \cdot 10^{-4}$$

## Exemple 2 :

8 composants identiques testés sur une durée de 550 heures dans les mêmes conditions.

Panne pour les composants 1 : 65 h ; 2 : 115h; 3: 135h; 4 : 340h; 5 : 535h.

$$\lambda = 0,00176$$

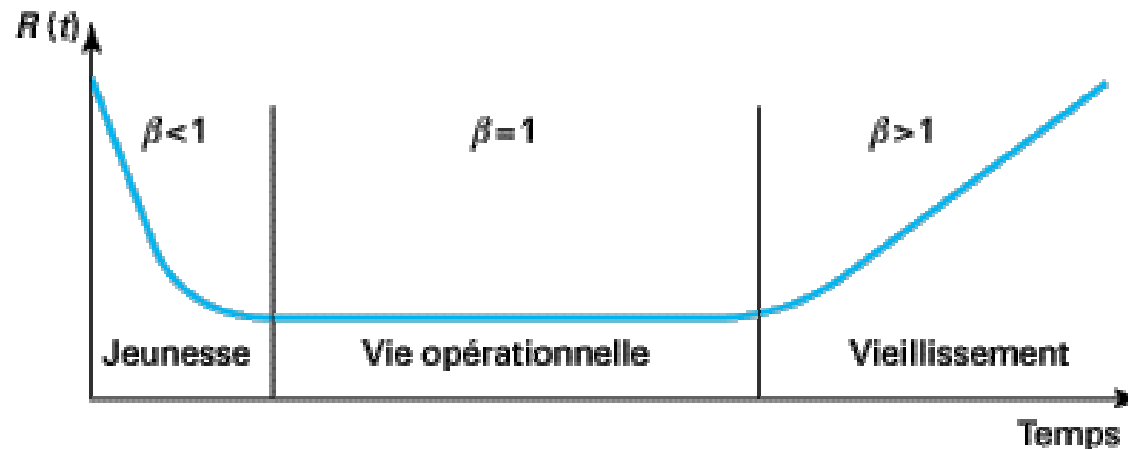
# LOI DE WEIBULL (1)

## Idée générale:

L'idée consiste à rechercher une distribution de la variable durée de vie  $X$  qui traduise les formes des 3 parties de la courbe en baignoire ( $\lambda$  n'est pas toujours constante).

W. Weibull a proposé en 1958 de représenter la fonction « taux de défaillance » par une fonction en «  $t$  puissance  $\beta$  » qui serait:

- décroissante pour  $\beta$  compris entre 0 et 1,
- constante pour  $\beta$  égal à 1,
- croissante pour  $\beta$  supérieur à 1.



# LOI DE WEIBULL (2)

## Définition :

On dit que la variable aléatoire « durée de vie »  $X$  obéit à une distribution de Weibull de paramètres :

- de forme  $\beta$ ,
- de position  $\gamma$ ,
- d'échelle  $\eta$

si:

- elle est définie pour  $t$  supérieur ou égal à  $\gamma$ ,
- sa fonction taux de défaillance instantanée  $\lambda$  vérifie :

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta - 1}$$



# LOI DE WEIBULL (3)

Avec :

- $\beta$  = **paramètre de forme** : réel positif sans dimension, qui traduit l'allure de dégradation du matériel,
  
- $\gamma$  = **paramètre de position** : valeur en unités d 'usage
  - \* Nulle si les défaillances peuvent débuter à l 'age 0 (ou au nombre 0 d'unités d 'usage),
  - \* Valeur positive si les défaillances ne peuvent se produire avant l 'age  $\gamma$ , c'est à dire qu 'il y a nécessairement survie entre l 'age 0 et l 'age  $\gamma$ ,
  - \* valeur négative si les défaillances ont débuté avant l 'origine des temps choisie pour effectuer les mesures
  
- $\eta$  = **paramètre d 'échelle**: réel positif en unités d 'usage dont la valeur dépend de l'unité choisie.

# LOI DE WEIBULL (4)

## Démarche :

- 1) Classer les durées de vie des équipements par ordre croissant (variable  $t$ ).
- 2) Estimation de  $\gamma$  :
  - Placer sur du papier d'Allan Plait (ou de Weibull), les points d'abscisse  $t$  et d'ordonnée  $F(t)$ ,
  - La courbe obtenue doit admettre une asymptote verticale: l'intersection de cette asymptote avec l'axe des abscisses donne une estimation de la valeur de  $\gamma$ .
- 3) Changement de variable et vérification de la loi:
  - effectuer le changement de variable  $t' = t - \gamma$
  - tracer sur le papier de Weibull, les points d'abscisse  $t'$  et d'ordonnée  $F(t') = F(t)$
  - Si ces points sont alignés, on est bien en présence d'une distribution de Weibull.
- 4) Calcul de  $\beta$ :  $\beta$  représente la pente de la droite. Pour l'obtenir, faire passer une droite parallèle à la droite réelle par le point  $\eta = 1$  sur l'axe  $F = 63,2\%$ , la valeur de  $\beta$  se lit alors sur l'axe des  $\beta$ .
- 5) Calcul de  $\eta$ : sa valeur se lit à l'intersection de la droite tracée et de l'axe  $F = 63,2\%$ .
- 6) Calcul de MTBF : (ou MTTF si systèmes non réparables)  
La valeur de  $A$  étant lue dans une table, en fonction de la valeur de  $\beta$ . On a la relation  $MTBF = E(t) =$

$$E(t) = \gamma + \eta \Gamma \left( 1 + \frac{1}{\beta} \right) = \gamma + \eta A$$

# LOI DE POISSON (1)

La réalisation d'événements aléatoires dans le temps se nomme : « processus de Poisson » et caractérise une suite de défaillances indépendantes entre elles, et indépendantes du temps.

Pendant cette période, la probabilité de constater  $k$  pannes à l'instant  $t$  s'exprime par la loi de Poisson :

$$P(k) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t}$$

La fiabilité (probabilité pour qu'il n'y ait pas de panne à l'instant  $t$ ) devient :

$$P(0) = \frac{(\lambda t)^0}{0!} e^{-\lambda t} = e^{-\lambda t} = R(t)$$

# SURETE DE FONCTIONNEMENT (1)

La sûreté de fonctionnement d'un système correspond à son aptitude au maintien dans le temps de la qualité du service qu'il délivre.

Il s'agit d'un concept global qui intègre principalement les caractéristiques de fiabilité, de maintenabilité, de disponibilité et de sécurité (FMDS).

## Fiabilité des Systèmes composés

### Notion de redondance :

La redondance est l'existence de plusieurs modes d'accomplissement d'une mission donnée, le système étant conçu de telle sorte que tous les modes doivent être défectueux pour qu'il y ait défaillance de l'ensemble. On distingue :

# SURETE DE FONCTIONNEMENT (2)

A) **La redondance ACTIVE** : elle est telle que tous les moyens permettant d'accomplir une fonction donnée soient mis en œuvre simultanément,

B) **La redondance PASSIVE** : (ou en attente, séquentielle, de réserve, à commutation, en stand by), est telle que les différents moyens d'accomplir une fonction donnée ne soient pas mis en œuvre avant que cela ne soit nécessaire.

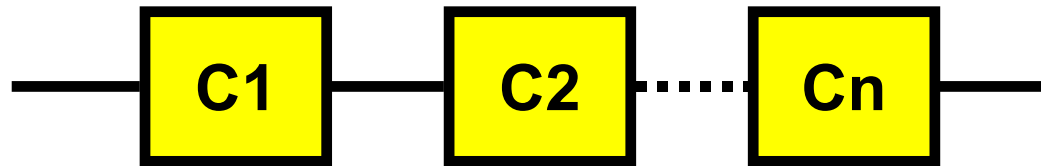
## **Fiabilité d'un système en redondance active $r/n$**

La redondance active  $r/n$  traduit une configuration où le système fonctionne si au moins  $r$  éléments parmi  $n$  fonctionnent. Deux cas particuliers peuvent se présenter :

# SURETE DE FONCTIONNEMENT (3)

1er cas :  $r = n$  : en terme de fiabilité, la situation est similaire à celle d'un **système configuré en série**, puisqu'il faut que  $n$  composants sur  $n$  fonctionnent pour que le système fonctionne

$R_1, R_2, \dots, R_n$  fiabilités des composants  $C_1, C_2, \dots, C_n$



$$R_{\text{système}} = R_1 \times R_2 \times \dots \times R_n$$

et si  $R_1 = R_2 = \dots = R_n = R$

alors  $R_{\text{système}} = R^n$

$$R_{\text{système}}(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t)$$

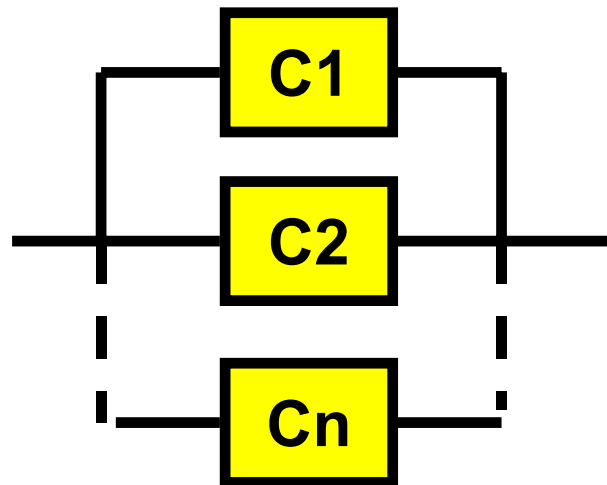
# SURETE DE FONCTIONNEMENT (4)

2ème cas :  $r = 1$  : en terme de fiabilité, la situation est similaire à celle d'un **système configuré en parallèle**, puisqu'il suffit que 1 composant sur n fonctionne pour que le système fonctionne et il faut que tous les composants soient défectueux pour que le système soit défectueux.

$F_1, F_2, \dots, F_n$  probabilités de défaillance des composants  $C_1, C_2, \dots, C_n$

$$F_1 = 1 - R_1$$

$$F_n = 1 - R_n$$



# SURETE DE FONCTIONNEMENT (5)

$$F_{\text{systeme}}(t) = \prod_{i=1}^n Fi(t)$$

$$F_{\text{systeme}} = 1 - R_{\text{systeme}} = (1 - R1) \times (1 - R2) \times \dots \times (1 - Rn)$$

donc  $F_{\text{systeme}} = 1 - (1 - R1) \times (1 - R2) \times \dots \times (1 - Rn)$

et si  $R1 = R2 = \dots = Rn = R$  alors  $R_{\text{systeme}} = 1 - (1 - R)^n$

$$R_{\text{systeme}}(t) = 1 - \prod_{i=1}^n Fi(t) \quad R_{\text{systeme}}(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - Ri(t))$$



# SURETE DE FONCTIONNEMENT (6)

$$R_{\text{systeme}}(t) = (e^{-\lambda a.t}) \cdot (e^{-\lambda b.t}) \dots (e^{-\lambda n.t})$$

$$MTBF_s = \frac{1}{\lambda a + \lambda b + \dots + \lambda n}$$

$$\text{Si: } \lambda a = \lambda b = \dots = \lambda n$$

$$R_s = e^{-n\lambda.t}$$

$$MTBF_s = \frac{1}{n.\lambda}$$

# SURETE DE FONCTIONNEMENT (7)

## Maintenabilité $M(t)$ et taux de réparation $m(t)$

La maintenabilité est caractérisée par la probabilité qu'un matériel, lorsqu'il nécessite une intervention de maintenance, soit remis dans un état de fonctionnement donné, dans des limites de temps spécifiées, lorsque le travail est effectué selon des procédures prescrites et des conditions définies.

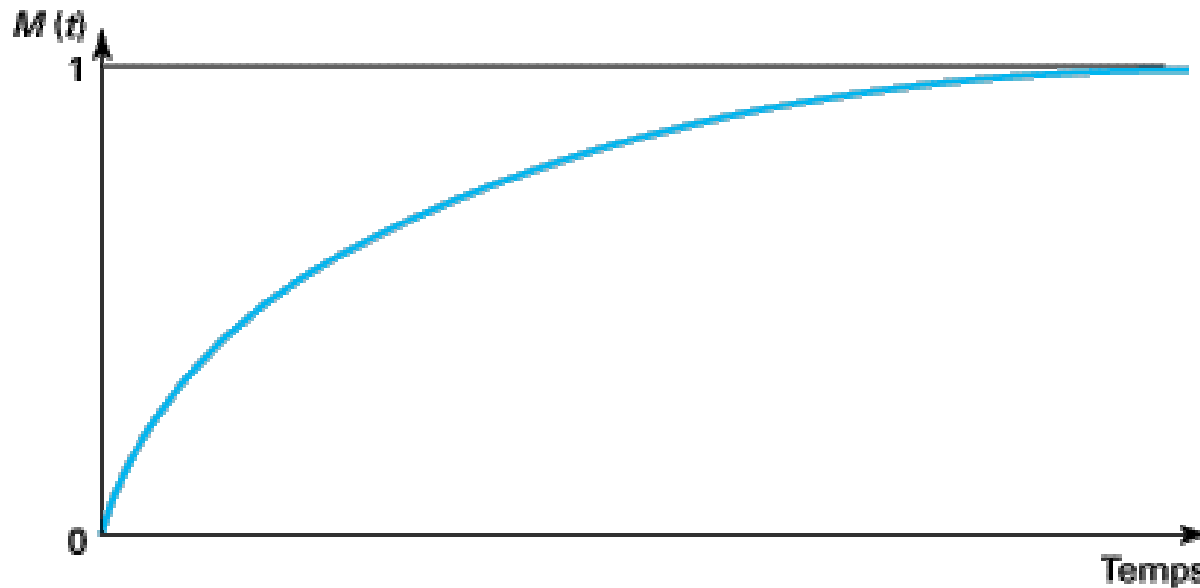
Si l'on suppose que les défaillances ont lieu comme des événements isolés, de nature aléatoire, à MRT (ou MTTR : Mean Time To Repair) constant, et sont prédites par la loi exponentielle des défaillances. Dans ce cas, la probabilité d'achever la réparation suite à une défaillance aléatoire en un temps donné  $t$  est :

$$\text{MTTR} = \frac{\text{Somme des temps de réparation}}{\text{Nombre de réparations}}$$

$$M(t) = 1 - e^{-\mu t} \text{ avec } \mu = \frac{1}{\text{MTTR}} = \text{taux de réparation}$$

# SURETE DE FONCTIONNEMENT (8)

Maintenabilité  $M(t)$  et taux de réparation  $m(t)$



A  $t = 0$ , le système est défaillant

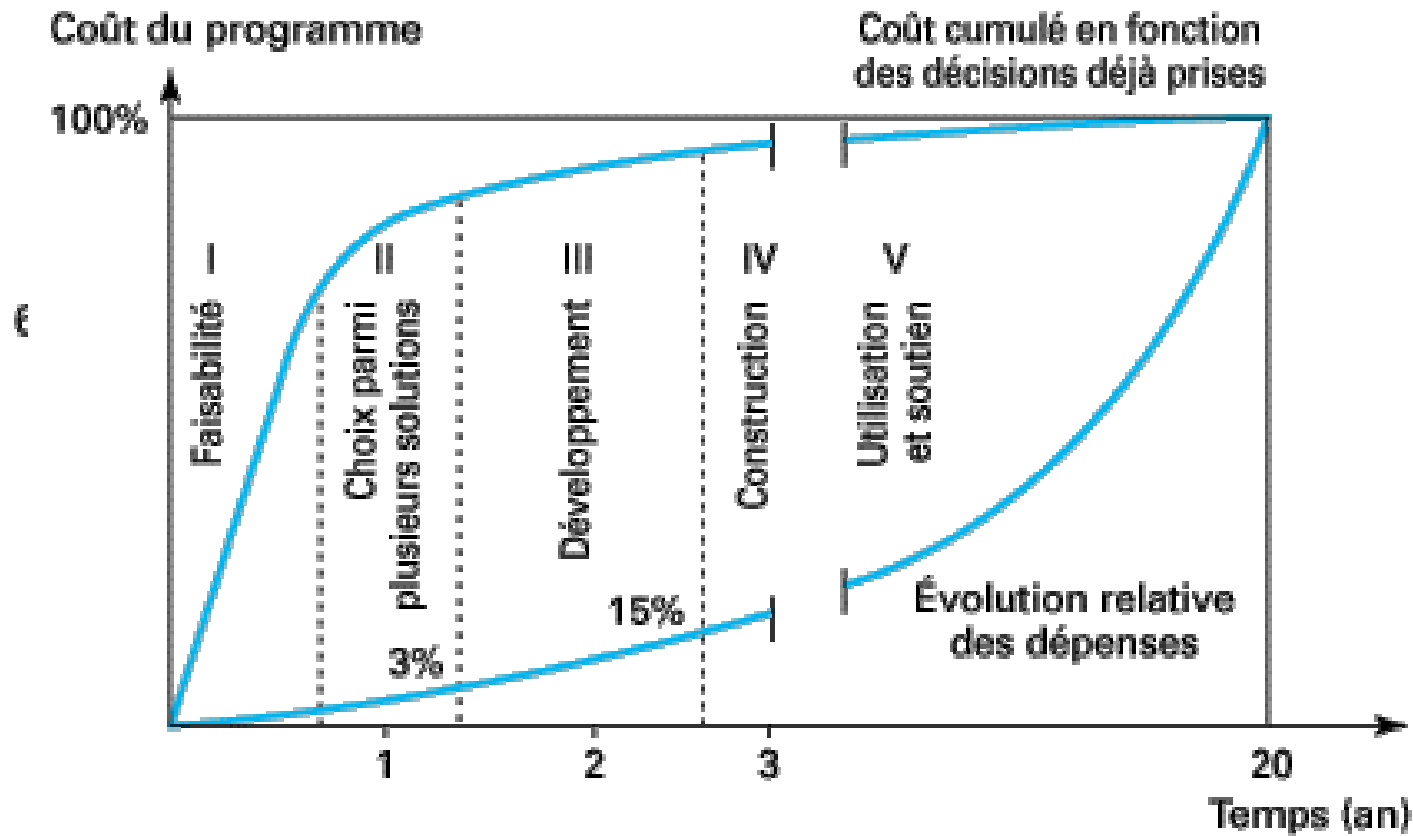
Si  $u$  est variable en fonction de  $t$ , alors  $M(t)$  suit une loi log-normale de paramètres  $m$  et  $\sigma$ , modélisable par la loi de Weibull

# SURETE DE FONCTIONNEMENT (9)

## Maintenabilité $M(t)$ et taux de réparation $m(t)$

Prise en compte en conception:

Vulnérabilité, accessibilité, testabilité, surveillabilité



# SURETE DE FONCTIONNEMENT (10)

## Disponibilité D(t)

### Composants élémentaires

#### *Disponibilité moyenne*

C'est le rapport du cumul du temps qu'un élément a été en service à la durée totale que celui-ci aurait pu être en service s'il avait fonctionné en continu.

$$D = \frac{\text{Temps}_d \text{ d'utilisation}_e \text{ et}_d \text{ d'attente}}{\text{Temps}_d \text{ d'utilisation}_e \text{ et}_d \text{ d'attente} + \text{Temps}_d \text{ de}_m \text{ maintenance}}$$

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} = \frac{\mu}{\lambda + \mu}$$

$$\text{Indisponibilité}_I = 1 - \text{Disponibilité} = 1 - D$$

# SURETE DE FONCTIONNEMENT (11)

**Disponibilité D(t)**

**Composants en série:**

$$D_s = D_1.D_2....D_n$$

$$D_s (t) = \prod_{i=1}^n D_i$$

**Composants en parallèles :**

$$D_s (t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - D_i)$$

# SURETE DE FONCTIONNEMENT (12)

Systemes composés

Avec  $I$  = Indisponibilité =  $1 - D$

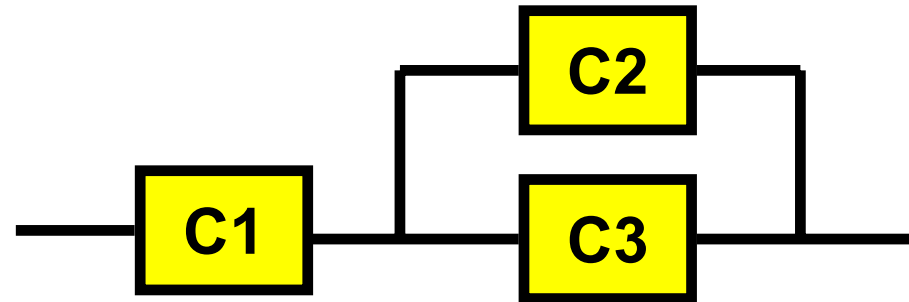
Systeme serie



$$I_{\text{systeme}} = I_1 + I_2 - I_1 * I_2$$

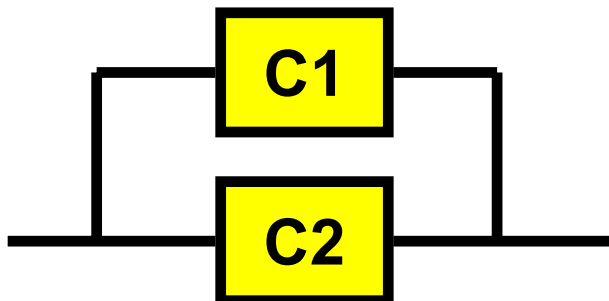
Systeme serie - parallele

$$I_s = I_1 + I_2 * I_3 - I_1 * I_2 * I_3$$



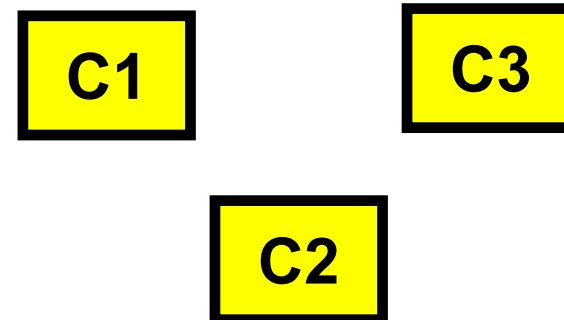
Systeme parallele

$$I_s = I_1 * I_2$$



Systeme independant

$$I_s = (I_1 + I_2 + I_3) / 3$$



# **Chapitre 7 : Outils méthodologiques pour l'analyse des comportements**



# AMDEC (1)

## Définition

L 'AMDEC est une méthode inductive permettant, pour chaque composant d 'un système, de recenser son mode de défaillance et son effet sur le fonctionnement ou la sécurité du système.

Acronyme Anglais: FMECA : **F**ailure **M**odes and **E**ffects and **C**ritically **A**nalysis

# AMDEC (2)

## **Aspects quantitatifs**

L 'analyse quantitative de l 'AMDEC va permettre d 'une part, d 'approfondir la notion de criticité des défaillances, et d'autre part de mieux comprendre les processus de propagation des défaillances grâce à l 'utilisation d 'arbres de défaillances.

## ***Notion de criticité***

$$\mathbf{C = G \times F \times D}$$

F : indice de fréquence,

G : indice de gravité,

D : indice de détection.

# AMDEC (3)

Equipement	Fonction	Modes de défaillances	Effets	Causes	F	D	G	C
Moteur M1	Mélange du produit Acide B4	Vibrations (3)	Mauvais mélange	Vis desserrée	1/3mois	Détection moyenne	Produit à rebuter	

- la **probabilité** d'apparition d'un mode de défaillance
- la **gravité** ou sévérité (client) : importance de ses effets
- la **détection** : le mode de détection est la manière par laquelle un utilisateur est susceptible de détecter la présence de la défaillance avant que l'effet de la défaillance ne puisse se produire. Ex: Détection visuelle, température, odeurs, bruits,...

**CRITICITE** : est une évaluation quantitative du risque

$$\text{Criticité} = \text{Probabilité} \times \text{Gravité} \times \text{Détection}$$

$$C = P \times G \times D$$

# AMDEC (4)

## MODES DE DEFAILLANCE GENERIQUE

1	Défaillance structurelle	18	Mise en marche erronée
2	Blocage physique	19	Ne s'arrête pas
3	Vibrations	20	Ne démarre pas
4	Ne reste pas en position	21	Ne commute pas
5	Ne s'ouvre pas	22	Fonctionnement prématuré
6	Ne se ferme pas	23	Fonctionnement après le délai
7	Défaillance en position ouverte	24	Entrée erronée (augmentation)
8	Défaillance en position fermée	25	Entrée erronée (diminution)
9	Fuite interne	26	Sortie erronée (augmentation)
10	Fuite externe	27	Sortie erronée (diminution)
11	Dépasse la limite supérieure	28	Perte de l'entrée
12	Sous la limite inférieure	29	Perte de la sortie
13	Fonctionnement intempestif	30	Court-circuit (électrique)
14	Fonctionnement intermittent	31	Circuit ouvert (élect.)
15	Fonctionnement irrégulier	32	Fuite (élect.)
16	Indication erronée	33	Autres
17	Ecoulement réduit		

# AMDEC (5)

## EXEMPLE DE HIERARCHISATION DE LA PROBABILITE DE DEFAILLANCE

Valeurs de F	Probabilité d'apparition de la défaillance
1	Défaillance inexistante sur matériel similaire (1 arrêt max. tous les 2 ans)
2	Défaillance occasionnelle déjà apparue sur matériel similaire (1 arrêt max. tous les ans)
3	Défaillance occasionnelle posant plus souvent des problèmes (1 arrêt max. tous les 6 mois)
4	Défaillance certaine sur ce type de matériel (1 arrêt max. par mois)
5	Défaillance systématique sur ce type de matériel (1 arrêt max. par semaine)

**P = 4,5**

# AMDEC (6)

## EXEMPLE DE HIERARCHISATION DE LA GRAVITE DE DEFAILLANCE

Niveau	Description
<b>Gravité 1</b>	Mort ou perte totale du système
<b>Gravité 2</b>	Blessés graves ou dommage matériel majeur
<b>Gravité 3</b>	Blessés légers ou dommage matériel significatif
<b>Gravité 4</b>	Aucun mort ou blessé ni de dommage matériel

**G = 1**

# AMDEC (7)

## EXEMPLE DE HIERARCHISATION DE LA DETECTION DE DEFAILLANCE

Note	1	2	3	4	5	6
<b>Critère</b>	Très faible probabilité de ne pas détecter le défaut (moins de 0,0001) Contrôle à 100%		Faible probabilité de ne pas détecter le défaut (0,0005 à 0,001) Facilement détectable		Probabilité moyenne de ne pas détecter le défaut (0,002 à 0,005) Contrôle manuel difficile	
Note	7	8	9	10		
<b>Critère</b>	Probabilité élevée de ne pas détecter le défaut (de 0,01 à 0,02) Cas d'un contrôle subjectif ou mal adapté		Probabilité très élevée de ne pas détecter le défaut (de 0,05 à 0,1) Contrôle difficile ou impossible, invisible			

$$D = 4,5$$

$$C = P \times G \times D = 4,5 \times 1 \times 4,5 = 20,25$$

# ARBRES DE DEFAILLANCE (1)

L'arbre de défaillances est une méthode déductive qui, à partir d'un événement indésirable (défaillance critique) sélectionné, permet de visualiser et de quantifier les différents scénarii qui peuvent lui donner naissance.

## **A/ Fonctions de base :**

Porte « OU » : une défaillance d'un composant entraîne la défaillance de l'ensemble (composants en série)

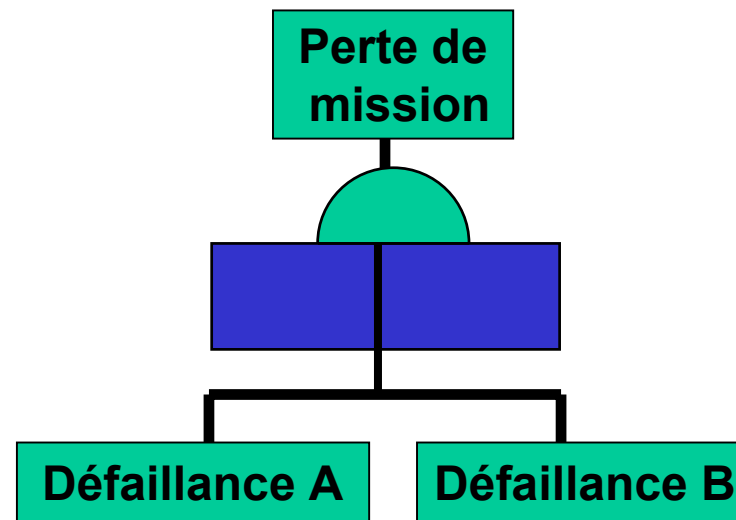
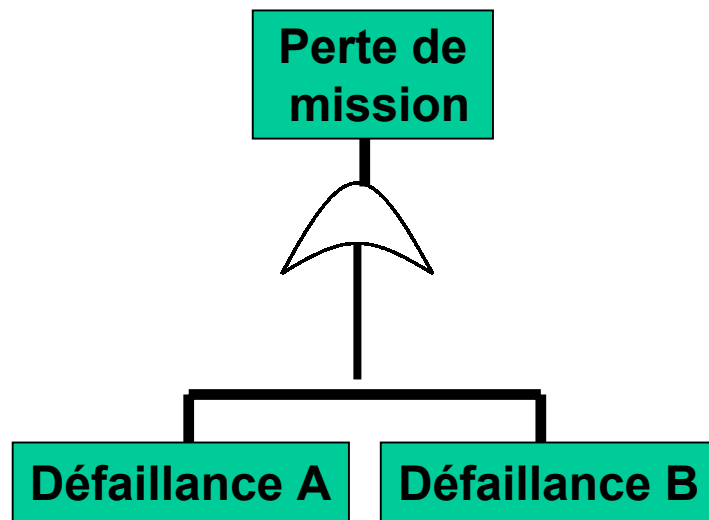
Porte « ET » : la défaillance de l'ensemble implique la défaillance de tous les composants.



# ARBRES DE DEFAILLANCE (2)

		B	
		0	1
A	OÙ	0	0
		1	1

		B	
		0	1
A	ET	0	1
		1	1



# ARBRES DE DEFAILLANCE (3)

## **B/ Traitement qualitatif :**

1) Écriture de l'équation de l'arbre

2) Réduction par algèbre de Boole

ex:  $A.A=A$ ;  $A+A=A$ ;  $A+AB=A$ ...

3) Coupes minimales ou chemins critiques

Il s'agit des plus petites combinaisons d'événement entraînant la perte de mission, elles peuvent être d'ordres différents:

- ordre 1 : simple défaillance pouvant entraîner la perte de mission,

- ordre 2 : pair de défaillances qui, si elles apparaissent simultanément, entraînent la perte de mission

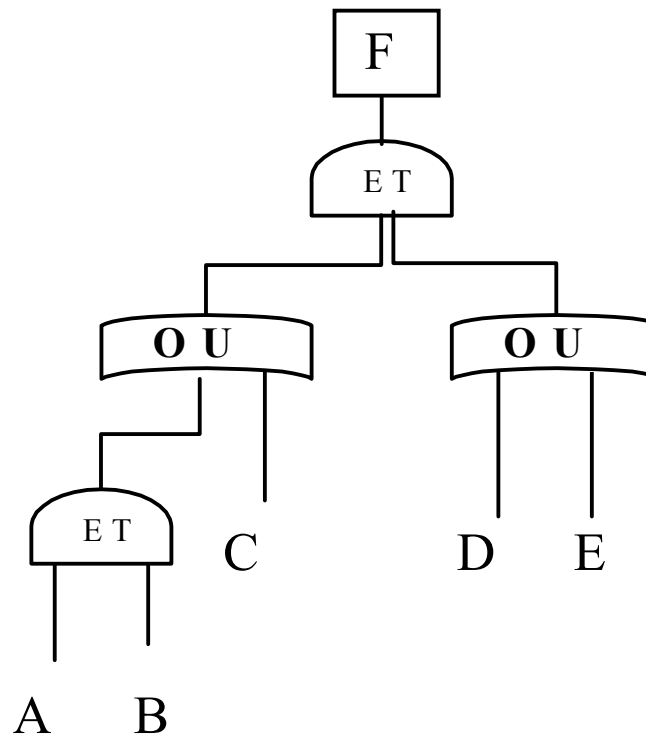
## **C/ Traitement quantitatif :**

On utilisera le taux de défaillance  $\lambda$  estimé de chaque composant élémentaire, en le supposant constant. Les composants seront donc considérés comme non réparables : pas d'intervention possible en cours de mission; une défaillance d'un composant subsiste jusqu'à la fin de la mission.

# ARBRES DE DEFAILLANCE (4)

Porte ET :  $\lambda = \lambda_1 . \lambda_2 . \lambda_3 . \dots . \lambda_n = \prod_{i=1}^n \lambda_i$

Porte OU :  $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \dots + \lambda_n = \sum_{i=1}^n \lambda_i$



$$F = (AB + C) . (D + E)$$

Développement de F :  
 $F = ABD + ABE + CD + CE$

# ARBRES DE DEFAILLANCE (5)

$$\text{avec} \begin{cases} \lambda(A) = \lambda(B) = \lambda(D) = 10^{-5} h^{-1} \\ \lambda(C) = \lambda(E) = 10^{-4} h^{-1} \end{cases}$$

$$\lambda(ABD) = 10^{-15} h^{-1}$$

$$\lambda(ABE) = 10^{-14} h^{-1}$$

$$\lambda(CD) = 10^{-9} h^{-1}$$

$$\lambda(CE) = 10^{-8} h^{-1}$$

$$\lambda F = 10^{-8} + 10^{-9} + 10^{-14} + 10^{-15} \approx 1,1 \cdot 10^{-8} h^{-1}$$

# CHAINES DE MARKOV (1)

## **Cas des systèmes réparables :**

L 'arbre de défaillances est dans ce cas dépendant du temps. Il faut alors prendre en compte  $\mu$ , le taux de réparation de chaque composant, qui caractérise la maintenabilité du système analysé, avec  $\mu=1/MTTR$  en régime établi.

La démarche, de forme semblable, aboutit à caractériser la « disponibilité » du système en analysant ses différents états, notamment par l 'utilisation de chaînes de Markov.

## **Chaîne de Markov:**

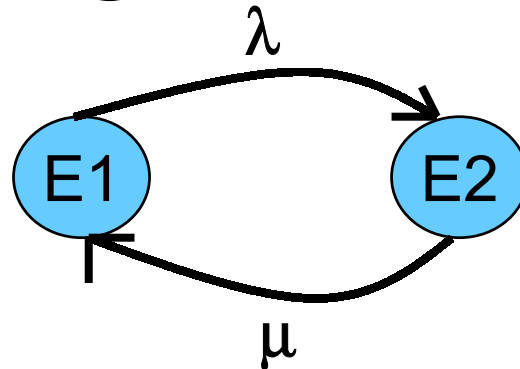
Un composant simple, ou un ensemble d 'éléments dont on connaît les taux de défaillance ( $\lambda=1/MTBF$ ) et de réparation ( $\mu=1/MTTR$ ) globaux, peut être dans 2 états:

E1: le composant fonctionne,

E2: le composant est en panne

Ceci peut être modélisé par la chaîne de Markov suivante :

# CHAINES DE MARKOV (2)



$E_i$  : État d'une structure ( $i$  : 1 à  $n$ ;  $n$  : nombre total d'état)

Arc : taux de transition; événements : défaillance, réparation

$\lambda$  est la probabilité de passer de l'état de fonctionnement à l'état de panne,

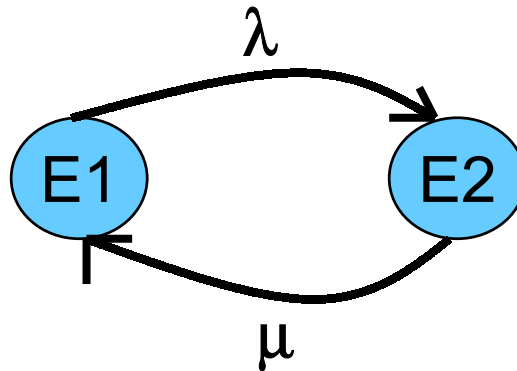
$\mu$  est la probabilité de passer de l'état de panne à l'état de fonctionnement.

On associe à chaque état une probabilité d'être dans un état

$P_1(t)$  est la probabilité de fonctionnement du système à l'instant  $t$ ,  
avec  $P_1(0)=1$ ,

$P_2(t)$  est la probabilité de non fonctionnement du système à l'instant  $t$ ,  
avec  $P_2(0)=0$ .

# CHAINES DE MARKOV (3)



Pour que le système fonctionne à l'instant  $t+dt$  avec une probabilité  $P_1(t+dt)$ , il faut :

- qu'il fonctionne à l'instant  $t$ , et qu'il n'y ait pas de défaillance entre  $t$  et  $t+dt$  : probabilité  $P_1(t) \cdot (1 - \lambda dt)$ ,
- qu'il ne fonctionne pas à l'instant  $t$ , mais qu'il soit remis en état entre  $t$  et  $t+dt$  : probabilité:  $P_2(t) \cdot \mu dt$

**Remarque : la somme des  $P_i(t) = 1$**

# CHAINES DE MARKOV (4)

On peut donc écrire l'équation des probabilités suivante:

$$P_1(t + dt) = P_1(t) \cdot (1 - \lambda dt) + (1 - P_1(t)) \cdot \mu dt$$

$$P_1(t + dt) = P_1(t) - \lambda P_1(t) dt + \mu dt - P_1(t) \cdot \mu dt$$

Si  $dt$  tend vers 0, on peut écrire :

$$\frac{P_1(t + dt) - P_1(t)}{dt} = -\lambda P_1(t) + \mu - \mu P_1(t) = \frac{dP_1(t)}{dt}$$

ce qui donne l'équation différentielle :

$$P_1'(t) + (\lambda + \mu) \cdot P_1(t) = \mu$$

La résolution de cette équation différentielle nous donne une expression de  $P_1(t)$  qui n'est autre que la **disponibilité** à l'instant  $t$  ( $D(t)$ ) :

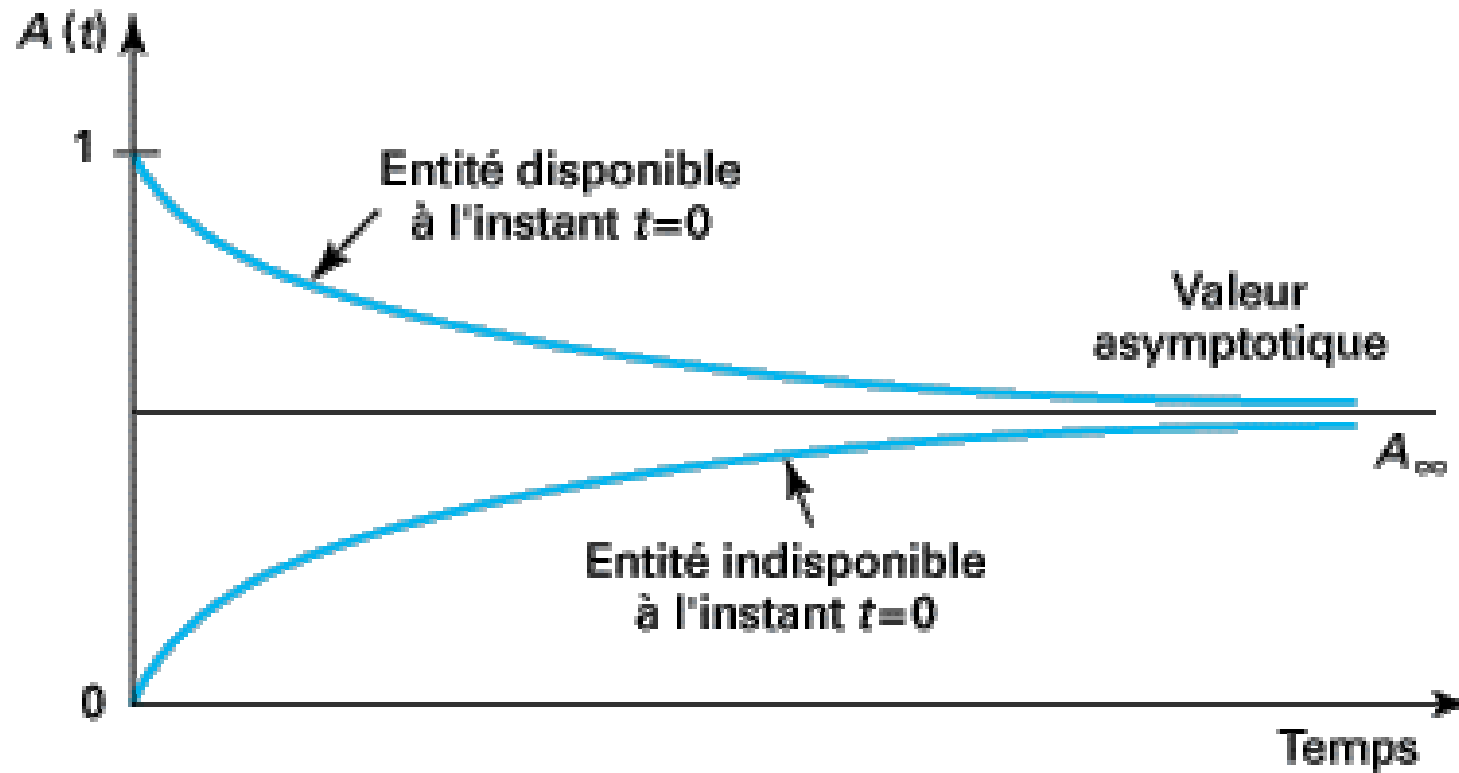
$$D(t) = \frac{1}{\lambda + \mu} \cdot \left[ \mu + \lambda e^{-(\lambda + \mu)t} \right]$$



# CHAINES DE MARKOV (5)

## Disponibilité

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} D(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu}$$

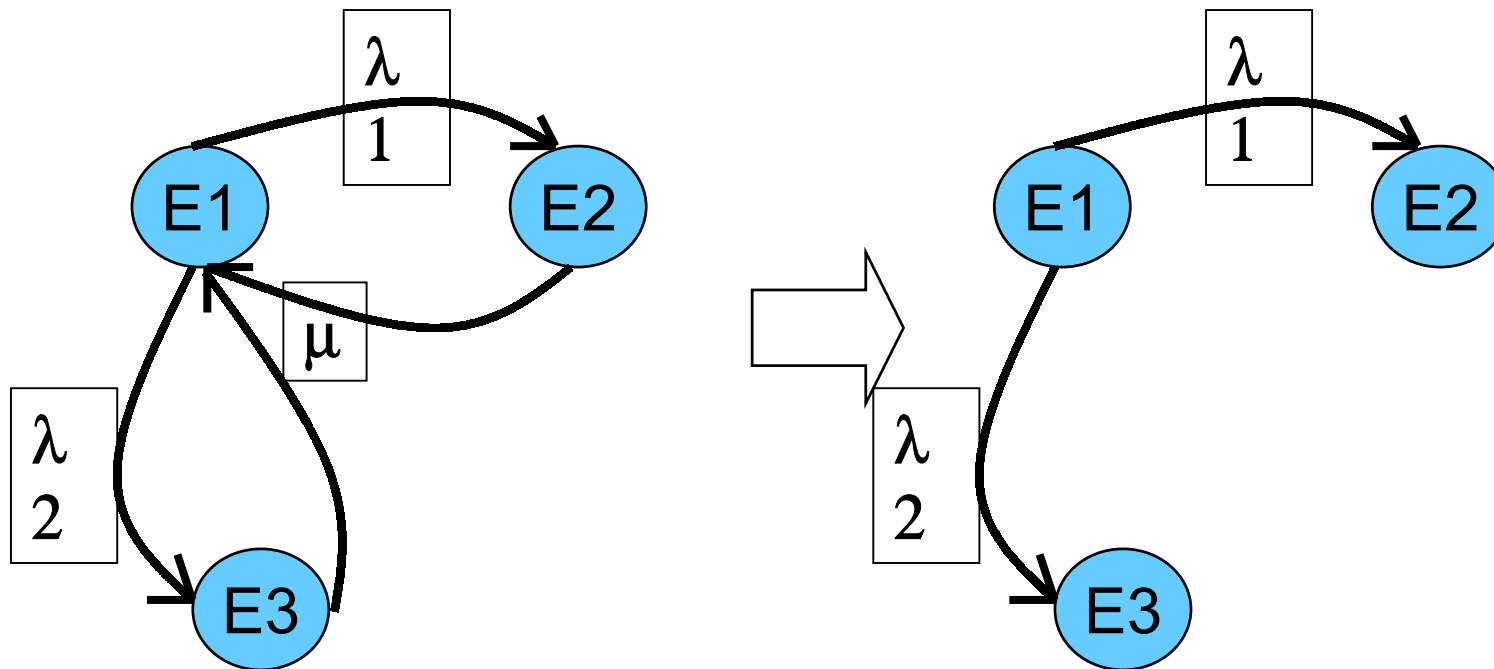


# CHAINES DE MARKOV (6)

## Fiabilité (1)

Domaine de fonctionnement : E1

On supprime les arcs qui ramènent dans le domaine de fonctionnement



# CHAINES DE MARKOV (7)

## Fiabilité (2)

$$R(t) = P1(t) \rightarrow \frac{dP1(t)}{dt} = -\lambda1P1(t) - \lambda2P1(t)$$

$$\frac{dP1(t)}{dt \times P1(t)} = -(\lambda1 + \lambda2)$$

$$\int_0^t \frac{dP1(t)}{P1(t)} = \ln P1(t) = \int_0^t -(\lambda1 + \lambda2)dt$$

**Si  $\lambda1$  et  $\lambda2$  sont constantes :**

$$R(t) = P1(t) = e^{-(\lambda1 + \lambda2)t}$$

# CHAINES DE MARKOV (8)

## Sécurité

**Domaine de sécurité : E1, E2**

**On supprime les arcs / états non considérés**

# **Chapitre 8 : Outils logiciels pour la maintenance (GMAO : Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur)**

# OUTILS INFORMATIQUES

## Notion générale de MAO (Maintenance Assistée par Ordinateur)

Étant donnée la masse d'informations qu'il est nécessaire de manipuler dans le cadre d'une activité de maintenance, la présence d'outils informatiques de saisie, de stockage, et de traitement de ces informations s'avère indispensable. De nombreux logiciels existent donc sur le marché, que l'on peut classer en 5 catégories :

- **La GMAO « Industrielle »** : Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur: gestion des ratios techniques, du magasinage, des fiches machine, suivi de projet, planification...
- **La GMAO « tertiaire »** : gestion des bâtiments, informations géographiques, gestion de patrimoine, planification (GTP, GTB),
- **L'aide au diagnostic algorithmique** : arbres de défaillance, calculs de maintenabilité, de fiabilité ...
- **Le monitoring** : analyse des signaux et alarmes,
- **L'aide au diagnostic par intelligence artificielle** : méthodes de résolution analogues au raisonnement humain (systèmes experts, réseaux de neurones...)

# LES FONCTIONS D'UNE GMAO (1)

Les systèmes de GMAO sont le plus souvent des applications développées à partir d'un SGBD (Système de Gestion de Bases de Données), permettant de programmer et de suivre sous les aspects techniques, budgétaires et organisationnels, toutes les activités de maintenance, les objets et les acteurs de ces activités. Une GMAO doit donc assurer les fonctions suivantes :

- **Gestion des activités de la maintenance** : gestion des différentes interventions à partir des documents.

- **Gestion des éléments maintenus** : localisation, caractéristiques techniques, caractéristiques de maintenance, mesures des dérives, résultats des rondes et visites, historique des défaillances, consommations, interventions réalisées...

- **Gestion des stocks et approvisionnements** : Fiches composants et nomenclatures, fiches fournisseurs, réapprovisionnements automatiques, commandes volontaires, saisie des mouvements...

# LES FONCTIONS D'UNE GMAO (2)

- **Gestion économique** : coûts horaires indirects (pénalisations), coûts horaires directs, coûts horaires des frais généraux, bons de travail, factures, ventilation des ces coûts par éléments maintenu, par politique de maintenance, par fonction, secteur...
- **Gestion des investissements** : frais d 'achat et d 'installation, durabilité estimée, types de financements...informations permettant notamment d 'estimer le coût moyen de fonctionnement et l 'amortissement technique des équipements.
- **Gestion des moyens humains** : structure des effectifs (qualifications, spécialisations, ancienneté...), relevé des heures de formation, conditions de travail (nb accidents, maladies professionnelles, absences...), relevé des salaires et promotions...



# **Chapitre 9 : La TPM (Total Productive Maintenance)**

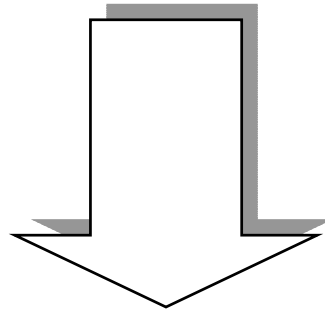
# DEFINITION DE LA TPM

## **TPM : Total Productive Maintenance :**

- La création d'une structure d'entreprise qui permet la recherche du rendement maximum du système de production
- La poursuite d'activités qui évitent toutes les pertes, qui procurent zéro accident, zéro défaut et zéro panne sur l'ensemble de la durée de vie du système de production.
- La participation de tous les départements, production, développement, commercial et administratif.
- La participation de tout le personnel depuis les dirigeants jusqu'au personnel d'exécution.
- L'obtention du zéro perte grâce aux activités croisées de groupes.

# OBJECTIFS DE LA TPM

La TPM a pour objectif d'améliorer la santé de l'entreprise par l'amélioration de la santé des équipements et des hommes



- Élimination des causes de pertes (au cas par cas) pour améliorer le rendement des équipements
- Mettre en place la maintenance autonome
- Mettre en place la maintenance planifiée
- Former aux techniques de production et de maintenance
- Mettre en place un système de conception des nouveaux équipements
- Mettre en place un système de maintenance et de qualité des produits
- Mettre en place la gestion de la sécurité et de l'environnement
- Mettre en place un système d'amélioration du rendement administratifs

# LES 6 GRANDES PERTES

1. Pannes
2. Changements de série et réglages
3. Marche à vide et micro arrêts
4. Ralentissement et sous vitesse
5. Défauts et retouches des produits
6. Redémarrage et rendement matière

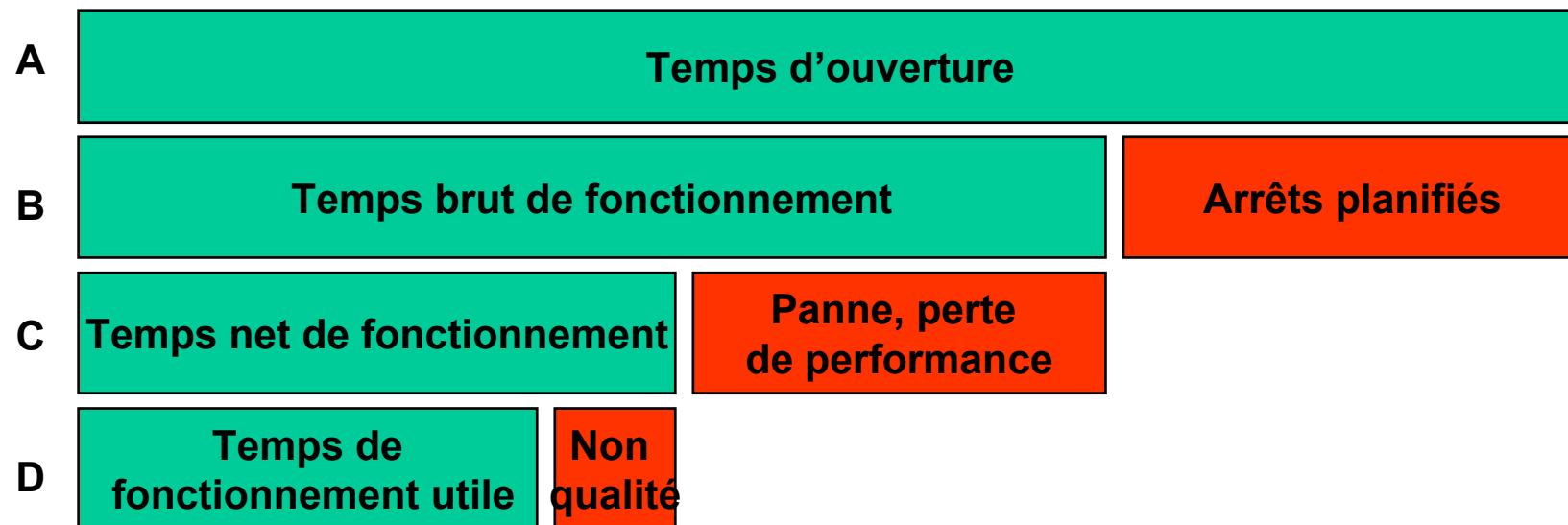
# LES 7 ETAPES DE LA MAINTENANCE AUTONOME

1. Nettoyage / inspection
2. Mesures contre les sources de salissures et pour faciliter les accès difficiles
3. Établissement des standards de nettoyage et de graissage
4. Inspection générale
5. Inspection autonome
6. Maîtrise du maintien en état
7. Approfondissement de la gestion autonome



# MESURES DES PERTES, LES INDICATEURS

Le schéma ci-dessus montre bien les différentes composantes de pertes qui érodent la productivité de la machine. Si l'on en reste à un niveau de précision insuffisant, comme le suivi du taux de marche calendaire, cet indicateur ne sera pas un reflet fidèle de la situation. Pour connaître avec précision la situation et mener des actions d'amélioration, un niveau de détail supérieur est requis.



# LE TRS

La **TPM** propose un indicateur qui **intègre toutes les composantes** du rendement machine, le **TRS** ou **Taux de Rendement Synthétique**.

**A = temps d'ouverture** : temps théorique de fonctionnement maximum.

**B = temps brut de fonctionnement**

**B = A** - total des arrêts machine (pannes, changements d'outils, approvisionnements..)

**C = temps net de fonctionnement**

**C = B** - pertes de performances = différence entre cadence théorique et cadence réelle due aux arrêts mineurs

Durant C on produit des ensembles bons comme des mauvais, nous posons

**D = temps utile** => qui produit que des ensembles bons

**D = C** - pertes de qualité : non qualité pendant le fonctionnement, réglages, essais, démarrage..

# LES SYSTEMES EXPERTS (1)

## **Définition :**

Logiciel qui reproduit le comportement d'un expert humain

- Conçu pour résoudre des problèmes de classification ou de décision (diagnostic médical, prescription thérapeutique, diagnostic de panne,...)
- Outil de « l'intelligence artificielle » (raisonnement (cognitif) artificiel)
- Utilisable que pour les domaines où il existe des experts humains (expression en langage naturel (Prolog, LISP))

## **Fonctionnement**

Il est composé de deux parties :

- Une base de connaissances (base de règles et base de faits)
- Un moteur d'inférence



# LES SYSTEMES EXPERTS (2)

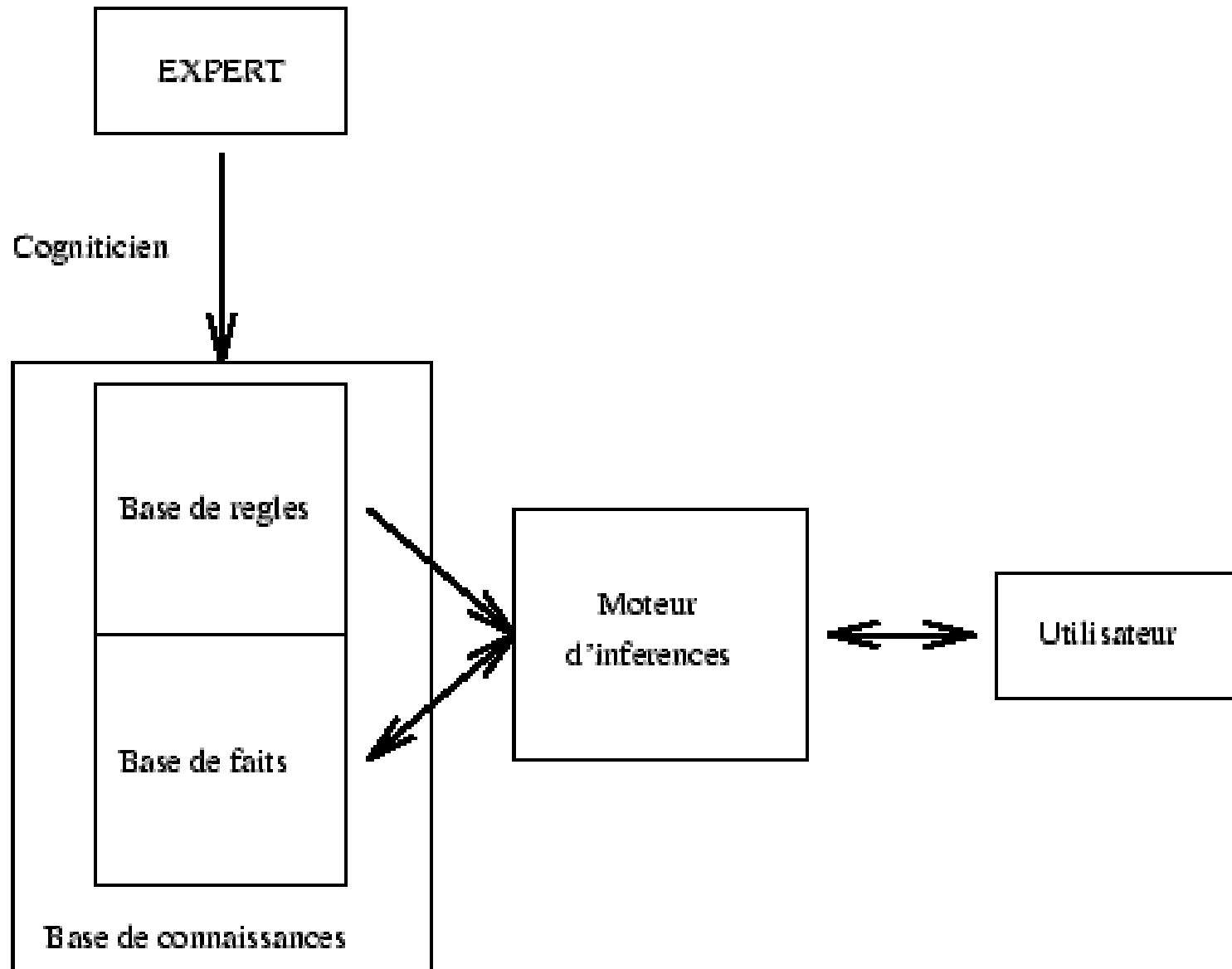
## **Base de connaissances :**

- Base de règles : **si condition est vrai alors resultat**
- Base de faits : entité vrai (« le chat est blanc », « la sécurité n'est pas enclenchée, « B est vrai »).

## **Moteur d'inférence :**

- Chaînage avant : déduction à partir de faits
- Chaînage arrière : raisonnement à partir d'un but
- Chaînage mixte : combinaison des deux chaînages

# LES SYSTEMES EXPERTS (3)



# LES SYSTEMES EXPERTS (4)

## Exemple simple

### Règles :

R1 : Si le tableau est blanc alors X

R2 : Si le tableau est vert et que le professeur écrit avec une craie blanche alors les élèves voient le texte

R3 : Si les élèves ne voient pas le texte alors ils râlent

R4 : Si les élèves râlent alors le professeur part

R5 : Si les élèves voient le texte alors ils comprennent le cours

### Faits :

B : Le tableau est vert

D/ : Le professeur possède une craie bleue

# LES SYSTEMES EXPERTS (5)

## Exemple / fonctionnement relatif (variable)

### Faits :

- F1 : Paul est le père de Jean
- F2 : Michel est le père de Paul
- F3 : Arnaud est le frère de Jean

### CAR :

Est-ce que Arnaud est le fils de Paul ?  
Réponse 'oui' car (R1, R2, R3, F1, F2, F3)

### Règles :

- R1 : Si X père de Y et Z père de X alors Z grand-père de Y
- R2 : Si X père de Y et Z frère de Y alors X père de Z
- R3 : Si X père de Y alors Y fils de X

### CAV :

- Jean est le fils de Paul (R3)
- Paul est le fils de Michel (R3)
- Michel est le grand – père de Jean (R1)
- Jean est le petit – fils de Michel (?)
- Jean est le frère d'Arnaud (?)
- Paul est le père d'Arnaud (R2)
- Arnaud est le fils de Paul (R3)