

ORGANISATION ET SUIVI DE LA MAINTENANCE

*Suite et support du cours NI872. *

- LA MAINTENABILITE

et

DISPONIBILITE -

B- LA DISPONIBILITE

✚ Concepts de Disponibilité.

I. Introduction

La politique de maintenance d'une entreprise est fondamentalement basée sur la disponibilité du matériel impliqué dans le système de production.

La condition pour qu'un équipement présente une bonne disponibilité,

Il doit :

- Avoir le moins possible d'arrêts de production
- Etre rapidement remis en bon état s'il tombe en panne

La disponibilité d'un équipement dépend de nombreux facteurs :

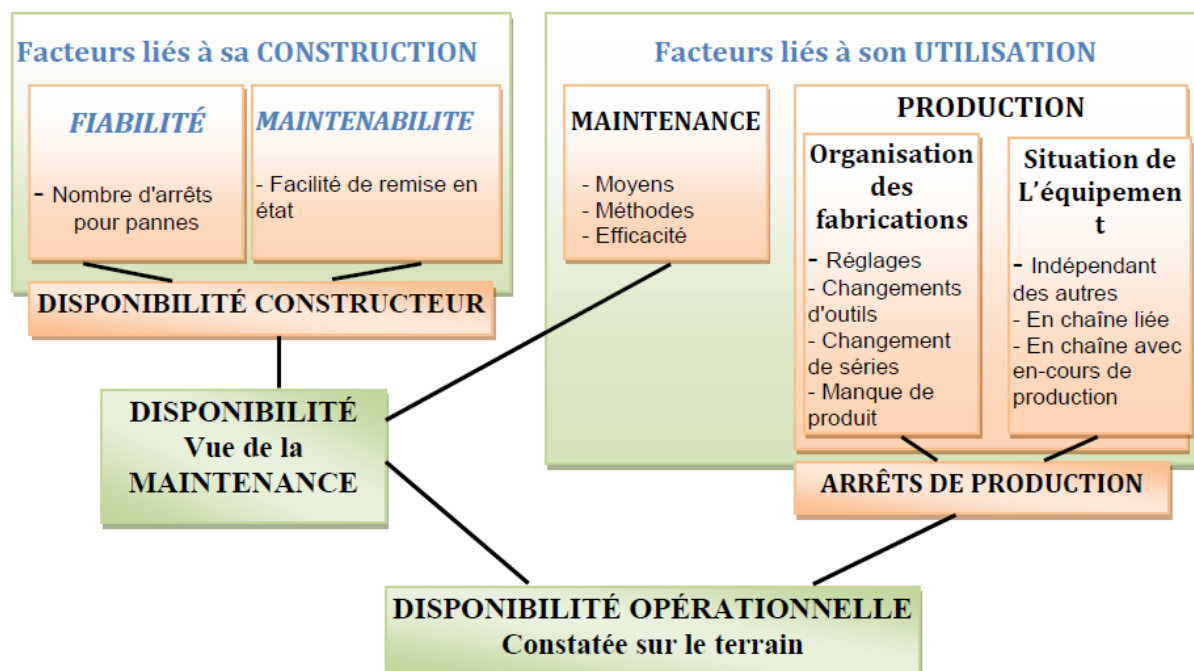


Figure 1 : Les facteurs de la disponibilité d'un équipement

La disponibilité allie donc les notions de fiabilité et de maintenabilité

Augmenter la disponibilité passe par :

1. **L'allongement de la MTBF (action sur la fiabilité)**
2. **La notion de le MTTR (action sur la maintenance)**

I. Quantification de la disponibilité :

La disponibilité peut se mesurer :

- sur un intervalle de temps donné (disponibilité moyenne),
- à un instant donné (disponibilité instantanée),
- à la limite, si elle existe, de la disponibilité instantanée lorsque $t \rightarrow \infty$ (disponibilité asymptotique)

II.1. Disponibilité moyenne

La disponibilité moyenne sur intervalle de temps donné peut être évaluée par le rapport suivant :

$$D_o = \frac{\textit{temps de disponibilité}}{\textit{temps de disponibilité} + \textit{temps d'indisponibilité}}$$

$$\textit{ou } D_o = \frac{TCBF}{TCBF + TCI}$$

Où :

- ⇒ TCBF = temps cumulé de bon fonctionnement
- ⇒ TCI = Temps cumulé d'immobilisation.

Remarque :

Le temps cumulé d'immobilisation comprend les temps d'intervention et les temps logistique.

- ⇒ En l'exprimant par rapport à des temps moyens, la disponibilité moyenne s'écrit :

$$\frac{\textit{Temps moyen de disponibilité}}{\textit{Temps moyen de disponibilité} + \textit{temps moyen d'indisponibilité}} = \frac{TMD}{TMD + TMI}$$

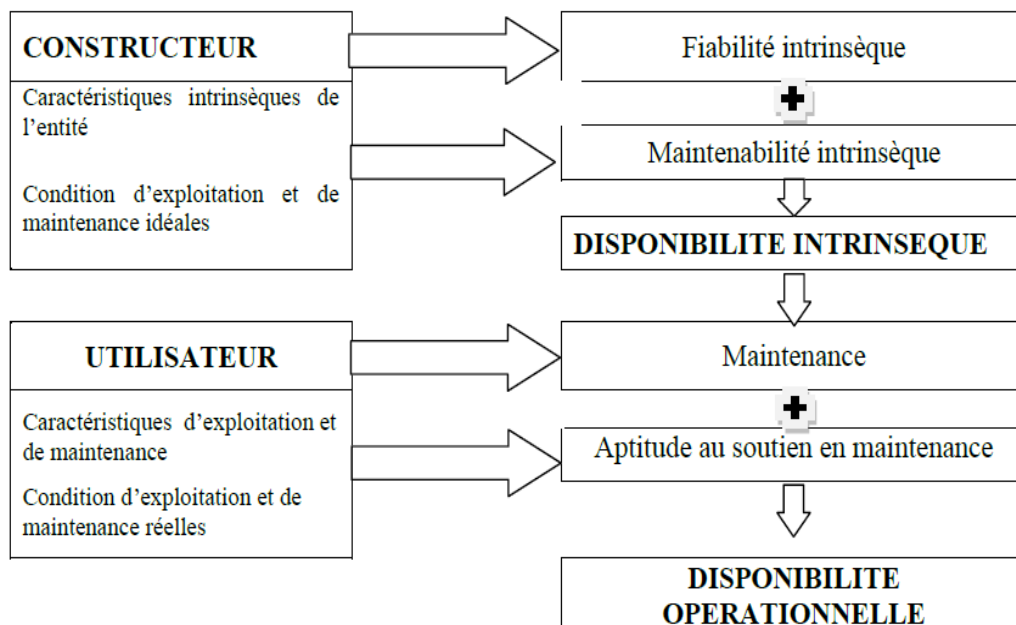
- ❖ **TMD** = MUT (Mean Up Time) et
- ❖ **TMI** = MDT (Mean Down Time).

Exemple:

Dans des équipements de surveillance ou de secours (tels que la surveillance d'un réacteur nucléaire, le pilote automatique d'un avion, la source d'énergie autonome d'un engin spatial), l'indisponibilité doit être < 10⁻⁵.

II.2. Disponibilité intrinsèque :

Elle exprime le point de vue du concepteur. Ce dernier a conçu et fabriqué le produit en lui donnant un certain nombre de caractéristiques intrinsèques, c'est à dire des caractéristiques qui prennent en compte les conditions d'installation, d'utilisation, de maintenance et d'environnement, supposées idéales.



Exemple :

Un fabricant de contacteur indique que tel type de contacteur peut supporter 1 million de cycles de manoeuvres dans des conditions d'utilisation bien précises.

Le calcul de la disponibilité intrinsèque **D_i** fait appel à 3 paramètres :

- ⇒ TBF : temps moyen entre pannes
- ⇒ TTR : temps de réparation
- ⇒ TTE : temps techniques d'exploitation

$$D_i = \frac{TBF}{TBF + TTR + TTE}$$

Exemple:

Un fabricant de machines-outils prévoit en accord avec son client la disponibilité intrinsèque d'une machine en prenant compte des conditions idéales d'exploitation et de maintenance :

- ⇒ Temps d'ouverture mensuel = 400 heures
- ⇒ 1 changement de fabrication par mois = 6 heures
- ⇒ Maintenance corrective mensuelle : taux de défaillance = 1 pannes / mois ; TTR estimé = 4 heures
- ⇒ Maintenance préventive mensuelle = 3 heures

$TBF = 400 - 6 - 4 - 3 = 387 \text{ heures}$	$TTE = 6 \text{ heures}$	$Di = 387 / (387 + 7 + 6) = 0,9675$
$TTR = 4 + 3 = 7 \text{ heures}$		

II.3. Disponibilité opérationnelle

Il s'agit de prendre en compte les conditions réelles d'exploitation et de maintenance. C'est la disponibilité du point de vue de l'utilisateur.

Le calcul de **Do** fait appel aux mêmes paramètres **TBF**, **TTR** et **TTE** sauf que ces 3 paramètres ne sont plus basés sur les conditions idéales de fonctionnement mais sur les conditions réelles (historiques d'exploitation).

Exemple :

Sur la machine outil précédente, une étude d'exploitation sur un mois a conduit aux résultats réels suivants :

- ⇒ Temps d'ouverture mensuel = 400 heures
- ⇒ Changement de production = 6 heures
- ⇒ Manque approvisionnement matière = 3 heures
- ⇒ Maintenance préventive = 3 heures
- ⇒ Maintenance corrective = 8 heures (3 heures d'attente maintenance + 5 heures d'intervention)

$TBF = 400 - 6 - 3 - 3 - 8 = 380 \text{ heures}$	$TTE = 6 + 3 = 9 \text{ heures}$	$Di = 380 / (380 + 9 + 11) =$
$TTR = 3 + 8 = 11 \text{ heures}$		0,95

III Exemples d'application

Machine-outil :

Le responsable maintenance d'une entreprise a le fichier historique d'un matériel équipé d'un terminal de saisie des données de production. Ces données sont récapitulées dans le tableau ci-dessous.

N°	Défaillance	Cause	TBF en h.	TTR en h.
1	Moteur	Electrique	80	2
2	Moteur	Electrique	40	3
3	Broche	Mécanique	50	2
4	Broche	Mécanique	100	8
5	Avance	Electrique	60	5
6	Avance	Electrique	40	2
7	Lubrification	Mécanique	20	3
8	Lubrification	Hydraulique	5	4
9	Lubrification	Hydraulique	10	3
10	Lubrification	Hydraulique	20	1.25

1. Calculer le total des TBF.
2. Calculer le total des TTR.
3. Calculer la MTBF.
4. Calculer la MTTR.
5. Calculer la disponibilité intrinsèque.

Somme des TBF	Somme des TTR	MTBF	MTTR	Disponibilité intrinsèque

SOLUTION :

N°	Défaillance	Cause	TBF en h.	Pièce de rechange	Coûts en €.	TTR en h.
1	Moteur	Electrique	80	Contacteur	300	2
2	Moteur	Electrique	40	Relais thermique	300	3
3	Broche	Mécanique	50	Courroie	150	2
4	Broche	Mécanique	100	Roulement	200	8
5	Avance	Electrique	60	Pignon	300	5
6	Avance	Electrique	40	Relais	150	2
7	Lubrification	Mécanique	20	Moteur	600	3
8	Lubrification	Hydraulique	5	Pignon	100	4
9	Lubrification	Hydraulique	10	Filtre	100	3
10	Lubrification	Hydraulique	20	Réservoir	0	1,25
			425			33,25

MTBF	MTTR	Di
42,5	3,325	92,74%

✚ La Disponibilité des Systèmes Réparables

I – Définition et Différentes Formes :

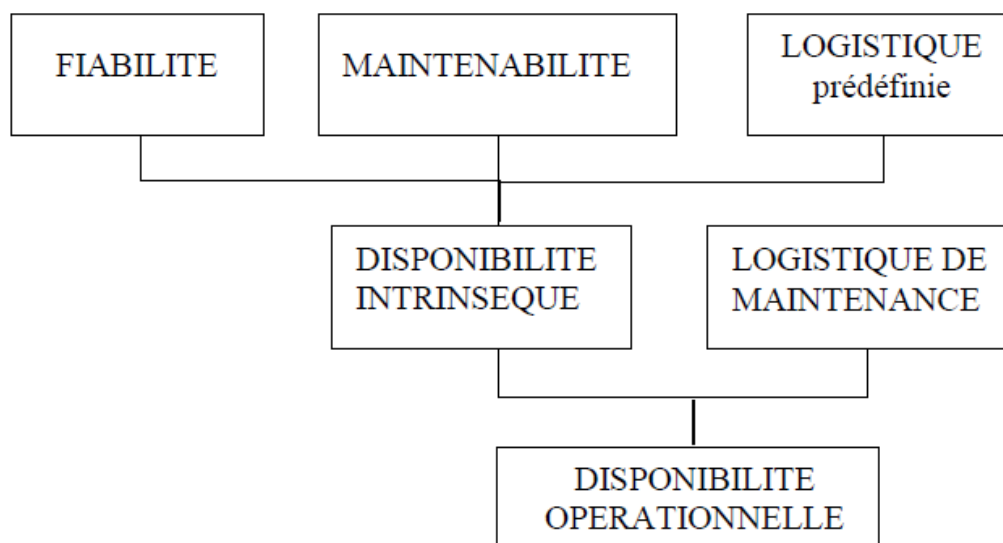
1.1 – Définition :

La disponibilité est l'aptitude d'un bien à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données, à un instant donné ou durant un intervalle de temps donné, en supposant que la fourniture des moyens extérieurs est assurée. Les moyens autres que la logistique de maintenance (personnel, documentation, rechanges, etc.) n'affectent pas la disponibilité d'un bien.

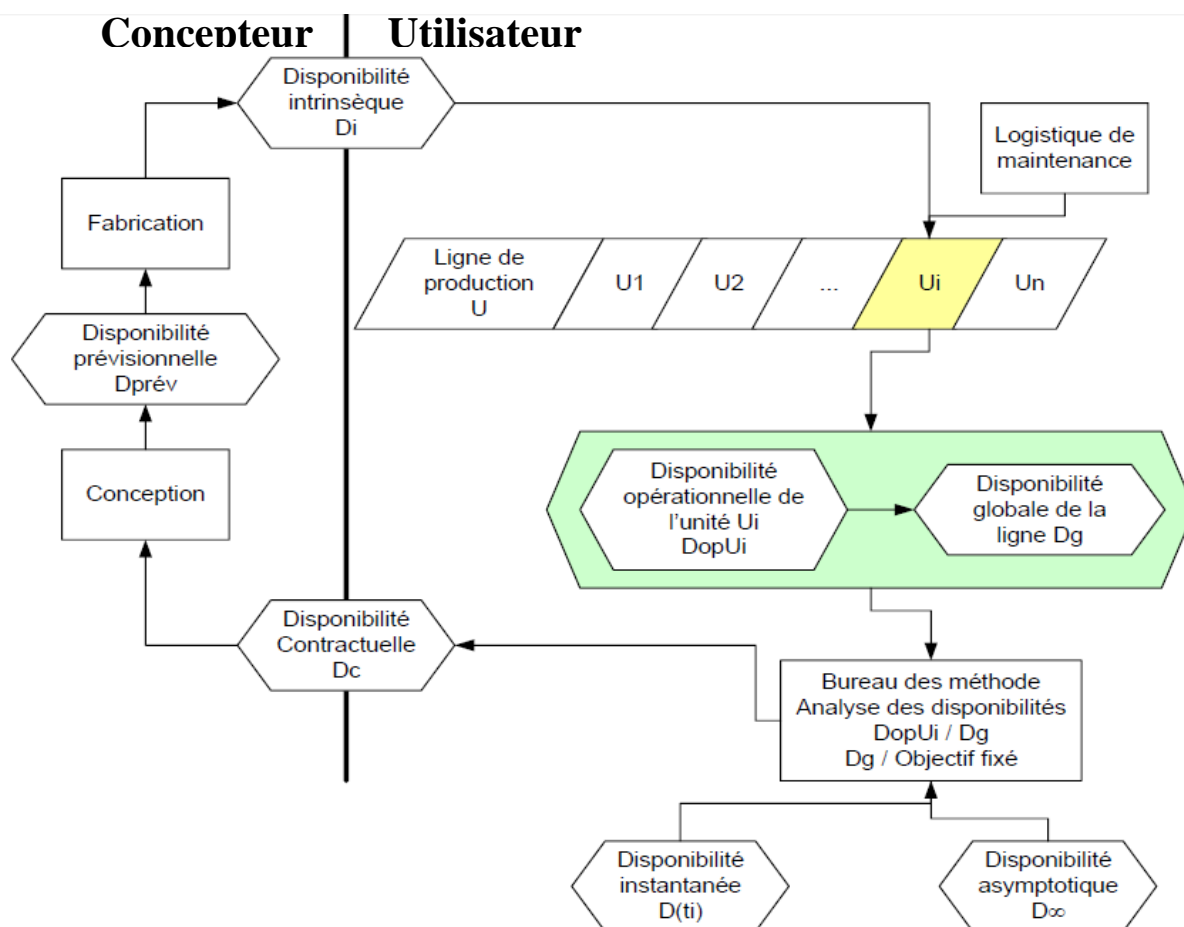
La disponibilité se traduit par « *Availability* » et se note souvent $A(t)$.

Seuls les temps d'arrêt intrinsèques, appelés également « temps d'arrêt propres » et caractérisés par la **MTI** (moyenne des temps d'indisponibilité), seront relevés pour évaluer la disponibilité opérationnelle d'un système.

La figure ci-dessous montre les 3 facteurs d'influence de la disponibilité intrinsèque D_i .



La figure ci-après schématise les différentes formes de disponibilité et leur contexte.



La figure ci-après schématise les différentes formes de disponibilité et leur contexte.

1.2 Explications sur les différentes disponibilités :

➤ *Disponibilité « propre » ou opérationnelle de l'unité de production U_i :*

Nommée **disponibilité opérationnelle** et notée **D_{op}**, l'évaluation de cette disponibilité est obtenue à partir des mesures de temps saisies à partir des états de l'équipement. Elle est évaluée à partir des relevés de temps relatifs :

- A une période de temps (1 jour, 1 semaine, n mois, 1 an)
- A un équipement ou, s'il s'agit d'une ligne de production, d'un tronçon U_i
- Aux temps d'indisponibilité propre de moyenne MTI et des durées de bon fonctionnement de moyenne MTBF suivant le modèle :

$$D_{op} = \frac{MTBF}{MTBF + MTI} < 1$$

On obtient une valeur moyenne de **Dop** mesurée sur un intervalle de temps t (d'une journée à un an). Cette disponibilité propre est un indicateur de gestion technique, spécifique à la maintenance. Elle suppose la prise en compte de « micro défaillances » par saisie automatique des « micro arrêts » et par imputation codée des causes intrinsèques d'arrêts, car elles représentent le gisement majeur d'amélioration de la disponibilité.

Le suivi périodique de **Dop** permet de tracer le graphe d'évolution montrant l'efficacité des actions de maintenance.

➤ **Disponibilité opérationnelle globale ou résultante :**

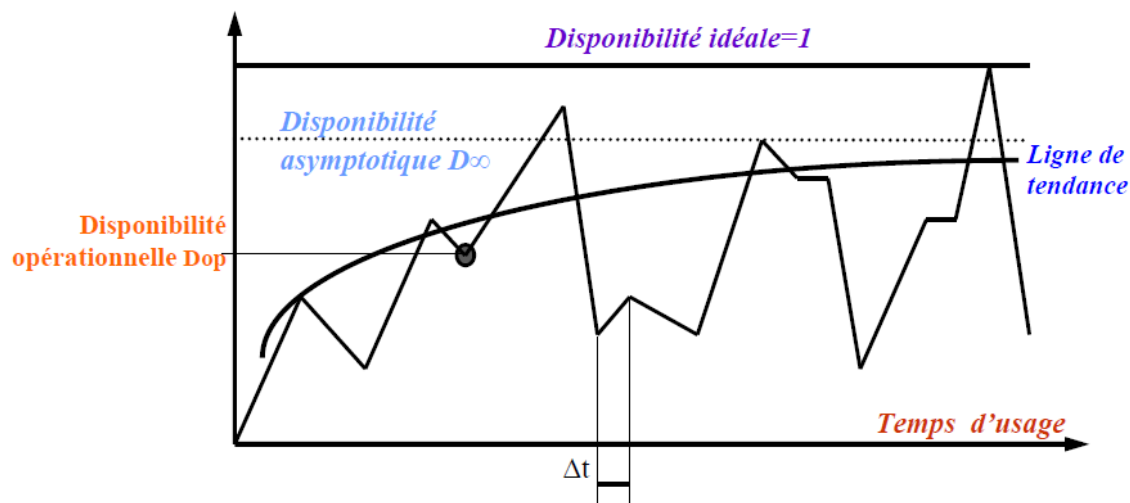
Notée **Dg**, cette disponibilité s'obtient par la composition des Dop d'unités, suivant présence et la valeur de stocks intermédiaires (ou stocks tampons) que la logique de flux tendu tend à supprimer.

Elle constitue un gisement d'amélioration de la productivité, donc un objectif à atteindre pour la maintenance. L'amélioration passe obligatoirement par une augmentation des **Dop_{Ui}** les plus faibles.

➤ **Disponibilité intrinsèque ou asymptotique :**

Pour un équipement donnée, il existe une limite de disponibilité **D_∞** au même titre qu'il existe une limite de performance de production (temps de cycle ou cadence) qui est mieux connue que **D_∞**.

Cette disponibilité intrinsèque est une caractéristique initiale de l'équipement, de valeur difficile à connaître à priori ; c'est normalement vers cette valeur que doit tendre la Dop. Par contre, elle est la résultante de la prise en compte initiale des critères de fiabilité et de maintenabilité qui doivent figurer au cahier des charges de l'équipement.



□ **Disponibilité instantanée $D(t_i)$:**

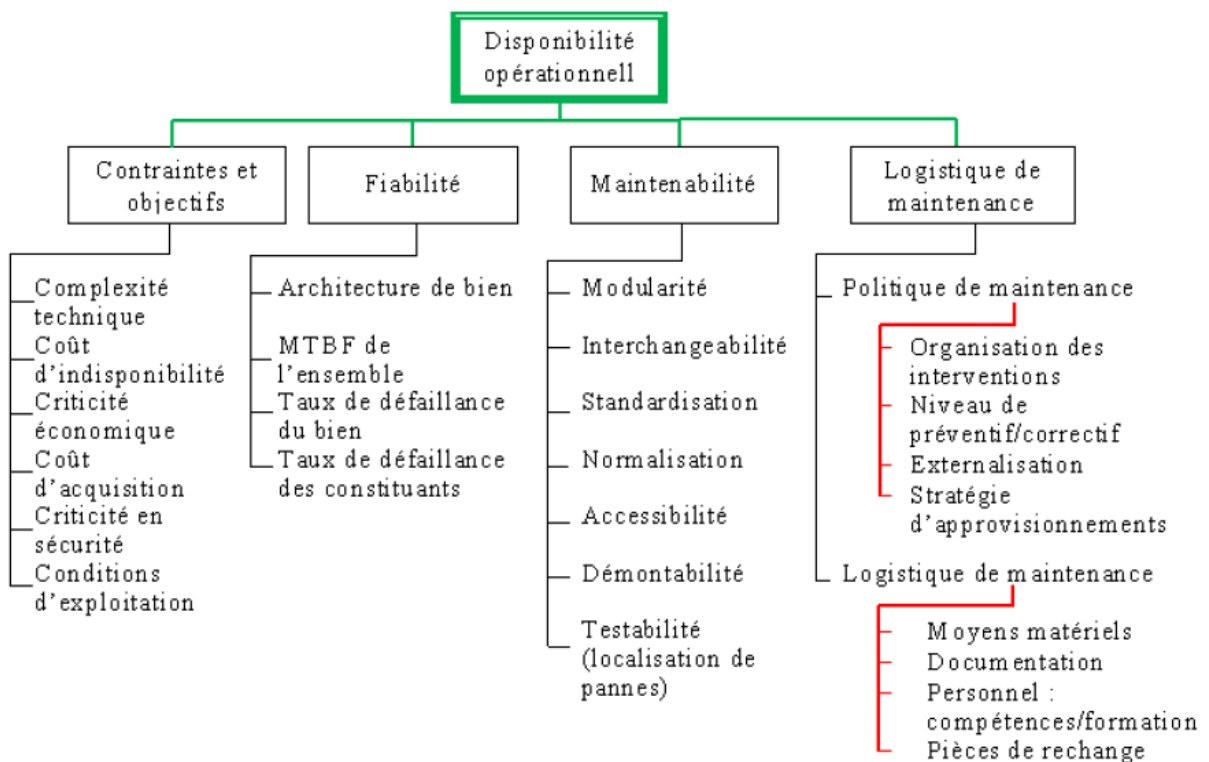
Elle permet de montrer l'existence d'une disponibilité asymptotique.

□ **Disponibilité contractuelle D_c et disponibilité prévisionnelle D_{prev} :**

Certains contrats d'achat d'équipement imposent une valeur allouée D_c qu'il appartient au concepteur de « construire » en réalisant une modélisation à partir de valeurs supposées (bases de données) de MTBF et de MTTR. Cette disponibilité prévisionnelle devra être confrontée à la D_{op} mesurée suivant des procédures précisées et acceptées par les 2 parties fournisseur / utilisateur – client.

1.3 Analyse de la disponibilité opérationnelle :

Facteurs influents sur la disponibilité opérationnelle :



L'analyse qualitative de la disponibilité passe par l'analyse des MTI. Après avoir classé et sélectionné certaines indisponibilités critiques ou anormales,

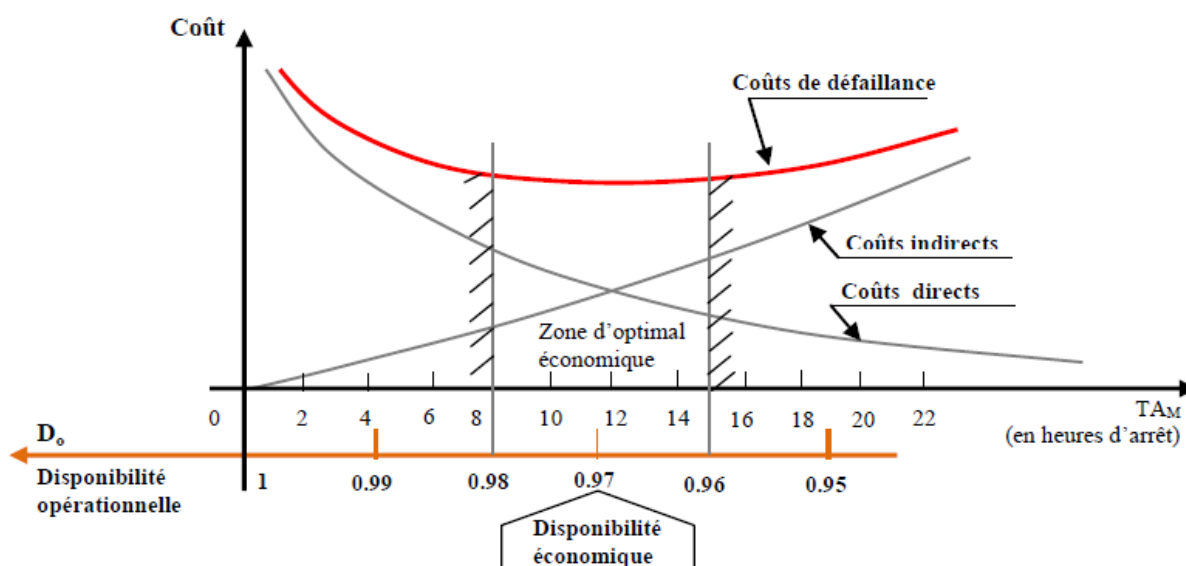
On peut analyser l'indisponibilité à 3 niveaux :

1. **Analyse de la défaillance** à l'origine de l'indisponibilité. S'il est possible de la guérir ou de la prévenir, l'analyse s'arrête là, sinon,
2. **Analyse des critères de disponibilité** (cf. ci-dessus). Il faut alors identifier le ou les critères à l'origine des temps d'arrêt propres anormalement pénalisants. On recherche ensuite des améliorations qui peuvent être de nature technique ou organisationnelle.
3. **Analyse des conditions de l'intervention ou de la série d'interventions**. Il s'agit de remettre en cause la logistique de maintenance et son organisation (ex : sur 2h d'indisponibilité, on met en évidence qu'il a fallu 1,25h pour rechercher une pièce de rechange au magasin, puis comme on ne la trouvait pas, on a été obligé de l'acheter chez le distributeur voisin).

L'analyse de la disponibilité passe aussi par une **approche économique** selon 2 objectifs possibles :

1. Obtenir la meilleure disponibilité au moindre coût pour un budget fixé
2. Obtenir une disponibilité performante, en mettant en oeuvre la meilleure logistique de maintenance possible

L'environnement économique de l'entreprise et du produit concerné conditionne la politique à appliquer, donc l'objectif de disponibilité fixé à la maintenance. Cependant, la productivité dépend obligatoirement des 3 facteurs suivants : cadence de production, **Dop** et qualité des produits ; éléments qui sont à la base du calcul du TRS.



II. Approche Mathématique de la Disponibilité :

1.1 Modèles d'évaluation de Dop :

Disponibilité opérationnelle propre :

$$Dop = \frac{MTBF}{MTBF + MTI} = \frac{MTBF + RT}{MTBF + MTTR + MTL} = \frac{MTBM}{MTBM + MMT}$$

MTBF : moyenne des temps de bon fonctionnement

MTI : moyenne des temps d'indisponibilité

RT : « ready time » ou temps moyens d'attente, le système étant prêt à fonctionner

MTL : moyenne des temps logistique **MTTR** : moyenne des temps techniques de réparation

MTBM : temps moyen entre actions de maintenance préventive ou corrective

MMT : temps moyen des actions préventives ou correctives

$$Dop = \frac{To - Tap}{To} = \frac{TMc.N}{TMc.N + Tap}$$

To : temps d'ouverture de la ligne ou temps requis

Tap : temps cumulés des arrêts propres

TMc.N : temps moyen de cycle x nb de pièces produites

Modes de saisie de Dop :

La saisie traditionnelle par BT, relevés compteurs ou feuilles de saisie documentées par un opérateur n'est pas pertinente pour évaluer régulièrement l'indicateur Dop, qui doit obligatoirement intégrer les « micros temps » d'indisponibilité pour être significatif.

La saisie automatique en temps réel des arrêts de production est presque toujours disponible (gestion de production) par information des entrées-sorties du système de commande.

Par contre, il faudra mettre en place une saisie semi-automatique pour imputer chaque arrêt à un code recensant les « causes d'arrêt » propres et les m causes d'arrêt induits par l'environnement du système.

L'imputation des feuilles de saisie par usage de code-barres est envisageable.

Le redémarrage conditionné à l'imputation garantit que l'imputation d'un arrêt à une cause est réalisée (sans qu'elle soit pour autant pertinente).

Un autre problème à maîtriser est le code « causes diverses » ou « autres causes » : il n'est pas facile de cibler des actions d'amélioration lorsque 66% des arrêts ont des causes diverses non identifiées !

La qualité des saisies est donc un facteur prépondérant de la valeur de l'indicateur « disponibilité » et de l'efficacité des actions d'amélioration que l'on va en déduire.

2.3 Modélisation de la disponibilité instantanée :

On se place dans l'hypothèse exponentielle, avec les taux de défaillance λ et de réparation μ constants et indépendants du temps :

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} \text{ et } \mu = \frac{1}{MTTR}$$

On définit la disponibilité instantanée d'un système réparable par :

$$D(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t}$$

- Disponibilité :

$D(t) = P_0(t)$ = Proba. que le système fonctionne) = Proba., qu'il ait 0 défaillance.

- Indisponibilité :

$I(t) = 1 - D(t) = P_1(t)$ = Proba. de non fonctionnement = Proba., ait 1 défaillance.

- La qualité initiale du système garantit que : $P_0(0) = 1$ et que $P_1(0) = 0$.

- Par complémentarité, $P_1(t) = 1 - P_0(t)$.

Pour que le système fonctionne à l'instant $(t+dt)$, avec une probabilité $P_0(t+dt)$,

Il faut :

⇒ Qu'il fonctionne à l'instant et qu'il n'y ait pas de défaillance t entre et $(t+dt)$:
probabilité = $P_0(t) \cdot (1 - \lambda dt)$

⇒ Ou qu'il ne fonctionne pas à l'instant t , mais qu'il soit remis en état à $(t+dt)$:
Probabilité = $(1 - P_0(t)) \cdot \mu dt$

Equation des probabilités : $P_0(t+dt) = P_0(t) \cdot (1 - \lambda dt) + (1 - P_0(t)) \cdot \mu dt$

En divisant par dt tendant vers 0 : $P_0'(t) + (\lambda + \mu) \cdot P_0(t) = \mu$

La solution de cette équation est :

$$D(t) = P0(t) = \frac{1}{\lambda + \mu} (\mu + \lambda \cdot e^{-(\lambda + \mu)t})$$

⇒ Quand $t \rightarrow \infty$, $D(t)$ tend vers une limite asymptotique D_∞ qui se traduit par les formules suivantes :

$$D_\infty = \frac{\mu}{\lambda + \mu} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} = \frac{1}{1 + \frac{\lambda}{\mu}} = \frac{1}{1 + \frac{MTTR}{MTBF}}$$

Le rapport (MTTR / MTBF) est appelé le « rapport de maintenance ».

2.4 Composition des disponibilités asymptotiques :

L’objectif est de modéliser la disponibilité d’un système **Dg** à partir de la disponibilité **DUi** de ses unités constitutives.

Il faut cependant envisager 2 cas :

1. Les éléments sont statistiquement indépendants (rare dans le cas des systèmes automatisés).
2. Les éléments sont statistiquement dépendants (le plus fréquent) car une dépendance fonctionnelle crée une dépendance sur les probabilités.

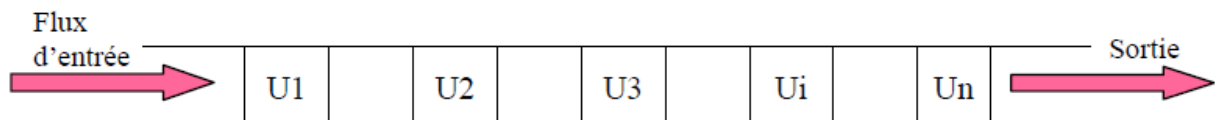
Cas possibles	Formule de calcul	Exemple
n unités indépendantes en série	$Dg = \prod_{i=1}^n DUi$	Soient 2 unités de disponibilités 0,9 et 0,8 en série : Dg = 0,9 x 0,8 = 0,72
n unités indépendantes en //	$Dg = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - DUi)$	Soient 2 unités de disponibilités 0,9 et 0,8 en // : Dg = 1 - (1 - 0,9) x (1 - 0,8) = 0,98
n unités dépendantes en série	$Dg = 1 - \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{\mu_i}$	
Redondance active de n unités identiques	$Dg = 1 - \prod_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{\mu_i}$	

2.5 Composition des disponibilités opérationnelles :

Une chaîne est constituée de différentes unités (ou machines) ayant leur vie propre (bon fonctionnement, mode dégradée, panne, etc.), donc leur disponibilité DU_i .

□ **Modèle « série » des lignes à unités liées (ou dépendantes) :**

Sur ce type de chaîne, l'arrêt d'une unité implique l'arrêt de l'ensemble.



*C'est comme si nous avions un processus **

Dans ce cas la disponibilité opérationnelle de la ligne sera :

$$Dg = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{DU_i} \right] - (n - 1)}$$

Dans ce type de chaîne, on peut remarquer que :

- Plus le nombre d'unités mis en série est élevé et plus on pénalise la disponibilité de la machine,
- Une perte, même infime de la disponibilité élémentaire des unités fait chuter considérablement la disponibilité de la chaîne.

*** déjà vu auparavant.**

Pour améliorer la disponibilité des chaînes en série dépendantes, il faut :

- ✓ Détecter l'unité pénalisante,
- ✓ Engager une action de fiabilité maintenabilité pour l'emmener au niveau des autres unités mais inutile de 'pousser' au dessus,
- ✓ Vérifier l'homogénéité des D_i .

Exemple :

Soit une ligne de 10 unités dont chacune à une $DU_i=0,99$:

$$Dg = \frac{1}{\sum_{i=1}^{10} \left[\frac{1}{0,99} \right] - (10 - 1)} = 0,908$$

Si 9 unités ont une $DU_i=0,99$, et une unité $DU_i=0,80$:

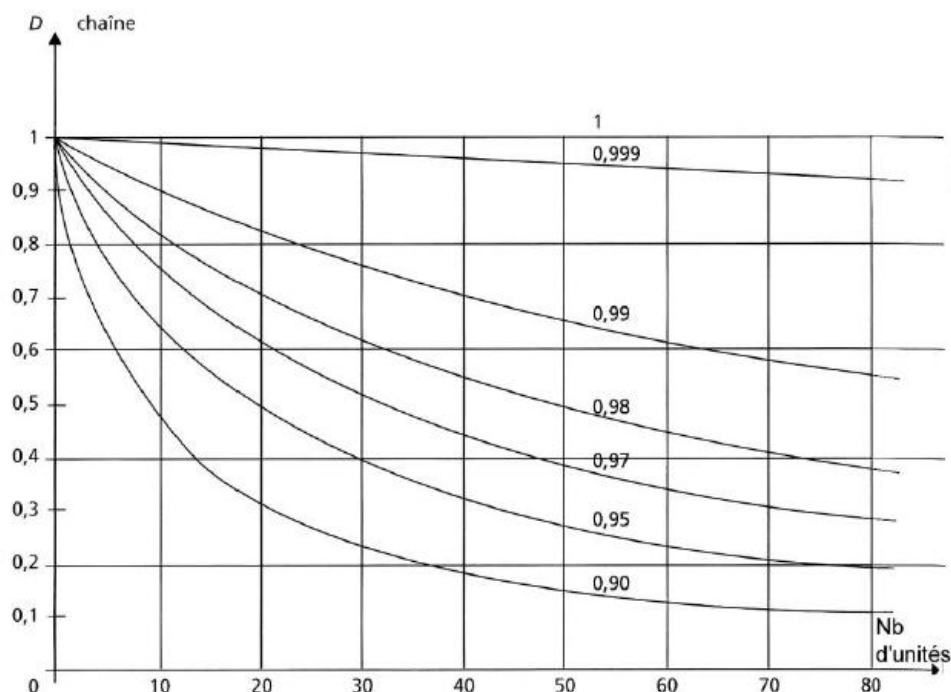
$$Dg = \frac{1}{9 \times \frac{1}{0,99} + \frac{1}{0,80} - (10 - 1)} = 0,746$$

Cet exemple montre très simplement que pour améliorer la disponibilité d'une ligne, il suffit de « s'attaquer » à l'unité la plus pénalisante.

Pour plus de simplicité, la formule de Dg a été mise en abaque pour un nombre d'unités important.

Ex : pour 50 unités de $DU_i=0,97$, $Dg=0,40$.

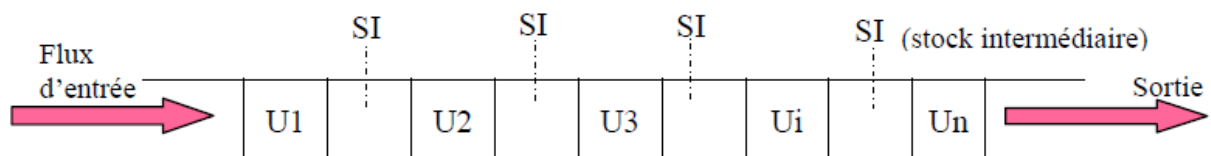
Ex : pour une $Dg=0,6$, avec 30 unités, $DU_i=0,978$



❖ **Unités en série indépendantes :**

Sur ce type de ligne, l'arrêt d'une unité n'entraîne pas l'arrêt de l'ensemble de la ligne : existence d'un stock intermédiaire « **SI** » permettant d'alimenter la machine en aval de l'unité défaillante pendant une durée établie à partir du temps moyen d'arrêt le plus important enregistré en régime normal.

Les stocks intermédiaires « **SI** » sont reconstitués en faisant varier les cadences.

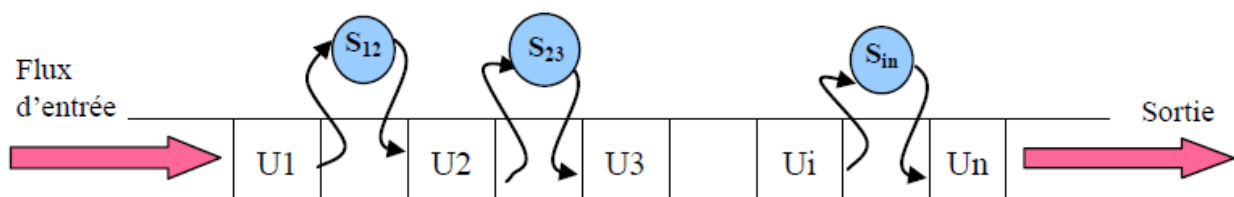


Si D_i est la disponibilité de la machine U_i :

$$D_{(chaîne)} = \prod_{i=1}^n (D_i)$$

❖ **Chaînes à « rempotage – dépotage » :**

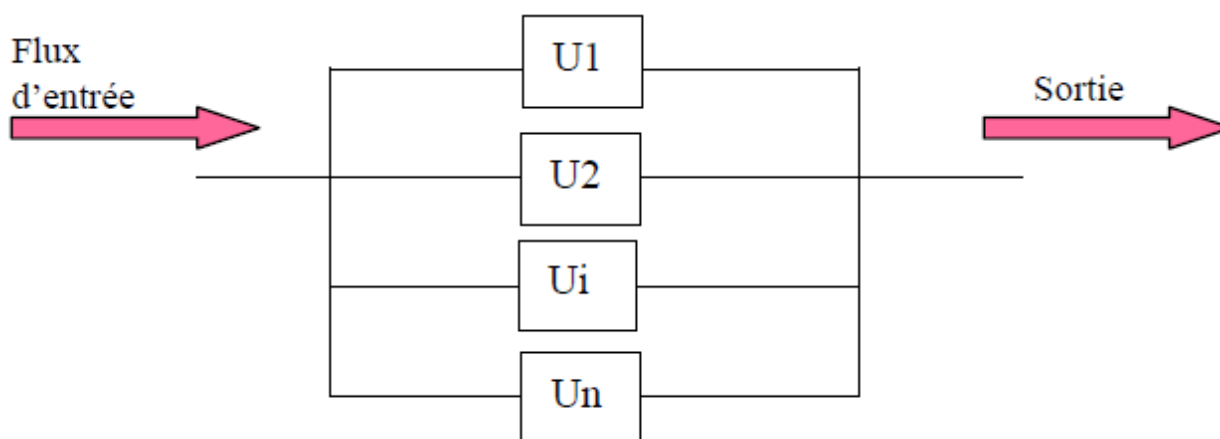
Sur ce type de ligne, il est possible, en cas de panne d'une unité de « rempoter » le stock aval et de « dépoter » le stock amont. Ceci n'est souvent possible que pour un *court arrêt*.



La disponibilité de la chaîne est conditionnée par la plus mauvaise disponibilité de machine. $D_{(chaîne)} = \min de (D_1, D_2, \dots, D_n)$

❖ *Disponibilité des chaînes à unités en redondance active ; modèle « parallèle » :*

Dans ce type de ligne, toutes les unités permettant d'accomplir la fonction requise, elles fonctionnent simultanément en dessous de leur capacité théorique. En cas de panne, leurs cadences augmentent pour accomplir la fonction requise.



Si D_i est la disponibilité de la machine U_i :

$$D_{(chaîne)} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - D_i)$$

Remarque :

☞ dans le cas de 2 machines en redondance passive en parallèle, lorsque les 2 éléments sont en état de marche, un seul fonctionne ; lorsqu'il tombe en panne, l'autre se met en marche ;

dans le cas d'un montage en parallèle de n éléments identiques sans redondance, la disponibilité de la ligne est la moyenne des disponibilités.

Nota : - Merci de préparer vos leçons.

La suite vous sera transmise ultérieurement.

- Dès-que j'aurai toutes vos réponses de série de TD-n°1, Je vous enverrai une deuxième série.
- Concernant la correction, Si, inchAllah, nous allons revenir travailler à la fac, dans un temps très proche, nous corrigerons, ensemble les séries, Sinon, je vous enverrai la correction en PDF.

**Bon courage avec une santé sécurisée à tous
Par notre Créateur Allah Soubhanahou wa Ta3ala.**

