

Systems Engineering II

Abdellatif MEGNOUNIF

Chap. 3

Design pour la maintenabilité

COURS 3 Mardi 10.11.2009

1. Introduction

Design et développement du système doit aboutir à un produit **opérationnellement faisable**.

Ceci implique que le système va accomplir ses fonctions effectivement et efficacement

La maintenabilité fait partie des paramètres qui vont affecter le design.

C'est une caractéristique du design liée à la facilité, la précision, la sécurité et l'économie dans la performance des fonctions de maintenance. Ça peut être spécifiée, contrôlée et mesurée et les méthodes et techniques de maintenabilité existent pour faciliter le processus.

La maintenabilité doit être considérée avec la performance, la fiabilité, les facteurs humains, la productibilité, la supportabilité, la mise hors service, le coût du cycle de vie....

Introduction (suite)

Actuellement, plus de systèmes sophistiqués répondant aux exigences opérationnelles mais dont la fiabilité reste à revoir (souvent marginalisée).

Les systèmes non fiables nécessitent beaucoup de maintenance.

Donc, il faut minimiser le cout de la maintenance (surtout là où les ressources sont très limitées).

2. Définition

- ❑ En engineering des systèmes, l'objectif est de concevoir et développer un système (produit) qui peut être maintenu **efficacement**, **sûre**, en un **temps** très minime, avec un **cout** très réduit, et avec le minimum d'**utilisation** des ressources sans toutefois influencer trop la mission du système.
- ❑ La **maintenabilité** est la possibilité d'un produit à être maintenu. C'est un paramètre dépendant du design.
- ❑ La **maintenance** est une série d'actions à prendre pour restaurer ou retenir un produit dans un état opérationnel effectif. Maintenance est le résultat du design.

Définition (Suite)

La maintenabilité peut être **exprimée** en termes de:

- Temps de maintenance,
- Fréquence de maintenance ou bien
- cout de la maintenance.

Par définition:

- 1.** La probabilité qu'un produit soit restauré ou retenu dans des conditions spécifiés pour une certaine période de temps.
- 2.** La probabilité que la maintenance ne sera pas exigée plus de « n » fois dans une période de temps donné.
- 3.** La probabilité que la maintenance ne va pas couter plus de « y » DA par période désignée.

3. Catégories de maintenance

❑ Pour un système.

On distingue 02 catégories de maintenance.

Corrective: Maintenance non programmée, résultant d'une panne. Permet de restaurer le système (produit) à un certain niveau de performance.

Préventive: Maintenance programmée pour retenir un système à un niveau de performance spécifié par inspection, détection, service ou bien la prévention des pannes par remplacement périodique d'articles .

❑ Pour un software. (d'autres catégories sont utilisées)

Maintenance adaptive: le procès continu de changement du software pour répondre aux changement des exigences dans les données ou procès.

Maintenance perfective: utilisé pour décrire les modifications du software dans le but d'améliorer la performance.

4. Calcul de la maintenabilité

Le calcul de la maintenabilité se fera à la base de

- la période de non fonctionnement: (downtime) période où le système n'est pas opérationnel pour cause de maintenance.
- heures de travail du personnel: (personnel labor hours) nombre total de personnes, niveaux de compétence et les heures de travail pendant la maintenance.
- fréquences de maintenance: i.e MTBM temps moyen entre maintenance.
- cout de maintenance.
- Facteurs liés aux éléments de support.

4.1 Facteurs de la période de non fonctionnement

Inclut temps de maintenance corrective et préventive, temps de retard administratif et logistique et temps total de non fonctionnement du à la maintenance.

1. Temps moyen de maintenance corrective (\overline{Mct}) (ou MTTR)

Qd un système tombe en panne, il ya plusieurs étapes pour le restaurer:

- Détection de la panne
- Isolation du défaut
- Désassemblage pour accéder au défaut
- Réparation...

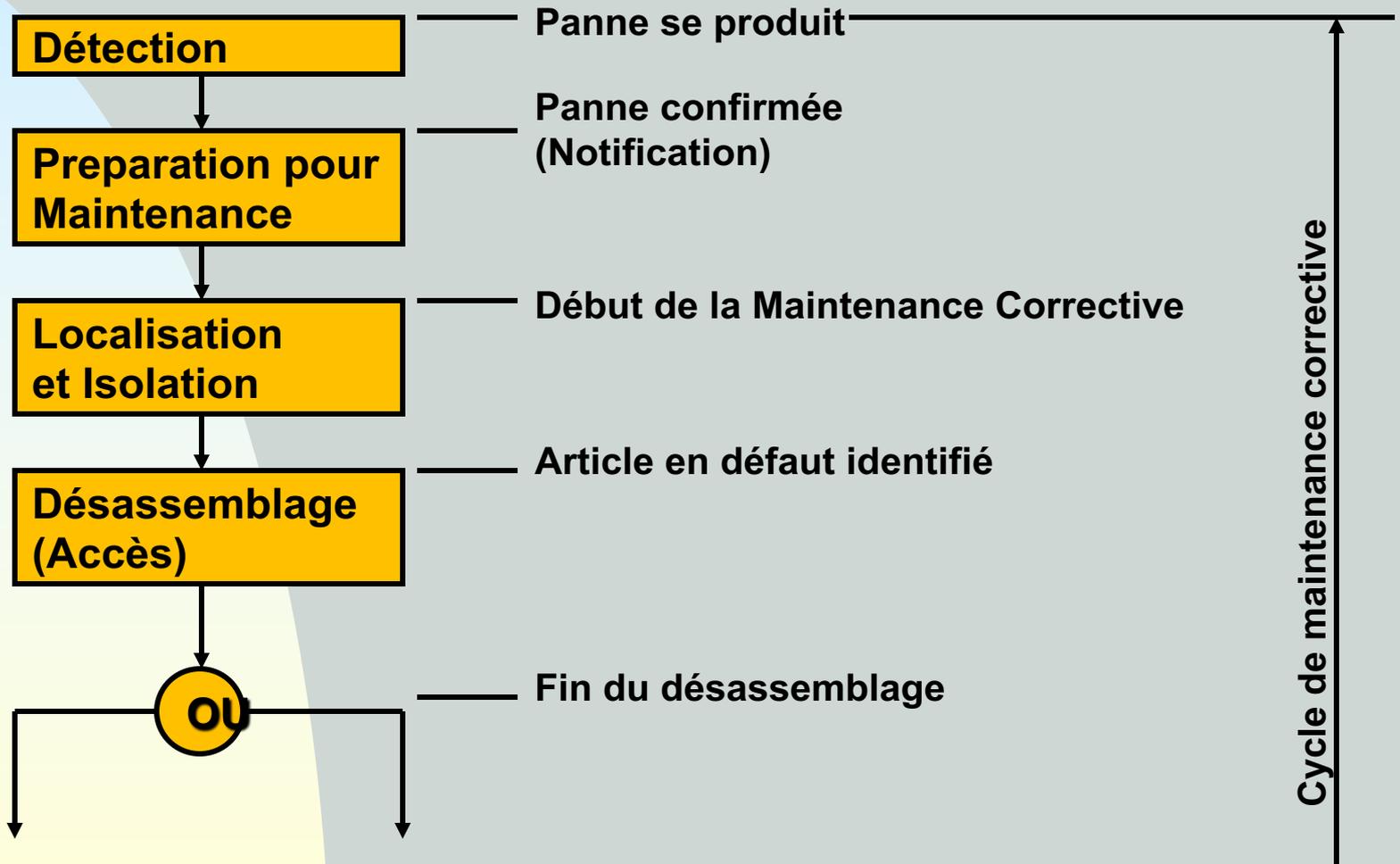
Cycle de maintenance corrective

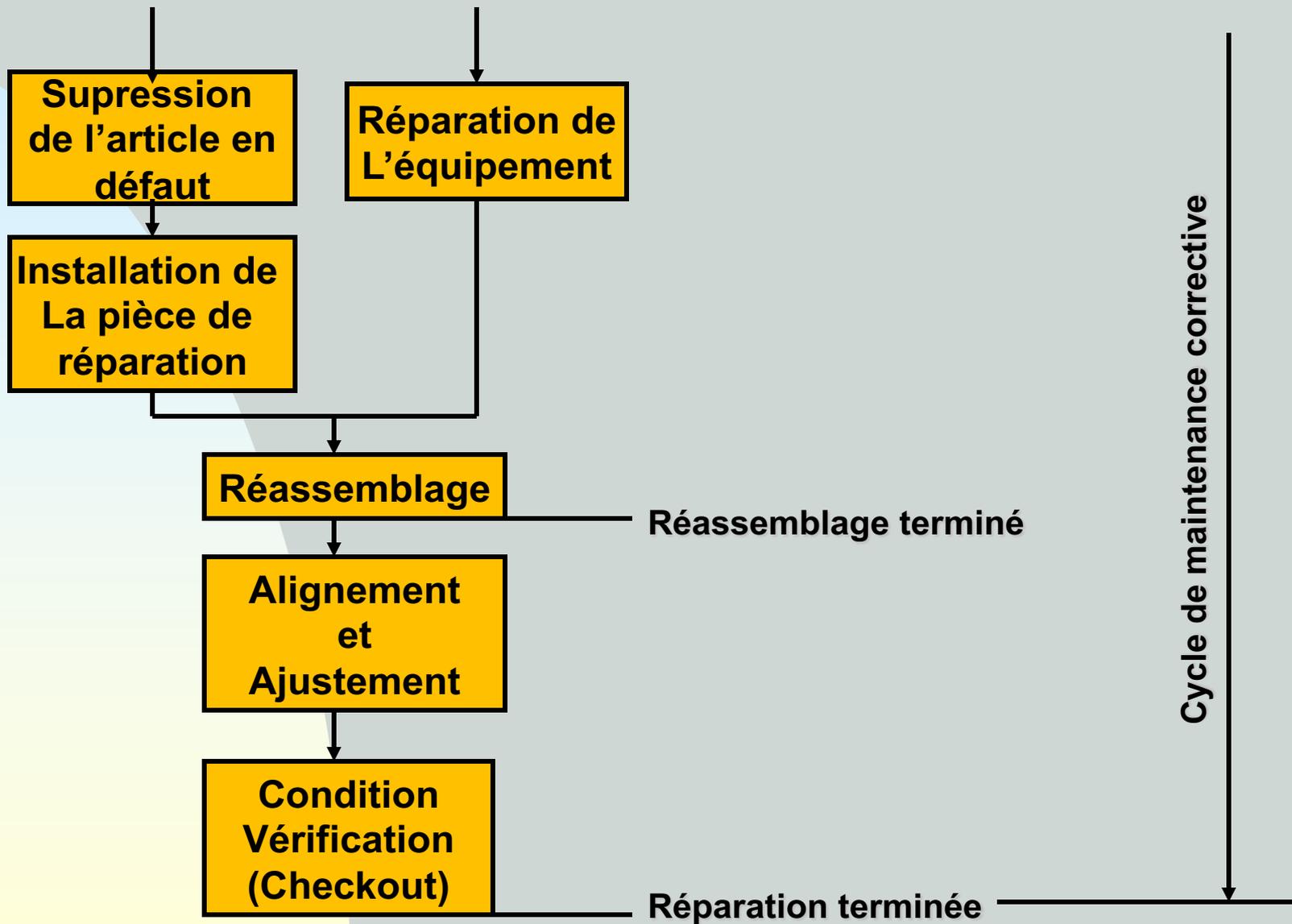
Pour un cycle, on a un temps de cycle de maintenance (Mct_i)

La moyenne arithmétique de tous les (Mct_i) donne le \overline{Mct}



Cycle de maintenance corrective





Exemple

On a procédé à une maintenance corrective d'un article 50 fois. Chaque temps donnée représente un cycle complet de maintenance corrective.

Quelle serait le fréquence de distribution et tracer l'histogramme des fréquences.

TABLE 13.1 Corrective Maintenance Times (Mct, in min)

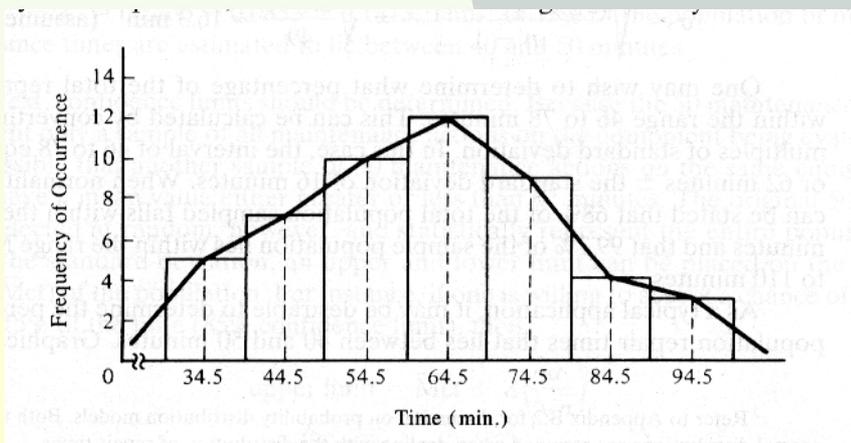
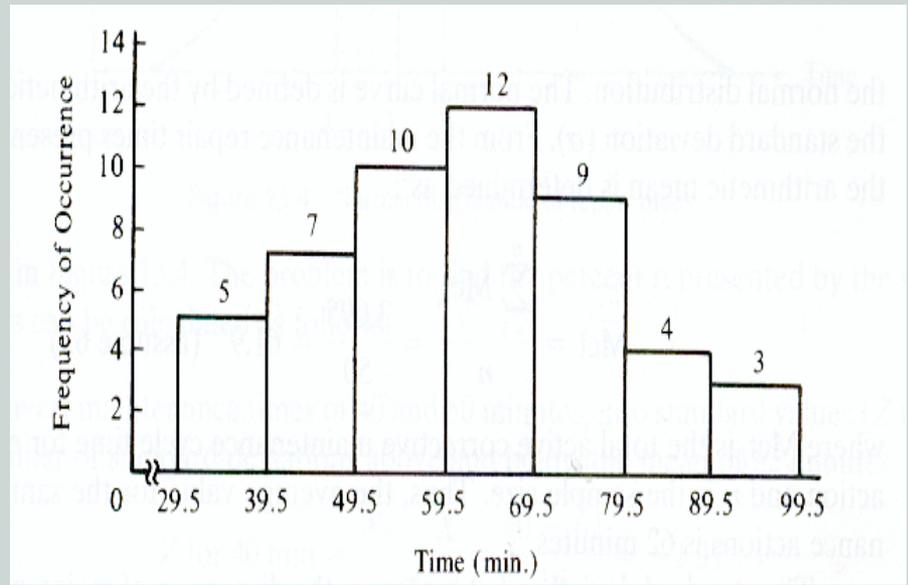
40	58	43	45	63	83	75	66	93	92
71	52	55	64	37	62	72	97	76	75
75	64	48	39	69	71	46	59	68	64
67	41	54	30	53	48	83	33	50	63
86	74	51	72	87	37	57	59	65	63

Les observations sont entre 97 et 30 minutes, soit 67 minutes
Il faut donc les ranger dans des classes d'intervalles (tous les 10 c'est pratique).

Exemple (suite)

TABLE 13.2 Frequency Distribution

Class interval	Frequency	Cumulative frequency
29.5-39.5	5	5
39.5-49.5	7	12
49.5-59.5	10	22
59.5-69.5	12	34
69.5-79.5	9	43
79.5-89.5	4	47
89.5-99.5	3	50



En faisant passer la courbe par les milieux de chaque intervalle, on obtient l'allure de la courbe de distribution de la probabilité de maintenance pour cet article

Exemple (suite)

En procédant à d'autres actions correctives supplémentaires, la courbe peut prendre la forme d'une distribution normale, qui sera définie par sa moyenne arithmétique (\overline{Mct}) et sa déviation standard (σ). Soit:

$$\overline{M}_{ct} = \frac{\sum_{i=1}^n M_{ct_i}}{n} = \frac{3095}{50} = 61.9 \cong 62$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_{ct_i} - \overline{M}_{ct})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{13013}{49}} = 16.3 mn \cong 16 mn$$

TABLE 13.3 Variance Data

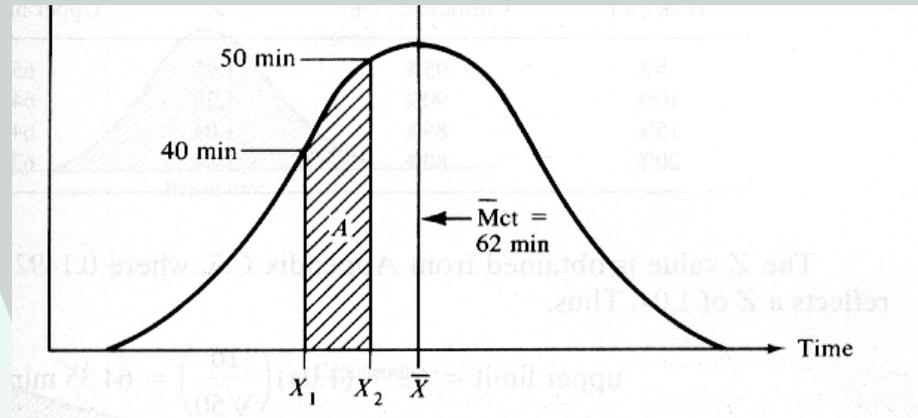
TOTAL	Mct _i - \overline{Mct}	(Mct _i - \overline{Mct}) ²
40	-22	484
71	+ 9	81
75	+13	169
67	+ 5	25
etc.	etc.	etc.
Total		13,013

σ : mesure la dispersion des valeurs de temps de la maintenance

Données de variance pour les 50 points

Exemple (suite)

On peut se poser la question: Quel sera le pourcentage de la population totale dont le temps de réparation est entre 40 et 50 mn. (partie hachurée)



Convertir d'abord les temps de maintenance 40 et 50 en valeurs standards (Z) ou bien le nombre de déviations standard au dessus et au dessous de la valeur moyenne 60 mn.

$$Z(40) = \frac{X_1 - \bar{X}}{\sigma} = \frac{40 - 62}{16} = -1.37$$

$$Z(50) = \frac{X_2 - \bar{X}}{\sigma} = \frac{50 - 62}{16} = -0.75$$

Exemple (suite)

De la table des probabilités de la loi normale, on peut lire:

TABLE C.3 Cumulative Normal Probabilities

Z	0.09	0.08	0.07	0.06	0.05	0.04	0.03	0.02	0.01	0.00
-3.5	0.00017	0.00017	0.00018	0.00019	0.00019	0.00020	0.00021	0.00022	0.00022	0.00023
-3.4	0.00024	0.00025	0.00026	0.00027	0.00028	0.00029	0.00030	0.00031	0.00033	0.00034
-3.3	0.00035	0.00036	0.00038	0.00039	0.00040	0.00042	0.00043	0.00045	0.00047	0.00048
-3.2	0.00050	0.00052	0.00054	0.00056	0.00058	0.00060	0.00062	0.00064	0.00066	0.00069
-3.1	0.00071	0.00074	0.00076	0.00079	0.00082	0.00085	0.00087	0.00090	0.00094	0.00097
-3.0	0.00100	0.00104	0.00107	0.00111	0.00114	0.00118	0.00122	0.00126	0.00131	0.00135
-2.9	0.0014	0.0014	0.0015	0.0015	0.0016	0.0016	0.0017	0.0017	0.0018	0.0019
-2.8	0.0019	0.0020	0.0021	0.0021	0.0022	0.0023	0.0023	0.0024	0.0025	0.0026
-2.7	0.0026	0.0027	0.0028	0.0029	0.0030	0.0031	0.0032	0.0033	0.0034	0.0035
-2.6	0.0036	0.0037	0.0038	0.0039	0.0040	0.0041	0.0043	0.0044	0.0045	0.0047
-2.5	0.0048	0.0049	0.0051	0.0052	0.0054	0.0055	0.0057	0.0059	0.0060	0.0062
-2.4	0.0064	0.0066	0.0068	0.0069	0.0071	0.0073	0.0075	0.0078	0.0080	0.0082
-2.3	0.0084	0.0087	0.0089	0.0091	0.0094	0.0096	0.0099	0.0102	0.0104	0.0107
-2.2	0.0110	0.0113	0.0116	0.0119	0.0122	0.0125	0.0129	0.0132	0.0136	0.0139
-2.1	0.0143	0.0146	0.0150	0.0154	0.0158	0.0162	0.0166	0.0170	0.0174	0.0179
-2.0	0.0183	0.0188	0.0192	0.0197	0.0202	0.0207	0.0212	0.0217	0.0222	0.0228
-1.9	0.0233	0.0239	0.0244	0.0250	0.0256	0.0262	0.0268	0.0274	0.0281	0.0287
-1.8	0.0294	0.0301	0.0307	0.0314	0.0322	0.0329	0.0336	0.0344	0.0351	0.0359
-1.7	0.0367	0.0375	0.0384	0.0392	0.0401	0.0409	0.0418	0.0427	0.0436	0.0446
-1.6	0.0455	0.0465	0.0475	0.0485	0.0495	0.0505	0.0516	0.0526	0.0537	0.0548
-1.5	0.0559	0.0571	0.0582	0.0594	0.0606	0.0618	0.0630	0.0643	0.0655	0.0668
-1.4	0.0681	0.0694	0.0708	0.0721	0.0735	0.0749	0.0764	0.0778	0.0793	0.0808
-1.3	0.0823	0.0838	0.0853	0.0869	0.0885	0.0901	0.0918	0.0934	0.0951	0.0968
-1.2	0.0985	0.1003	0.1020	0.1038	0.1057	0.1075	0.1093	0.1112	0.1131	0.1151
-1.1	0.1170	0.1190	0.1210	0.1230	0.1251	0.1271	0.1292	0.1314	0.1335	0.1357
-1.0	0.1379	0.1401	0.1423	0.1446	0.1469	0.1492	0.1515	0.1539	0.1562	0.1587
-0.9	0.1611	0.1635	0.1660	0.1685	0.1711	0.1736	0.1762	0.1788	0.1814	0.1841
-0.8	0.1867	0.1894	0.1922	0.1949	0.1977	0.2005	0.2033	0.2061	0.2090	0.2119
-0.7	0.2148	0.2177	0.2207	0.2236	0.2266	0.2297	0.2327	0.2358	0.2389	0.2420
-0.6	0.2451	0.2483	0.2514	0.2546	0.2578	0.2611	0.2643	0.2676	0.2709	0.2743
-0.5	0.2776	0.2810	0.2843	0.2877	0.2912	0.2946	0.2981	0.3015	0.3050	0.3085
-0.4	0.3121	0.3156	0.3192	0.3228	0.3264	0.3300	0.3336	0.3372	0.3409	0.3446
-0.3	0.3483	0.3520	0.3557	0.3594	0.3632	0.3669	0.3707	0.3745	0.3783	0.3821
-0.2	0.3859	0.3897	0.3936	0.3974	0.4013	0.4052	0.4090	0.4129	0.4168	0.4207
-0.1	0.4247	0.4286	0.4325	0.4364	0.4404	0.4443	0.4483	0.4522	0.4562	0.4602
-0.0	0.4641	0.4681	0.4721	0.4761	0.4801	0.4840	0.4880	0.4920	0.4960	0.5000

$Pr(40) (Z=-1.37) = 0.0853$

$Pr(50) (Z=-0.75) = 0.2266$

$Pr = 0.2266 - 0.0853 = 0.1413 = 14.13\%$

14.13% de la population de temps de maintenance est estimée se produire entre 40 et 50 mn.

Exemple (suite)

On peut calculer les limites (sup et inf) de confiance. Parce que les 50 points considérés sont aléatoires, d'autres 50 points peuvent donner une autre valeur de la moyenne. Dans ce cas, il faut parler de confiance. En utilisant la déviation standard, on peut considérer une limite sup ou inf de la valeur moyenne (Mct):

Ex: Si on veut accepter la chance d'être en erreur 15% (85% de limite de confiance), alors:

$$Limite\ Sup = \bar{M}_{ct} + Z \left(\frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right)$$

σ/\sqrt{n} : erreur sur la déviation standard.

Z: tirée du tableau de prob pour 15%
Pour 0.1492 on aura Z=1.04

$$Limite\ Sup = 62 + 1.04 \left(\frac{16}{\sqrt{50}} \right) = 64.35\ mn$$

85% de chance que la moyenne Mct soit inférieure à 64.35 mn

TABLE C.3 (continued) Cumulative Normal Probabilities

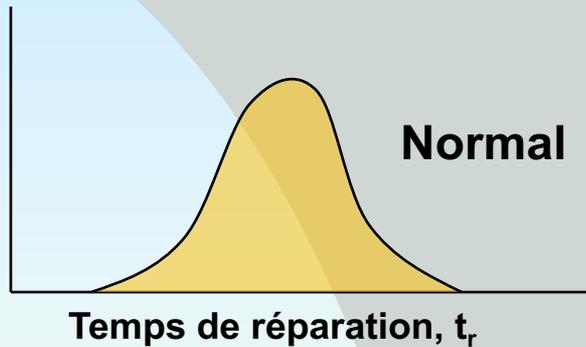
Z	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
+0.0	0.5000	0.5040	0.5080	0.5120	0.5160	0.5199	0.5239	0.5279	0.5319	0.5359
+0.1	0.5398	0.5438	0.5478	0.5517	0.5557	0.5596	0.5636	0.5675	0.5714	0.5753
+0.2	0.5793	0.5832	0.5871	0.5910	0.5948	0.5987	0.6026	0.6064	0.6103	0.6141
+0.3	0.6179	0.6217	0.6255	0.6293	0.6331	0.6368	0.6406	0.6443	0.6480	0.6517
+0.4	0.6554	0.6591	0.6628	0.6664	0.6700	0.6736	0.6772	0.6808	0.6844	0.6879
+0.5	0.6915	0.6950	0.6985	0.7019	0.7054	0.7088	0.7123	0.7157	0.7190	0.7224
+0.6	0.7257	0.7291	0.7324	0.7357	0.7389	0.7422	0.7454	0.7486	0.7517	0.7549
+0.7	0.7580	0.7611	0.7642	0.7673	0.7704	0.7734	0.7764	0.7794	0.7823	0.7852
+0.8	0.7881	0.7910	0.7939	0.7967	0.7995	0.8023	0.8051	0.8079	0.8106	0.8133
+0.9	0.8159	0.8186	0.8212	0.8238	0.8264	0.8289	0.8315	0.8340	0.8365	0.8389
+1.0	0.8413	0.8438	0.8461	0.8485	0.8508	0.8531	0.8554	0.8577	0.8599	0.8621
+1.1	0.8643	0.8665	0.8686	0.8708	0.8729	0.8749	0.8770	0.8790	0.8810	0.8830
+1.2	0.8849	0.8869	0.8888	0.8907	0.8925	0.8944	0.8962	0.8980	0.8997	0.9015
+1.3	0.9032	0.9049	0.9066	0.9082	0.9099	0.9115	0.9131	0.9147	0.9162	0.9177
+1.4	0.9192	0.9207	0.9222	0.9236	0.9251	0.9265	0.9279	0.9292	0.9306	0.9319
+1.5	0.9332	0.9345	0.9357	0.9370	0.9382	0.9394	0.9406	0.9418	0.9429	0.9441
+1.6	0.9452	0.9463	0.9474	0.9484	0.9495	0.9505	0.9515	0.9525	0.9535	0.9545
+1.7	0.9554	0.9564	0.9573	0.9582	0.9591	0.9599	0.9608	0.9616	0.9625	0.9633
+1.8	0.9641	0.9649	0.9656	0.9664	0.9671	0.9678	0.9686	0.9693	0.9699	0.9706
+1.9	0.9713	0.9719	0.9726	0.9732	0.9738	0.9744	0.9750	0.9756	0.9761	0.9767
+2.0	0.9773	0.9778	0.9783	0.9788	0.9793	0.9798	0.9803	0.9808	0.9812	0.9817
+2.1	0.9821	0.9826	0.9830	0.9834	0.9838	0.9842	0.9846	0.9850	0.9854	0.9857
+2.2	0.9861	0.9864	0.9868	0.9871	0.9875	0.9878	0.9881	0.9884	0.9887	0.9890
+2.3	0.9893	0.9896	0.9898	0.9901	0.9904	0.9906	0.9909	0.9911	0.9913	0.9916
+2.4	0.9918	0.9920	0.9922	0.9925	0.9927	0.9929	0.9931	0.9932	0.9934	0.9936
+2.5	0.9938	0.9940	0.9941	0.9943	0.9945	0.9946	0.9948	0.9949	0.9951	0.9952
+2.6	0.9953	0.9955	0.9956	0.9957	0.9959	0.9960	0.9961	0.9962	0.9963	0.9964
+2.7	0.9965	0.9966	0.9967	0.9968	0.9969	0.9970	0.9971	0.9972	0.9973	0.9974
+2.8	0.9974	0.9975	0.9976	0.9977	0.9977	0.9978	0.9979	0.9979	0.9980	0.9981
+2.9	0.9981	0.9982	0.9983	0.9983	0.9984	0.9984	0.9985	0.9985	0.9986	0.9986
+3.0	0.9986	0.9986	0.9987	0.9987	0.9988	0.9988	0.9989	0.9989	0.9989	0.9990
+3.1	0.9990	0.9990	0.9991	0.9991	0.9991	0.9991	0.9992	0.9992	0.9992	0.9992
+3.2	0.9993	0.9993	0.9993	0.9993	0.9994	0.9994	0.9994	0.9994	0.9994	0.9995
+3.3	0.9995	0.9995	0.9995	0.9995	0.9996	0.9996	0.9996	0.9996	0.9996	0.9996
+3.4	0.9996	0.9996	0.9996	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997
+3.5	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998

Exemple (suite)

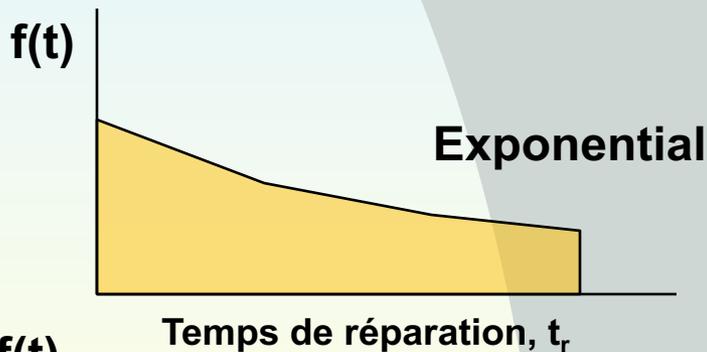
Enfin, on peut définir pour plusieurs valeurs de confiance (ou de risques) une variation dans les limites.

Risk (%)	Confidence (%)	Z	Upper limit (min)
5%	95%	1.65	65.72
10%	90%	1.28	64.89
15%	85%	1.04	64.35
20%	80%	1.84	63.89

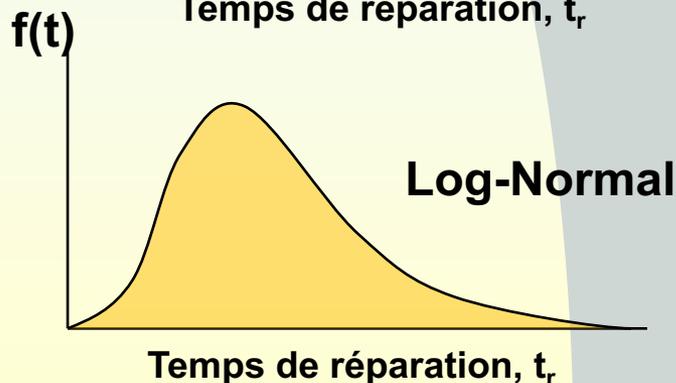
La dépendance du temps entre la probabilité de réparation et le temps alloué à la réparation produit généralement une densité de probabilité sous forme de :



Taches de maintenance directes. (taches de suppression et de remplacement très simples.)

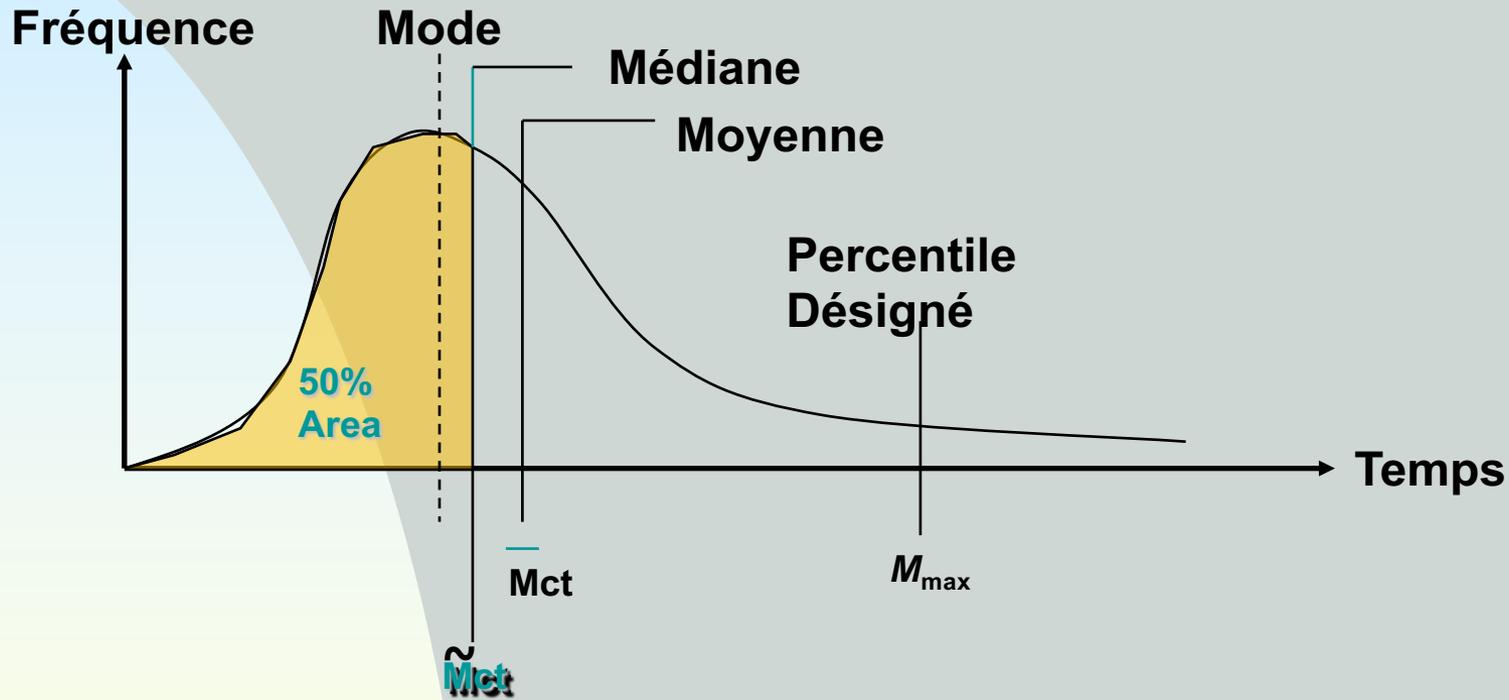


Taches de maintenance impliquant des méthodes de substitution de parties pour l'isolation de la panne dans de grands systèmes en un taux de réparation constant.



Taches de maintenance et actions de réparation comprenant plusieurs taches de fréquence et de durée non constante.

Un équipement électronique, sa distribution de temps de réparation est plutôt « Log-normale ».



La valeur moyenne du temps de maintenance corrective sera alors

$$\overline{Mct} = \frac{\sum (\lambda_i)(Mct_i)}{\sum \lambda_i}$$

λ_i = le taux de panne de l'élément individuel (i^{th})

Facteurs de la période de non fonctionnement (suite)

2. Temps moyen de maintenance préventive (\overline{Mpt})

Préventive c'est faire des actions pour retenir le système à un niveau spécifié de performance. Ça peut inclure:

- Inspection périodique
- Remplacement programmée d'articles critiques
- Calibration
- Révisions...

Le temps moyen est défini par: (inclut uniquement temps de maintenance active et non pas les retards...)

$$\overline{Mpt} = \frac{\sum (fpt_i)(Mpt_i)}{\sum fpt_i}$$

Où fpt_i : Fréquence d'action de maintenance préventive de l'individuel (i^{th})

Mpt_i : temps de maintenance préventive de l'élément i^{th}

Facteurs de la période de non fonctionnement (suite)

3. Temps médian de maintenance corrective (active) ($\tilde{M}ct$) ($MTTR_g$)

Temps médian de maintenance est la valeur qui divise tous les temps de non fonctionnement de façon à ce que 50% sont égaux ou inférieurs à la médiane et 50% sont égaux ou supérieurs à la médiane.

La médiane donne généralement la meilleure position moyenne du point.

Pour une distribution normale: la médiane est la moyenne arith.

Pour Log-normale: La médiane est la moyenne géométrique (voir fig. avant).

$$\tilde{M}ct = \text{antilog} \frac{\sum_{i=1}^n \log Mct_i}{n} = \text{antilog} \frac{\sum (\lambda_i)(\log Mct_i)}{\sum \lambda_i}$$

Où λ_i : Taux de panne de l'élément l'individuel (i^{th})

Mct_i : temps de maintenance corrective de l'élément i^{th}

Exemple

Mct _i	LOG Mct _i	(LOG Mct _i) ²	Mct _i	LOG Mct _i	(LOG Mct _i) ²
55	1.740	3.028	64	1.806	3.262
28	1.447	2.094	1	2.041	4.248
123	2.097	4.397	48	1.681	2.826
47	1.672	2.796	52	1.716	2.945
58	1.763	3.108	60	1.778	3.161
53	1.724	2.972	72	1.857	3.448
36	1.556	2.421	87	1.939	3.760
88	1.945	3.783	105	2.021	4.084
51	1.708	2.917	55	1.740	3.028
110	2.041	4.166	82	1.914	3.663
40	1.602	2.566	66	1.819	3.309
75	1.875	3.516	65	1.813	3.287
Total				43.315	78.785

$$\tilde{Mct} = \text{antilog} \frac{\sum_{i=1}^{24} \log Mct_i}{24} = \text{antilog} \frac{43.315}{24}$$

$$= \text{antilog } 1.805 = 63.80 \text{ mn}$$

Facteurs de la période de non fonctionnement (suite)

4. Temps médian de maintenance préventive (active) (\tilde{M}_{pt})

Même approche que le (\tilde{M}_{ct}).

$$\tilde{M}_{pt} = \text{antilog} \frac{\sum (f_{pt_i})(\log M_{pt_i})}{\sum f_{pt_i}}$$

5. Temps moyen de maintenance active (\bar{M})

Temps moyen pour la maintenance corrective (non programmée) et la maintenance préventive (programmée) ça n'inclut pas les retards de logistiques et administratifs.

$$\bar{M} = \frac{(\lambda)(\bar{M}_{ct}) + (f_{pt})(\bar{M}_{pt})}{\lambda + f_{pt}}$$

Où λ : Taux de panne ou taux de maintenance corrective

f_{pt} : taux de maintenance préventive

Facteurs de la période de non fonctionnement (suite)

6. Temps maximal de maintenance corrective (active) (M_{\max})

C'est le temps de non fonctionnement du à la maintenance au dessous duquel un pourcentage spécifié d'actions de maintenance est supposé terminé.

M_{\max} est généralement lié à la distribution log-normale et le point 90th ou 95th percentile est généralement pris comme valeur spécifiée.

$$M_{\max} = \text{antilog}(\overline{\log Mct} + Z\sigma_{\log Mct_i})$$
$$\sigma_{\log Mct_i} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\log Mct_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^n \log Mct_i\right)^2 / n}{n-1}}$$

Z: la valeur correspondante à la valeur spécifiée 90% ou 95%)

Exemple

55	28	125	47	58	53	36	88
51	110	40	75	64	115	48	52
60	72	87	105	55	82	66	65

En choisissant un point spécifié de 95%, calculer M_{\max}
Pour 95%, $Z=-1.65$

$$M_{\max} = \text{antilog}(\overline{\log Mct}) + 1.65\sigma_{\log Mct_i}$$

$$\sigma_{\log Mct_i} = \sqrt{\frac{78.785 - (43.315)^2 / 24}{24 - 1}} = 0.163$$

$$M_{\max} = \text{antilog}[\overline{\log Mct} + (1.65)(0.163)]$$

$$M_{\max} = \text{antilog}(1.805 + 0.269) = 119 \text{ mn}$$

Facteurs de la période de non fonctionnement (suite)

7. Temps de retard de logistiques (LDT: logistics delay time)

C'est le temps de non fonctionnement de maintenance du à l'attente de la pièce de rechange d'être disponible, l'attente de disponibilité d'un équipement de maintenance, l'attente du au transport, attente d'utiliser un local de maintenance...

LDT n'inclut pas le temps de maintenance active (corrective ou préventive) mais c'est un élément important dans le calcul du temps total de non fonctionnement de maintenance (MDT).

8. Temps de retard administratif (ADT: administrative delay time)

C'est le temps de non fonctionnement de maintenance du à une raison administrative (grève, contrainte organisationnelle...)

ADT n'inclut pas le temps de maintenance active (corrective ou préventive) mais c'est un élément important dans le calcul du temps total de non fonctionnement de maintenance (MDT).

Facteurs de la période de non fonctionnement (suite)

9. Temps de non fonctionnement du à la maintenance (MDT: Maintenance downtime)

C'est le temps total (qd le système est inopérational) exigé pour réparer ou restaurer un système à un statut de fonctionnement total.

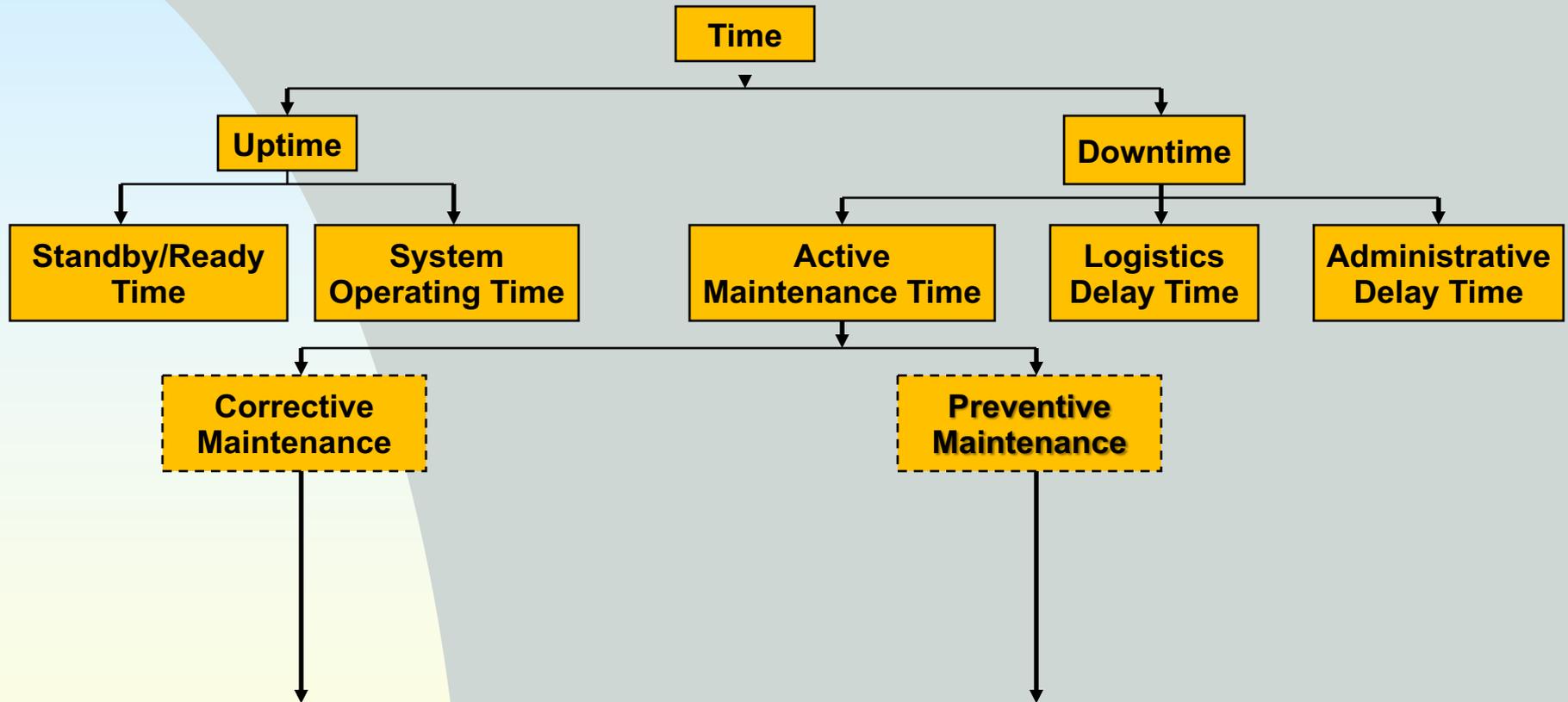
MDT inclut :

\bar{M} : temps moyen de maintenance active

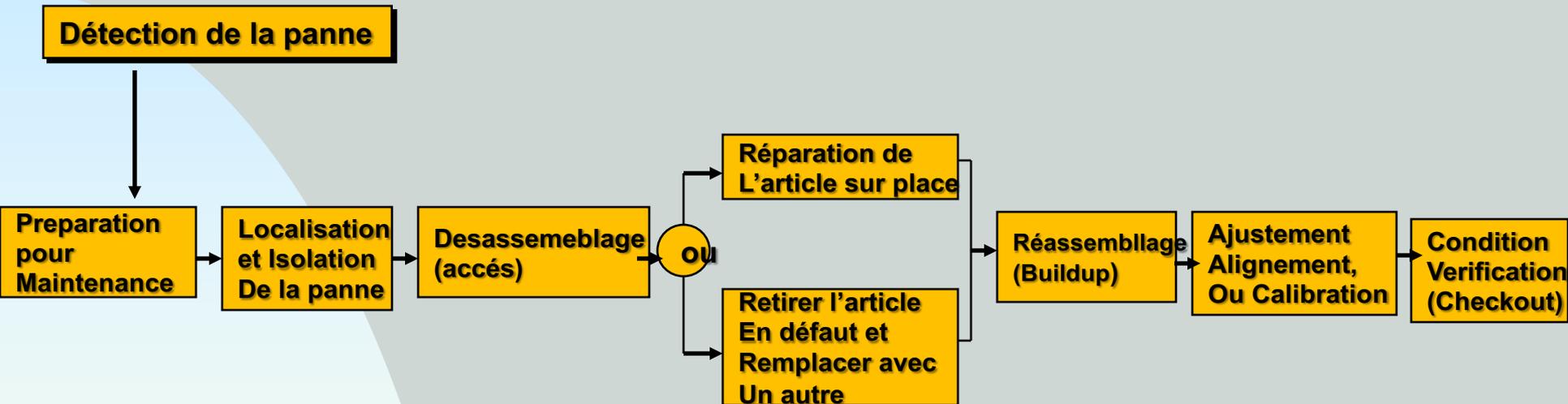
LDT: temps de retard des logistiques

ADT: temps de retard administratif.

En résumé, pour ces facteurs



Cycle de maintenance corrective



Cycle de maintenance préventive



4.2 Facteurs liés aux heures de travail

L'objectif de la maintenance est d'obtenir un équilibre entre le temps écoulé, le temps de travail et le niveau du personnel à un cout minimal de maintenance.

En maintenance, les facteurs Mct et MDT sont insuffisants, il faut aussi considérer les facteurs liés aux heures de travail, comme:

- Heures de travail maintenance par heure de fonctionnement du système (MLH/OH : Maintenance labor-hours per system operating hour)
- Heures de travail maintenance par cycle opérationnel du système (MLH/cycle : Maintenance labor-hours per cycle of system operation)
- Heures de travail maintenance par mois (MLH/mois : Maintenance labor-hours per month)
- Heures de travail maintenance par action de maintenance (MLH/MA : Maintenance labor-hours per maintenance action)

Facteurs liés aux heures de travail (suite)

Chacune de ces valeurs peuvent être exprimées en valeur moyenne.

Exemple.

$$\overline{\text{MLH}}_c = \frac{(\sum \lambda_i)(\text{MLH}_i)}{\sum \lambda_i}$$

Où λ_i : Taux de panne de l'élément « i » (pannes/heure)

MLH_i : Heures de travail de maintenance moyen nécessaire pour finir la réparation de l'élément « i ».

4.3 Facteurs liés à la fréquence de maintenance

La fiabilité et la maintenabilité sont très liées.

Les facteurs de fiabilité, MTBF et « λ » sont des éléments importants pour déterminer le fréquence de la maintenance corrective.

Aussi, beaucoup de maintenance préventive peut entrainer la dégradation de la fiabilité du système.

L'objectif est de définir un équilibre entre la maintenance corrective et la maintenance préventive à un cout très réduit.

Facteurs liés à la fréquence de maintenance (suite)

1. Temps moyen entre maintenance (MTBM)

C'est le temps moyen de toutes les actions de maintenance (corrective et préventive)

$$\text{MTBM} = \frac{1}{1/\text{MTBM}_u + 1/\text{MTBM}_s}$$

Où MTBM_u est l'intervalle moyen de la maintenance non programmée (corrective) et MTBM_s est celle de la maintenance programmée (préventive).

Le facteur MTBM est utilisé pour la détermination de la disponibilité (voir chapitre de la fiabilité)

Facteurs liés à la fréquence de maintenance (suite)

2. Temps moyen entre remplacement (MTBR)

Un facteur de MTBM, C'est le temps moyen entre remplacement de l'article. Il permet de déterminer les exigences la pièce de rechange.

MTBR est applicable pour les deux types de maintenance (corrective et préventive).

Un objectif de la maintenance est de maximiser MTBR (ou bien minimiser le nombre de remplacements des composantes).

4.4 Facteurs liés au cout de la maintenance

Une partie importante du cout total du cycle de vie d'un système.

Cout est très influencé par les décisions de design prises tôt.

On parle alors d'économie dans la performance des actions de maintenance.

En considérant le cout de maintenance, on s'intéresse alors:

1. Cout par action de maintenance (DA/action)
2. Cout de maintenance par heure de fonctionnement du système (DA/OH)
3. Cout de la maintenance par mois (DA/Mois)
4. Cout de maintenance par mission (ou partie de mission)
DA/mission
5. Le rapport du cout de la maintenance sur le cout total du cycle de vie.

(Plus de détails au chapitre 7)

4.5 Facteurs de maintenance liés aux éléments de support

D'autres facteurs (de type logistiques) peuvent influencer hautement sur la maintenabilité,

- 1. Réponse à une demande, probabilité d'avoir la pièce de rechange disponible lorsqu'on aura besoin, taux de demande des pièces de rechange, temps d'approvisionnement pour un article donné, niveau d'inventaire...**
- 2. Efficacité de l'équipement de support et de test (fiabilité et disponibilité de l'équipement de test), utilisation de l'équipement de test...**
- 3. Disponibilité et utilisation de l'espace de maintenance.**
- 4. Modes de transport, temps entre endroits de maintenance et fréquence.**
- 5. Efficacité de l'organisation de la maintenance et du personnel**
- 6. Capacité, temps et fréquence de traitement de l'information et des données.**

Facteurs de maintenance liés aux éléments de support

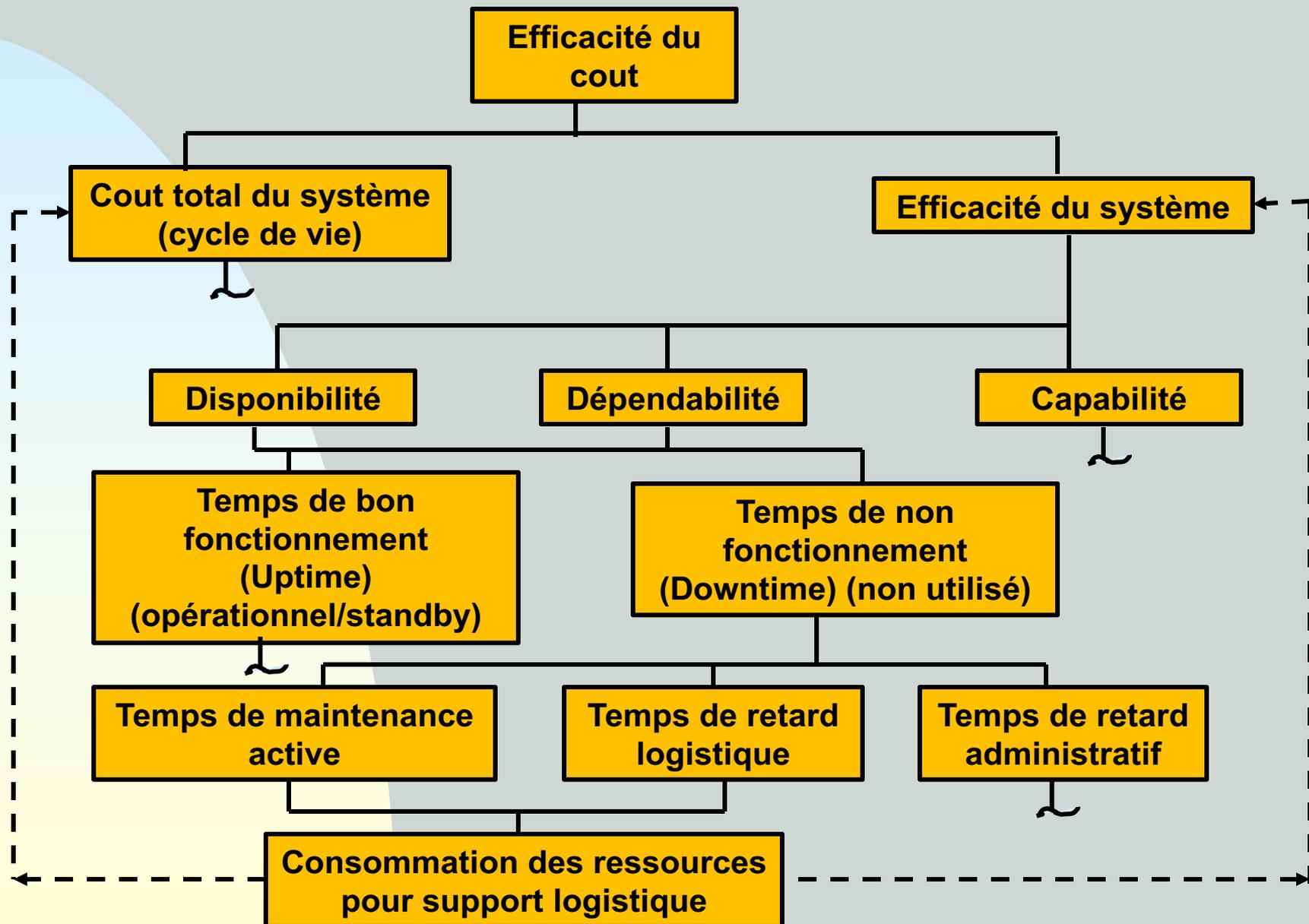
D'autres facteurs doivent être pris en compte. Exemples:

- 1. Exiger 15 mn pour le Mct (temps de maintenance corrective) pour un élément principal est insuffisant si la probabilité d'avoir la pièce de rechange disponible lorsqu'on la demande (temps de retard logistique important)**
- 2. Spécifier des exigences d'heures de travail de maintenance est inapproprié si une organisation de la maintenance n'existe pas.**
- 3. Spécifier des exigences de temps de test du système est inapproprié si la fiabilité prédite de l'équipement de test est plus petite que la fiabilité de l'article à tester.**
- 4. ...**

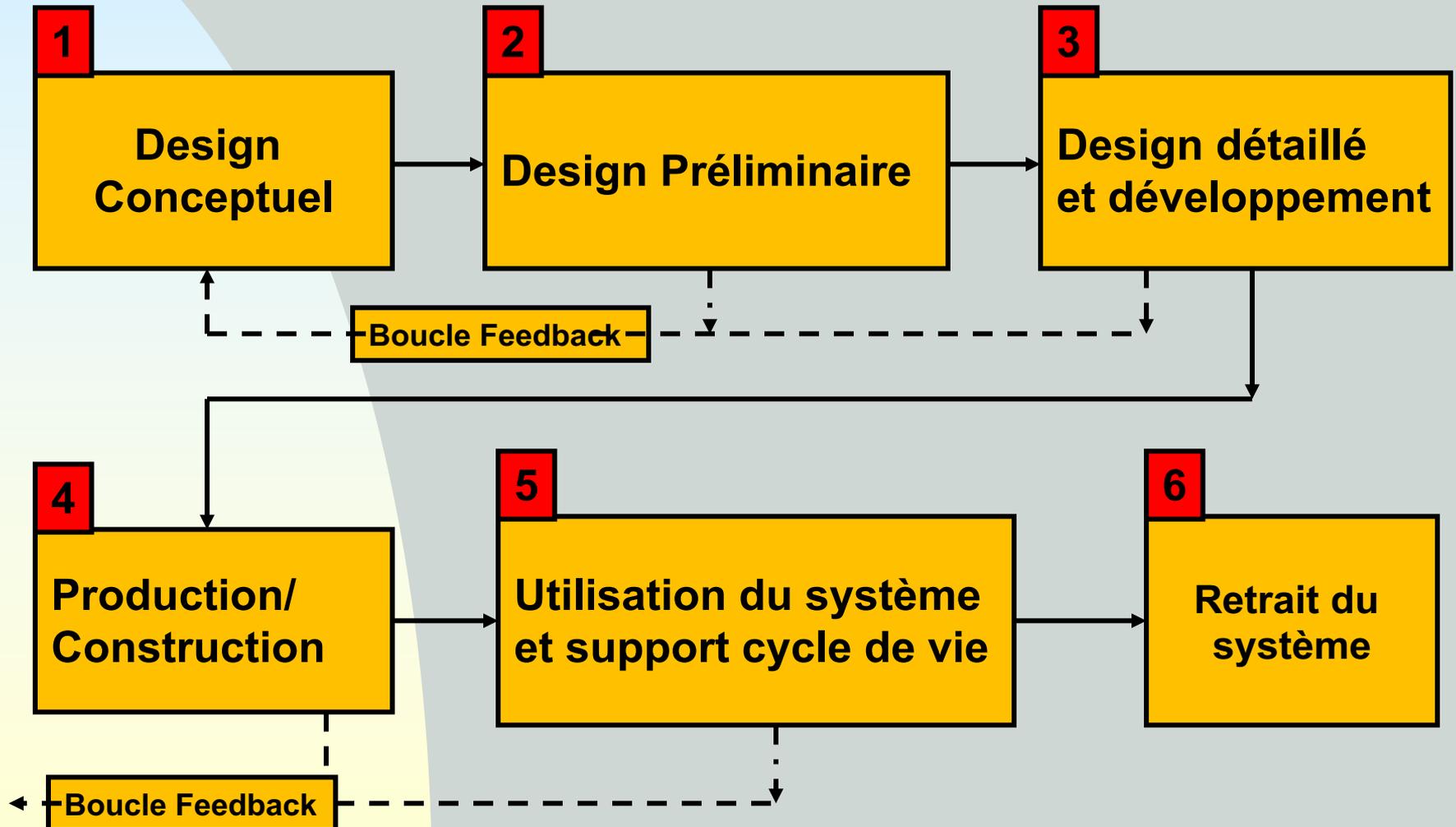
On doit tenir compte dans le design de l'interaction entre la maintenabilité et les éléments de support (fig d'après).



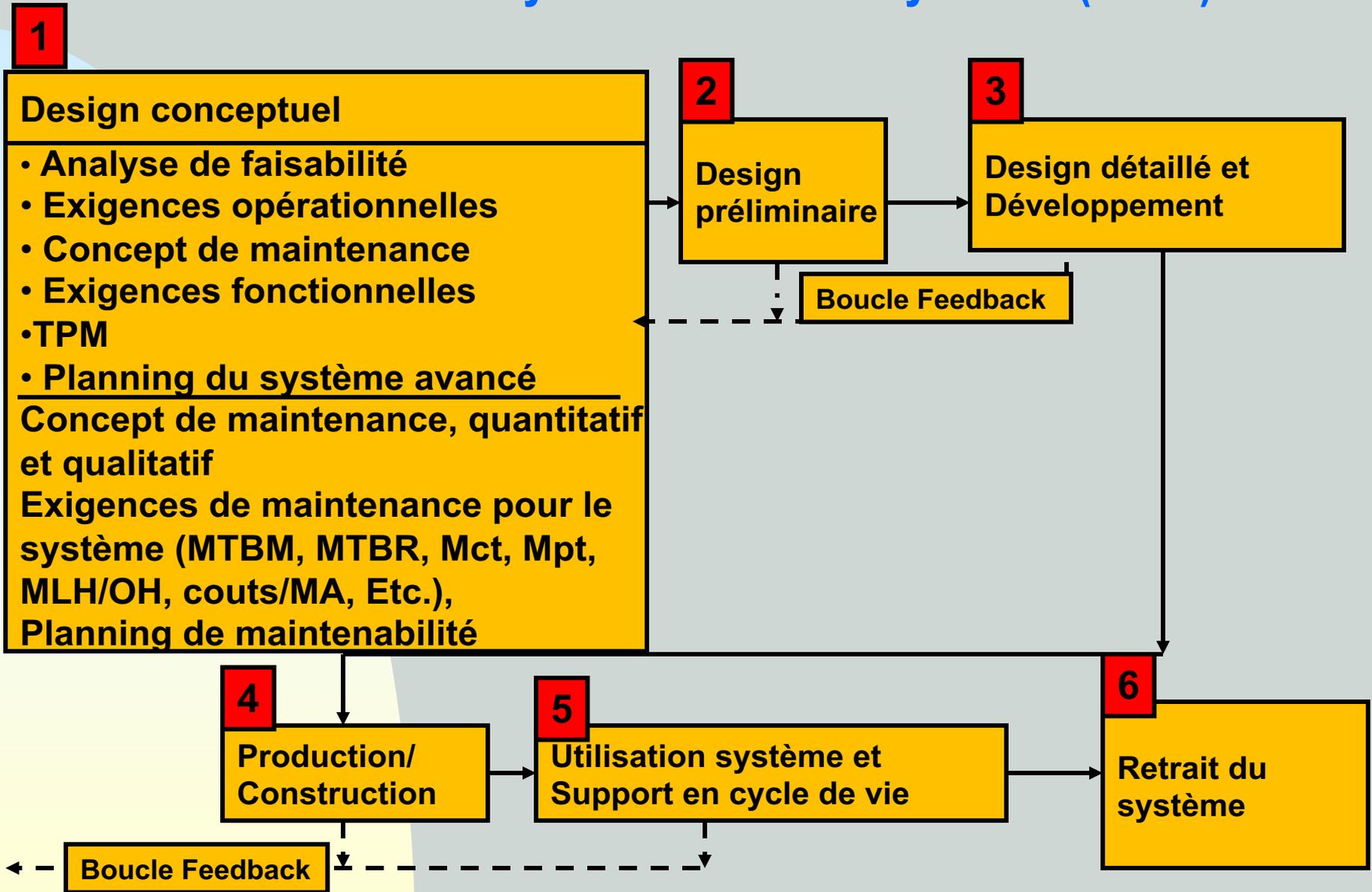
Relation entre temps de non fonctionnement de maintenance et les facteurs logistiques



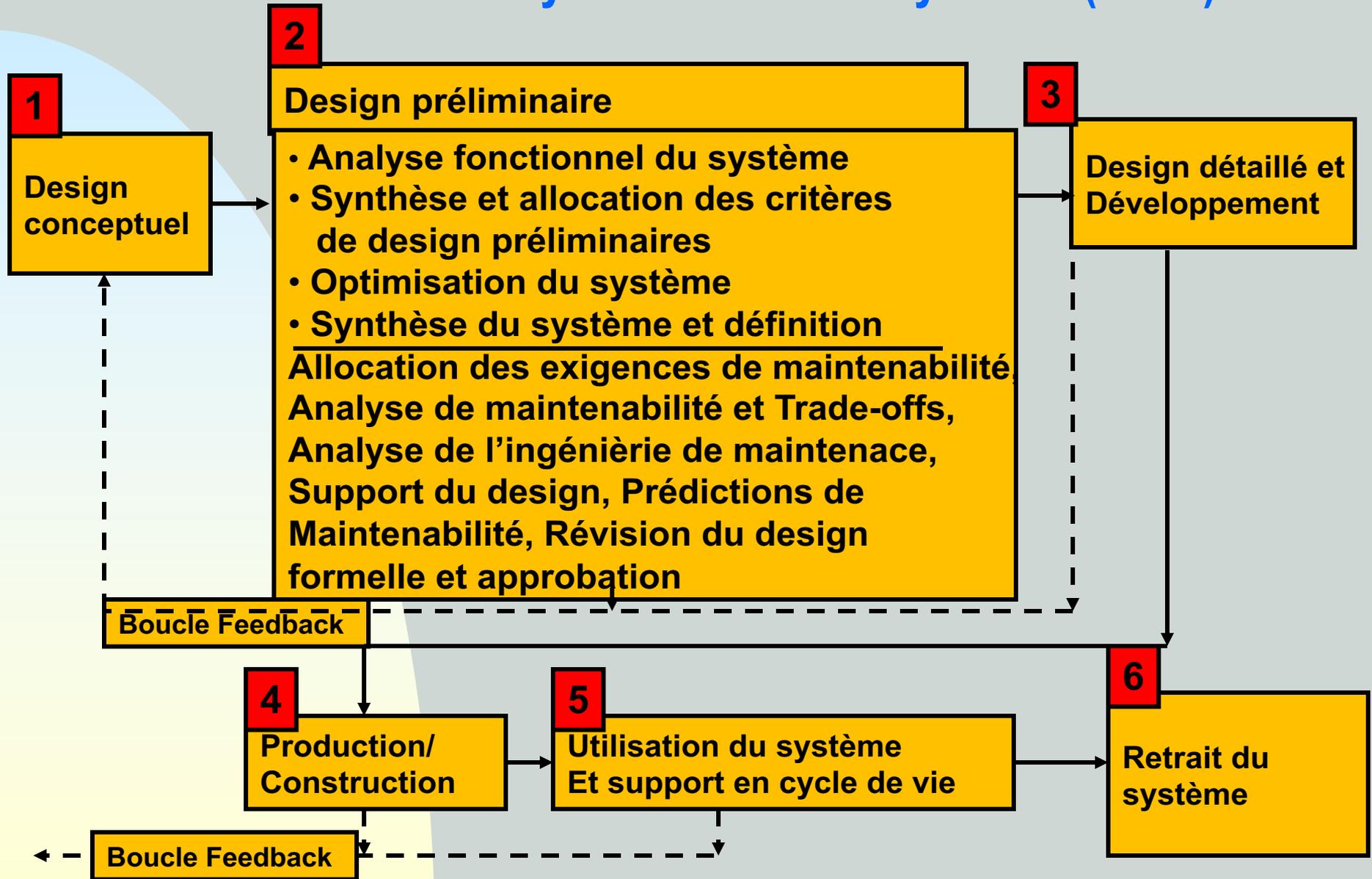
5. Maintenabilité dans le cycle de vie d'un système



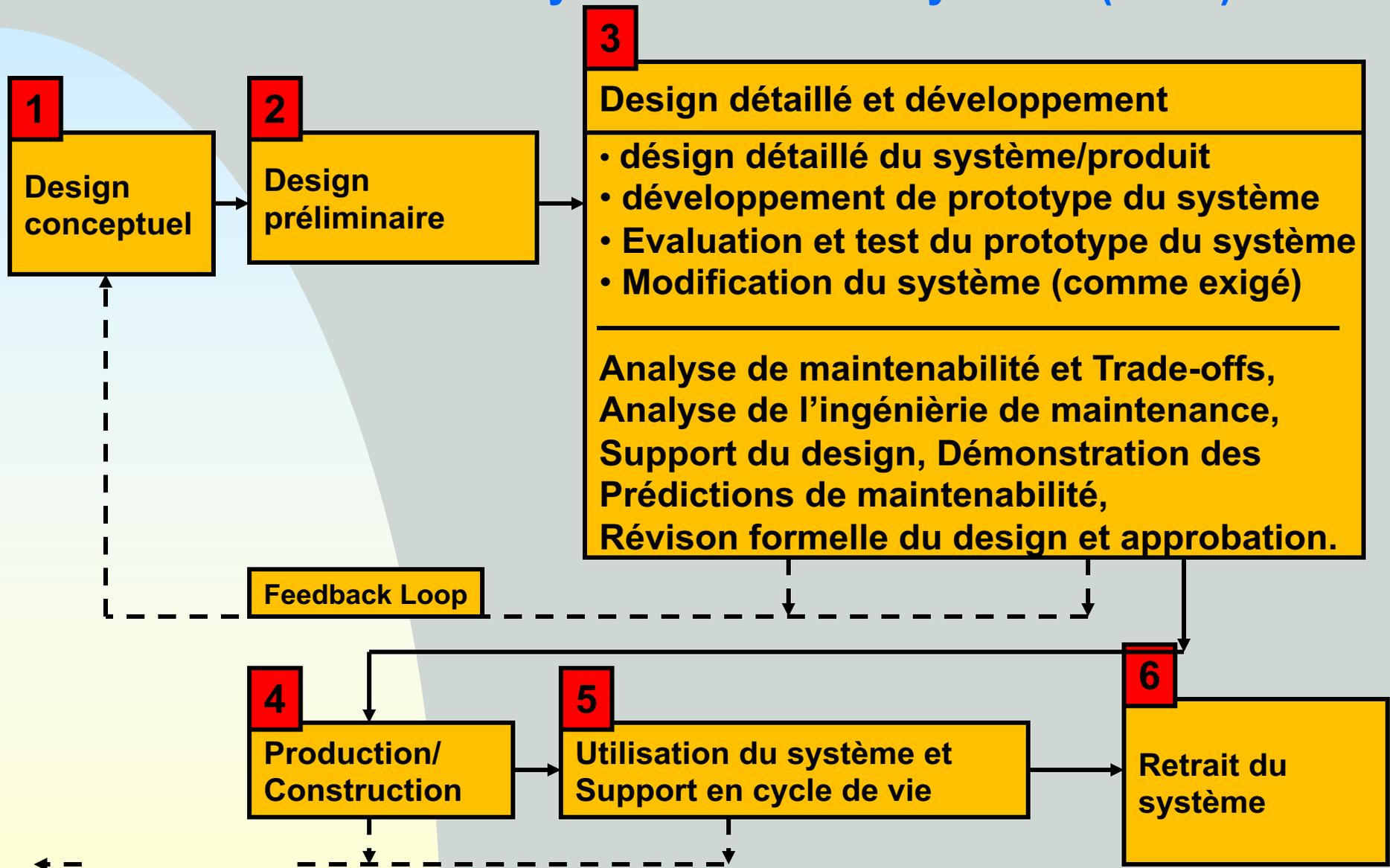
Maintenabilité dans le cycle de vie d'un système (suite)



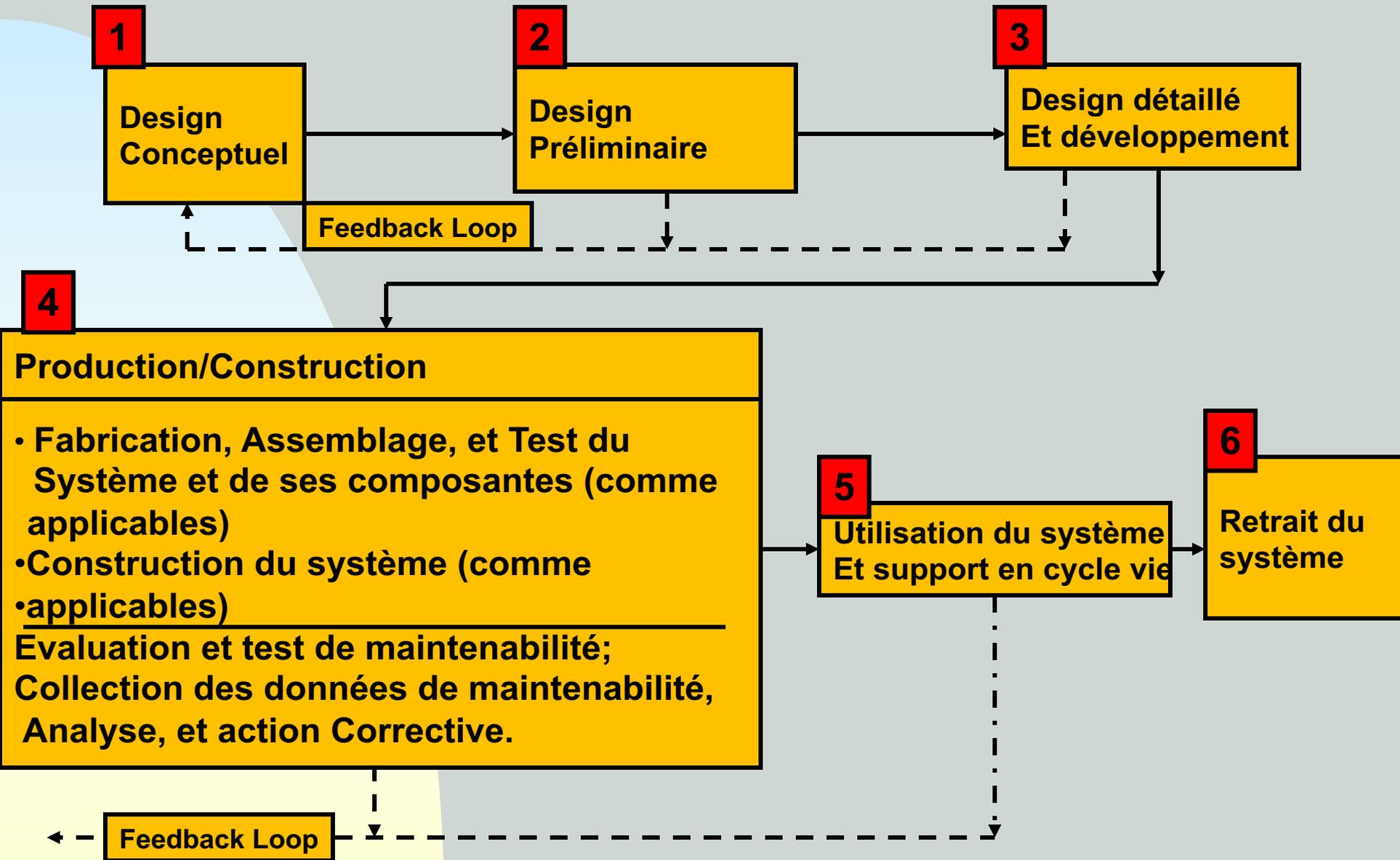
Maintenabilité dans le cycle de vie d'un système (suite)



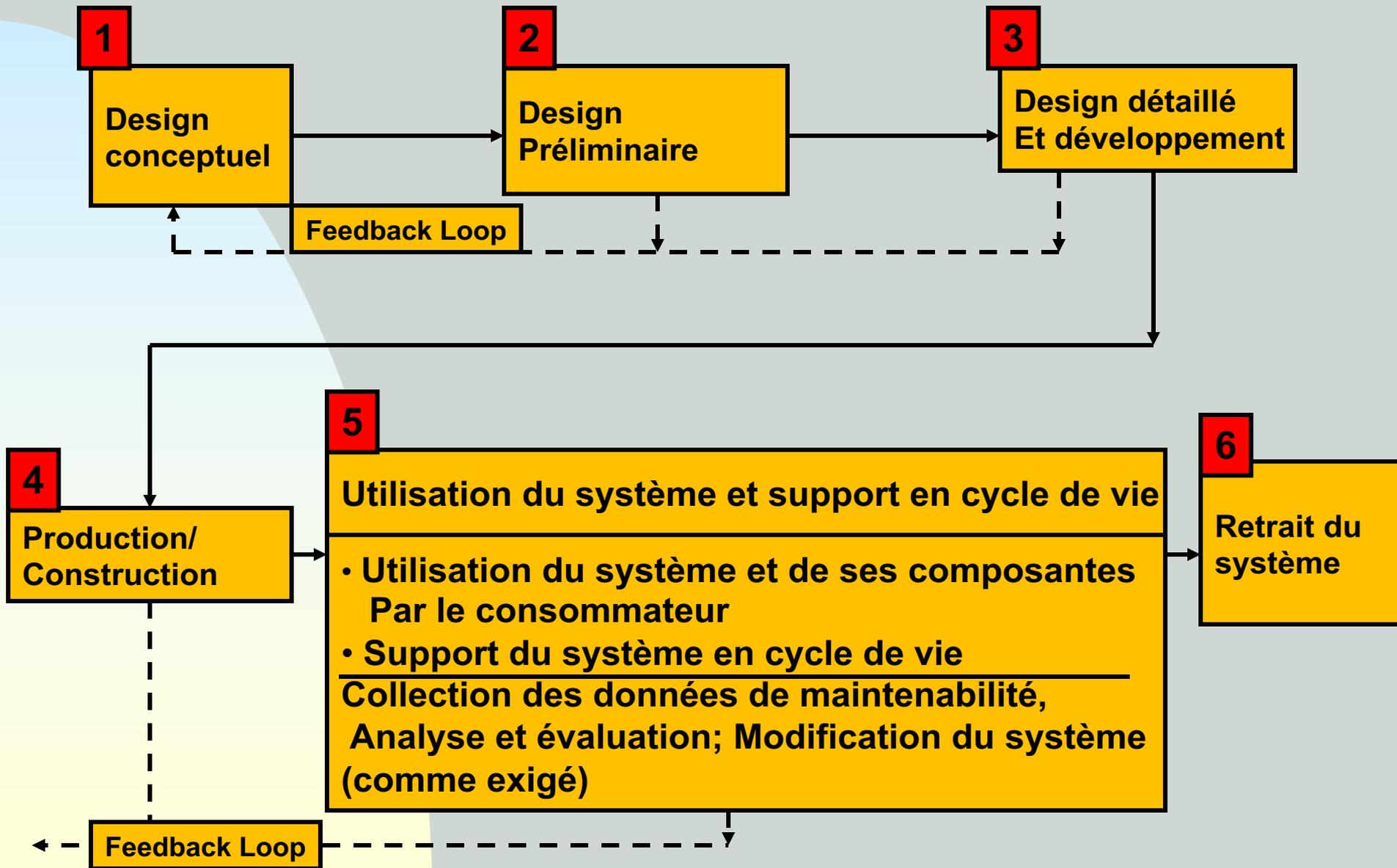
Maintenabilité dans le cycle de vie d'un système (suite)



Maintenabilité dans le cycle de vie d'un système (suite)



Maintenabilité dans le cycle de vie d'un système (suite)



Maintenabilité dans le cycle de vie d'un système (suite)

5.1. Exigences du système

L'efficacité d'un système pour accomplir certaines fonctions exigées dépend de la performance, de la maintenabilité et d'autres facteurs.

Les exigences de la maintenabilité, spécifiées quantitativement et qualitativement, sont définies comme partie de toutes les exigences opérationnelles du système et le concept de maintenance. On peut s'intéresser de près à:

- 1. Définition des facteurs de performance du système, le profil de la mission, exigences de l'utilisation du système (conditions d'utilisation, cycles de fonction, et comment le système sera manipulé).**
- 2. Définition du cycle de vie opérationnel (le temps anticipé où le système sera en inventaire et en utilisation opérationnelle).**
- 3. Définition du concept de base de support et de maintenance du système (niveaux anticipés de maintenance, responsabilités de maintenance, fonctions majeurs à chaque niveau, et les éléments principaux de support logistique à chaque niveau-type de pièces de rechange, équipement de test, compétence du personnel, ...)**

Maintenabilité dans le cycle de vie d'un système (suite)

5.1. Exigences du système (suite)

4. Définition de l'environnement dans lequel le système est supposé fonctionner et maintenu (température, humidité, vibration...). Doit être considérés en mode transport, manutention ou bien en stockage.

5.2. Allocation de la maintenabilité

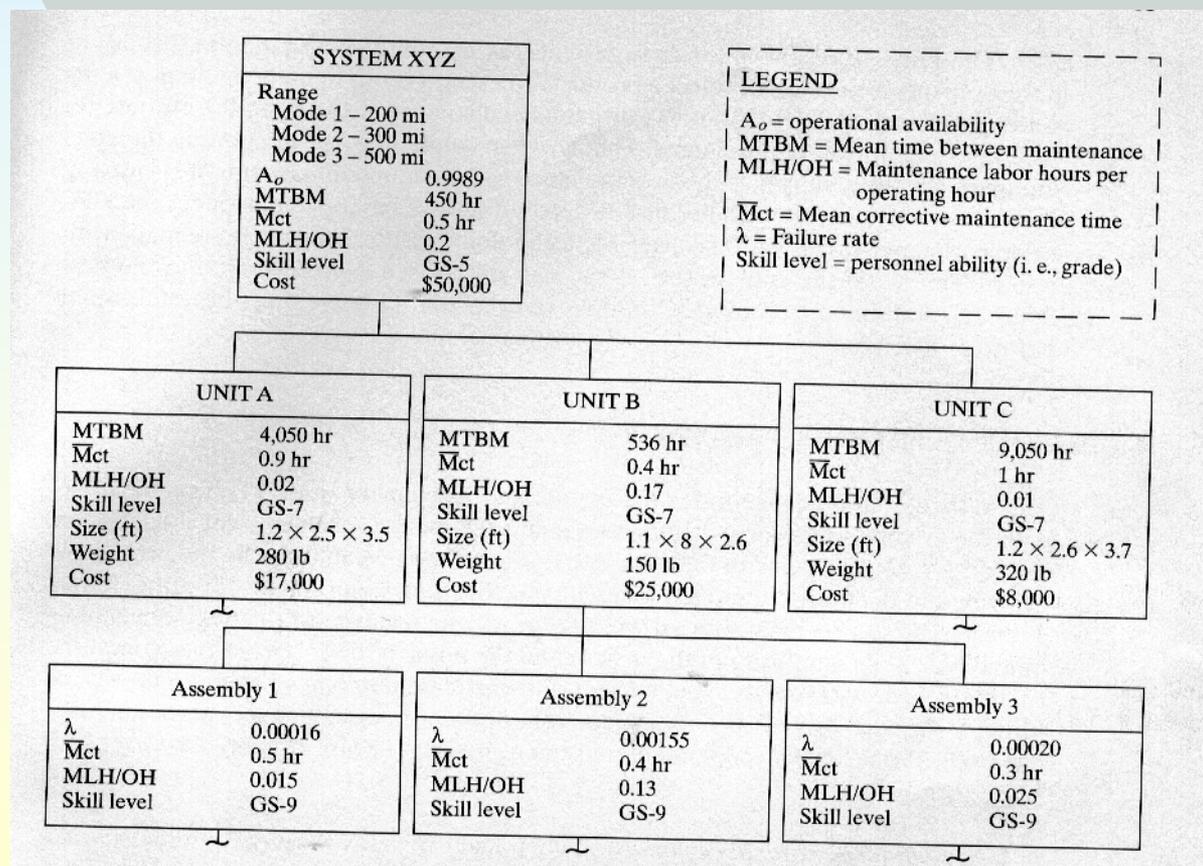
Après l'établissement des exigences du système, il faut les transformer en critère de design au bas niveau à travers l'allocation de maintenabilité.

Exemple:

Maintenabilité dans le cycle de vie d'un système (suite)

Exemple d'allocation de la maintenabilité

Considérons, l'exemple du système XYZ suivant. Ce système doit satisfaire une exigence de disponibilité inhérente de 0.9989, un MTBF de 450 heures et un MLH/OH (pour maintenance corrective) de 0.2 et un besoin existe pour allouer $\bar{M}ct$ et MLH/OH au niveau de l'assemblage.



Maintenabilité dans le cycle de vie d'un système (suite)

Exemple d'allocation de la maintenabilité

Disponibilité inhérente $A_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$

Ici, $MTTR = M_{ct}$, d'où

$$\overline{M}_{ct} = \frac{MTBF(1 - A_i)}{A_i} = \frac{450(1 - 0.9989)}{0.9989} = 0.5 \text{ Heures}$$

Ainsi, les exigences du système $M_{ct}=0.5$ heure, qui doivent être allouées aux unités A, B et C et les assemblages au niveau de ces unités. (tableau suivant)

Maintenabilité dans le cycle de vie d'un système (suite)

Exemple d'allocation de la maintenabilité

1	2	3	4	5	6	7
Article	Quantité d'article pour le système (Q)	Taux de panne (λ)x1000 heures	Contribution de toutes les pannes $C_f = (Q)(\lambda)$	Contribution en % $C_p = C_f / \sum C_f \times 100$	Temps moyen de maintenance corrective Mct(H)	Contribution du temps total de maintenance corrective $C_t = (C_f)(Mct)$
1. Unité A	1	0.246	0.246	11%	0.9	0.221
2. Unité B	1	1.866	1.866	84%	0.4	0.746
3. Unité C	1	0.110	0.110	5%	1.0	0.110
Total			$\sum C_f = 2.222$	100%		$\sum C_t = 1.077$

Mct pour le système XYZ = $\sum C_t / \sum C_f = 1.077 / 2.222 = 0.485$ h (exigé 0.5 h)

Ainsi, Mct calculé pour le système respecte les exigences de 0.5 heures. Les valeurs de Mct pour les unités donne un critère de design (DDP: design dependant parameter).

Une fois alloué à l'échelle de l'unité, on peut descendre de la même manière à l'échelle de l'assemblage (mêmes équations) (exemple)

Maintenabilité dans le cycle de vie d'un système (suite)

Exemple d'allocation de la maintenabilité

Pour l'unité B, $Mct=0.4$, on va l'allouer aux assemblages 1, 2 et 3.

1	2	3	4	5	6	7
Article	Quantité d'article pour le système (Q)	Taux de panne (λ)x1000 heures	Contribution de toutes les pannes $Cf = (Q)(\lambda)$	Contribution en % $Cp=Cf/\sum Cfx100$	Temps moyen de maintenance corrective Mct(H)	Contribution du temps total de maintenance corrective $Ct=(Cf)(Mct)$
Assemblage 1	1	0.116	0.116	6%	0.5	0.058
Assemblage 2	1	1.550	1.550	83%	0.4	0.620
Assemblage 3	1	0.200	0.200	11%	0.3	0.060
Total			$\sum Cf=1.866$	100%		$\sum Ct=0.738$

Mct pour l'unité B = $\sum Ct/\sum Cf = 0.738/1.866 = 0.395$ h (exigé 0.4 h)

Dire que Mct est respectée peut dire qu'il ya augmentation des niveaux de compétence du personnel accomplissant les actions de maintenance, augmentation du personnel pour certaines fonctions de maintenance, ou bien utilisation de l'automatique pour des opérations manuelles.

Maintenabilité dans le cycle de vie d'un système (suite)

- ❑ **Dire que Mct est respectée peut dire qu'il ya augmentation des niveaux de compétence du personnel accomplissant les actions de maintenance, augmentation du personnel pour certaines fonctions de maintenance, ou bien utilisation de l'automatique pour des opérations manuelles.**
- ❑ **Mais, ça s'accompagne par une augmentation des couts.**
- ❑ **Il faut donc considérer des contraintes additionnelles comme le niveau de compétence du personnel à chaque niveau de maintenance et les heures de travail de maintenance par heure de fonctionnement (MLH/OH) pour les articles significatifs.**

Maintenabilité dans le cycle de vie d'un système (suite)

5.3. Sélection de la composante et application

Les caractéristiques de maintenabilité sont choisies pour le design non seulement sur le design des composantes individuelles mais aussi sur la façon de leur assemblage ou leur position dans la structure du système.

Les objectifs sont:

- 1. La sélection de composantes et de matériaux standards. Le but est de minimiser le nombre et les types (différents) de composantes, réduire la quantité et la variété des exigences des pièces de rechange (et l'inventaire associé) tout en assurant des sources d'approvisionnement le long du cycle de vie du système.**
- 2. Pour les articles réparables, sélectionner ceux ayant des caractéristiques de self-test (built-in) et le niveau et la profondeur des diagnostics qui facilitent la terminaison du cycle de maintenance en un temps minimal et avec un haut degré de confiance. (Plus de temps à perdre pour localiser et diagnostiquer surtout pour les équipements électroniques).**

Maintenabilité dans le cycle de vie d'un système (suite)

Sélection de la composante et application (suite)

3. Sélectionner l'article qui peut être réparé et testé en utilisant des équipements standards dans des espaces disponibles et sans avoir recours à un personnel hautement qualifié.
4. S'assurer de la facilité d'accessibilité qui permet d'identifier rapidement l'article à enlever, permet l'enlèvement et le remplacement rapides de l'article à défaut . Généralement, l'article qui nécessite le plus de maintenance est l'article le plus accessible (composantes critiques ou bien à haut taux de panne).
5. Opter pour l'approche de packaging fonctionnel modulable, où dans le cas d'une panne, l'article en panne sera rapidement enlevé et remplacé sans toucher aux autres composantes. L'interdépendance entre articles doit être minimisée.
6. Eviter la sélection de composantes à très courte vie et l'exigence pour la maintenance préventive.
7. Incorporer la quantité d'étiquetage et d'identification des composantes en articles réparables pour aider le technicien intervenant.

D'autres points peuvent être ajoutés. **L'essentielle de l'objectif est de minimiser les fréquences de maintenance, les temps et les ressources à utiliser en maintenance.**

6. Méthodes d'analyse de Maintenabilité

Plusieurs outils pour déterminer la maintenabilité: **Trade-off entre la fiabilité et la maintenabilité**, maintenance centrée-fiabilité (RCM: reliability-centered maintenance, analyse de la Réparation vs abandon (ou bien analyse du niveau de réparation), prédiction de la maintenabilité, analyse de la tâche de maintenance...

6.1 Evaluation du trade-off maintenabilité-fiabilité

Exemple:

Supposons qu'on va remplacer un article existant avec un nouveau pour améliorer l'efficacité.

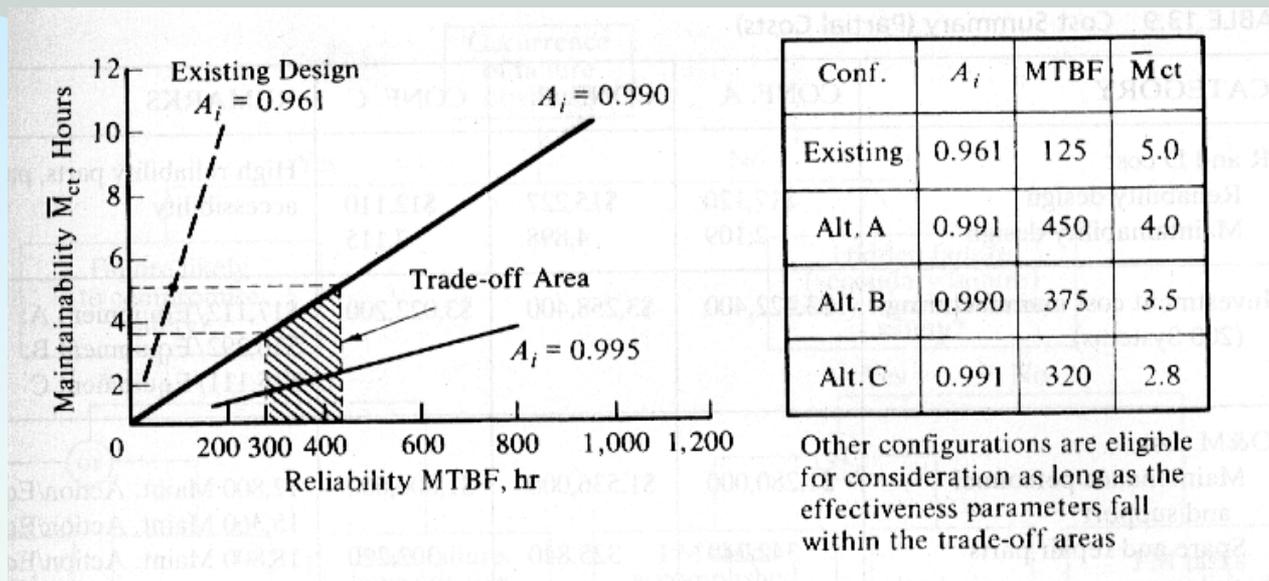
Ancien: disponibilité=0.961, MTBF=125 h, Mct=5 h

Nouveau: Fonctionne 8 h/jour, 360j/an pour 10 ans.

Nouveau: disponibilité=0.990, MTBF>300h et Mct<5 h.

200 articles à commander.

03 différentes configurations de design d'alternatives sont considérées pour satisfaire les exigences et chaque configuration est une modification de l'existant.



$$\bar{M}_{ct} = \frac{MTBF(1 - A_i)}{A_i}$$

On fixe A_i et on trace la droite $M_{ct} = f(MTBF)$.

La zone de trade off est la zone hachurée.

L'article existant ne vérifie pas les exigences, les 03 autres vérifient l'exigence de disponibilité avec A plus grande MTBF estimé et C les meilleures caractéristiques de maintenabilité avec une valeur de M_{ct} petite.

La question comment choisir la meilleure alternative?

Pour choisir, on ajoute le critère du cout.

Il ya des couts de recherche et développement (R&D), cous d'investissement et de fabrication et les couts de maintenance et de fonctionnement (O&M).

Améliorer les caractéristiques de fiabilité ou de maintenabilité c'est augmenter les couts de (R&D) et de l'investissement et réduire les couts (O&M) en particulier les couts du personnel de maintenance et support.

Exemple de couts:

CATEGORY	CONF. A	CONF. B	CONF. C	REMARKS
R and D cost				
Reliability design	\$17,120	\$15,227	\$12,110	High reliability parts, packaging, accessibility
Maintainability design	2,109	4,898	7,115	
Investment cost manufacturing (200 Systems)	\$3,422,400	\$3,258,400	\$3,022,200	\$17,112/Equipment A; \$16,292/Equipment B; \$15,111/Equipment C
O&M cost				
Maintenance personnel and support	\$1,280,000	\$1,536,000	\$1,800,000	12,800 Maint. Action/Equipment A; 15,360 Maint. Action/Equipment B; 18,800 Maint. Action/Equipment C; 10% of manufacturing cost for spares
Spare and repair parts	342,240	325,840	302,220	
Total	\$5,063,869	\$5,140,365	\$5,143,645	

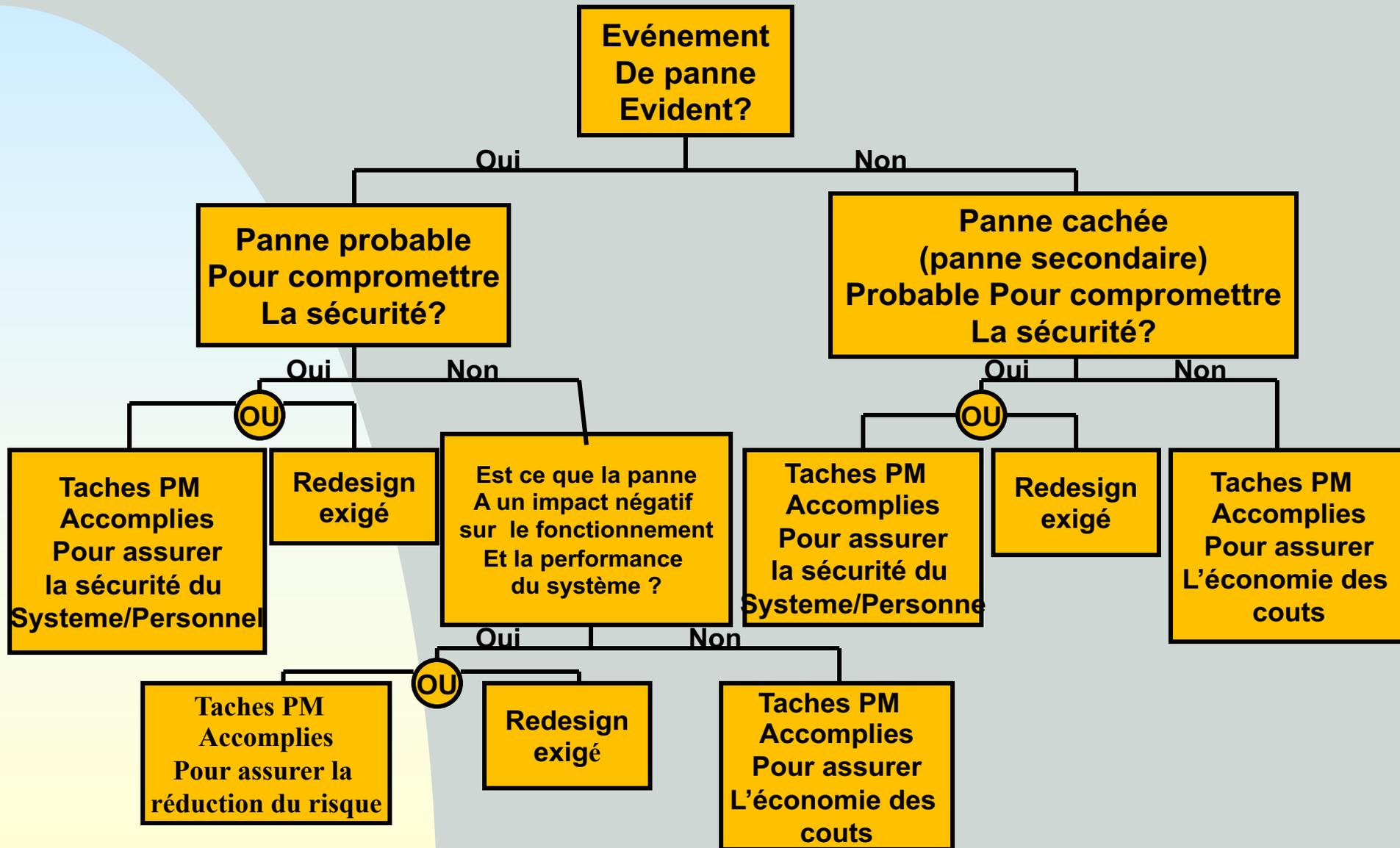
A partir de ces résultats on peut voir que la **configuration**

A satisfait les exigences de disponibilité, fiabilité et maintenabilité avec un cout minimal.

6.2 Maintenance centrée-fiabilité (RCM: reliability-centered maintenance)

- Approche systématique pour développer un programme de maintenance préventive effectif et un plan de control d'un système/produit.
- Techniques meilleures dès le début du design
- Développée en 1960 à travers les efforts de l'industrie de l'aviation commerciale.
- Utilisant un arbre de décision bien structurée qui permet à l'analyste pour décrire les taches de maintenance préventive les plus appliquées (leurs natures et fréquences). (voir figure)

Méthodes d'analyse de Maintenabilité (Suite) Maintenance centrée-fiabilité (RCM)



6.3 Réparer Vs Abandonner

- ❑ Economiquement, il faut savoir s'il faut réparer un élément défectueux ou l'abandonner.
- ❑ S'il faut réparer il faut déterminer le niveau de maintenance où la réparation doit se faire (i.e. maintenance intermédiaire ou maintenance dépôt).
- ❑ Le niveau de maintenance peut être défini selon plusieurs critères, le plus courant est le critère du cout total du cycle de vie.

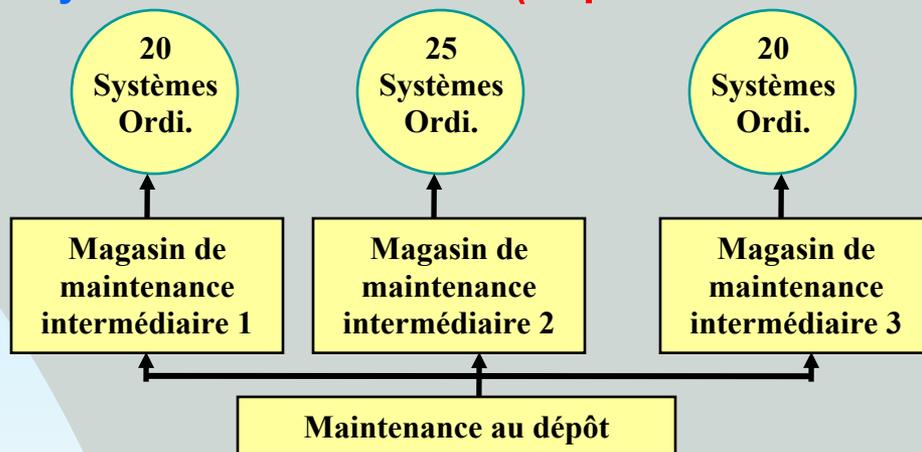
Exemple: Réparer ou abandonner

Méthodes d'analyse de Maintenabilité (Réparer ou abandonner) (Suite)

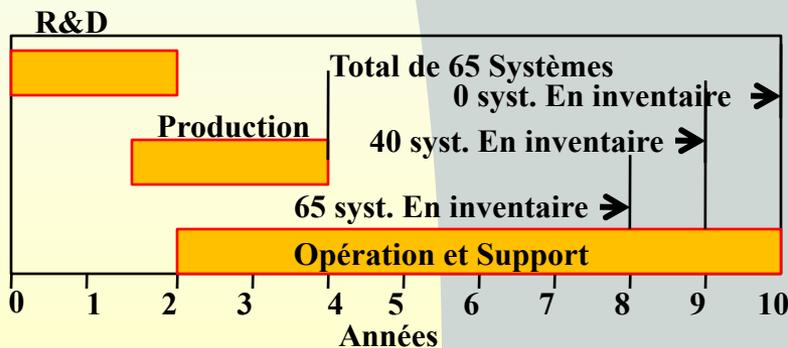
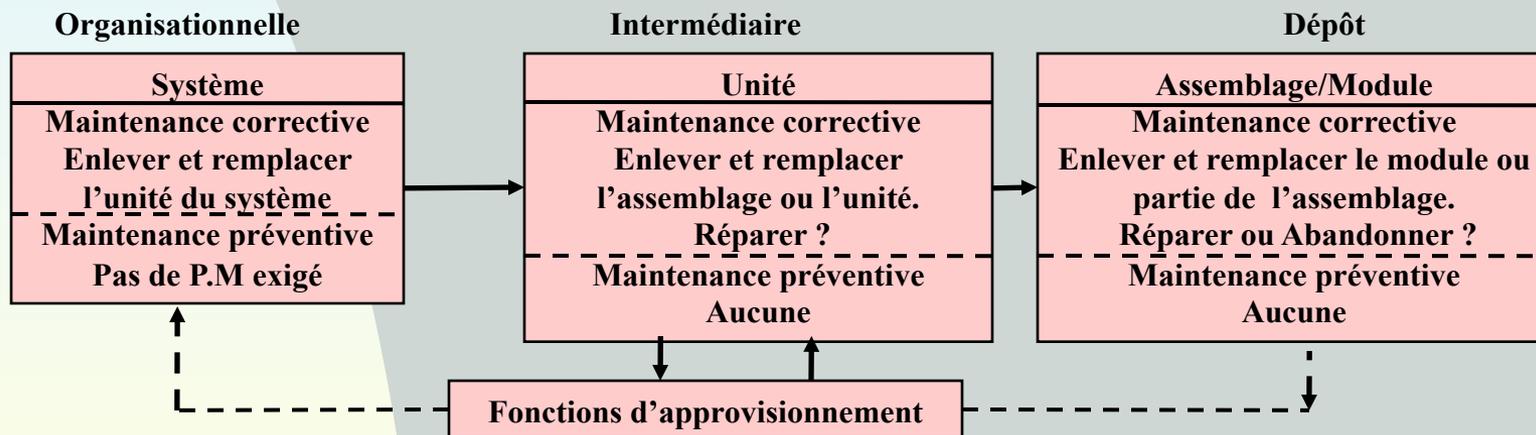
- ❑ On veut distribuer 65 systèmes ordinateurs à travers 03 régions importantes.
- ❑ Le système sera utilisé en moyenne 4 h / jour (360 jours/an)
- ❑ Actuellement le système est en phase de développement, il sera en production dans 18 mois et sera opérationnel dans 02 ans.
- ❑ Les 65 systèmes sont supposés être en utilisation dans 04 ans et seront disponibles le long des 08 années du programme avant le début de la mise hors service du système. Le cycle de vie du système durera 10 années.
- ❑ Le système sera en kit avec une possibilité de self-test qui permet l'isolation des défauts à l'échelle de l'unité.
- ❑ Les unités en défauts seront retirées et remplacées au niveau organisationnel (chez le client) et puis seront envoyées à une boutique de maintenance intermédiaire pour réparation.
- ❑ La réparation sera accomplie à travers le remplacement d'assemblage et les assemblages peuvent être réparés ou abandonnés.
- ❑ Un total de 15 assemblages a été considéré et l'exigence est de justifier la décision de réparer ou abandonner l'assemblage en tenant compte d'un seul critère celui du cout de cycle de vie.

Voir figure pour les exigences opérationnelles, le concept de maintenance et le programme.

Méthodes d'analyse de Maintenabilité (Réparer ou abandonner) (Suite)



Distribution: 03 régions géographiques
Utilisation: 04h/jour (360j/an)



Chaque assemblage va être évalué en termes de

- 1. Réparation de l'assemblage à un niveau de maintenance intermédiaire.**
- 2. Réparation de l'assemblage en dépôt.**
- 3. Jeter l'assemblage.**

Ces évaluations seront faites à partir du cout de cycle de vie au niveau assemblage.

Pour cela il faut développer un CBS (Cost breakdown structure) et établir des critères d'évaluation qui seront axés sur les couts O&S (operation&support) comme fonction du cout d'acquisition.

(Voir figure suivante pour un seul assemblage, la généralisation pour les 15 reste la même)

Méthodes d'analyse de Maintenabilité (Réparer ou abandonner) (Suite)

<i>Evaluation Criteria</i>	<i>Repair at Intermediate Cost (\$)</i>	<i>Repair at Supplier Cost (\$)</i>	<i>Discard at Failure Cost (\$)</i>	<i>Description and Justification</i>
1. Estimated acquisition costs for assembly A-1 (to include R and D cost and production cost)	550/Assy. or 35,750	550/Assy. or 35,750	475/Assy. or 30,875	Acquisition cost includes all applicable costs allocated to assembly A-1 based on a requirement of 65 systems. Assembly design and production are simplified in the discard area.
2. Unscheduled maintenance costs	6,480	8,100	Not applicable	Based on the 8-year useful system life, 65 systems, a utilization of 4 hrs/day, a failure rate (λ) of 0.00045 for assembly A-1, and a \overline{Mct} of 2 hr, the expected number of maintenance actions is 270. When repair is accomplished, two technicians are required on a full-time basis. The labor rates are \$12/hr for intermediate maintenance and \$15/hr for supplier maintenance.
3. Supply support spare assemblies	3,300	4,950	128,250	For intermediate maintenance 6 spare assemblies are required to compensate for transportation time, the maintenance queue, TAT, etc. For supplier/depot maintenance 9 spare assemblies are required. 100% spares are required in the discard case.
4. Supply support spare modules or parts for assembly repair	6,750	6,750	Not applicable	Assume \$25 for materials per repair action.
5. Supply support inventory management	2,010	2,340	25,650	Assume 20% of the inventory value (spare assemblies, modules, and parts).
6. Test and support equipment	5,001	1,667	Not applicable	Special test equipment is required in the repair case. The acquisition and support cost is \$25,000 per installation. The allocation for assembly A-1 per installation is \$1,667. No special test equipment is required in the discard case.

4. Supply support spare modules or parts for assembly repair	6,750	6,750	Not applicable	Assume \$25 for materials per repair action.
5. Supply support inventory management	2,010	2,340	25,650	Assume 20% of the inventory value (spare assemblies, modules, and parts).
6. Test and support equipment	5,001	1,667	Not applicable	Special test equipment is required in the repair case. The acquisition and support cost is \$25,000 per installation. The allocation for assembly A-1 per installation is \$1,667. No special test equipment is required in the discard case.
7. Transportation and handling	Not applicable	2,975	Not applicable	Transportation costs at the intermediate level are negligible. For supplier maintenance, assume 340 one-way trips at \$175/100 lb. One assembly weighs 5 pounds.
8. Maintenance training	260	90	Not applicable	Delta training cost to cover maintenance of the assembly is based on the following: Intermediate - 26 students, 2 hrs each, \$200/student week. Supplier - 9 students, 2 hrs each, \$200/student week.
9. Maintenance facilities	594	810	Not applicable	From experience, a cost estimating relationship of \$0.55 per direct maintenance laborhour is assumed for the intermediate level, and \$0.75 is assumed for the supplier level.
10. Technical data	1,250	1,250	Not applicable	Assume 5 pages for diagrams and text covering assembly repair at \$250/page.
11. Disposal	270	270	2,700	Assume \$10/assembly and \$1/module or part as the cost of disposal
Total estimated cost	61,665	64,952	187,475	

Méthodes d'analyse de Maintenabilité (Réparer ou abandonner) (Suite)

En résumé (pour les 15 assemblages)

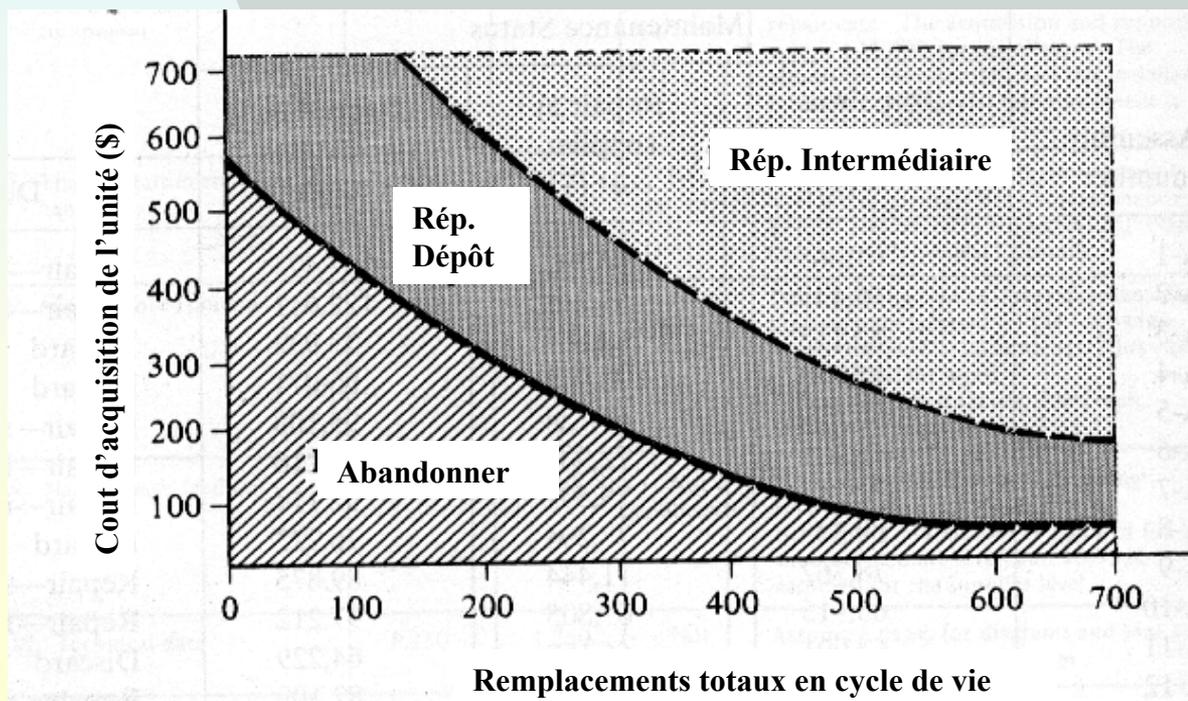
N° d'assemblage	Type maintenance			Décision
	Réparation à un endroit intermédiaire	Réparation en dépôt	Abandonner	
A-1	61665	64952	187475	Répar. Interm.
A-2	58149	51341	122611	Répar. Dépôt
A-3	85115	81544	73932	Abandonner
A-4	85778	78972	65071	Abandonner
A-5	66679	61724	95108	Répar. Dépôt
A-6	65101	72988	89216	Répar. Interm.
A-7	72223	75591	92114	Répar. Interm.
A-8	89348	78204	76222	Abandonner
A-9	78762	71444	89875	Répar. Dépôt
A-10	63915	67805	97212	Répar. Interm.
A-11	67001	66158	64229	Abandonner
A-12	69212	71575	82109	Répar. Interm.
A-13	77101	65555	83219	Répar. Dépôt
A-14	59299	62515	62005	Répar. Interm.
A-15	71919	65244	63050	Abandonner
Cout	1 071 267	1 037 362	1 343 449	Répar. Dépôt

Méthodes d'analyse de Maintenabilité (Réparer ou abandonner) (Suite)

Avant de prendre une dernière décision, il faut réévaluer chaque situation où on a des valeurs très proches de couts.

Les alternatives de réparation sont dépendantes du cout d'acquisition de l'unité de chaque assemblage et le nbr total estimé des remplacements le long du cycle de vie (i.e Actions de maintenance basées sur la fiabilité de l'assemblage).

La tendance est donnée en figure.



6.4 Prédiction de la maintenabilité

- ❑ Ça implique une évaluation très tôt des caractéristiques de la maintenabilité dans le design du système et est accomplie périodiquement à différentes étapes du procès de design.
- ❑ A travers la révision des données de design, MTBM, Mct, Mpt, MLH/OH...sont prédits et sont comparés avec les exigences spécifiées initialement dans le procès d'allocation de maintenabilité.
- ❑ Les prédictions se feront sur facteurs temps de maintenance, facteurs heures-travail, facteurs de fréquence de maintenance et facteurs de couts de maintenance.
- ❑ En plus des prédictions des temps et fréquences, la méthode évalue aussi qualitativement les caractéristiques de design pour la supportabilité.

a- Prédiction du Mct.

- ❑ **En utilisant breakdown de l'élément du système (exemple système XYZ avant) et en déterminant les tâches de maintenance et les temps associés en progressant d'un élément à un autre.**
- ❑ **Le breakdown comprend les sous systèmes, les unités, les assemblages, les sous assemblages et les parties.**
- ❑ **Les caractéristiques de maintenabilité, localisation, isolation, accessibilité, réparation et vérification (utilisées dans le design) sont évaluées et identifiées avec un des niveaux de l'analyse fonctionnelle puis on descend jusqu'au niveau de l'élément.**
- ❑ **Temps appliqués à chaque partie, sont combinés pour obtenir les acteurs du niveau supérieur (selon la hiérarchie fonctionnelle) (voir l'exemple ci après)**

Méthodes d'analyse de Maintenabilité **Prédiction de la maintenabilité (Suite)**

Données de prédiction de maintenabilité pour un assemblage.

Cat.	λ	N	(N)(λ)	Temps de maintenance (h)							(N)(λ) (Mct _i)
				Loc	Isol	Acc	Ali	Che	Int	Mct _i	
Part A	0.161	2	0.322	0.08	0.08	0.14	0.01	0.01	0.11	0.43	0.138
Part B	0.102	4	0.408	0.01	0.05	0.12	0.01	0.02	0.12	0.33	0.134
Part C	0.021	5	0.105	0.03	0.04	0.11	---	0.01	0.14	0.33	0.034
Part D	0.084	1	0.084	0.01	0.03	0.10	0.02	0.03	0.11	0.30	0.025
Part E	0.452	9	4.068	0.02	0.04	0.13	0.02	0.03	0.08	0.32	1.302
Part F	0.191	8	1.520	0.01	0.02	0.11	0.01	0.02	0.07	0.24	0.364
Part G	0.022	7	0.154	0.02	0.05	0.15	---	0.05	0.15	0.42	0.064
Total			6.661	Total							2.061

N : Quantité de chaque partie

Iso: Isolation (du défaut)

Che: Vérification

λ : Taux de panne

Acc: Accessibilité

Int: Interchangement

Loc : localisation (du défaut)

Ali: Alignement

Mct_i: temps de cycle de maintenance

Pour le détermination du MLH_c entrer les heures de travail pour les temps de maintenance.

Méthodes d'analyse de Maintenabilité **Prédiction de la maintenabilité (Suite)**

L'opération est refaite pour tous les assemblages, et on aura:

N°	Désignation	Facteur	
		$\sum (N) (\lambda)$	$\sum (N) (\lambda) (Mct_i)$
1	Assemblage 1	7.776	3.021
2	Assemblage 2	5.328	1.928
3	Assemblage 3	8.411	2.891
4	Assemblage 4	6.653	2.039
5	Assemblage 5	5.112	2.576
15	Assemblage 15	4.798	3.112
Total		86.476	33.118
$\overline{Mct} = \frac{\sum (N)(\lambda)(Mct_i)}{\sum (N)(\lambda)} = \frac{33.118}{86.486} = 0.382 \text{ h}$			

On obtiendra ainsi, le temps moyen de maintenance corrective Mct)

b- Prédiction du \bar{M}_{pt} .

- En utilisant la même démarche que celle utilisée pour le temps de maintenance corrective.
- Les taches de la maintenance préventive sont estimées par les temps de fréquence et de tache.

Exemple

Description de la tache de maintenance préventive	Fréquence de la tache $(f_{pt_i})(N)$	Temps de la tache (M_{pt_i})	Produit $(f_{pt_i})(N)(M_{pt_i})$
1. Lubrifier	0.115	5.511	0.060
2. Calibrer	0.542	4.234	0.220
31 Service	0.321	3.315	0.106
Total	13.260		31.115

$$\bar{M}_{pt} = \frac{\sum (f_{pt_i})(N)(M_{pt_i})}{\sum (f_{pt_i})(N)} = \frac{31.115}{13.260} = 2.346 \text{ h}$$

c- Prédiction des exigences des ressources de maintenance.

- ❑ Ça inclut les exigences du personnel et de leur formation, équipement de test et de support, support de provision (pièces de rechange...), exigences de transport et de manutention, les installations, logiciels et les données pour l'accomplissement des actions de maintenance.

- ❑ Exemple de questions:
 - ✓ quel équipement de test est exigé pour l'isolation du défaut?
 - ✓ Quelles personnes et leur niveau de compétence est exigé pour réparer l'élément en défaut?
 - ✓ Quel moyen de manutention pour transporter un élément à un magasin intermédiaire de maintenance
 - ✓ ...

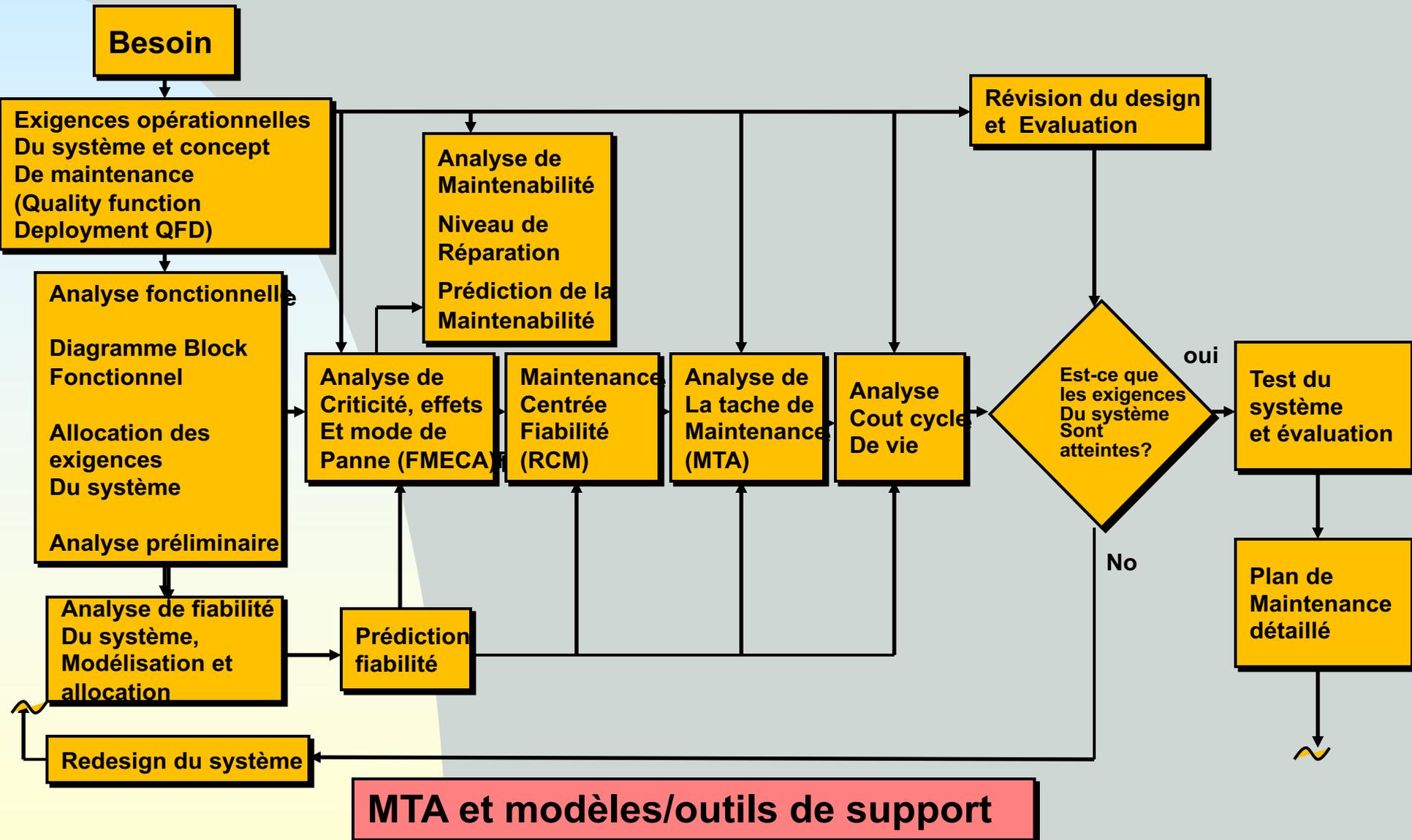
Il faut surtout prédire le temps et les ressources exigées.

6.5 Analyse de la tâche de maintenance (MTA: Maintenance Task Analysis)

C'est le procès d'évaluation d'une configuration d'un système donné pour déterminer ce qui suit:

- ❑ Identifier les ressources exigées pour soutenir et supporter la maintenance du système le long de son cycle de vie. (Nb de personnel, compétence, pièces de réparation/détachées, équipement de test...)
- ❑ Fournir une évaluation de la configuration relative à l'incorporation des caractéristiques de maintenabilité dans le design. L'objectif est de s'assurer que la configuration du design du système à ce temps est compatible avec les TPM et les DDP avec un minimum d'exigences de ressources de support.
- ❑ MTA se développe à partir du concept de maintenance et de l'analyse fonctionnelle et utilise comme input les données de la FMECA, RCM, prédictions de maintenabilité et de fiabilité et l'analyse du niveau de réparation. (Voir l'organigramme suivant)

Méthodes d'analyse de Maintenabilité (MTA: Maintenance Task Analysis) (Suite)



MTA et modèles/outils de support

7. Evaluation et révision du design

La révision du degré d'incorporation de la maintenabilité dans le design du système est accomplie comme partie inhérente du processus global de révision. Les caractéristiques du système (et de ses éléments) sont évaluées en termes des exigences de maintenabilité spécifiées initialement. Si c'est atteint, c'est bon sinon, il faut corriger.

Pour la révision, vaut mieux développer une checklist comme:

- 1. Est-ce que les exigences quantitatives et qualitatives de la maintenabilité ont été adéquatement définies et spécifiées?**
- 2. Est-ce que les exigences de maintenabilité sont compatibles avec les autres exigences du système? Est-ce qu'elles sont réalistiques?**
- 3. Est-ce que les exigences de maintenabilité sont compatibles avec le concept de maintenance du système?**
- 4. Est-ce le niveau d'accessibilité a été pourvu dans le design pour permettre facilement la réparation ou le remplacement de l'article? Est-ce que les exigences d'accessibilité sont compatibles avec la fréquence de la maintenance?**
- 5. Est-ce que la standardisation est incorporé à une étape max. du design? Dans l'intérêt de développer une capacité de support de provision efficace, le nombre de types différents de pièces de rechange doit être minimal.**

Evaluation et révision du design (suite)

- 6. Est-ce que les moyens du test de diagnostique ont été correctement incorporés dans le design? Est-ce que le niveau du test est compatible avec l'analyse du niveau de réparation?**
- 7. Est-ce les modules et composantes ont les mêmes fonctions éclectiquement, fonctionnellement et physiquement interchangeables?**
- 8. Est-ce que les moyens de manutention sont adéquats avec les exigences de transport d'éléments très lourds?**
- 9. Est-ce les exigences de l'ajustement, l'alignement et de la calibration ont été minimisées (si non éliminées)?**
- 10. Est-ce que les exigences du service et de la lubrification ont été minimisées (sinon éliminées)?**
- 11. Est-ce que les exigences de l'étiquetage des assemblages, sous assemblages, modules et composantes sont adéquates? Es ce que les étiquettes sont bien fixes (permanentes)?**
- 12. Est-ce que toutes les exigences de maintenabilité du système sont atteintes?**

8. Démonstration de la maintenabilité

- ❑ La démonstration de la maintenabilité fait partie de l'effort du test (type II) et de l'évaluation.
- ❑ C'est pour vérifier que les exigences qualitatives et quantitatives de maintenabilité sont atteintes.
- ❑ Permet aussi l'estimation des facteurs de support logistique liés aux paramètres de maintenabilité et du temps non fonctionnement (downtime) (i.e équipement de test et de support, pièces de rechange, données techniques, personnel, politiques de maintenance...)
- ❑ La démonstration est généralement accomplie à la fin du design détaillé dans un environnement simulé proche de celui planifié pour l'opérationnel et la maintenance.
- ❑ La démonstration peut varier considérablement en fonction des exigences du système et des objectifs du test.

02 approches existent:

Démonstration de la maintenabilité (Suite)

8.1 Méthode de démonstration I

- ❑ Suit l'approche de test séquentiel.
- ❑ Pour maintenance corrective, 02 plans de test sont employés pour démontrer M_{ct} et M_{max} et une décision d'acceptation est prise suivant ces 02 plans qui supposent une distribution log-normale du temps de la tâche de maintenance.
- ❑ Le test de maintenabilité est accompli par simulation des erreurs sur le système et en observant les temps des tâches et les ressources exigées pour corriger. Ça inclut les étapes suivantes:
 1. une panne (semblable à celle qui pourrait se produire) est introduite dans l'équipement sans que l'équipe de test soit au courant.
 2. Le technicien est appelé pour vérifier le fonctionnement de l'équipement. Des signes de mal fonctionnement sont détectés.
 3. Une fois détecté, le technicien se prépare pour des tâches de maintenance corrective (localisation du défaut, isolation, désassemblage, enlèvement, ajustement et alignement...)
 4. Au fur et à mesure de l'intervention, on collecte les données du test et on les enregistre. (séquences des tâches, zones à tâches difficiles, et temps des tâches, adéquation ou non du support logistique...)

Démonstration de la maintenabilité Méthode de démonstration I (Suite)

Ce cycle de test de maintenabilité est conduit suivant le nombre de la taille de l'échantillon. (souvent 100).

Les taches sélectionnées doivent être représentatives et basées sur la contribution (en %) supposée envers les exigences de la maintenance totale.

Le procès de sélection de la tache est accompli en distribuant proportionnellement les 100 taches parmi les éléments fonctionnels majeurs du système.

Exemple:

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Article	Quantité (Q)	pannes/article 1000h (λ)	Pannes totales (Q) (λ)	Contribution %	Taches de mainte. Allouées pour démonstration
Unité A	1	0.48	0.48	21	21
Unité B	1	1.71	1.71	76	76
Unité C	1	0.06	0.06	3	3
Total			2.25	100	100

(5): % contribution = $(Q. (\lambda) / \sum Q. (\lambda)) \times 100$

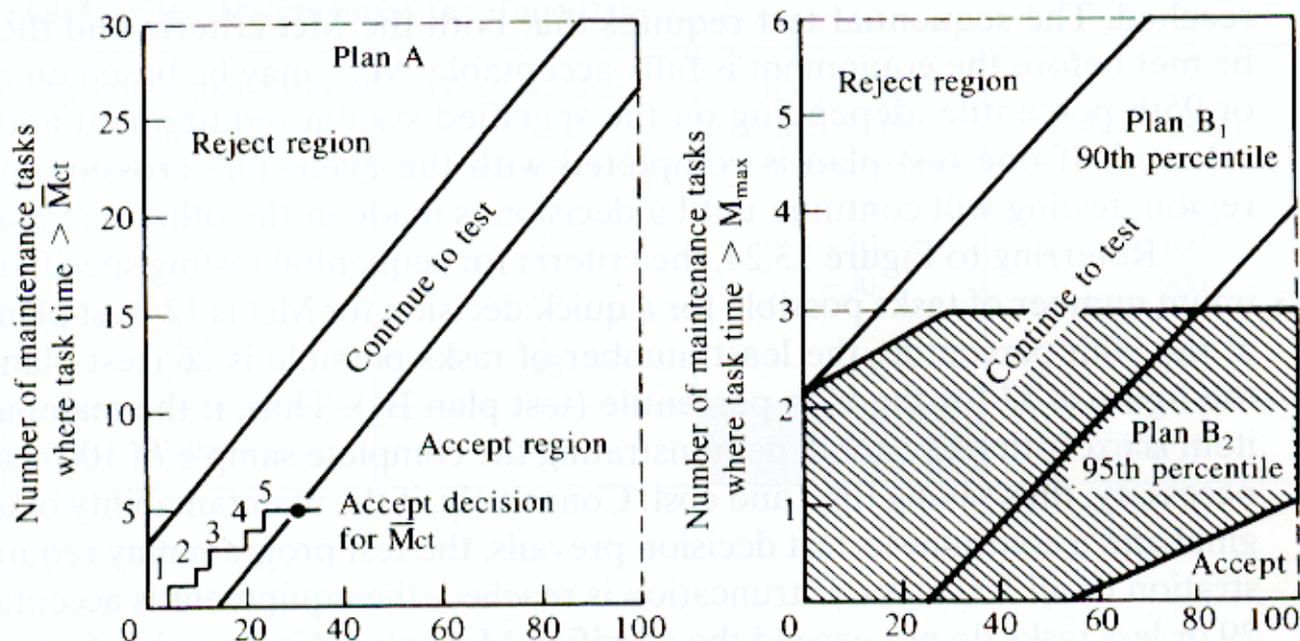
Démonstration de la maintenabilité Méthode de démonstration I (Suite)

Cette allocation peut continuer à des niveaux inférieurs, ex: les 21 tâches de l'unité A seront allouées aux différents assemblages de cette unité et ainsi de suite...

A la fin de l'allocation, il se peut qu'il y ait une tâche assignée à un assemblage particulier et l'assemblage peut avoir plusieurs composante où la panne représente des modes de panne différents (pas d'output, output erronée, output faible...).

A travers un processus aléatoire, une des composantes dans l'assemblage sera sélectionnée comme article où la panne sera provoquée et la méthode avec laquelle sera provoquée est spécifiée.

Ainsi, la démonstration commence avec la 1^{ère} tâche, puis la seconde et ainsi de suite... Les critères d'acceptation-rejet



temps de taches (M_{ct_i}) sont mesurés et comparés aux valeurs spécifiées de \bar{M}_{ct} et M_{max} . Si c'est $>$, un point est enté sur le graphe.

Démonstration de la maintenabilité (Suite)

8.2 Méthode de démonstration II

- ❑ Applicable pour la démonstration du \bar{M}_{ct} , \bar{M}_{pt} et \bar{M} .
- ❑ On prend généralement un échantillon de 50 taches de maintenance correctives pour \bar{M}_{ct} , 50 pour taches de maintenance préventives pour \bar{M}_{pt} .
- ❑ M est déterminée analytiquement des résultats des tests pour \bar{M}_{ct} et \bar{M}_{pt} .
- ❑ M_{max} peut aussi être déterminée si la distribution est log-normale.

On utilise la même approche que celle de la méthode I. Les taches sont sélectionnées selon leur contribution à la maintenance totale et chaque tache est évaluée en termes de temps de maintenance et des ressources de logistique exigées.

Exemple.

Démonstration de la maintenabilité **Méthode de démonstration II (Suite)**

Exemple.

- ❑ Un système a ces exigences:

$\bar{M}=75$ mn; $\bar{M}_{ct}=65$ mn; $\bar{M}_{pt}=110$ mn; $M_{max}=120$ mn;

Risque du producteur (α) = 20%

- ❑ Le test a été accompli et les données collectées sont comme suit:

La limite de confiance supérieure est calculée:

$$\text{lim.Sup} = \bar{M}_{ct} + Z \left(\frac{\sigma}{\sqrt{n_c}} \right)$$

Où:

$$\bar{M}_{ct} = \frac{\sum_{i=1}^{n_c} M_{ct_i}}{n_c} = \frac{3105}{50} = 62.1 (\approx 62)$$

Numéro de la tâche de démonstration	Temps observé M_{ct_i}	$M_{ct_i} - \bar{M}_{ct}$ ($M_{ct_i} - 62$)	$(M_{ct_i} - \bar{M}_{ct})^2$
1	58	-4	16
2	72	+10	100
3	32	-30	900
⋮	⋮	⋮	⋮
50	48	-14	196
Total	3105		15016

Démonstration de la maintenabilité Méthode de démonstration II (Suite)

Exemple.

Z de la table (pour 20%) Z=0.84

et

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_c} (Mct_i - \overline{Mct})^2}{n_c - 1}} = \sqrt{\frac{15016}{49}} = 17.5$$

ainsi $\text{lim.Sup} = 62 + 0.84 \left(\frac{17.5}{\sqrt{50}} \right) = 64.07 \text{ mn} < \text{à } \overline{Mct} = 65 \text{ mn spécifiée}$

Le test du \overline{Mct} est accepté.

Pour \overline{Mpt} ???

50 taches de maintenance préventives sont démontrées et les temps de taches (Mpt_i) sont enregistrés. Le temps de non fonctionnement préventif moyen sera:

$$\overline{Mpt} = \frac{\sum_{i=1}^{n_p} Mpt_i}{n_p}$$

La procédure continuera de la même manière que précédemment

$$\overline{Mpt} + Z \left(\frac{\sigma}{\sqrt{n_p}} \right) \leq 110 \text{ mn}; \text{ alors accepté}$$

sinon $\overline{Mpt} + Z \left(\frac{\sigma}{\sqrt{n_p}} \right) > 110 \text{ mn}; \text{ alors rejeté}$

Exemple.

Ayant les valeurs de test pour \overline{M}_{ct} et \overline{M}_{pt} , on peut calculer le temps moyen de maintenance, \overline{M}

$$\overline{M} = \frac{(\lambda)(\overline{M}_{ct}) + (f_{pt})(\overline{M}_{pt})}{\lambda + f_{pt}}$$

λ : aux de maintenance corrective ou bien nombre attendu des taches de maintenance corrective pour une période donnée.

f_{pt} : aux de maintenance préventive ou bien le nombre attendu des taches de maintenance préventive pour une période donnée.

En application numérique, M calculée doit être égale ou inférieure à 75 mn.

Enfin: $M_{\max} = \text{anti log} \left(\log \overline{M}_{ct} + Z \cdot \sigma_{\log M_{ct_i}} \right)$

Qui doit être égale ou inférieure à 120 mn

En conclusion, si toutes les valeurs démontrées sont inférieures aux valeurs spécifiées, on accepte. Sinon, il faut faire d'autres tests ou bien des redesign doivent être ajoutés en fonction de la sévérité du pb.

8.3 Estimation de la maintenabilité

- ❑ La vraie estimation de la maintenabilité pour un système dans un environnement opérationnel est accomplie à travers une collection de données effectives, une analyse et une capacité d'évaluation.
- ❑ Les tâches de maintenance, les séquences de tâches, les temps des tâches, et les facteurs de logistiques sont tous enregistrés.
- ❑ Des zones majeurs de défaillance sont notées et doivent être corrigées à travers une initiation de changements et un système de modification approprié.

Merci. Fin du chapitre 3

Systems Engineering

Abdellatif MEGNOUNIF

Semaine Prochaine

Design pour l'utilisabilité (Facteurs humains)