

UNIVERSITE HOUARI BOUMEDIENE

ALGER

25/80

2 ex

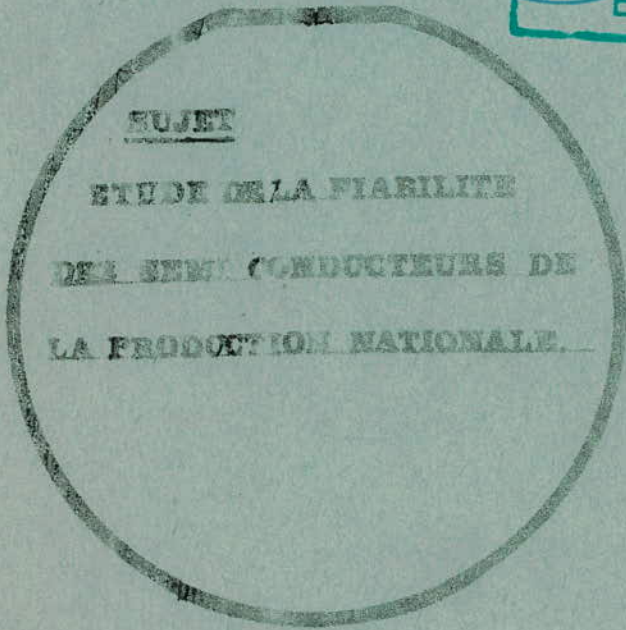
T1

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT ELECTRONIQUE / ELECTROTECHNIQUE

INGENIORAT EN ELECTRONIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES



PROPOSE PAR:

Mr. BAGHLI

INGENIEUR D'ETAT

CHARGE DE COURS ASSOCIE

REALISE PAR:

Med. MAHROUG-ERRAS

Med. ROUGINAT

JUN 80

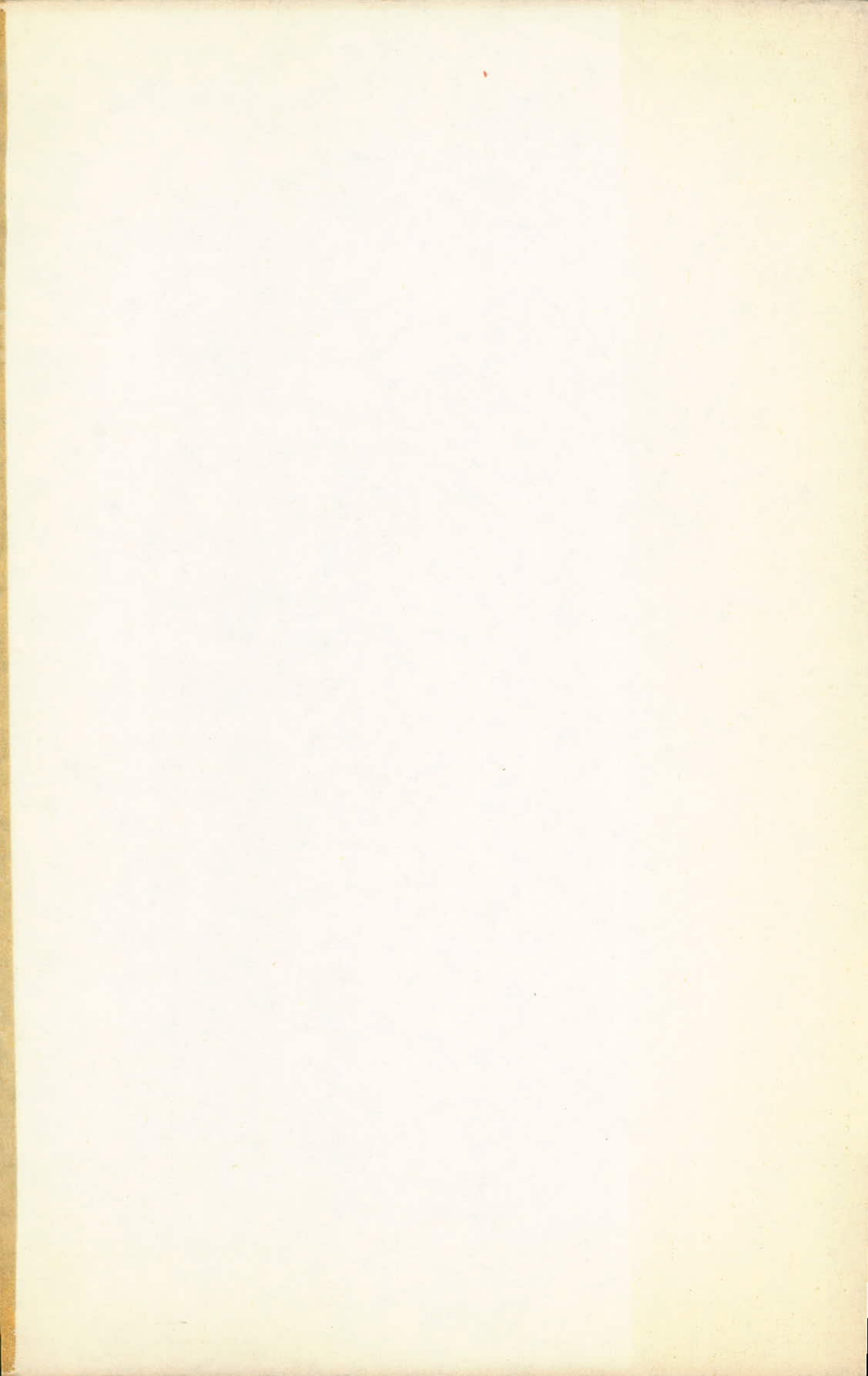
E R R A T A
 DU PROJET DE FIN D'ETUDES
 SUR LA FIABILITE DES SEMI CONDUCTEURS
 DE LA PRODUCTION NATIONALE

POLYCOPIE : Fascicule I

N° de la page	N° de la ligne	Lire	au lieu de...
2	20	Fonctionnement	f^{ent}
3	8	ou	du
4	20	électronique	électrique
5	20	divisions	division
5	25	$t + dt$	$t + td$
6	1	$\frac{d F(t)}{dt}$	$\frac{d F(f)}{dt}$
6	13	$D(t)$	$(D) t$
7	7	<u>vive</u>	<u>ruine</u>
8	18	par partie	pour partie
20	15,16,17	essais <u>censurés</u>	essais tronqués
59	17	orthoxylène	osthoxylène
65	2	fonction	f^{ct}
40	25	on ne peut pas écrire	on ne peut écrire que
43	12	s'écrit alors comme le complément	s'écrit alors le complément
73	11	Chrome	crome

ANNEXE : Fascicule II

5	10	la loi binomiale	la loi bien amicale
6	7	NQA (AQL)	(A02)
10	14,15,16	log	lag
26	6	coefficient de variabilité	coefficient de variation



UNIVERSITE HOUARI BOUMEDIENE

ALGER



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT ELECTRONIQUE / ELECTROTECHNIQUE

INGENIORAT EN ELECTRONIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

ETUDE DE LA FIABILITE

DES SEMI CONDUCTEURS DE

LA PRODUCTION NATIONALE.

PROPOSE PAR:

MF. BAGHLI

INGENIEUR D'ETAT

CHARGE DE COURS ASSOCIE

REALISE PAR:

Med. MAHROUG-ERRAS

Med. BOUGBINAT

JUN 80

" LA FORMATION QUE LES CADRES RECOIVENT A L'UNIVERSITE
LEUR EST NECESSAIRE MAIS NON SUFFISANTE POUR L'ACCES
A LA MAITRISE TOTALE DE LA SCIENCE ET DE LA TECHNOLO-
GIE.

ENCORE, FAUT-IL QU'ILS UTILISENT LEURS CONNAISSANCES
A LA SOLUTION DES PROBLEMES CONCRETS ET VECUS QUE PO-
SENT L'IMPLANTATION ET LE FONCTIONNEMENT DES INDUS-
TRIES DANS LES CIRCONSTANCES SPECIFIQUES DU PAYS".

CHARTRE NATIONALE

- A mes parents.
- A mes frères et
sœurs.
- A mes amis.
- A tous les habitants
de Zaouiat Sidi El-Abed.



Mohammed B.

- A mes parents.
- A mes frères et
ma sœur.
- A tous ceux qui
me sont chers.

M. E. M.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier tous les professeurs qui ont contribué à notre formation, en particulier monsieur BAGHLI, de nous avoir proposé ce sujet et procurer les moyens pour le réaliser.

Nos vifs remerciements vont également à l'égard de :

- Mr GHRIB, Directeur du C.T.G.P et Mr STMOUCI, Directeur Technique pour l'accueil qu'ils nous ont réservé au sein de leur établissement.
- Mr ZEBENTOUT, D, Chef du département Assurance de Qualité, pour les conseils constructifs qu'il n'a cessé de nous donner. Nous reconnaissons en lui le responsable exemplaire.
- Mr HAZI, Chef de la Division II (fabrication des semi-conducteurs) pour nous avoir autorisé à effectuer notre travail dans ladite division.
- Tous les ingénieurs et les secrétaires du Département Assurance de Qualité pour leurs encouragements et leur gentillesse.

Enfin, nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

INTRODUCTION

Les techniques de fiabilité n'ont fait leur apparition que depuis quelques dizaines d'années, lors de la deuxième guerre mondiale, grâce aux progrès accompli par le calcul moderne de probabilité. Le mot " fiabilité " a été admis comme l'équivalent du mot anglais, d'origine, " Reliability " qui par définition exprime la probabilité de survie d'un matériel.

De nos jours, les techniques de fiabilité occupent une place primordiale dans toute industrie de pointe. L'insuffisance de fiabilité a des conséquences fâcheuses sur le coût, le temps perdu inutilement et même souvent sur la sécurité des vies humaines ; sans compter les effets néfastes qu'elle provoque chez les utilisateurs. On peut citer l'exemple d'un satellite qui échoue sa mission ou un avion dont le système de contrôle tombe en panne ; à cause de la défaillance seulement d'un transistor ou d'un circuit intégré.

Ainsi la fiabilité a un sens bien précis, non seulement on peut la définir mais on peut la calculer, la tester, la mesurer et la déterminer au moment de la conception d'un matériel. Mesurer la fiabilité c'est déterminer la fréquence avec laquelle se produisent les pannes.

Une collecte de données obtenues à partir des essais de fiabilité permet d'apporter des actions correctives dans le process de fabrication du produit c'est à dire :

- l'amélioration de la qualité totale du produit lors de son lancement et la prévision de fiabilité pour les produits futurs.

C'est dans ce but qu'on se propose de contribuer à l'étude de la fiabilité des semi-conducteurs de la production nationale au sein du Complexe Electronique Grand Public de Sidi Bel-Abbès.

Avant d'aborder le fond du sujet, on a jugé utile de rassembler les éléments mathématiques nécessaires et de suivre le process de fabrication des semi-conducteurs depuis la plaquette de silicium vierge jusqu'à la finition du produit afin de pouvoir localiser les origines des défauts.

Comme la fiabilité n'est autre qu'une caractéristique de la qualité, un exposé sur les méthodes d'échantillonnages en contrôle de qualité est traité en annexe.

CHAPITRE I

THEORIE ET PRATIQUE DE LA FIABILITE

SOMMAIRE DU CHAPITRE I

TI TRE

- | TI TRE | |
|---|--|
| I - Introduction | |
| II - Définition | |
| III - Notion d'avaries | |
| 1) Définition concernant les avaries | |
| 2) Distinction entre les trois types de pannes | |
| 3) Distribution des pannes de jeunesse, acc et d'usure | |
| IV - Expression math. de la fiabilité | |
| 1) Formule générale de la fiabilité | |
| 2) Fiabilité en fonction de la densité de probabilité de panne | |
| 3) Forme intégrale de la fiabilité | |
| V - Principaux paramètres de la fiabilité | |
| 1) M.T.B.F | |
| 1.1 - Définition | |
| 1.2 - Relation entre le M.T.B.F et le taux de panne | |
| 1.3 - Relation entre le M.T.B.F et la fiabilité | |
| 1.4 - Intervalle de confiance | |
| 2) Vie moyenne et écart type | |
| 2.1 - Usure et fiabilité | |
| 2.2 - Formulation mathématique | |
| 2.3 - Intervalle de confiance de la vie moyenne | |
| VI - Contraintes et taux de panne des composants électroniques | |
| VII - Essais de fiabilité | |
| 1) Estimation du MTBF des composants (essais sans remplacement) | |
| 2) Estimation du MTBF (essais avec remplacement) | |
| III - Fiabilité des systèmes | |
| 1) Introduction | |
| 2) Notions préliminaires | |
| 3) Généralités sur la fiabilité des systèmes | |
| 4) Fiabilité d'éléments en série | |
| 5) Fiabilité d'éléments en parallèle | |
| 6) Systèmes séries-parallèles | |
| 7) Fiabilité des éléments en attente. | |

TITRE

IX -- NOTION DE RISQUES

- 1) Définition des risques de l'utilisateur et du fournisseur
- 2) Comparaison du MTBF à une valeur contractuelle donnée
 - 2.1 -- Position du problème
 - 2.2 -- Essai censuré à r défaillances
 - 2.3 -- Courbe d'efficacité du test
 - 2.4 -- Pratique des tests censurés
 - 2.5 -- Essai de durée tronquée (cumulé)
 - 2.6 -- Essais tronqués
 - 2.7 -- Remarques pratiques
- 3) Les tests séquentiels de fiabilité
 - 3.1 -- But
 - 3.2 -- Application : cas où la fiabilité est exponentielle
 - 3.3 -- Remarque
 - 3.4 -- Troncature d'essai

X -- Conclusion.

I/ INTRODUCTION

L'étude de la théorie de la fiabilité repose sur les éléments de calcul statistique simples mais qu'il faut, cependant, manier avec précaution. L'excès de jeunesse dont souffre la fiabilité (elle est née il y a à peine 20 ans) fait qu'elle est encore l'objet d'étude et de recherches. La naissance de la fiabilité a ouvert aux mathématiciens et aux ingénieurs un nouveau champ de recherche.

Contrairement à jadis, la fiabilité est aujourd'hui l'une des plus importantes clauses techniques de tout produit industriel. Elle a cessé d'être réservée aux usages spécialisés, et constitue maintenant une connaissance de base.

Le présent chapitre rassemble les éléments mathématiques nécessaires permettant de résoudre les problèmes pratiques de fiabilité qu'on peut rencontrer dans le travail de chaque jour. On s'est proposé de traiter dans un exposé bref et englobant les notions fondamentales de la théorie de la fiabilité dont on a besoin dans la présente étude.

II/ DEFINITION

C'est la confiance qu'on peut accorder à un matériel de remplir sa fonction de façon satisfaisante pendant un temps donné sous des contraintes bien déterminées. Autrement dit c'est la probabilité de succès d'un matériel pendant sa période de f^{ent} . La fiabilité est une caractéristique qu'on peut la calculer, la mesurer, la tester et même la déterminer au moment de la conception d'un matériel. Elle mesure l'aptitude du matériel à fonctionner sans pannes une fois mis en service et permet de prévoir mathématiquement son comportement dans les conditions d'utilisation prévues.

Mesurer la fiabilité c'est déterminer la fréquence avec laquelle se produisent les pannes. S'il n'y a jamais de pannes la fiabilité est de 100 %, si cette fréquence est faible la fiabilité est en général acceptable, si cette fréquence est élevée le matériel n'est pas fiable.

Le fonctionnement normal d'un matériel peut être perturbé par trois types de pannes.

- Les pannes infantiles ou de jeunesse
- Les pannes accidentelles ou franches
- Les pannes de vieillesse ou d'usure.

Les pannes infantiles sont dues aux défauts de fabrication et interviennent après une courte durée de la mise en service d'un matériel.

Les pannes accidentelles surviennent subitement de façon aléatoire pendant la vie utile du matériel.

Les pannes d'usure sont le symptôme de vieillissement du matériel.

III - NOTIONS D'AVARIES

3.1 - Définitions concernant les avaries:

Avarie, panne et défaillance sont trois mots qui ont la même signification exprimant ainsi l'incapacité d'un élément ou d'un système à accomplir sa fonction requise.

Toutefois on rencontre plusieurs types d'avaries à savoir:

a) - Avarie soudaine : C'est une défaillance non prévue par l'examen antérieur du matériel ou de l'élément tombant en panne.

b) - Avarie progressive : c'est le type de défaillance prévue par un examen préalable du matériel.

c) - Avarie partielle : on appelle ainsi toute défaillance due à la déviation d'une ou de plusieurs caractéristiques entraîne la disparition totale de la fonction requise, on parlera d'avarie complète.

e) - Avarie accidentelle : on appelle ainsi toute défaillance à la fois soudaine et complète.

f) - Avarie par dégradation: défaillance qui est à la fois progressive et partielle.

g) - Défaillance d'exploitation: on appelle ainsi toutes les défaillances qui résultent du non respect des limites d'exploitation spécifiées ou qui sont dues à des contraintes extérieures dépassant les limites spécifiées d'exploitation du matériel.

h) - Panne de jeunesse (ou panne infantile): les pannes de jeunesse ou infantiles sont celles qui se produisent dès le début de la mise en service du matériel. Elles sont en général dues au mauvais assemblage d'un système ou la mauvaise fabrication de ses éléments.

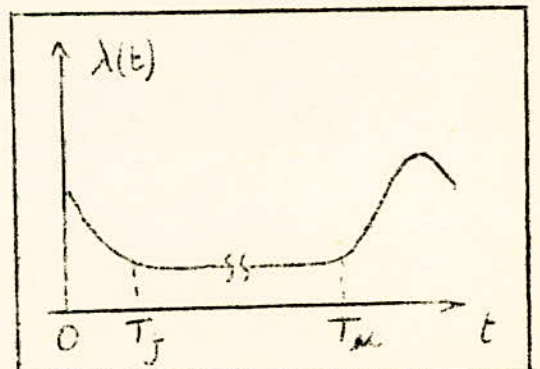
i) - Panne d'usure : on appelle ainsi les pannes qui surviennent à la suite du vieillissement du matériel.

* Les trois (3) types de pannes les plus usuelles sont les avaries de jeunesse les pannes accidentelles et les pannes dues à l'usure.

3.2 - Distinction entre les trois causes de pannes:

Le schéma de la figure ci-contre donne l'allure du taux d'avarie instantané $\lambda(t)$ en fonction de la durée de vie.

On distingue en générale trois intervalles séparés par les temps T_j et T_u .



a) - $[0, T_j]$ est l'intervalle des pannes de jeunesse constitué par un taux de panne décroissant en exponentielle.

Les pannes de jeunesse sont généralement le résultat des défaillances des mauvais composants comportant des défauts de fabrication (mauvaise soudure, fils dénudés, masses intermittentes, étanchéité imparfaite, débris de vernis ou de métal, contamination, etc...).

Ces pannes disparaissent rapidement. Donc il est très avantageux de ne pas utiliser un équipement avant que celui-ci ne subisse un rodage pendant un temps T_j .

b) - L'intervalle au delà de T_u :

C'est l'intervalle des pannes d'usures. Il est caractérisé par un taux de pannes croissant assez rapidement. Aucun équipement n'échappe à ces pannes. Donc T_u est l'époque limite où il faut procéder au changement du matériel sinon il serait illusoire de penser à un accomplissement de la fonction requise après ce temps.

c) - L'intervalle $[T_j - T_u]$

Pendant cette période les pannes sont purement aléatoires et soudaines. La durée de cet intervalle dépend de l'équipement et des contraintes du milieu auquel cet équipement est soumis. Elle est en général très longue pour les composants électriques. Cependant le remplacement de l'équipement s'avère nécessaire dès que l'on s'approche de l'époque T_u .

Pour avoir une bonne fiabilité, une tranquillité et même pour des raisons économiques on ne doit pas :

- * mettre en service un équipement n'ayant pas subi un rodage.
- * laisser l'équipement en fonctionnement au delà de T_u même s'il n'y a pas de pannes.

3.3- Distribution des pannes de jeunesse et des pannes d'usure:

Bien qu'il n'est possible de déterminer avec précision les limites T_j et T_u des intervalles, de nombreux travaux ont été entrepris pour trouver une distribution pour chaque type de pannes.

1°) Panne de jeunesse

En supposant que le taux d'avarie dans l'intervalle $[0, T_j]$ décroît exponentiellement on écrit que :

$$\lambda_j(t) = \lambda_0 \exp\left(-\frac{t}{a}\right)$$

2°) Panne durant la vie utile

dans cette zone le taux d'avarie en général est constant.

$$\lambda_u(t) = \lambda_0$$

Toutefois, il arrive que le taux de panne ne peut être considéré constant durant la vie utile. On estime sa distribution par une loi de WEIBULL.

$$\lambda_u(t) = \beta (t - b) \gamma^{-1}$$

Pannes d'usure :

La distribution des pannes d'usure suit une loi normale de densité de probabilité

$$f_v(t) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \frac{(t - \mu)^2}{\sigma^2} \right\}$$

ce qui conduit à

$$\lambda_v(t) = \frac{f_v(t)}{\int_t^{\infty} f_v(t) dt}$$

IV EXPRESSION MATHÉMATIQUE DE LA FIABILITÉ

1) - Formule générale de la fiabilité

Étant donné un nombre N_0 de composants soumis à l'essai à l'instant t_0 , au bout d'un certain temps t on aura N_1 composants qui survivent encore et N_2 composants qui deviennent défectueux. La probabilité de survie ou fiabilité est donc:

$$F(t) = \frac{N_1}{N_0}$$

Le nombre de composants survivant est $N_1 = N_0 - N_2$, on écrit également

$$F(t) = \frac{N_0 - N_2}{N_0} = 1 - \frac{N_2}{N_0}$$

Par différentiation on obtient:

$$\frac{dF(t)}{dt} = -\frac{1}{N_0} \frac{dN_2}{dt} \implies \frac{dN_2}{dt} = -N_0 \frac{dF}{dt}$$

Divisons les 2 membres par N_1 :

$$\frac{1}{N_1} \frac{dN_2}{dt} = -\frac{N_0}{N_1} \frac{dF}{dt} = -\frac{1}{F} \frac{dF}{dt} \quad (\text{car } F = \frac{N_1}{N_0})$$

On a donc :

$$\frac{1}{N_1} \frac{dN_2}{dt} = -\frac{1}{F} \frac{dF}{dt}$$

$\frac{dN_2}{dt}$ représente le nombre de composants qui tombent en panne entre l'instant t et l'instant $t + dt$.

N_1 est le nombre de composants survivant à l'instant t d'où : $\frac{1}{N_1} \frac{dN_2}{dt}$

représente la probabilité de panne instantanée ou taux de panne qu'on

note λ

$$\lambda(t) = +\frac{1}{N_1} \frac{dN_2}{dt} = -\frac{1}{F} \frac{dF}{dt}$$

$$\implies \boxed{\lambda(t) = -\frac{1}{F} \frac{dF}{dt}}$$

C'est l'expression la plus générale du taux de défaillance.

$F(t)$ et $\frac{dF}{dt}(f)$ dépendent du temps donc λ dépend aussi du temps de fonctionnement t . Le seul cas où λ est indépendant du temps, c'est lorsque les pannes se produisent suivant une distribution aléatoire dans le temps.

Cherchons l'expression générale de la fiabilité:

$$\frac{dF}{F} = -\lambda(t) dt \implies \ln\left(\frac{F}{C}\right) = \int_0^t -\lambda dt \implies$$

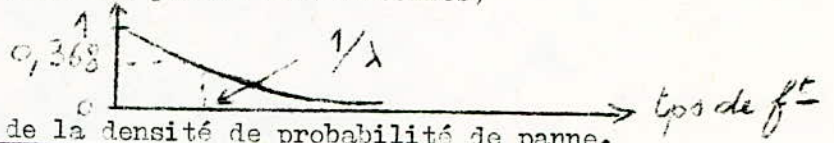
$$F = C e^{-\int_0^t \lambda dt} \quad \text{pour } t = 0 \text{ on suppose que la fiabilité}$$

$$F = 1 \implies C = 1$$

On a finalement $F(t) = e^{-\int_0^t \lambda dt}$ c'est la formule générale.

Si $\lambda = \text{constante}$ (distribution des pannes accidentelles)

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



2) Fiabilité en fonction de la densité de probabilité de panne.

Expression de la densité de probabilité de panne.

L'évènement complémentaire de la fiabilité est la défiabilité $(D)t$. Ce sont 2 évènements qui s'excluent mutuellement.

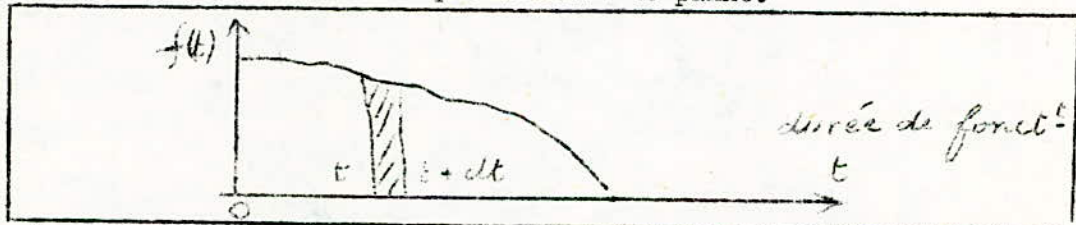
$$\text{Par définition } D(t) = \frac{N2}{N0} = \frac{N0 - N1}{N0} = 1 - \frac{N1}{N0}$$

Par différentiation on a :

$$\frac{d D(t)}{dt} = \frac{1}{N0} \frac{dN2}{dt}$$

$$\implies D(t) = \int_0^t \frac{1}{N0} \frac{dN2}{dt} dt \quad (1)$$

Soit $f(t)$ la densité de probabilité de panne.



La probabilité qu'a le composant de tomber en panne entre t et $t + dt$ est $f(t) dt$.

Sa probabilité de tomber en panne entre 0 et t est donc :

$$D(t) = \int_0^t f(t) dt \quad (2)$$

En égalant les expressions (1) et (2) de $D(t)$ on a :

$$f(t) = \frac{1}{N0} \frac{dN2}{dt}$$

$$\text{Le taux de panne } \lambda(t) = \frac{1}{N1} \frac{dN2}{dt} = \frac{N0}{N1} \cdot \frac{1}{N0} \frac{dN2}{dt}$$

comme $F(t) = \frac{N1}{N0}$ et $f(t) = \frac{1}{N0} \frac{dN2}{dt}$

on a $\lambda(t) = \frac{f(t)}{F(t)}$ ou $F(t) = \frac{f(t)}{\lambda(t)}$

3/ Forme intégrale de la fiabilité.

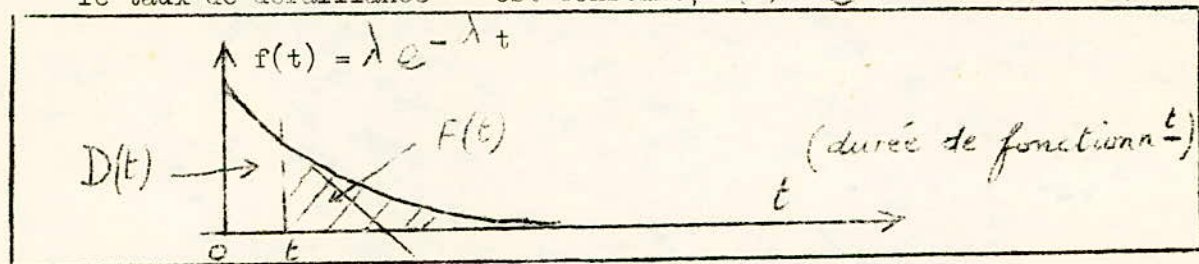
$F(t) + D(t) = 1 \implies F(t) = 1 - D(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt$

comme $\int_0^\infty f(t) dt = 1$ on a : $F(t) = \int_0^\infty f(t) dt - \int_0^t f(t) dt$
 $= \int_t^\infty f(t) dt.$

$\implies F(t) = \int_t^\infty f(t) dt$

C'est donc la probabilité pour que le composant ruine au delà de t.

Dans le cas exponentiel c'est à dire durant la vie utile du composant où le taux de défaillance λ est constant, $F(t) = e^{-\lambda t}$ et $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$



V - PRINCIPAUX PARAMETRES DE LA FIABILITE

Après élimination des éventuelles avaries de jeunesse, les paramètres dont dépend la fiabilité sont: la moyenne de la distribution des pannes accidentelles appelée temps moyen entre pannes (MTBF) ou temps moyen de bon fonctionnement, et la moyenne de la distribution des pannes d'usure appelée vie moyenne.

1/ - Temps moyen entre panne (MTBF)

On le note m.

On bénéficiera d'une grande fiabilité seulement durant la vie utile des composants.

Durant la période de vie utile, il suffit de connaître le MTBF et la fiabilité peut être calculer à partir de la formule exponentielle pour une période de fonctionnement.

1.1 - Définition:

Le MTBF est l'intervalle de temps moyen qui sépare 2 défaillances accidentelles. C'est aussi le temps moyen pendant lequel on peut espérer un bon fonctionnement. Comme il s'agit seulement d'une moyenne, il faut s'attendre à ce que la panne peut arriver au bout d'un temps beaucoup

* M T B F - en anglais - Mean Time Between Failures.

plus court, comme elle peut survenir après des intervalles beaucoup plus longs.

2.2 - Relation entre MTBF et le taux de défaillances λ

Le MTBF représente la moyenne de la densité de probabilité exponentielle $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$. Il est égal à l'intégrale sur tout l'intervalle 0 à l'infini du moment d'ordre 1 de $f(t)$:

$$m = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} t \lambda e^{-\lambda t} dt$$

on pose $x = \lambda t$

on intègre par partie : soit $u = x$ et $dv = e^{-x} dx$

$$(dx = \lambda dt \implies dt = \frac{1}{\lambda} dx)$$

$$\implies m = \frac{1}{\lambda} \int_0^{\infty} x e^{-x} dx = \frac{1}{\lambda} \left\{ \left[-x e^{-x} \right]_0^{\infty} - \int_0^{\infty} e^{-x} dx \right\} = \frac{1}{\lambda} \left[e^{-x} \right]_0^{\infty} = \frac{1}{\lambda}$$

$$m = 1/\lambda$$

1.3 - Relation entre MTBF et la fiabilité

$$m = \int_0^{\infty} t f(t) dt \quad ; \quad f(t) = \frac{d D(t)}{dt}$$

$F(t)$ et $D(t)$ sont 2 événements complémentaires pour une même période de fonctionnement, on peut écrire:

$$F(t) + D(t) = 1 \implies D(t) = 1 - F(t) \text{ et } \frac{d D(t)}{dt} = - \frac{d F(t)}{dt} = f(t)$$

$$\implies m = \int_0^{\infty} t \left(- \frac{d F(t)}{dt} \right) dt \quad \text{ce qui donne en intégrant par partie:}$$

$$m = - \left[t F(t) \right]_0^{\infty} + \int_0^{\infty} F(t) dt$$

$$F = e^{-\int_0^t \lambda dt} \quad \text{et } t F = \frac{t}{e^{\int_0^t \lambda dt}}$$

qui tend vers zéro lorsque t tend vers l' ∞ avec λ constant ou λ va en croissant.

$$\implies m = \int_0^{\infty} F(t) dt$$

$$\text{Durant la vie utile où } F(t) = e^{-\lambda t} ; m = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}$$

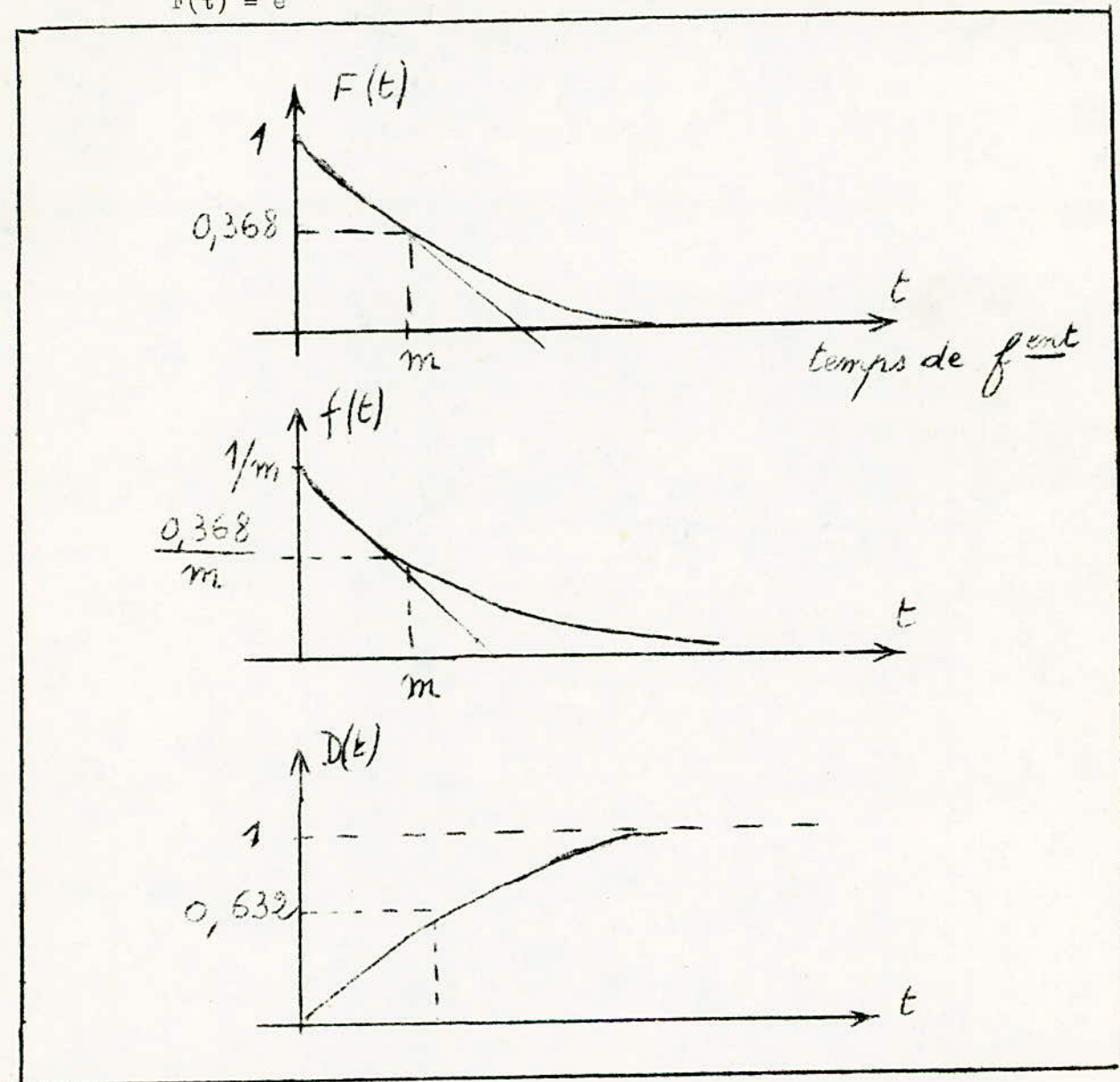
$$m = 1/\lambda$$

Dans le cas exponentiel m est égal à l'inverse du taux de panne. On peut écrire alors les expressions suivantes en fonction de m :

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} = \frac{1}{m} e^{-t/m}$$

$$D(t) = 1 - e^{-t/m}$$

$$F(t) = e^{-t/m}$$



1.4 - Intervalle de confiance pour le MREBF.

Les valeurs des paramètres déterminés par l'essai ne sont que des valeurs estimées. En faisant plusieurs essais on constate que les différentes valeurs estimées se distribuent autour de la vraie valeur du paramètre dans un intervalle plus ou moins grand. La majorité des valeurs se trouvent autour de la vraie valeur dans un intervalle de confiance. Pour trouver cet intervalle de confiance, il faut connaître la distribution du paramètre estimé.

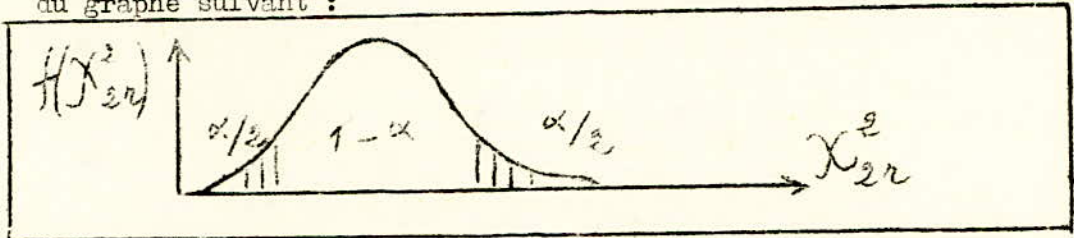
Un intervalle de confiance est caractérisé par un niveau de confiance et une limite inférieure pour le cas unilatéral, plus une limite supérieure pour le cas bilatéral.

Soit \hat{m} la valeur estimée de la vraie valeur du MTBF m et obtenue à partir d'un test où l'on a relevé r pannes. On peut démontrer en utilisant les fonctions caractéristiques que $2 r \hat{m} / m$ suit une distribution de χ^2 .

a) - Intervalle de confiance bilatéral:

Soit α le risque que le MTBF m est hors de l'intervalle. Ce risque se répartit sur les 2 aires situées aux coins de la courbe $f(\chi^2)$ (coin à droite et coin à gauche). Chaque aire vaut $\alpha/2$.

Pour un degré de liberté $n = 2 r$ et un risque α on obtient la forme du graphe suivant :



Il y'a 100 $(1 - \alpha)$ chances sur 100 pour que la variable aléatoire de type χ^2_{2r} se trouve entre les 2 valeurs de χ^2_{2r} limitant les 2 aires $\alpha/2$ ou 100 α chances sur 100 pour que cette même valeur se trouve à l'extérieur de cet intervalle.

Pour un niveau de confiance $(1 - \alpha)$ on écrit :

$$P \left(\chi^2_{2r, 1-\alpha/2} \leq \frac{2r \hat{m}}{m} \leq \chi^2_{2r, \alpha/2} \right) = 1 - \alpha$$

$$\implies P \left(\frac{\chi^2_{2r, 1-\alpha/2}}{2r \hat{m}} \leq \frac{1}{m} \leq \frac{\chi^2_{2r, \alpha/2}}{2r \hat{m}} \right) = 1 - \alpha$$

$$\implies P \left(\frac{2r \hat{m}}{\chi^2_{2r, \alpha/2}} \leq m \leq \frac{2r \hat{m}}{\chi^2_{2r, 1-\alpha/2}} \right) = 1 - \alpha$$

\implies pour un niveau de confiance $100(1 - \alpha) \%$ la vraie valeur de m est comprise dans un intervalle tel que: $\frac{2r \hat{m}}{\chi^2_{2r, \alpha/2}} \leq m \leq \frac{2r \hat{m}}{\chi^2_{2r, 1-\alpha/2}}$

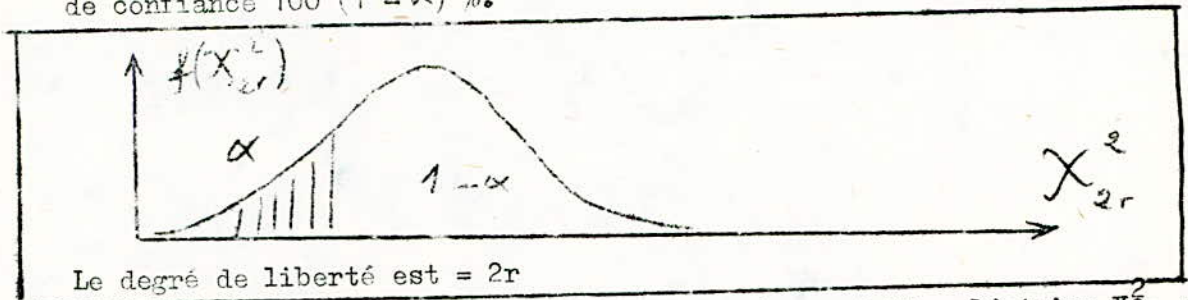
La limite inférieure de l'intervalle est :

$$m_{\inf} = \frac{2r \hat{m}}{\chi_{2r, \frac{\alpha}{2}}^2}$$

et la limite supérieure est: $m_{\sup} = \frac{2r \hat{m}}{\chi_{2r, 1-\frac{\alpha}{2}}^2}$

b)- Intervalle de confiance unilatéral:

on exige que la valeur m soit égale à une valeur seuil avec un niveau de confiance $100(1 - \alpha) \%$.



Le degré de liberté est = $2r$

Il y'a $100(1 - \alpha)$ chances sur 100 pour que la variable aléatoire X_{2r}^2 se trouve supérieure à la valeur seuil de X_{2r}^2 ou 100α chances sur 100 pour que cette même valeur se trouve inférieure à la valeur seuil.

Pour un niveau de confiance $100(1 - \alpha) \%$ on écrit:

$$P(X_{2r, \alpha}^2 \geq \frac{2r \hat{m}}{m}) = 1 - \alpha$$

$$\implies P(m \geq \frac{2r \hat{m}}{X_{2r, \alpha}^2}) = 1 - \alpha$$

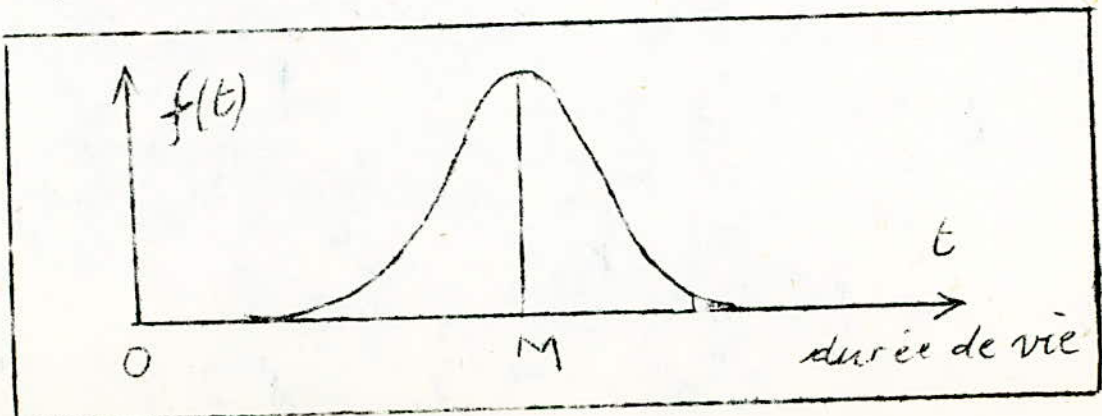
\implies la valeur minimum que peut avoir m est

$$m_u = \frac{2r \hat{m}}{X_{2r, \alpha}^2}$$

2°/ Vie moyenne: M et écart type:

2.1 - Usure et fiabilité:

Même si un composant pouvait fonctionner avec une fiabilité presque absolue pendant sa vie utile, cette fiabilité ne persisterait que pendant une certaine durée de vie relativement courte. Même si aucune panne accidentelle ne survient, l'usure finira par le faire tomber en panne. La distribution des pannes dues à l'usure peut être bien approximée par une loi normale où les défaillances se trouvent groupées autour de la vie moyenne M .



$$f(t) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-M)^2}{2\sigma^2}}$$

C'est la densité de probabilité des pannes.

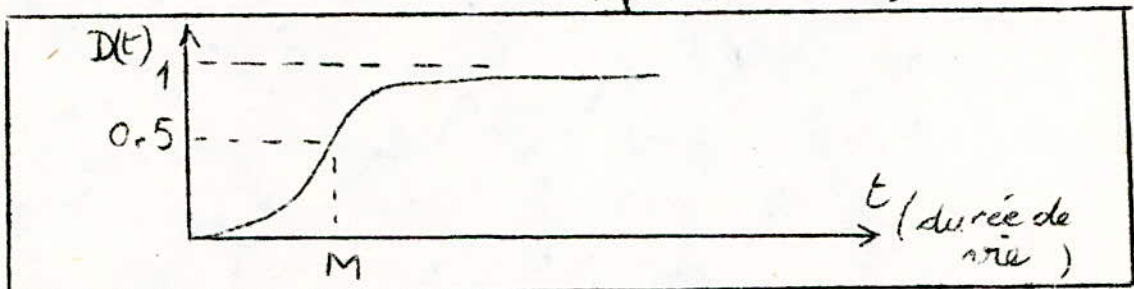
M : moyenne de la distribution et σ son écart type.

t : l'âge ou temps de fonctionnement cumulé.

Si le composant entre dans le domaine d'usure, le taux de panne croît et vient se superposer aux pannes de caractère exponentiel.

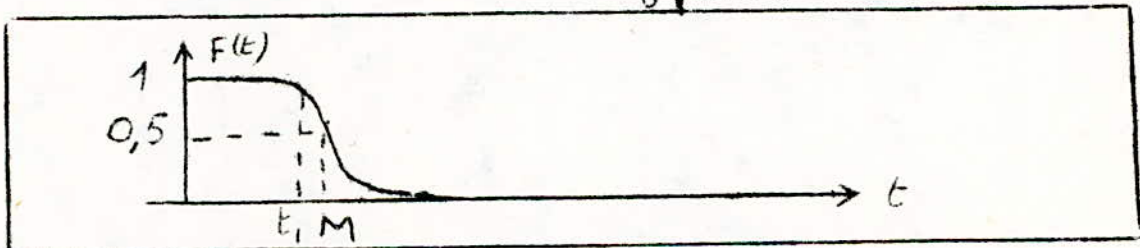
Soit $D(t) = \int_0^t f(t) dt$ la probabilité cumulée de panne d'usure de 0 à t.

$$D(t) = 1 - \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_t^{\infty} e^{-\frac{(t-M)^2}{2\sigma^2}} dt$$



Pour un temps assez long la probabilité de pannes d'usure ou défiabilité tend vers 1 et pour un temps égal à la vie moyenne d'usure la défiabilité vaut 1/2.

La fiabilité d'usure $F(t) = 1 - D(t) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_t^{\infty} e^{-\frac{(t-M)^2}{2\sigma^2}} dt$



Cette figure montre que jusqu'à l'âge t_1 la probabilité de survie à l'usure est bonne. Ensuite les pannes dues à l'usure deviennent prédominantes et la courbe de fiabilité descend rapidement vers zéro. A la vie moyenne la fiabilité est de 1/2.

Pour conserver la fiabilité d'un système, il faut procéder à un remplacement préventif des composants qui atteignent la fin de leur vie utile, car durant la période d'usure le taux de panne des composants augmente considérablement et un composant qui tombe en panne lors du fonctionnement du système peut entraîner la destruction totale du système, donc il serait moins coûteux de remplacer quelques composants que le système tout entier.

La fin de la vie utile correspondant à la période de remplacement se détermine à partir de la vie moyenne M des composants et son écart type

2.2 - Formulation mathématique de M et $\hat{\sigma}$:

Un échantillon de composants à l'état neuf est soumis aux essais dans des conditions d'environnement simulées jusqu'à ce que tous les composants aient péri, ou au moins une forte proportion d'entre eux. On mesure la durée de vie de chacun de ces composants et à partir des chiffres relevés on calcule la vie moyenne et l'écart type.

La vie moyenne estimée est :

$$\hat{M} = \frac{\sum_{i=1}^r t_i}{r}$$

et l'écart type estimé:

$$\hat{\sigma} = \left\{ \frac{\sum (t_i - \hat{M})^2}{r} \right\}^{1/2}$$

avec t_i le nombre d'heure de fonctionnement jusqu'à l'usure complète du $i^{\text{ème}}$ composant, et r le nombre de composant atteint par l'usure.

Pour les essais tronqués les estimations de $\hat{\sigma}$ et \hat{M} sont données par :

$$\hat{\sigma} = S = \frac{\sum_{i=1}^{n-a} (t_0 - t_i)}{n-a} g(z)$$

$$\hat{M} = t_0 + ZS$$

avec: a : nombre de composants sur n , mis à l'essai, vivants à l'instant d'interruption t_0 .

$(n - a)$: nombre de composants tombés en panne par usure durant l'essai.

t_i : durée de vie d' $i^{\text{ème}}$ composants.

$$g(z) = \frac{n-a}{a\psi(z) - (n-a)z}$$

La valeur de z en générale négative s'obtient par des tables: (réf: A.HALD statistical Tables and Formulas - John Weilly and sé 1952 ou Statistical Theory With Engineering Applications. - à partir des valeurs h et y telle que h représente l'estimation du degré de troncature.

$$h = a/n.$$

$$Y = \frac{(n-a) \sum_{i=1}^{n-a} (t_0 - t_i)^2}{2 \sum_{i=1}^{n-a} (t_0 - t_i)^2}$$

$\psi'(z)$ s'obtient aussi par des tables connaissant la valeur de z .

Pour réduire la variance de M et S il ne faut pas interrompre l'essai avant ou moins 70 % de l'échantillon ait péri.

2.3 - Intervalle de confiance de la vie moyenne:

Si l'on prend plusieurs échantillons de taille n , et qu'on calcule pour chaque échantillon la vie moyenne estimée, on constate que la distribution de ces valeurs estimées autour de la vraie valeur suit la même loi que la distribution des durées de vie mesurées ayant servi pour trouver la valeur estimée.

Les durées de vie se distribuent autour de M avec un écart type σ . La dispersion des estimations autour de la vraie valeur M est nécessairement plus faible que la dispersion des durées de vie t_i autour de M . Elles se distribuent autour de la vraie valeur avec un écart type $\sigma' = \sigma/\sqrt{n}$ on l'appelle erreur type. Donc la loi de l'estimateur \hat{M} de la vie moyenne est une loi normale de moyenne M et de variance $\sigma^2/n = \sigma'^2$

alors $K = \frac{\hat{M} - M}{\sigma/\sqrt{n}} \rightarrow \mathcal{N}(0, 1)$

a) Intervalle de confiance bilatéral :

Si K est le nombre d'écart type σ' à prendre à partir de la moyenne estimée \hat{M} et si l'on désigne l'aire d'une queue de distribution par $\alpha/2$ correspondant à $K = K_{\alpha/2}$, l'aire située dans l'intervalle $\pm K_{\alpha/2}$ sera $(1 - \alpha)$ et le niveau de confiance correspondant sera $100(1 - \alpha)\%$.

ce qui permet d'écrire :

$$P \left[-K_{\alpha/2} \leq \frac{\hat{M} - M}{\sigma'} \leq K_{\alpha/2} \right] = 1 - \alpha$$

$$\implies P \left[\hat{M} - K_{\alpha/2} \sigma' \leq M \leq \hat{M} + K_{\alpha/2} \sigma' \right] = 1 - \alpha$$

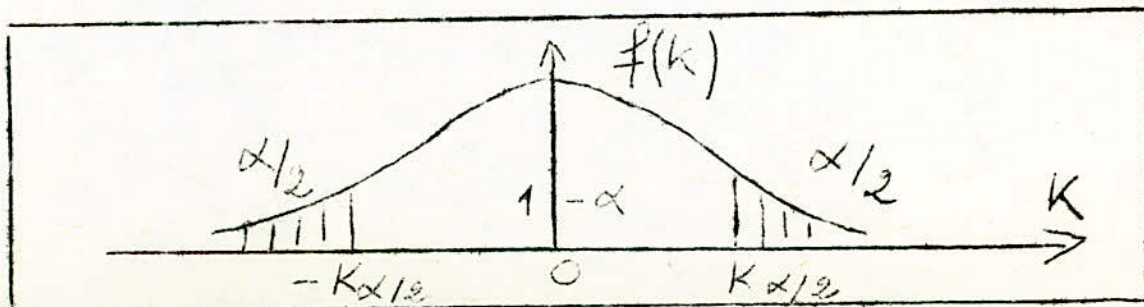
$$\implies \text{la valeur de } M \text{ est comprise entre } \hat{M} - K_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \text{ et } \hat{M} + K_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

avec un niveau de confiance de $100(1 - \alpha)\%$.

La limite inférieure de l'intervalle de confiance est :

$$M_i = \hat{M} - K_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

La limite supérieure de l'intervalle de confiance est :



$$M_s = \hat{M} + K \alpha / 2 \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

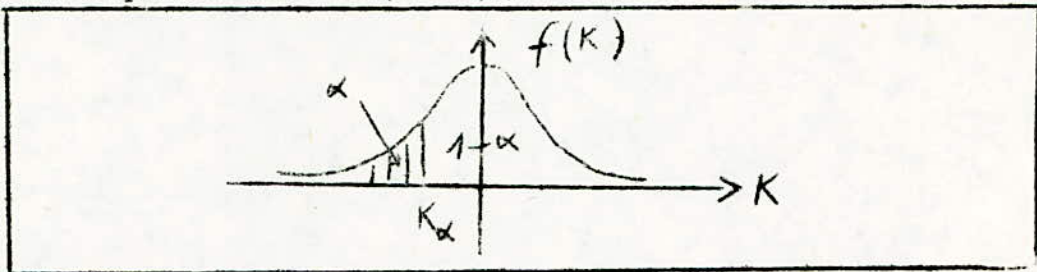
En fiabilité on s'intéresse plus à la limite inférieure de l'intervalle de confiance car elle permet de déterminer la période de remplacement du matériel $T_0 = M_i - K_\alpha \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ (K correspond au niveau de fiabilité exigé) pour s'assurer qu'un système ne tombera pas en panne par usure d'un élément.

b) Intervalle de confiance unilatéral :

Il s'agit d'assurer au client que la vie moyenne d'un composant est au moins égale à une limite inférieure avec une probabilité $1 - \alpha$.

α est le risque que la vraie valeur de la vie moyenne M est inférieure à cette limite inférieure.

Si K est le nombre d'écart type à prendre à partir de la moyenne estimée \hat{M} et si l'on désigne l'aire de la queue inférieure de distribution par α correspondant à $K = K_\alpha$ l'aire restante sera $1 - \alpha$ et le niveau de confiance correspondant sera $100(1 - \alpha) \%$



ce qui permet d'écrire :

$$P \left[\frac{\hat{M} - M}{\sigma'} \geq K_\alpha \right] = 1 - \alpha$$

$$\implies P \left[M \geq \hat{M} - K_\alpha \sigma' \right] = 1 - \alpha$$

$\implies M$ est supérieure ou égale à $\hat{M} - K_\alpha \sigma'$ avec une probabilité $(1 - \alpha)$

La limite inférieure de l'intervalle de confiance unilatérale est donc :

$$M_u = \hat{M} - K_\alpha \sigma / \sqrt{n}$$

Il faut donc que \hat{M} obtenue à l'issue du test d'acceptation satisfasse à l'inégalité $\hat{M} \geq M_u + K_\alpha \sigma / \sqrt{n}$, sinon M est trop faible et on ne peut garantir au niveau de confiance $100(1 - \alpha) \%$ que M soit au moins égal à M_u .

Ces formules sont valables si n , taille de l'échantillon, est au moins égale à 25 sinon on ne peut plus assimiler S à σ (S est l'estimateur de σ et $= \left[\frac{\sum (t_i - M)^2}{n - 1} \right]^{1/2}$) et il faut utiliser d'autres formules

basées sur la loi de STUDENT de variable aléatoire $t = \frac{\hat{M} - M}{S / \sqrt{n}}$ (formule

semblable à celle de la variable aléatoire réduite K de la loi normale utilisée précédemment, seulement σ est remplacée par S).

Pratiquement, il suffit de remplacer $K_{\alpha}/2$ et K_{α} de la loi normale par $t_{\alpha/2, n-1}$ et $t_{\alpha, n-1}$ données par la table de STUDENT \implies

a) - Intervalle de confiance bilatéral :

$$M_i = \hat{M} - t_{\alpha/2, n-1} S/\sqrt{n}$$

$$M_s = \hat{M} + t_{\alpha/2, n-1} S/\sqrt{n}$$

b) - Intervalle de confiance unilatéral :

$$M_u = \hat{M} - t_{\alpha, n-1} S/\sqrt{n}$$

Pour le test d'acceptation, il faut que $\hat{M} \geq M_u + t_{\alpha, n-1} S/\sqrt{n}$.

Pour déterminer la période de remplacement, pour un échantillon de petite taille, on doit remplacer σ de la relation $T_0 = M_i - K \sigma$ par la limite supérieure S_u de son intervalle de confiance.

Le calcul de l'intervalle de confiance pour l'écart type est basé sur la distribution de χ^2 .

Le rapport $(n-1)S^2/\sigma^2$ suit une loi de χ^2 à $(n-1)$ degrés de liberté.

Pour un niveau de confiance $100(1-\alpha)\%$ on a :

$$P(\chi_{\alpha}^2; n-1 \leq \frac{(n-1)S^2}{\sigma^2}) = 1 - \alpha$$

$$\implies P(\sigma^2 \chi_{\alpha}^2; n-1 \leq (n-1)S^2) = 1 - \alpha$$

$$\implies P(\sigma \leq S \sqrt{\frac{n-1}{\chi_{\alpha}^2; n-1}}) = 1 - \alpha$$

$$\implies S_u = S \sqrt{\frac{n-1}{\chi_{\alpha}^2; n-1}}$$

et la période de remplacement est $T_0 = \hat{M} - k S_u$

Dans le cas où le test est tronqué et après détermination de la vie moyenne estimée \hat{M} et l'écart type estimé S , on utilise la méthode HALD* pour trouver l'intervalle de confiance de la vie moyenne. Cette méthode faisant intervenir un facteur de correction $\mu_{11}(z)$ donné par une table**.

L'écart type corrigé $\sigma = S/\sqrt{n} \cdot \mu_{11}(z)$

La limite inférieure de l'intervalle de confiance dans le cas unilatérale devient alors :

$$M_u = \hat{M} - \frac{K_{\alpha} S}{\sqrt{n}} \mu_{11}(z)$$

* A. HALD Statistical Theory With Engineering Applications

** A. HALD $\mu_{11}(z)$ donné dans des tables dans: A. HALD : Statistical Tables and Formulas John Wiley and son N.Y. 1952.-

VI - CONTRAINTES ET TAUX DE PANNES DES COMPOSANTS ELECTRONIQUES:

La fiabilité des composants dépend beaucoup des contraintes de fonctionnement et d'environnement. Il n'existe pas des lois rigoureuses qui régissent les variations de la fiabilité suivant les régimes de fonctionnement, mais quand même il existe quelques formules empiriques avec lesquelles on peut estimer la fiabilité.

Mais si l'on veut connaître la fiabilité avec précision, il faut essayer les composants sous les mêmes contraintes qu'en fonctionnement normal. On appelle cette méthode: mesure de fiabilité en laboratoire par simulation des contraintes.

Les composants à comportement exponentiel ne se détériorent pas au cours du temps et ne subissent que des pannes purement accidentelles. Ils sont conçus pour résister à certaines contraintes nominales au cours du fonctionnement. Lorsqu'une certaine population de composants est soumise à des conditions nominales, on détermine à partir des calculs statistiques un taux de pannes nominal correspondant aux composants.

Lorsqu'on augmente les contraintes ou certaines d'entre elles, au dessus du niveau nominal, le taux de pannes des composants augmente assez rapidement par rapport au taux de pannes nominal. Inversement, il décroît lorsque les contraintes sont ramenées au dessous de leur niveau nominal.

Il existe 2 catégories de contraintes :

- a) - Contraintes d'environnement telle que la température, la pression, l'humidité, les vibrations mécaniques, les chocs...
- b) - Contraintes de fonctionnement, elles sont principalement les régimes transitoires en tension et en courant, ainsi que les températures de fonctionnement élevées qui peuvent provoquer des pannes accidentelles au cours de la période de vie utile des composants électroniques. Elles sont d'origine électrique, exemple: tension, courant, fréquence, dissipation de chaleur...

Conformément à une pratique très répandue en fiabilité, la variation du taux de pannes des composants en fonction de la température et des contraintes électriques suit la loi d'Arrhénius et la loi de la cinquième puissance. La loi d'Arrhénius dit que la vitesse des réactions chimiques en solution, double pour un accroissement de température de 10°C. A partir de là on a : le taux de pannes des composants qui double pour un accroissement de température de 10°C.

La loi de la 5^{ème} puissance exprime que la vie de certains types de condensateurs est inversement proportionnelle à la puissance 5 de la différence de potentiel. D'où le taux de pannes des composants est proportionnel à la puissance 5 de la tension de fonctionnement.

Il est plus proche de la réalité d'admettre une loi en puissance n pour l'influence de la contrainte de fonctionnement et une règle de doublement du taux de panne pour une augmentation de la contrainte d'environnement.

$$\text{Soit } \lambda_2 = \lambda_1 \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^n K^{(T_2 - T_1)}$$

avec λ_1 taux de défaillance pour une tension de fonctionnement V_1 à une température T_1 .

λ_2 est le taux de défaillance que peut avoir le composant à une température T_2 sous une tension de fonctionnement V_2 .

n et K des constantes caractéristiques du type et de la marque des composants. Habituellement K prend les valeurs entre 1,02 et 1,15 et n entre 4 et 10. Elles sont déterminées expérimentalement comme suit:

On soumet les composants à la tension nominale V et on effectue un essai pour mesurer le taux de pannes λ_1 à la température ambiante T_1 , et un autre essai à la température nominale T_2 pour mesurer le taux de panne λ_2 .

$$\text{On aura: } \frac{V_2}{V_1} = \frac{V}{V} = 1 \text{ et } \lambda_2 = \lambda_1 K^{(T_2 - T_1)}$$

$$\implies \ln K^{(T_2 - T_1)} = \ln \lambda_2 - \ln \lambda_1 \implies \boxed{\ln K = \frac{\ln \lambda_2 - \ln \lambda_1}{T_2 - T_1}}$$

Ce qui nous donne K à partir de cette formule.

Puis on effectue un 3^{ème} essai à la température ambiante T_1 mais en appliquant une tension égale à la moitié de la tension nominale, on obtient un taux de pannes λ_3 .

$$\text{Dans ce cas } \frac{V_2}{V_1} = 1/2 \text{ et } T_2 - T_1 = 0$$

$$\implies \lambda_3 = \lambda_1 (1/2)^n \implies \ln 2^{-n} = \ln \lambda_3 - \ln \lambda_1$$

$$\implies -n \ln 2 = \ln \lambda_3 - \ln \lambda_1 \implies \boxed{n = \frac{\ln \lambda_1 - \ln \lambda_3}{\ln 2}}$$

Connaissant K et n, on peut tracer toute la famille de courbes donnant les taux de pannes en fonction de la tension appliquée et de la température.

A partir de ces courbes, on peut lire directement le taux de pannes pour une tension de fonctionnement donnée allant de 10 % à 100 % de la tension nominale et pour une température de fonctionnement donnée située dans les limites acceptables. Cependant il faut faire attention car K et n ne sont pas absolument constant pour tout le domaine de température et de tension. On les suppose constants tant qu'on reste dans les limites de fonctionnement normal. Aussi les autres contraintes de nature mécanique peuvent augmenter le taux de pannes mais avec des techniques fiables d'assemblage: attache des pastilles, soudure des liens, enrobages, scellement hermétique... On peut réduire beaucoup l'effet de ces contraintes sur le taux de pannes purement accidentel.

Finalement, avant d'effectuer les essais et tracer les courbes, l'ingénieur chargé de l'étude de fiabilité doit avoir une bonne connaissance des niveaux probables de contraintes où doit être utilisé le composant.

VII - ESSAIS DE FIABILITE :

Au cours de l'utilisation normale, il ne doit exister que 2 types de pannes, accidentelles et usures. Le paramètre important pour la détermination de la fiabilité est la mesure du MTBF. Pour estimer la fiabilité d'un composant, il faut connaître avec le maximum de précision la vraie valeur de m qui sépare les avaries accidentelles de même que la valeur vraie de la vie moyenne M et de l'écart type σ des défaillances par usure. M et σ permettent d'établir un programme de remplacement des pièces et la connaissance de m permet de calculer la probabilité d'avarie accidentelle.

En pratique, l'estimation du MTBF peut se faire de 2 types d'essais.

- Les essais censurés
- Les essais tronqués.

a) - Essais censurés :

On dit qu'un essai est censuré si l'on fixe le nombre de panne r à l'avance et on arrête l'essai à l'instant même ou se produit la $r^{\text{ième}}$ panne.

On distingue 2 catégories d'essais tronqués.

- Essai tronqué sans remplacement
- Essai tronqué avec remplacement:

b) - Essais tronqués :

On dit qu'un essai est tronqué si l'on fixe la durée de l'essai à l'avance.

On distingue 2 catégories d'essais tronqués :

- Essai tronqué sans remplacement
- Essai tronqué avec remplacement.

Dans notre cas les essais tronqués et les essais censurés donnent les mêmes résultats.

1) - Estimation du MTBF des composants : Méthodes sans remplacement.

Il faut limiter la durée de l'essai de façon à pouvoir admettre qu'il n'y avait pas encore eu de défaillances dues à l'usure. Pour cela, on doit arrêter l'essai à l'apparition de la $r^{\text{ième}}$ panne et l'on fait la somme du temps de fonctionnement de tous ^{les} composants.

$$T = t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_r + (n - r) t_r .$$

T représente le temps total accumulé par l'ensemble de la population.

EPSTEIN a montré que si l'on met une population de n composants à l'essai et si r d'entre eux périssent aux instants t_1, t_2, \dots, t_r avec pour origine des temps le début de l'essai, que l'on interrompt à l'instant t_r de la $r^{\text{ième}}$ panne où $(n - r)$ composants donnent encore satisfaction, alors la meilleure estimation du MTBF de la population est donnée par l'expression théorique.

$$\hat{m} = \frac{\sum_{i=1}^r t_i + (n-r) t_r}{r}$$

Pour éviter d'avoir pendant l'essai des défaillances dues à l'usure, il faut choisir une durée t_r assez petite devant le temps au bout duquel se manifestent les phénomènes d'usure.

2 ème possibilité d'estimation du MTBF pour la méthode sans remplacement :

Si l'on ne mesure pas exactement les instants où surviennent les défaillances accidentelles et si l'on interrompt l'essai au bout du temps t_r correspondant à la r ième panne sur un effectif de n composants au départ, on peut obtenir une estimation du MTBF à partir de la probabilité de défaillance $D(t)$.

on a : $D(t) = \frac{r}{n} = 1 - e^{-tr/m}$ =====>

$$r = n - n e^{-\frac{tr}{m}} \implies n - r = n e^{-\frac{tr}{m}} \implies$$

$$\ln(n - r) = \ln n - \frac{tr}{m} \implies \ln n - \ln(n - r) = tr / m$$

d'où l'on tire l'estimation du MTBF :

$$\hat{m} = \frac{tr}{\ln n - \ln(n - r)}$$

soit

$$\hat{m} = \frac{tr}{\ln \left(\frac{n}{n-r} \right)}$$

Connaissant t_r durée de l'essai et le nombre r de défaillances l'estimation de m sera donnée par la formule ci-dessous.

Le taux de défaillances accidentelles par heure sera :

$$\lambda = \frac{1}{m} = \frac{\ln n - \ln(n - r)}{tr}$$

soit

$$\lambda = \frac{\ln \left(\frac{n}{n-r} \right)}{tr}$$

Ce type d'essai s'appelle méthode de survie.

Il a l'avantage de ne pas demander le remplacement des composants défaillants et de ne pas exiger le relevé des instants où surviennent les défaillances. Cette méthode ne demande pas une surveillance continue et peut s'effectuer jour et nuit sans interruption.

Certains fabricants de pièces détachées chiffrent la fiabilité des composants d'après cette méthode du taux de survie. Ils garantissent que le nombre de défaillance des composants n'exèdera pas un certain pourcentage au bout d'un temps t dans des conditions fixées d'environnement et de fonctionnement. Cela revient à garantir que le taux de défaillance λ ne dépasse pas la valeur qu'on a pu calculer.

2) - Estimation du MTBF des composants: Méthode avec remplacement.

On remplace les composants qui tombent en panne durant l'essai par d'autres composants neufs afin de conserver le nombre d'éléments survivants

$$N_1 = N_0.$$

Si l'on interrompt l'essai au moment de l'apparition de la $r^{\text{ième}}$ panne, le temps total accumulé par les N_0 composants sera: $T = N_0 t$. Et, d'après le théorème d'Epstein l'estimation du MTBF est:

$$\hat{m} = \frac{N_0 t}{r} = \frac{\text{temps accumulé par les } N_0 \text{ composants}}{\text{nombre de panne}}$$

N_0 : effectif constant tout au long de l'essai.

$$\hat{m} = \frac{N_0 t}{r} \quad / \quad \text{et le taux de défaillance est :}$$

$$\lambda = 1/\hat{m} = \frac{r}{N_0 t}$$

Cette méthode s'utilise rarement en laboratoire car elle exige une surveillance constante pour remplacer les éléments tombant en panne. C'est une méthode coûteuse. Cependant, c'est une méthode relativement rapide lorsque la taille de l'échantillon n'est pas très élevée. Elle s'utilise souvent pour évaluer la fiabilité des éléments d'après les informations recueillies sur un ensemble de matériels en exploitation.

-IX- Notion de risques :

1°)- Définition des risques de l'utilisateur et fournisseur:

Dans le cas des essais par variable en supposant que la distribution des intervalles de temps entre défaillance est exponentielle on a un cahier des charges qui impose un M.T.B.F pour un lot égal à m_1 . On estime m_1 par un prélèvement d'un échantillon, au hasard, du lot.

On pose l'hypothèse H.1 : " le lot est conforme à la norme m_1 ". l'échantillon permet de calculer \hat{m} avec une certaine probabilité $(1-\alpha)$ pour que \hat{m} soit supérieur ou égal à m_1 .

$$P(\hat{m} \geq m_1) = 1 - \alpha$$

et inversement

$$P(\hat{m} < m_1) = \alpha$$

= risque du fournisseur de se voir refuser par l'utilisateur un lot conforme (risque de première espèce).

On appelle H.2, l'hypothèse :

" le lot n'est pas conforme à la norme m_1 "

On calcule \hat{m} au moyen de l'échantillon et on a une certaine probabilité β pour que $\hat{m} \leq m_2$

$$P(\hat{m} \leq m_2) = \beta$$

β = risque de l'utilisateur d'accepter un lot non conforme (risque de 2° espèce).

En résumé, on a :

Fournisseur	Probabilité de se voir refuser par l'utilisateur un <u>lot conforme</u> (risque du fournisseur).	α
	Probabilité de se voir refuser par l'utilisateur un lot non conforme.	$1 - \beta$
Utilisateur	Probabilité d'accepter un <u>mauvais lot</u> (risque de l'utilisateur.)	β
	Probabilité d'accepter un bon lot.	$1 - \alpha$

2°)- Comparaison du MTBF d'un lot à une valeur contractuelle donnée:

2.1)- Position du problème :

On dispose d'un lot qu'on désire l'accepter si son MTBF est supérieur à une valeur contractuelle m_1 fixée; le refuser sinon. Comment faire alors ?.

Les résultats auxquels on va aboutir reposent sur des risques:

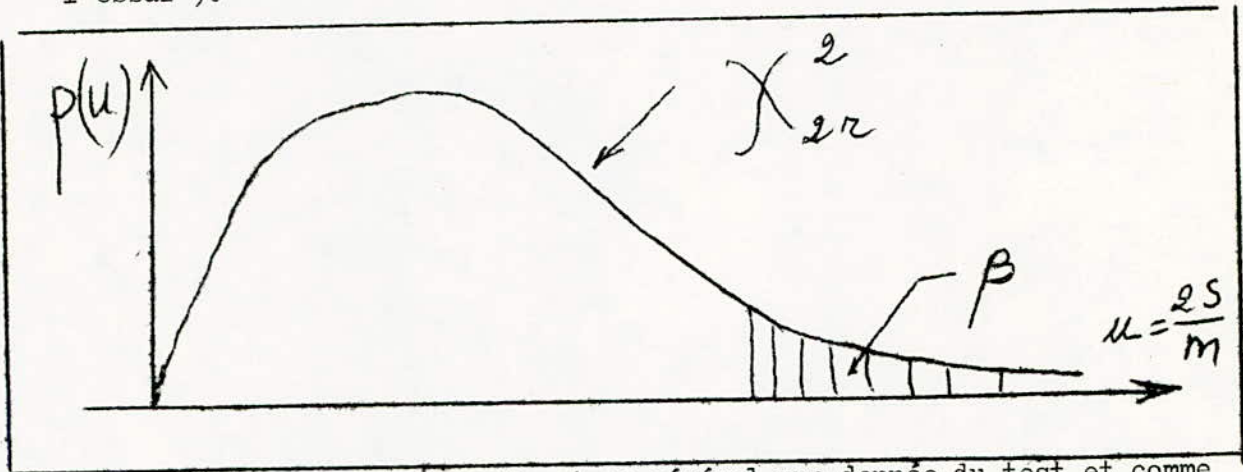
$(1 - \alpha)$ = probabilité d'accepter le lot
 et quant $m = m_0$

β = probabilité de rejeter le lot
 quant $m = m_1$.

La procédure qu'on va exposer s'applique aux tests avec et sans remplacement.

2.2)- Essai censuré à r défaillances :

Essayons d'établir une règle d'acceptation. Sachant que d'après le théorème d'Epstein, la variable aléatoire $u = \frac{2S}{m}$ suit une loi χ^2 à $2r$ degrés de liberté. (avec S temps accumulé par les n composants soumis à l'essai).

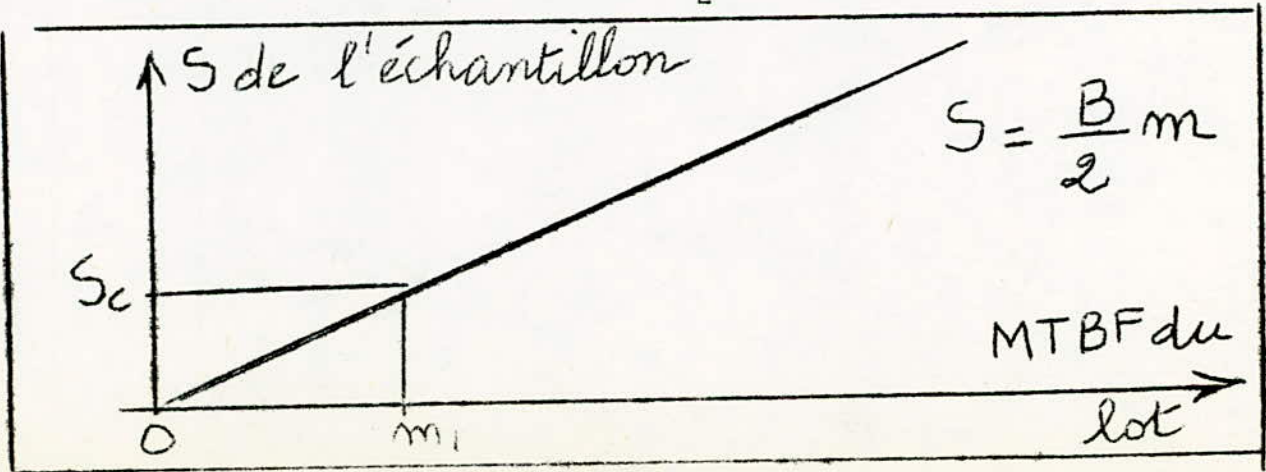


Le risque β est en général une donnée du test et comme

$$\beta = \int_B^{\infty} p(u) du \quad \text{permet par l'usage de}$$

La table de χ^2 de déterminer u

Considérons la droite d'équation $S = \frac{B}{2} m$



$$\text{Si } m = m_0 \implies S_c = \frac{B}{2} m_0$$

Il est pratiquement très rare pour qu'un lot de $m < m_0$ donne $S > S_c$

Ainsi on décide après mise à l'épreuve de n éléments ($n \gg r$) dans un essai censuré à r défaillances et où S_e la durée totale de fonctionnement effectuée par les n éléments.

d'accepter le lot si $S_e > S_c$

de refuser le lot si $S_e < S_c$

2.3)- Courbe d'efficacité du test :

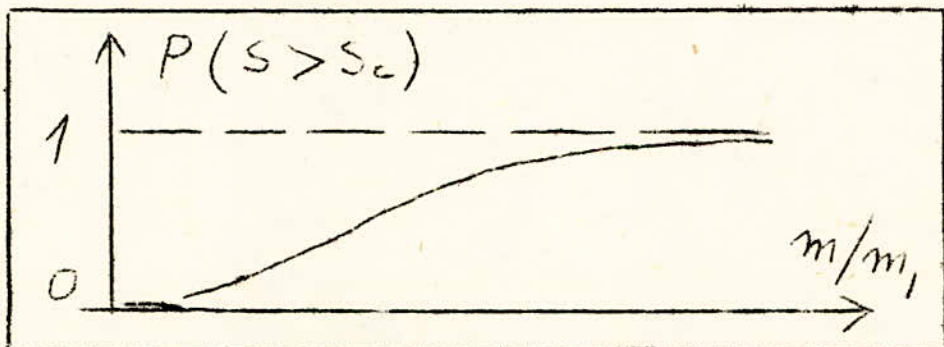
La probabilité d'acceptation d'un lot de $MTBF = m$ est égale à :

$$P(S > S_c) = P\left(u > \frac{2S_c}{m}\right) = P\left(u > B \frac{m_0}{m}\right)$$

$$\text{soit } P(S > S_c) = 1 - \frac{\int_0^{B \frac{m_0}{m}} \chi^2_{2r} \, dx}{\int_0^{\infty} \chi^2_{2r} \, dx}$$

où $\chi^2(u)$ désigne la fonction de répartition de χ^2 à $2r$ degrés de liberté.

Donc connaissant m on peut calculer la probabilité d'accepter le lot, d'où la courbe d'efficacité :



Ainsi tout lot présentant un échantillon n à l'essai censuré à r peut donner toujours une durée de fonctionnement $S > S_c$.

$P(S > S_c)$ croît avec m

Ainsi l'utilisateur pourra toujours être satisfait au profit du fournisseur qui l'est moins.

Et c'est dans le but de satisfaire les deux qu'il faut considérer deux valeurs m_0 et m_1 auxquelles on associe deux risques α et β tels que :

$$(1 - \alpha) = \text{Probabilité d'accepter un lot où } m \gg m_0$$

β = risque de l'utilisateur

et

m_0 = MTBF spécifié.

m_1 = MTBF minimum acceptable.

2.4)- Pratique des tests censurés :

Les données du test étant $r, m.1, \alpha$ et β . On doit utiliser la table de χ^2 pour trouver m_0 et S_c .

Toutefois ne serait-il pas plus intéressant d'utiliser les tables donnant r et $\frac{S_c}{m.0}$ (ou $\frac{S_c}{m.1}$) en fonction de α, β et $\frac{m^0}{m.1}$?.

Cependant il se peut que les risques α et β ne soient pas rigoureusement égaux aux risques d'hypothèse car on doit avoir :

$$\frac{m.1}{m_0} = \frac{A}{B} \qquad \frac{A}{2} = \text{pente de } S = \frac{Am}{2}$$

$$\frac{B}{2} = \text{pente de } S = \frac{Bm}{2}$$

Le choix de α et β doit faire l'objet de négociation entre le fournisseur et l'utilisateur car c'est ce choix qui va conditionner la suite du test.

Ainsi on possède sur le test les informations :

- (α
- (β
- (n et la procédure
- (r
- ($m.1$

et on veut obtenir des informations sur :

- (S_c : durée critique du fonctionnement cumulée.
- (m_0 : MTBF associé à α
- ($E(tr)$: durée moyenne de l'essai pour constater la r ième défaillance.

2.5)- Essais de durée tronquée par S :

On peut limiter la durée du test par S (durée cumulée), et voir si le MTBF du lot répond à une valeur contractuelle $m.1$.

Et connaissant $m.1$ (MTBF minimale acceptable).

β (risque de l'utilisateur associé à $m.1$) et C (nombre de pannes à ne pas dépasser), on détermine la durée S cumulée comme suit :

On pose :

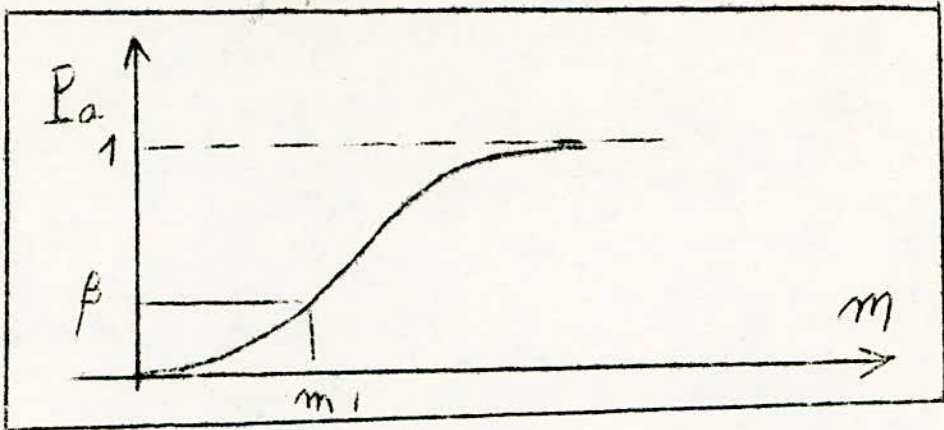
P_a = Probabilité pour que l'échantillon extrait du lot de MTBF m présente C ou moins pannes pendant la durée S

P_a = probabilité que le lot de MTBF m soit accepté.

Par définition, le lieu des points $M(m, P_a)$, quand m est vraie, représente la courbe d'efficacité du test.

... dit par ... :

Cette courbe d'efficacité doit passer par M.1 ($m \cdot 1, \beta$) comme :



$$P(r < c) = \beta$$

le premier terme de cette expression peut s'écrire

$$P(r \leq c) = \sum_{r=0}^c \exp\left(-\frac{S}{m_1}\right) \frac{\left(\frac{S}{m_1}\right)^r}{r!} = \int_0^{\frac{2S}{m_1}} \frac{u^c}{c!} \exp(-u) du$$

On pose :

$$c + 1 = \frac{\nu}{2} \quad \text{et } u = \frac{\chi^2}{2}$$

on a

$$P(r < c) = \int_{\frac{2S}{m_1}}^{\infty} \exp\left(-\frac{\chi^2}{2}\right) \frac{(\chi^2)^{\frac{\nu}{2} - 1}}{2^{\nu/2} \Gamma\left(\frac{\nu}{2}\right)} d(\chi^2)$$

on reconnaît la loi χ^2 à $2(c + 1)$ degrés de liberté.

$$\text{ainsi } P(r < c) = \int_{\frac{2S}{m_1}}^{\infty} p(\chi^2) d\chi^2$$

soit :

$$\int_{\frac{2S}{m_1}}^{\infty} p(\chi^2) d\chi^2 = \beta$$

et connaissant B et C on peut déterminer à l'aide de la table de χ^2 la valeur de $\frac{2 \cdot S}{m \cdot 1}$ c'est à dire de S puisqu'on connaît aussi la valeur de $m \cdot 1$.

si on pose B cette valeur on aura :

$$S = \frac{B \cdot m \cdot 1}{2}$$

en conclusion :

on tronque l'essai à une durée cumulée égale à S et :

on accepte le lot si $r \leq C$

on rejette le lot si $r > C$

Calcul de m_0 :

Sur les courbes d'efficacité précédente si on considère le point :

$$M(1 - \alpha, Pa)$$

on aura

$$\sum_{r=0}^C \exp\left(-\frac{S}{m_0}\right) \cdot \frac{(S/m_0)^r}{r!} = 1 - \alpha$$

de même que précédemment on peut écrire que :

$$\alpha = \int_0^A p(\chi) d\chi$$

$p(\chi)$ étant la densité de distribution de χ à $2(C+1)$ degrés de liberté. A l'aide de la table de χ on trouve A d'où :

$$\frac{A m_0}{2} = S \Rightarrow m_0 = \frac{2S}{A}$$

$$\text{soit } m_0 = \frac{B}{A} m \cdot 1$$

On peut considérer le cas où l'on possède le point fournisseur $M \cdot 1(m_1, B)$ et le point acheteur $M_0(m_0, (1 - \alpha))$ le problème maintenant est de trouver C et S.

$$\text{Or } \forall C \text{ on a toujours } \frac{m_0}{m \cdot 1} = \frac{B}{A}$$

Dans la table de χ on cherche la valeur la plus voisine du rapport $\frac{m_0}{m \cdot 1}$ et on en déduit la solution.

Si la valeur trouvée dans la table n'est pas exactement égale à $\frac{m_0}{m \cdot 1}$ la courbe d'efficacité ne passera pas rigoureusement par les deux points M_0 et $M \cdot 1$.

Dans ce cas on essayera de la faire passer par un des points et seulement au voisinage de l'autre.

2.6)- Essais tronqués à T :

La différence entre cet essai et le précédent est que la valeur du temps au bout duquel on arrête l'essai était prédéterminée par les données du test tandis que dans ce cas on commence le test à l'instant 0 et on l'arrête après un temps T. La détermination des paramètres du test tronqué à T est plus difficile que dans le cas précédent car elle se fait par extrapolation.

2.6.1)- Cas où l'essai d'effectue avec remplacement :

On considère la valeur u de densité

$$p(u, k) du = \exp\left(-\frac{u}{2}\right) \frac{u^{k-1}}{2^k \Gamma(k)} du \quad (u > 0, k > 1)$$

On peut calculer au moins deux valeurs A et B telles que :

$$\int_0^A p(u) du = \alpha \quad \text{et} \quad \int_B^{\infty} p(u) du = \beta$$

et on trace dans le plan (u, k) les liens de A et B quand k varie et cela en supposant que k n'est pas entier.

On peut toutefois extrapoler les résultats d'un test censuré et dire que :

$$A_k < \frac{2S}{m} < B_k$$

d'où la méthode :

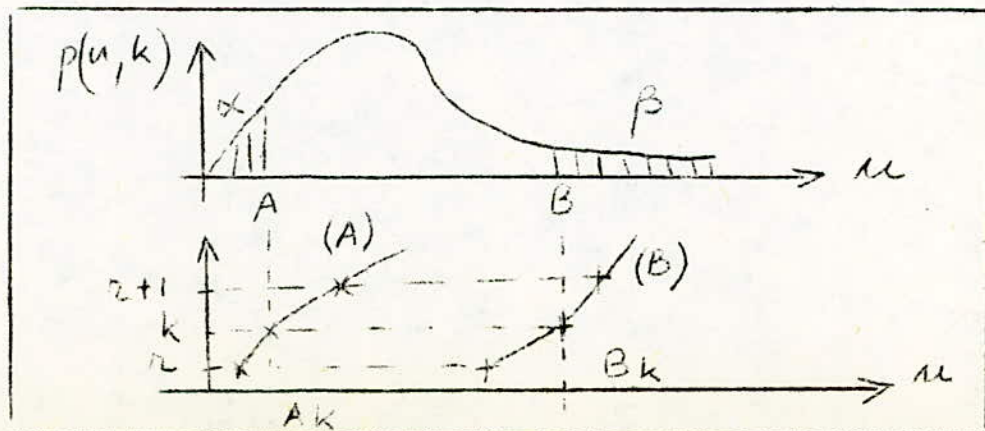
Connaissant β (risque de l'utilisateur) associé à m.1 fixée et α (risque du fournisseur) ainsi que l'effectif n constant d'éléments à l'essai et le temps T.

On calcule :

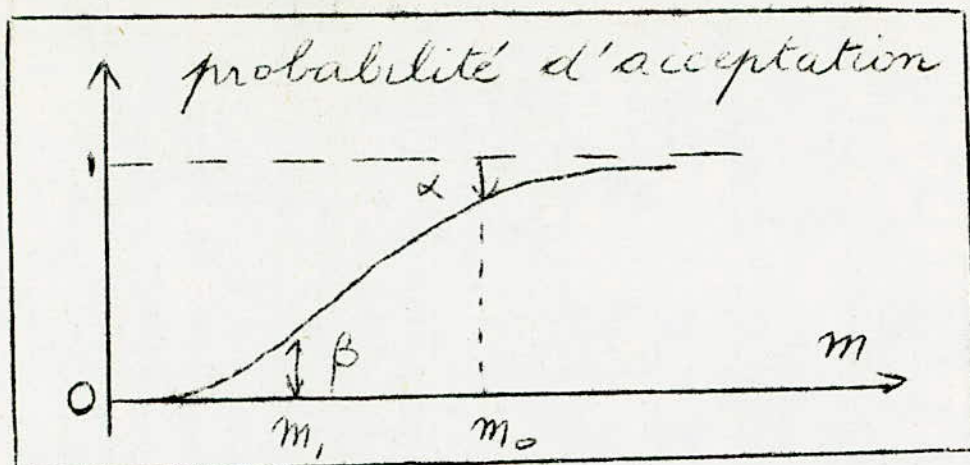
$$u.1 = \frac{2nT}{m.1} \quad \text{dont l'ordonnée sur le lieu (B) donne } k.$$

On considère alors la valeur entière par excès de k, k_c. Le MTBF est alors à 100 β % près supérieure ou égal à m.1.

Alors on accepte le lot si $n < k_c$
on le refuse sinon.



2.6.2) - Courbe d'efficacité :



On connaît par l'hypothèse : $m \cdot 1$ et β .

Il est facile alors de déterminer $m_0 = \frac{2S}{u_0}$ dont l'ordonnée est $(1 - \alpha)$

le test est alors déterminé.

2.6.3) - 2ème cas: essai sans remplacement :

Dans le cas de ces essais, il est préférable de se référer aux tables (page: 47).

2.7) - Remarques pratiques :

1°) - Pour être pratique on préfère calculer des tables en portant des données $\frac{m \cdot 1}{m}$, $\frac{T}{m_0}$, α , β et n

2°) - α , β , m_0 et $m \cdot 1$ permettent de déterminer entièrement le test car on peut trouver:

kc , n et T

n et T étant liés par

$$nT = \frac{u \cdot 1 \cdot m \cdot 1}{2}$$

on fixe la valeur entière de n et on a automatiquement T

3°) - Les tests séquentiels de fiabilité :

3.1) - But :

Le but de ces tests est de s'assurer que la fiabilité d'un matériel répond au moins à ce que l'on demande. C'est à dire qu'elle est bien égale à un seuil fixé.

3.2) - Application : Cas où la fiabilité est exponentielle:

Pour résoudre ce problème par la méthode de WALD ou des tests séquentiels, qui consiste à tester l'hypothèse:

H_0 : " $m = m_0$ " contre l'hypothèse

H_1 : " $m = m_1$ "

où m est la vraie valeur d'un paramètre d'une distribution donnée.

m_0 : est choisi dans le domaine de l'acceptation.

m_1 : est la valeur minimale fixée par une spécification.

on pose : $P(r/m)$ = probabilité d'avoir r observations au bout d'une durée t donnée pour la vraie valeur de m .

on aura alors :

$P_1 (r/m_1)$: pour m_1 valeur minimale d'acceptation.

$P_0 (r/m_0)$ pour m_0 valeur maximale choisie arbitrairement.

Comme m_1 et m_0 sont fixés, on peut calculer les probabilités

$P_1 (r/m_1)$ et $P_0 (r/m_0)$ pour une distribution donnée

et comparer ces valeurs aux résultats observés à tout instant t où on a en r pannes.

La méthode de WALD consiste à calculer à chaque étape le rapport $\frac{P_1}{P_0}$

et le comparer à deux nombres positifs fixés A et B qui représentent les niveaux des risques sur lesquels le fournisseur et l'utilisateur se sont mis d'accord.

B = risque de l'utilisateur d'accepter un matériel dont les caractéristiques sont inférieurs à la valeur minimale m_1

A = risque de fournisseur de se voir refuser un bon matériel c'est à dire dont les caractéristiques sont supérieures à la plus grande valeur m_0

si on pose β = Probabilité d'accepter un matériel mauvais.

= risque de l'utilisateur

α = probabilité de refuser un matériel satisfaisant.

= risque du fournisseur.

donc: $(1 - \alpha)$ = probabilité d'accepter un bon matériel.

$(1 - \beta)$ = probabilité de rejeter un mauvais matériel.

on démontre que les constantes A et B sont données par

$$\boxed{A = \frac{1 - \beta}{\alpha} \qquad B = \frac{1 - \alpha}{\beta}} \quad (1)$$

en général on a :

$$B < 1 \ll A$$

c'est à dire :

$$B \ll A$$

A et B sont alors les limites des décisions sur lesquelles l'utilisateur et le fournisseur se mettent d'accord, et on a les trois décisions:

- 1° (si $P_{.1}/P_{.0} \leq B$ on accepte.
- 2° (si $P_{.1}/P_{.0} \geq A$ on refuse.
- 3° (si $B < \frac{P_{.1}}{P_{.0}} < A$ on continue le test.

En poursuivant le test on aboutit finalement à l'une des décisions acceptation ou refus du matériel. En conclusion, si on a prononcé l'acceptation conformément à la règle (1), le paramètre m est supérieur au minimum $m_{.1}$ spécifié avec une probabilité au moins égale à $(1 - \beta)$; ou bien m est supérieur à $m_{.1}$ avec un niveau de confiance minimum de $100(1 - \beta)\%$, si on a pris la décision de refus, il y a une probabilité $(1 - \alpha)$ pour que m soit inférieure à la valeur m_0 choisie.

Donc le choix des risques α et β est nécessaire et doit se faire avant de commencer le test, car ils déterminent l'efficacité du test c'est à dire le risque maximum d'aboutir à une décision incorrecte.

Ce choix influe sur la durée du test de telle sorte que plus α et β sont petits plus la durée du test est longue, pour une même fiabilité du matériel.

Pour le matériel électronique, on recommande le compromis de choisir $\alpha = \beta = 10\%$ soit :

$$A = \frac{0,9}{0,1} = 9 \text{ et } B = \frac{0,1}{0,9} = 0,111$$

Aussi plus m_0 est près du seuil imposé $m_{.1}$ plus la durée du test est longue. Ainsi n'est-il pas plus économique de prendre m_0 nettement supérieure à $m_{.1}$?. Le risque de refuser un matériel ne dépend que du choix de la probabilité α ; par contre la probabilité de refuser un mauvais matériel est d'autant plus meilleur que m_0 est grand.

Aussi ne faudrait-il pas laisser au fournisseur le choix du paramètre $m_{.0}$ afin que le risque α de celui-ci ne perd pas de sa signification? car plus $m_{.0}$ est grand plus la signification du risque α diminue et la connaissance que le fournisseur a de la fiabilité de son matériel ne le rend-il pas apte à choisir la valeur adéquate de $m_{.0}$

Les valeurs de α et β ne doivent pas être élevées sinon les constantes A et B ne sont plus données par les relations (1).

Leur détermination exacte risque de devenir alors très compliquée.

Les valeurs numériques retenues pour α , β et m_0 dépendent du test dont on dispose pour faire le test du nombre de matériel disponible; plus ce nombre est important plus vite on obtient l'information nécessaire.

Ce qui intéresse le client c'est surtout le seuil d'acceptation m_1 et le risque β d'accepter un matériel incohérent qu'il cherche à minimiser au maximum. Le problème qui se pose à chaque fois est : comment choisir m_1 ?.

Il est évident que m_1 soit au moins égal au minimum indispensable au bon fonctionnement. Toutefois, on peut faire intervenir un facteur correctif $k < 1$ si on sait par expérience qu'il y a dégradation de la caractéristique de fiabilité entre le moment de l'essai et la mise en service. Ainsi si l'élément présente une caractéristique m' à la livraison et qu'en service cette caractéristique devient km' c'est bien m' qu'il faut choisir comme valeur contractuelle sous la réserve que km' est égal au minimum indispensable. Ainsi si l'expérience montre qu'il y a une dégradation de $(1 - k)$ 100% entre l'essai et la mise en service et m_0 est le minimum indispensable, il faut imposer au fournisseur la valeur contractuelle :

$$m_1 = \frac{m_0}{k}$$

et lui exiger de prouver par un test statistique que la caractéristique de son matériel est au moins égale à m_1 avec le risque de l'utilisateur B.

On sait que la probabilité d'avoir r pannes pendant un laps de temps de fonctionnement S est d'après la loi de Poisson :

$$P(r) = \frac{\left(\frac{S}{m}\right)^r \frac{\exp\left(-\frac{S}{m}\right)}{r!}}{\quad} \quad (2)$$

le matériel étant considéré durant sa vie utile et de $MTBF = m$.

on a
$$p(r) = \frac{P_1}{P_0} = \left(\frac{m_0}{m_1}\right)^r \exp\left(-S\left(\frac{1}{m_1} - \frac{1}{m_0}\right)\right)$$

La considération $B < \frac{P_1}{P_0} < A$ s'écrit alors, en prenant les logarithmes.

$$\ln B < r \ln\left(\frac{m_0}{m_1}\right) + S\left(\frac{1}{m_0} - \frac{1}{m_1}\right) < \ln A$$

c'est à dire :

$$\frac{\ln B}{\ln \left(\frac{m_0}{m_1} \right)} + \frac{S \left(\frac{1}{m_1} - \frac{1}{m_0} \right)}{\ln \left(\frac{m_0}{m_1} \right)} < n < \frac{\ln A}{\ln \left(\frac{m_0}{m_1} \right)} + \frac{S \left(\frac{1}{m_1} - \frac{1}{m_0} \right)}{\ln \left(\frac{m_0}{m_1} \right)}$$

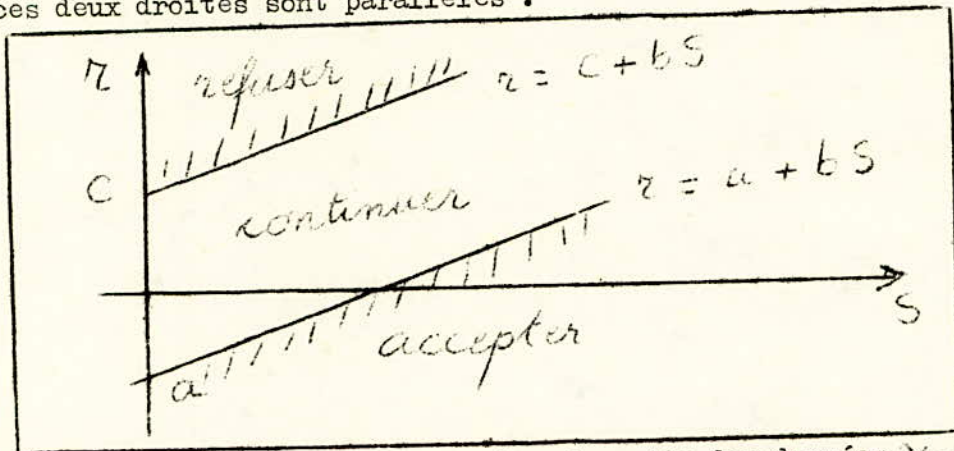
sous cette forme, cette double inégalité est susceptible d'être représentée graphiquement dans le plan (S, r).

en effet considérons les droites

$$r = a + b S \quad \text{et} \quad r = c + b S$$

avec $a = \frac{\ln B}{\ln \left(\frac{m_0}{m_1} \right)}$ $b = \frac{\left(\frac{1}{m_1} - \frac{1}{m_0} \right)}{\ln \left(\frac{m_0}{m_1} \right)}$ $c = \frac{\ln A}{\ln \left(\frac{m_0}{m_1} \right)}$

ces deux droites sont parallèles :



Le test consistera à calculer à partir des données α, β, m_1 et m_0 les trois nombres a, b, c et à tracer les droites de refus et d'acceptation. Ensuite on met le matériel à l'épreuve :

- Le matériel qui tombe en panne, le premier, à fonctionner jusqu'à t_1
- " " " " " " jusqu'à t_2
- " " " " " " jusqu'à t_3
- " " " " " " jusqu'à t_k

Dans le plan (S, r) on considère les points :

$$M_1 (t_1, 1) \quad , \quad M_2 (S_2 = t_1 + t_2, 2)$$

$$M_3 (S_3 = \sum_1^3 t_i, 3) \dots \dots M_k (S_k, k)$$

que l'on porte au fur et à mesure du déroulement du test sur le graphique.

Le test est arrêté aussitôt qu'on sort de la région d'indécision. Il peut être une acceptation ou un refus.

Variante du test :

Dans la procédure ci-dessus, la durée de fonctionnement S_k était uniquement la durée de fonctionnement cumulée accomplie par les premiers éléments défectueux :

$$S_k = \sum_{i=1}^k t_i$$

Toutefois cette procédure reste valable si pour déterminer S on cumule les durées de fonctionnement des vivants et des morts.

3.3)- Remarque :

La condition d'acceptation $H_0 : m = m_0$ s'applique aussi au cas où $r = 0$.

En effet la probabilité de ne rencontrer aucune panne dans les deux hypothèses s'écrit :

$$\frac{P_{.1}(0)}{P_{.2}(0)} = \exp \left\{ -S \left(\frac{1}{m_1} - \frac{1}{m_0} \right) \right\}$$

On doit avoir :

$$\frac{P_{.1}(0)}{P_{.2}(0)} \leq B \quad \Rightarrow \quad S \geq - \frac{\ln B}{\frac{1}{m_1} - \frac{1}{m_0}}$$

Donc la durée cumulée de service accomplie par les éléments, mis à l'épreuve dépasse, sans qu'il y ait de panne, la valeur

$$- \frac{\ln B}{\left(\frac{1}{m_1} - \frac{1}{m_0} \right)} \quad \text{on arrête l'essai et on accepte}$$

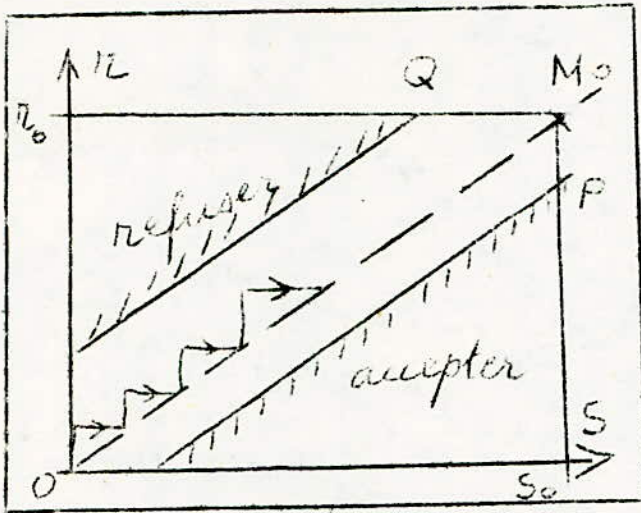
l'hypothèse H_0 contre H_1

TRONCATURES

Il est possible de rencontrer des échantillons pour lesquels on ne sort jamais, si ce n'est après un temps très long de la région d'indécision. La décision serait donc trop longue et pénible à acquiescer.

C'est pour parer à cet inconvénient qu'on opère une troncature. La ligne de cette troncature est la droite passant par l'origine et parallèle aux droites limitées ($r = b S$).

On choisit un point $M_0 (r_0, S_0)$ sur cette droite et de là on trace les parallèles aux axes r et S passant par M_0 . APSTEIN a démontré que le choix du point M_0 doit se faire quand le nombre de panne atteint 3 r.



Si le segment $M (S_n, r_n)$ traverse le segment $P M_0$ entre deux observations on accepte le lot, on refusera le lot s'il coupe $M_0 Q$.

En résumé, les tests séquentiels de fiabilité ont l'avantage de permettre de décider relativement vite si un matériel est au moins assez bon que prévu.

VIII - FIABILITE DES SYSTEMES

1) - Introduction

Dans cette partie on se propose d'étudier la fiabilité d'un système c'est-à dire d'un ensemble d'éléments groupés et utilisés d'une façon bien précise. Car après tout, il serait plus intéressant de pouvoir déterminer la fiabilité des systèmes du plus simple au plus complexe afin de concevoir des systèmes plus sûrs et de connaître à l'avance les chances de tels systèmes de répondre aux exigences de sûreté de fonctionnement.

La fiabilité d'un système dépend de la fiabilité de ses composants et se détermine au moyen des calculs de probabilités. Donc la fiabilité des éléments susceptibles d'entraîner une panne de l'ensemble est une donnée de base indispensable.

On peut dire que les calculs de fiabilité d'un système se basent sur deux opérations importantes:

- une mesure aussi précise que possible de la fiabilité de chacun de ces composants dans les conditions de fonctionnement.
- calcul de la fiabilité d'une combinaison complexe de ses composants.

2) - Notions préliminaires

- Défiabilité de mission

On appelle ainsi la probabilité $D(t, \theta)$ pour que l'élément, sans panne jusqu'à t , tombe en panne entre t et $t + \theta$

$$D(t, \theta) = 1 - \frac{F(t + \theta)}{F(t)}$$

$\frac{F(t + \theta)}{F(t)}$ étant la fiabilité de mission $F(t + \theta)$ et est donnée

$$\text{par } F(t, \theta) = \exp \left[+ \left\{ - \int_t^{t + \theta} \lambda(t) dt \right\} \right]$$

θ = durée de mission.

Dans le cas où $\lambda(t) = \lambda_0$ (fiabilité exponentielle) la défiabilité dépend seulement de θ .

et on a : $D(t, \theta) = D(\theta) = 1 - F(\theta) = 1 - \exp(-\lambda_0 \theta)$

3°) - Généralités sur la fiabilité d'un système

Supposons que l'on dispose de n éléments et posons

$F_i = P \left[[F_i] \right]$ = probabilité que l'élément d'ordre i a vécu entre t et $t + \theta$

$[F_i]$: évènement = l'élément d'ordre i a vécu entre t et $t + \theta$.

$D_i = P \left[[D_i] \right]$ = probabilité que l'élément i est tombé en panne entre t et $t + \theta$

avec $F_i + D_i = 1$

Si on suppose que la panne ou la survie d'un élément n'influe pas sur l'ensemble des autres éléments c'est-à-dire que les évènements $[F_i]$ sont indépendants. On peut alors affirmer que :

* La suite des évènements possibles est celles des termes du développement du produit.

$$\left[[F_1] + [D_1] \right] \left[[F_2] + [D_2] \right] \dots \left[[F_n] + [D_n] \right]$$

* La probabilité associée à un comportement donné s'obtient en supprimant les crochets dans l'expression de ce comportement.

La fiabilité $F_s(t, \theta)$ d'un système sera donc obtenue en dénombrant les comportements de l'ensemble favorable et en additionnant les probabilités correspondantes.

4) - Fiabilité de n éléments en série

4.1 - Définition

On dit que le système composé de n éléments est en série si la défaillance d'un élément quelconque entraîne la panne générale du système.

4.2 - Etablissement de F_s

Si F_1 est la fiabilité de l'élément n°1

c'est-à-dire sa probabilité de survivre entre t et $t + \theta$,

F_2 la fiabilité de l'élément n° 2 F_n la fiabilité de l'élément n° n .

Les évènements qui peuvent se produire sont donc les termes des produits

$$\left[(F_1) + (D_1) \right] \left[(F_2) + (D_2) \right] \dots \left[(F_n) + (D_n) \right]$$

C'est-à-dire :

$$\text{On a } (E_1) : [F_1] \dots [F_n]$$

$$(E_2) : [F_1] [D_2] \dots$$

$$\text{Ou } \left(\frac{n}{2} \right) : [D_1] [D_2] \dots [D_n]$$

Parmi ces évènements, un seul est favorable. C'est l'évènement E_1 qui exprime que pendant la durée de mission aucun élément n'est tombé en panne.

Donc $F_s =$ Probabilité pour que le système ne tombe pas en panne du-

La fiabilité du système = $P([E_s])$

puisque les événements $[F_i]$ sont indépendants

$$F_s = \prod_{i=1}^n P([F_i]) = \prod_{i=1}^n F_i$$

$$F_s = \prod_{i=1}^n F_i$$

La fiabilité du système est égale au produit des fiabilités des éléments composant le système, et, est inférieure à chacune des fiabilités des éléments.

Dans le cas particulier où chacun des éléments admet une fiabilité exponentielle on a :

$$F_s = \prod_{i=1}^n F_i = \prod_{i=1}^n \exp(-\lambda_i \theta) = \exp\left\{-\sum_{i=1}^n \lambda_i \theta\right\}$$

donc si un système est composé de n éléments en série, chacun avec une fiabilité exponentielle

* la fiabilité du système reste exponentielle

* le taux de pannes du système est donné par :

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i$$

* le M T B F du système est

$$m_s = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \lambda_i}$$

* la fiabilité du système pendant la durée de mission θ est

$$F_s(m) = \exp(-\lambda_s \theta)$$

5) - Système de n éléments en parallèles

5.1 - Définition

On dit, du point de vue de la fiabilité, qu'un ensemble de n éléments fonctionnant simultanément, constitue un système en parallèle si la panne de l'un des éléments n'entraîne pas nécessairement la panne du système.

5.2 - Fiabilité du multiplex

Un ensemble de n éléments constitue un multiplex simple si un seul élément parmi les n suffit pour assurer la continuité du fonctionnement du système entre t et $t + \theta$, quand tous les autres éléments tombent en panne.

Ainsi les évènements possibles d'un tel système sont donnés en faisant le produit.

$$\left[\left[F_1 \right] + \left[D_1 \right] \right] \left[\left[F_2 \right] + \left[D_2 \right] \right] \dots \dots \dots \left[\left[F_n \right] + \left[D_n \right] \right]$$

Autrement dit on a :

$$(E_1) : \left[F_1 \right] \left[F_2 \right] \dots \dots \left[F_n \right]$$

$$(E_2) : \left[D_1 \right] \left[F_2 \right] \dots \dots \left[F_n \right]$$

$$(E_{2^n}) : \left[D_1 \right] \left[D_2 \right] \dots \dots \left[D_n \right]$$

Parmi tous les évènements (E_i) il y'a un seul qui est défavorable. C'est l'évènement E_{2^n} c'est à dire le dernier évènement, qui exprime que tous les éléments sont tombés en panne entre t et $t + \theta$.

On peut donc écrire que :

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

donc l'infiabilité du système est inférieure à l'une quelconque des infia- bilités de chaque élément composant le système?

$$D_s < D_i \quad \forall i$$

d'où l'expression de la fiabilité totale du système

$$F_s = 1 - D_s = 1 - \prod_{i=1}^n D_i$$

Ainsi la fiabilité totale d'un système multiplex est toujours supérieure à la fiabilité de chacun des éléments du système.

$$F_s > F_i \quad \forall i$$

Le système aura alors (cf IV - 1)

$$* \quad \lambda_s = -1 \frac{dF_s}{F_s d\theta} = \text{taux instantané de pannes.}$$

$$* \quad m_s = \int_0^{\infty} F_s d\theta = \text{MTBF du système.}$$

Dans le cas usuel où chacun des éléments du système admet une fiabilité exponentielle on a :

Dans le cas des systèmes en parallèles le taux de défaillance λ_s n'est plus constant mais dépend du temps. Donc on ne peut écrire $m_s = \frac{1}{\lambda_s}$

comme dans le cas des systèmes en série.

La fiabilité du système n'est plus exponentielle.

Ainsi si les n éléments composant le système sont identiques on aura:

$$F_s = 1 - \left\{ 1 - \exp(-\lambda t) \right\}^n$$

Calcul de m_s

$$m_s = \int_0^{\infty} F_s(t) dt = \int_0^{\infty} \left\{ 1 - [1 - \exp(-\lambda t)]^n \right\} dt$$

posons $1 - \exp(-\lambda t) = u \Rightarrow du = \lambda \exp(-\lambda t) dt$

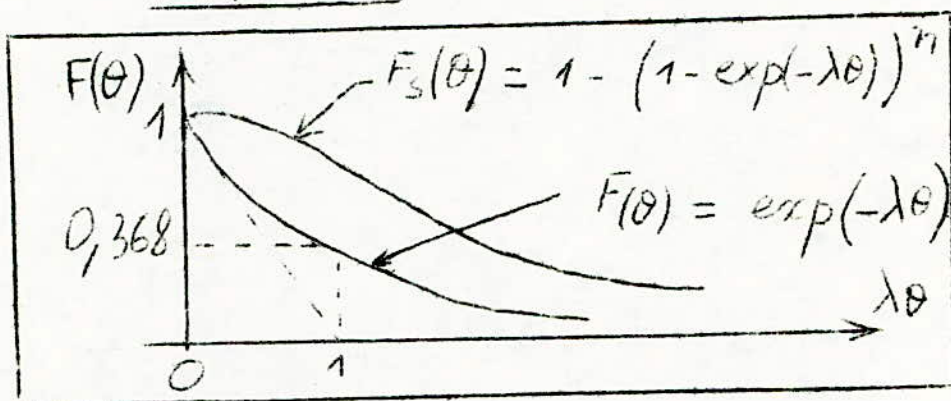
d'où $m_s = \int_0^{\infty} dt - \int_0^1 u^n \frac{du}{\exp(-\lambda t)}$

$$m_s = \frac{1}{\lambda} \int_0^1 \exp(\lambda t) du - \frac{1}{\lambda} \int_0^1 u^n \exp(\lambda t) du$$

$$m_s = \frac{1}{\lambda} \int_0^1 \frac{du}{1-u} - \frac{1}{\lambda} \int_0^1 \frac{u^n}{1-u} du$$

$$m_s = \frac{1}{\lambda} \int_0^1 \frac{u^n - 1}{u - 1} du = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=1}^n \frac{1}{i}$$

d'où $m_s = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=1}^n \frac{1}{i}$



6) - Système en série - parallèle

On peut rencontrer dans la pratique des systèmes dont la disposition des éléments n'est pas seulement en série ou en parallèle mais beaucoup plus complexe. Cependant le calcul de la fiabilité de tels systèmes peut être ramené à celui des systèmes simples.

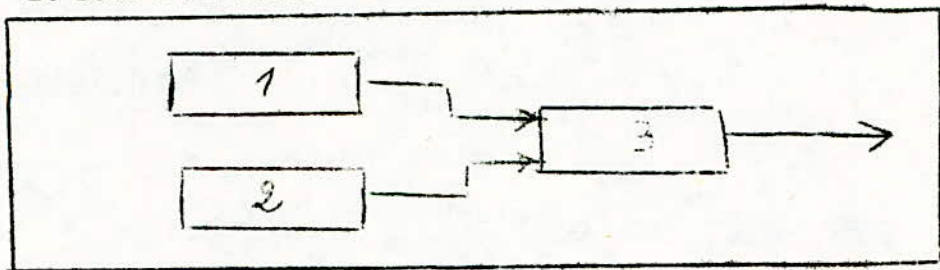
Ainsi, si le système est composé de n éléments il existe 2^n états ou événements possibles donnés par le produit.

$$\left[[F_1] + [D_1] \right] \left[[F_2] + [D_2] \right] \dots \left[[F_n] + [D_n] \right]$$

Il suffit donc de dénombrer les événements pour lesquels le système sera en bon état.

Pour fixer les idées proposons-nous l'exemple suivant:

Prenons le cas d'un système composé de deux éléments servant à la même mesure. Ces éléments sont en liaison avec un troisième élément qui joue le rôle d'un filtre d'information.



Posons F_1 , F_2 et F_3 les fiabilités de missions des éléments.

Les événements possibles sont alors le résultat du produit

$$(F_1 + D_1) (F_2 + D_2) (F_3 + D_3)$$

$$(E_1) : F_1 F_2 F_3 \quad (E_2) : D_1 F_2 F_3 \dots\dots\dots (E_8) : D_1 D_2 D_3$$

maintenant il s'agit de dénombrer les événements qui ne perturbent pas la bonne marche du système ou bien les événements défavorables suivant la facilité de l'opération.

Les états défavorables dans notre exemple sont les événements (E_i) contenant les termes D_3 et l'expression de la défiabilité du système s'écrit alors:

$$D_s = D_3 + F_3 D_1 D_2$$

d'où la valeur de la fiabilité de mission

$$F_s = 1 - D_s = 1 - D_3 - F_3 D_1 D_2$$

$$\text{soit } F_s = F_3 (1 - D_1 D_2)$$

notre système n'est d'autre que l'ensemble de deux éléments en série.



le premier élément étant constitué de deux éléments en parallèle 1 et 2 .

En conclusion

Pour calculer la fiabilité d'un système il suffit de connaître la fiabilité et la disposition de ses constituants ainsi que l'influence qu'aura la défaillance de chacun d'eux sur l'ensemble du système.

7) - Fiabilité des éléments redondants

Considérons un système dont les éléments ne fonctionnent pas tous à la fois. Seul un élément (ou groupe d'éléments) est en service tandis

que les autres éléments (ou groupe d'éléments) n'interviennent qu'en cas de pannes du précédent.

7.1 - Cas de $n + 1$ éléments identiques

On suppose que chaque élément admet une fiabilité exponentielle.

$$F(t) = \exp(-\lambda t).$$

La mission commence par le premier élément quand celui-ci tombe en panne le second le remplace et ainsi de suite jusqu'au dernier.

Posons m = durée de la mission du système et T_i = durée de mission de l'élément i ($i = 1, 2, \dots, n + 1$).

Pour que la mission soit accomplie il faut que :

$$m \geq \sum_{i=1}^{n+1} T_i$$

L'expression de la fiabilité du système s'écrit alors le complément de la fonction de distribution d'ERLANG.

$$\text{Soit : } F_s(m) = e^{-\lambda m} \left\{ 1 + \lambda m + \frac{\lambda^2 m^2}{2!} + \dots + \frac{(\lambda m)^n}{n!} \right\}$$

$F_s(m)$ n'est pas une exponentielle pure alors le taux instantané d'avarie n'est plus constant.

Le MTBF du système s'écrit :

$$m_s = \int_0^{\infty} F_s(m) dm$$

$$\text{soit } m_s = \int_0^{\infty} \left[e^{-\lambda m} \left\{ 1 + \lambda m + \frac{(\lambda m)^2}{2!} + \dots + \frac{(\lambda m)^n}{n!} \right\} dm \right]$$

$$m_s = \int_0^{\infty} e^{-\lambda m} \left(\sum_{i=0}^{n+1} \frac{(\lambda m)^i}{i!} \right) dm$$

$$\text{posons } e^{-\lambda m} = v \implies dm = -\frac{dv}{\lambda v}$$

$$\lambda m = -\ln v$$

par suite on a :

$$m_s = -\frac{1}{\lambda} \int_0^1 \sum_{i=0}^{n+1} \frac{(\ln v)^i}{i!} dv = \frac{n+1}{\lambda}$$

$$m_s = \frac{n+1}{\lambda}$$

7.2 - Éléments en attente avec fiabilités exponentielles non identiques

Dans le cas où le système est composé d' n éléments en attente à fiabilité exponentielles de paramètres $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$

$$\text{on démontre que : } F_s(m) = \frac{\prod_{i=1}^n \lambda_i e^{-\lambda_i m}}{\prod_{i=2}^n (\lambda_i - \lambda_1)} + \frac{\prod_{i=1}^n \lambda_i e^{-\lambda_i m}}{\prod_{i=1, i \neq 2}^n (\lambda_i - \lambda_2)} + \dots$$

Soit :

$$F_s(m) = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{n}{i} \lambda_i \exp(-\lambda_j m)}{\sum_{i=1}^n \frac{n}{i} (\lambda_i - \lambda_j)} \quad \text{with } j=1, i \neq j$$

$$m_s = (M(TBF)) = \frac{\sum_{i=1}^n 1}{\sum_{i=1}^n \lambda_i}$$

CONCLUSIONS

Le calcul de fiabilité permet de garantir le bon fonctionnement d'un matériel pendant une période d'utilisation durant sa vie utile. La formule mathématique de fiabilité la plus utilisée, tant ^{que} le matériel ne risque plus d'avoir des pannes infantiles et qui ne souffre pas encore de phénomène d'usure est $F(t) = e^{-\lambda t}$.

En réalité, la fiabilité déterminée à partir de cette formule ne subsiste que pendant une certaine durée qui est limitée par l'augmentation du taux de panne dû à l'usure. Un calcul de la vie moyenne, de l'écart type et de leurs intervalles de confiance, du matériel permet de déterminer la fin de la période où la valeur de la fiabilité donnée par $e^{-\lambda t}$ n'est plus vraie.

La fin de cette période correspond bien au moment du remplacement des éléments dont la fiabilité est devenue médiocre.

La fiabilité d'un système dépend de celle de ses composants ainsi que de leur disposition.

Enfin, ne serait-il pas économiquement avantageux aussi bien pour un fournisseur que pour un utilisateur d'homologuer la fiabilité d'un matériel en s'aidant du calcul statistique?

Quelle est l'utilité de la fiabilité d'un matériel pour l'utilisateur si ce n'est la garantie qu'il est en droit d'exiger de son fournisseur?

Mais ce dernier n'a-t-il pas intérêt à demander en échange un "prix de vente" élevé pour compenser le prix de revient que lui demanderait l'amélioration de la fiabilité de son matériel ?

Valeurs de r et C/m_0 en fonction de m_1/m_0 , α et β

$\frac{m_1}{m_0}$	$\alpha = 0,01$ $\beta = 0,01$		$\alpha = 0,01$ $\beta = 0,05$		$\alpha = 0,01$ $\beta = 0,10$		$\alpha = 0,01$ $\beta = 0,25$	
	r	C/00	r	C/m ₀	r	C/m	r	C/m
2/3	136	0,811	101	0,783	83	0,752	60	0,724
1/2	46	0,689	35	0,649	30	0,625	22	0,572
1/3	19	0,544	15	0,498	13	0,459	10	0,413
1/5	9	0,390	8	0,363	7	0,333	5	0,256
1/10	5	0,256	4	0,206	4	0,206	3	0,145
$\frac{m_1}{m_0}$	$\alpha = 0,05$ $\beta = 0,01$		$\alpha = 0,05$ $\beta = 0,05$		$\alpha = 0,05$ $\beta = 0,10$		$\alpha = 0,05$ $\beta = 0,25$	
	r	C/m	r	C/m	r	C/m	r	C/m
2/3	95	0,837	67	0,808	55	0,789	35	0,739
1/2	33	0,732	23	0,683	19	0,655	13	0,592
1/3	13	0,592	10	0,543	8	0,498	6	0,436
1/5	7	0,469	5	0,394	4	0,342	3	0,272
1/10	4	0,342	3	0,272	3	0,272	2	0,178
$\frac{m_1}{m_0}$	$\alpha = 0,10$ $\beta = 0,01$		$\alpha = 0,10$ $\beta = 0,05$		$\alpha = 0,10$ $\beta = 0,10$		$\alpha = 0,10$ $\beta = 0,25$	
	r	C/m	r	C/m	r	C/m	r	C/m
2/3	77	0,857	52	0,827	41	0,806	25	0,754
1/2	26	0,758	18	0,712	15	0,687	9	0,604
1/3	11	0,638	8	0,582	6	0,525	4	0,436
1/5	5	0,487	4	0,436	3	0,367	3	0,367
1/10	3	0,357	2	0,266	2	0,266	2	0,266
$\frac{m_1}{m_0}$	$\alpha = 0,25$ $\beta = 0,01$		$\alpha = 0,25$ $\beta = 0,05$		$\alpha = 0,25$ $\beta = 0,10$		$\alpha = 0,25$ $\beta = 0,25$	
	r	C/m	r	C/m	r	C/m	r	C/m
2/3	52	0,903	32	0,876	23	0,853	12	0,793
1/2	17	0,827	11	0,784	8	0,744	5	0,674
1/3	7	0,726	5	0,674	4	0,634	2	0,481
1/5	3	0,576	2	0,481	2	0,481	1	0,288
1/10	2	0,481	2	0,481	1	0,288	1	0,288

ESSAIS TROMPES AVEC REPLACEMENT

Valuers de r pour $\alpha, \beta, m_1/m_0, T/m_0$ donnés

$\frac{m_1}{m_0}$	n	T/m_0				n	T/m_0				
		1/3	1/5	1/10	1/20		1/3	1/5	1/10	1/20	
		n	n	n	n		n	n	n	n	
		$\alpha = 0,01 \quad \beta = 0,01$						$\alpha = 0,01 \quad \beta = 0,05$			
2/3	136	331	551	1103	2207	101	231	395	790	1581	
1/2	46	95	159	317	634	35	69	113	227	454	
1/3	19	31	51	103	206	15	22	37	74	149	
1/5	9	10	17	35	70	8	8	14	29	59	
1/10	5	4	6	12	25	4	3	4	8	16	
		$\alpha = 0,01 \quad \beta = 0,10$						$\alpha = 0,05 \quad \beta = 0,01$			
2/3	83	199	316	632	1265	95	239	397	795	1591	
1/2	39	55	93	187	374	33	72	120	241	483	
1/3	13	18	39	60	121	13	23	39	76	153	
1/5	7	7	11	23	45	7	9	15	32	65	
1/10	4	2	4	8	15	4	4	5	13	27	
		$\alpha = 0,05 \quad \beta = 0,05$						$\alpha = 0,05 \quad \beta = 0,10$			
2/3	67	169	270	541	1082	55	130	216	433	867	
1/2	23	47	79	157	314	19	37	62	124	249	
1/3	10	15	27	54	108	8	11	19	39	79	
1/5	5	6	10	19	39	4	4	7	13	27	
1/10	3	3	4	8	16	3	3	4	8	16	
		$\alpha = 0,10 \quad \beta = 0,01$						$\alpha = 0,10 \quad \beta = 0,05$			
2/3	77	197	329	659	1319	59	129	214	429	859	
1/2	25	59	98	197	394	18	38	64	128	256	
1/3	11	21	35	70	140	8	13	23	45	93	
1/5	3	7	12	24	48	4	5	9	17	34	
1/10	3	3	5	11	22	2	2	3	5	10	
		$\alpha = 0,10 \quad \beta = 0,10$						$\alpha = 0,25 \quad \beta = 0,25$			
2/3	41	99	165	330	660	12	29	47	95	190	
1/2	15	30	51	102	205	5	10	16	33	67	
1/3	6	9	15	31	63	2	2	4	9	19	
1/5	3	4	6	11	22	1	1	2	3	6	
1/10	2	2	2	5	10	1	1	1	2	5	

ESSAIS TROMPQUES SANS REMPLACEMENT

Valours de r pour $\alpha, \beta, \frac{m_1}{m_0}$ et T/m_0 donnés.

$\frac{m_1}{m_0}$	r	T/m_0				r	T/m_0				
		1/3	1/5	1/10	1/20		1/3	1/5	1/10	1/20	
		n	n	n	n		n	n	n	n	
		$\alpha = 0,01 \quad \beta = 0,01$						$\alpha = 0,01 \quad \beta = 0,05$			
2/3	136	403	522	1172	2275	101	291	448	842	1532	
1/2	46	119	182	340	657	35	87	132	245	472	
1/3	19	41	61	113	216	15	30	45	82	157	
1/5	9	15	22	39	74	8	13	18	33	62	
1/10	5	6	9	15	28	4	4	6	10	18	
		$\alpha = 0,01 \quad \beta = 0,10$						$\alpha = 0,05 \quad \beta = 0,01$			
2/3	83	234	359	675	1307	95	289	417	843	1639	
1/2	30	72	109	202	390	33	99	138	258	499	
1/3	13	25	37	67	128	13	30	45	83	160	
1/5	7	11	15	26	59	7	13	20	36	69	
1/10	6	6	4	10	18	4	6	9	15	29	
		$\alpha = 0,05 \quad \beta = 0,05$						$\alpha = 0,05 \quad \beta = 0,10$			
2/3	67	198	305	575	1116	55	159	245	462	895	
1/2	23	59	90	168	326	19	47	72	134	258	
1/3	10	21	32	59	113	8	16	24	43	83	
1/5	5	8	12	22	41	4	6	9	15	29	
1/10	3	4	5	9	17	3	4	5	9	17	
		$\alpha = 0,10 \quad \beta = 0,01$						$\alpha = 0,10 \quad \beta = 0,05$			
2/3	77	238	369	699	1358	52	156	242	456	886	
1/2	26	73	112	210	407	18	48	73	137	265	
1/3	11	27	40	75	145	8	18	27	50	97	
1/5	5	10	14	26	51	4	7	10	19	36	
1/10	3	5	7	12	23	2	2	3	6	11	
		$\alpha = 0,10 \quad \beta = 0,10$						$\alpha = 0,25 \quad \beta = 0,25$			
2/3	41	121	186	351	681	12	34	53	101	196	
1/2	15	39	59	110	213	5	12	19	36	69	
1/3	6	12	18	34	66	2	3	5	10	20	
1/5	3	5	7	12	23	1	1	1	3	6	
1/10	2	2	3	6	11	1	1	1	3	6	

CHAPITRE II

PROCESS DE FABRICATION DES S.C.

SOMMAIRE DU CHAPITRE II

TITRES

I - INTRODUCTION

II - ORIGINE DE LA PLAQUETTE

- 1) Purification
- 2) Purification par fusion localisée horizontale
- 3) Purification par zone flottante verticale
- 4) Extraction du monocristal
- 5) Inspection des plaquettes

III - EPITAXIE

IV - OXYDATION

V - PHOTOMASKING

VI - DIFFUSION

- a) But et Définition
- b) Rappel théorique sur la diffusion
- c) Formation de jonction par diffusion
- d) Solubilité solide des impurétés
- e) Température de diffusion
- f) Durée de diffusion
- g) Etat de surface et imperfection cristalline
- h) Processus de diffusion
- i) Moyens de contrôle
- j) Diffusion de l'or

VII - METALLISATION

- a) But
- b) Choix du métal
- c) Formation de l'alliage eutectique
- d) Pratique de la métallisation
- e) Déposition de la couche de vapox

VIII - TEST PROBE (SONDAGE)

IX - ASSEMBLAGE

- 1) Incision et découpage des plaquettes de silicium par la méthode scribing
- 2) Attache des pastilles au support
- 3) Soudure des liens
- 4) Encapsulation

TITRES

X -- EXEMPLE D'APPLICATION :

Suivi de la diffusion d'un transistor et d'une résistance dans un CI

XI -- ~~XXXXXXXXXX~~

XII -- RELATION ENTRE PROCESS ET FIABILITE

I INTRODUCTION

La réalisation d'un dispositif électronique à partir d'un substrat semi-conducteur s'effectue en plusieurs étapes d'un process déterminé à partir des caractéristiques désirées, permettant de délimiter et de doper convenablement les diverses régions P et N , et d'assurer les isolements et les prises de contact nécessaires. Les substrats sont des plaquettes très fines de silicium monocristallin de résistivité appropriée.

Tout au long du processus de fabrication la plaquette est soumise à des tests de contrôle de qualité et d'inspection en vue d'obtenir un produit fiable et de bonne qualité.

Il faut environ 4 semaines pour obtenir une plaquette finie à partir d'une plaquette vierge.

Origine de la plaquette vierge, accroissement de la couche épitaxiale après diffusion des sous collecteurs, oxydation, photomasquage, diffusion, métallisation et assemblage sont les différentes parties développées dans ce chapitre.

Un exposé sur les différents problèmes pouvant être causé par le processus de fabrication, notamment pendant l'opération de l'assemblage a été traité à la fin du chapitre dans le but de mettre en évidence le lien entre " Fiabilité et Process de Fabrication " .

CARACTERISTIQUES DU Si

- Structure cristalline : cubique à face centré type diamant
- Paramètres cristallographiques à 298°K : $a = 5,4307\text{\AA}$ ~~a_c~~ = 1,17
- Nombre atomique : 14 (2, 8, 4)
- Poids atomique : 28,09
- Densité : $2,33 \text{ g/cm}^3$
- Nombre d'atomes par cm^3 : $4,96 \cdot 10^{22}$ atomes.
- Point de fusion : 1410°C
- Point d'ébullition : 2477°C
- Chaleur spécifique (0 à 100°C) : 0,18 Cal/g. °C.
- Dureté Brinell : 240
- Conductivité thermique (300°K) : $1,3 \text{ W/cm} \cdot \text{°C}$
- Hauteur de la bande interdite (300°K) : 1,1 eV.
- Concentration intrinsèque (300°K) $n_p = 2,2 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-6}$
- Mobilité des électrons (300°K) : $1300 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{sec.}$
- Mobilité des trous (300°K) : $500 \cdot \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{sec.}$
- Résistivité intrinsèque (300°K) $230000 \text{ } \Omega \cdot \text{cm.}$
- Constante de diffusion des électrons à 300°K : $35 \text{ cm}^2/\text{s}$
- Constante de diffusion des trous à 300°K : $13,1 \text{ cm}^2/\text{s}.$

II ORIGINE DE LA PLAQUETTE

Actuellement le silicium constitue le matériau de base des composants semi-conducteurs diodes, transistors et circuits intégrés. Il est très répandu sur la croûte terrestre sous forme de silice (SiO_2). Son utilisation dans la réalisation de dispositifs implique un degré de pureté élevé et une perfection cristalline poussée.

1) PURIFICATION

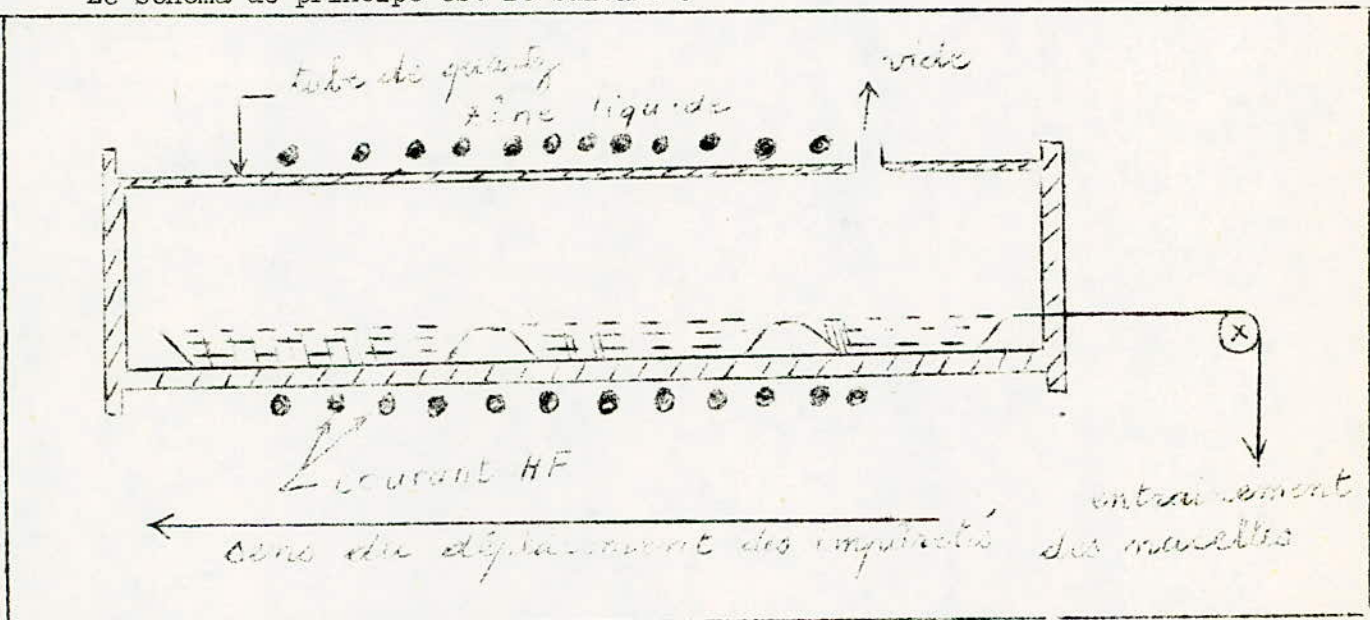
Pour le préparer avec la pureté adéquate, on doit passer par un composé intermédiaire comme les hallogénures, ou le trichlorosilane.

Ce dernier est le plus utilisé. Il est purifié par distillation puis réduit par l'hydrogène pour donner du silicium.

A ce stade la pureté n'est pas suffisante pour l'industrie électronique, il doit subir une purification physique. Elle se fait soit par fusion localisée horizontale soit par zone flottante verticale.

2) PURIFICATION PAR FUSION LOCALISEE HORIZONTALE

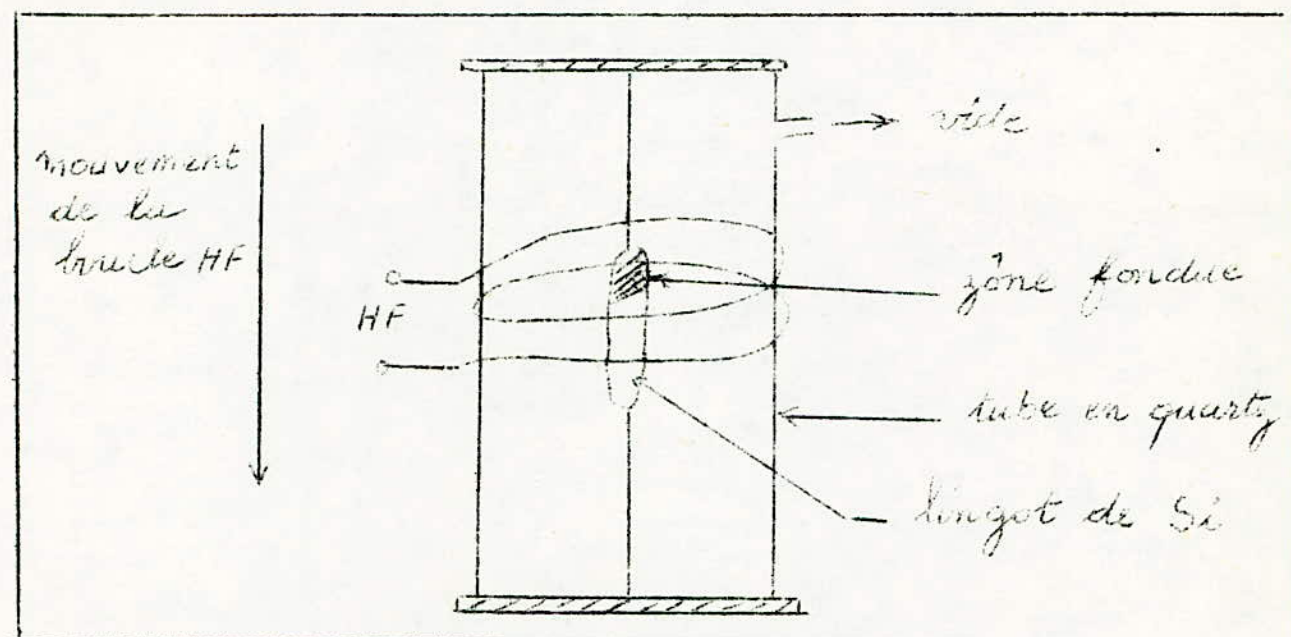
Le schéma de principe est le suivant :



Le lingot de silicium est placé dans une nacelle de graphite, dans un tube à vide en quartz. On fait déplacer la nacelle dans un sens unique à travers les anneaux de chauffage par induction. Le silicium fond sur la largeur chauffée. Cette zone liquide se déplace lentement le long du lingot de façon à créer une fusion suivie d'une solidification. Au fur et à mesure que la zone en fusion se déplace, la concentration en impuretés de la phase liquide augmente. A la fin de l'opération, les impuretés se trouvent à l'extrémité du barreau qu'on coupe.

I 3) PURIFICATION PAR ZONE FLOTTANTE VERTICALE

Le schéma de principe est donné par la fig. suivante :



Dans ce cas le tube de quartz est placé verticalement. Le lingot de Si est placé verticalement aussi, et est maintenu fixe par ses 2 extrémités.

La boucle de chauffage HF se déplace le long du lingot avec la vitesse de 2 mm/mm créant ainsi un anneau liquide entraînant les impuretés. Maintenu par la tension du fil, l'anneau ne coulera pas et on n'a plus besoin de nacelle pour éliminer des contaminations.

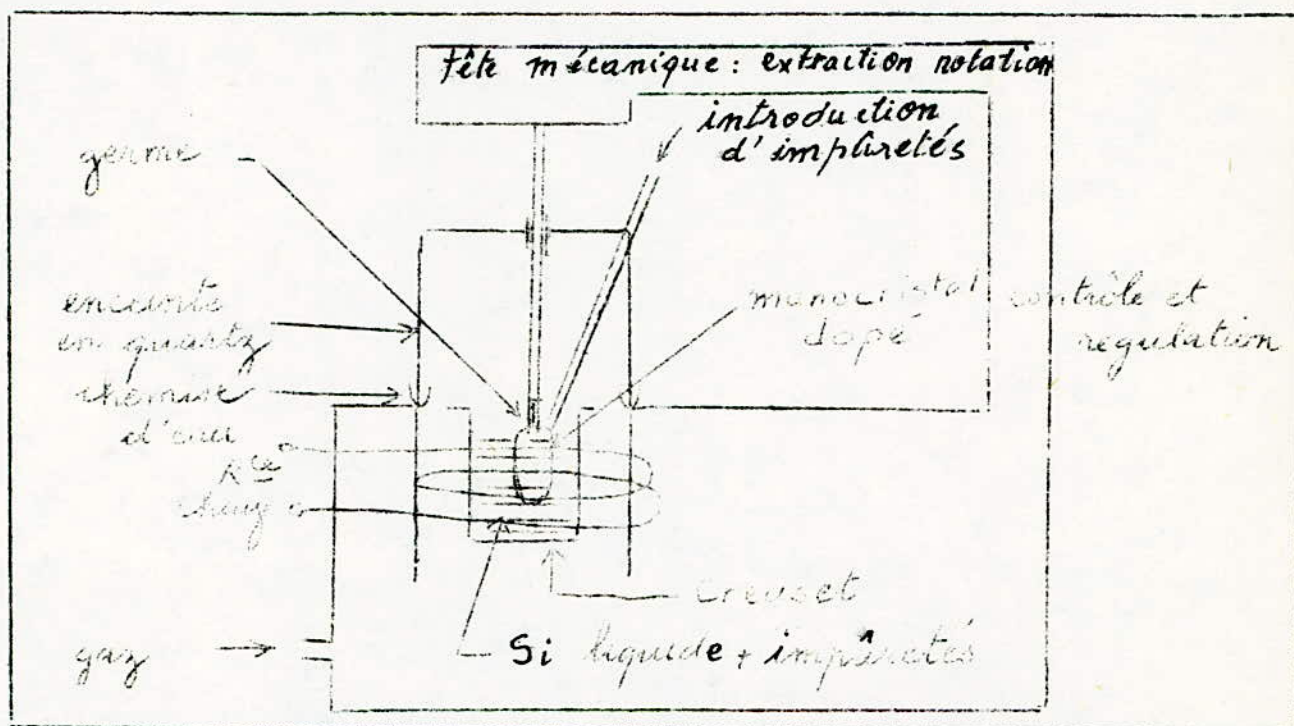
Les impuretés s'évaporent et sont éliminées par la pompe à vide.

Cependant le Bore ne s'évapore pas, et le batonnet de Si obtenu sera de type P de résistivité pratiquement constante d'une extrémité du batonnet à l'autre.

4) EXTRACTION DU MONOCRISTAL

Afin d'obtenir une architecture monocristaline lors de la formation des jonctions, on doit employer un monocristal. La cristallisation du silicium doit être la plus régulière possible, sans déformation, sans dislocation et sans distorsion pour la constance du résultat à obtenir. Les plans de cristallisation adoptés sont : $(1,1,1)$, $(1,1,0)$, et $(1,0,0)$.

Pour l'extraction du monocristal, on découpe un germe dans un monocristal convenablement orienté. On enplit un creuset chauffé par un courant H.F. avec le silicium et l'impureté de dopage. On descend le germe au niveau du creuset et enfin on choisit la vitesse de rotation et d'extraction de la barre porte-germe ainsi que la température du bain. C'est la méthode dite de CZOCKRALSKI. Le schéma de principe est celui de la fig. ci-dessous. Le lingot monocristallin convenablement dopé et de résistivité correspondant au composant à fabriquer est découpé en rondelles d'épaisseur voulue.



5) INSPECTION DES PLAQUETTES IMPORTEES UTILISEES PAR LA SONELEC

Le but de cette inspection est de vérifier si les plaquettes de Si brutes importées répondent aux spécifications voulues.

Les plaquettes sont emballées dans des boîtes comportant les indications suivantes :

- a) type de dopage
- b) diamètre de la plaquette
- c) orientation de structure cristalline de la plaquette
- d) résistivité de la plaquette
- e) l'épaisseur de la plaquette

On doit suivre certaines règles de sécurité en manipulant les plaquettes par exemple : ouvrir la boîte contenant les plaquettes du bon côté, enrober les doigts avant toute manipulation et utiliser les petites pincettes

On procède à :

* une première inspection visuelle (microscope)

La plaquette reçue ne doit pas présenter des rayures, des empreintes digitales des matériaux étrangers ou des cassures si petites soient-elles.

* Un contrôle dimensionnel

On contrôle l'épaisseur à l'aide d'un μ mètre, le diamètre et la longueur plate (flat) servant de repère pendant l'incision. Les lignes d'incision y seront perpendiculaire.

* Une vérification du type du dopage

On utilise à cet effet une sonde à 4 points qui permet à la fois de déterminer le type du dopant (N ou P) et la résistivité de la plaquette. Le schéma de principe de cette sonde est le suivant :



un courant I_0 traverse la plaquette du Pt A vers le point B, le voltmètre nous indique la ddp. entre les 2 points C et D et à partir de la formule

$$\frac{\rho}{x_j} = 4,53 \frac{V}{I} \quad \text{on détermine } \rho.$$

On fixe $I_0 = 4,53A$ et on lit sur le voltmètre la valeur ρ/x_j

(x_j = épaisseur de la plaquette) des voyants s'allument suivant le sens du courant pour indiquer que la plaquette est dopée P (+) ou N (-) connaissant la résistivité, on peut déterminer la concentration de la plaquette directement sur un graphique donnant $\rho = f(T)$.

* Un contrôle de l'orientation cristalline de la plaquette

Il y a 2 façons pour déterminer l'orientation cristalline de la plaquette. La première consiste à appliquer une force à l'aide d'une pincette à la plaquette qui se casse en petits morceaux triangulaires si l'orientation est (1,1,1) rectangulaires ou carrés sinon la deuxième méthode se fait optiquement au microscope. La plaquette attaquée par un mélange de trioxyde de chrome 25g par plaquette dans 100 ml d'eau et 50 ml de HF, pendant 10 mn. Puis on la rince par H_2O pendant 5 mn et on la sèche par N_2 .

De petites taches noires sur les régions défectueuses, en forme triangulaires si l'orientation est (1,1,1) rectangulaires ou carrées sinon apparaissent à la surface de la plaquette. Cette méthode permet aussi de localiser et compter les points présentant des défauts, d'avoir l'orientation de la plaquette et le taux de défectuosité.

Ayant le nombre de défaut et la section que devra avoir la pastille, on peut avoir la densité de défauts dont la connaissance est forte intéressante car elle permet de calculer le rendement :

$$Y_{IED} = \frac{\% \text{ bon}}{\text{quantité totale}} = e - a/d$$

ou a = section de la pastille ; d = densité de défauts.

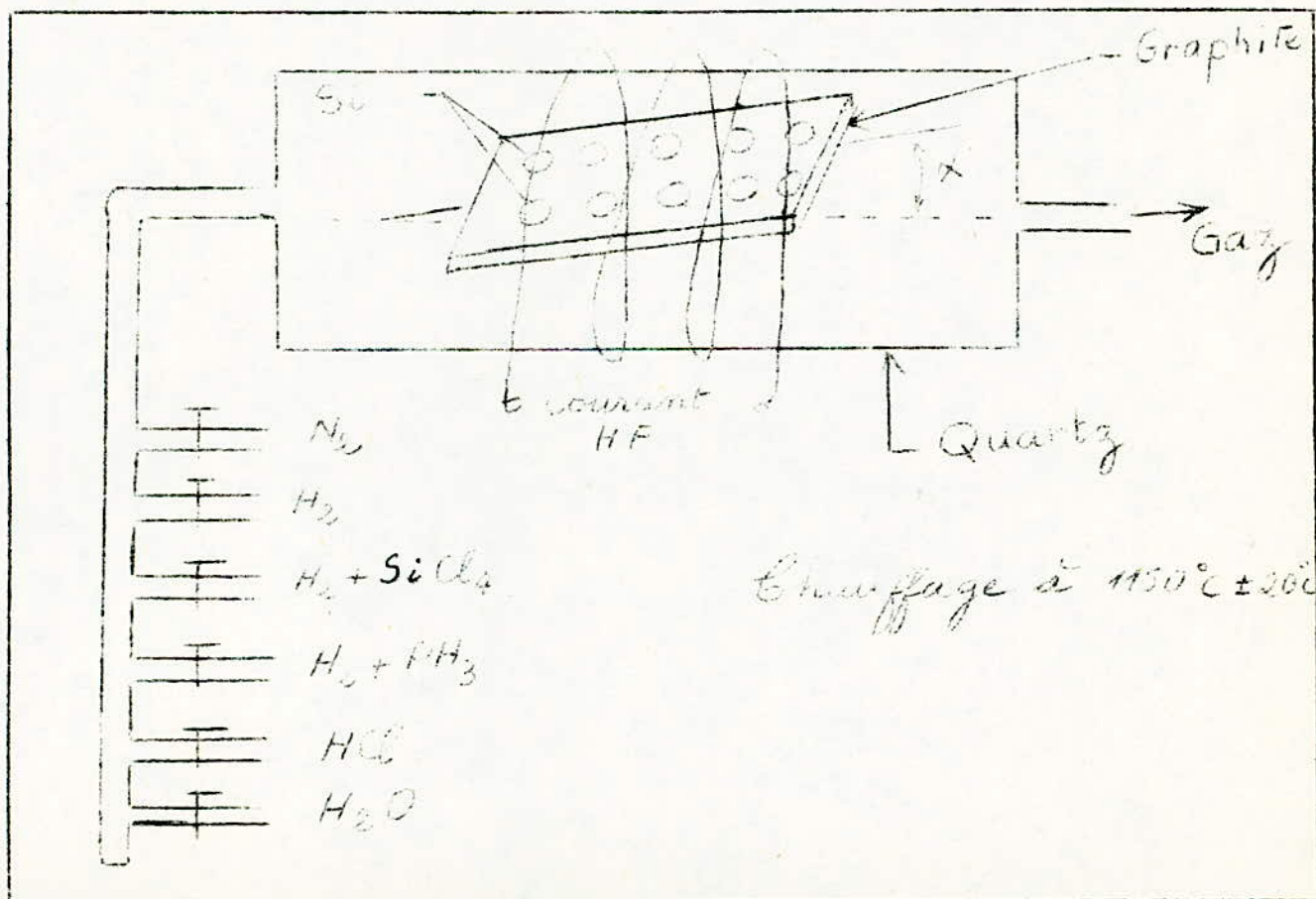
EPI TAXIE

Sur la plaquette monocristalline de silicium, dopée, de 16 à 18 mils d'épaisseur et orientée suivant le plan (1,0,0) ou (1,1,1) on fait déposer une couche de silicium appelée couche épitaxiale. Donc l'épitaixie consiste à faire croître sur la surface de la plaquette monocristalline de silicium une mince couche monocristalline également de silicium. Le choix de cette méthode résulte dans le fait qu'elle présente les avantages suivants.

- 1) assure une uniformité de dopage
- 2) permet de réaliser des isolations, par diffusion, entre les différents circuits d'une pastille. Les isolations s'obtiennent en produisant des caissons dopés de même nature que le substrat.
- 3) permet de faire varier la résistivité
- 4) évite d'importer des plaquettes spéciales pour chaque type de circuit à réaliser. A partir de plaquettes de silicium on fait varier la concentration de la couche épitaxiale de telle sorte à obtenir toute autre plaquette.

L'obtention de tous ces paramètres n'est pas disponible par une plaque sans couche épitaxiale.

Le schéma de principe est le suivant :

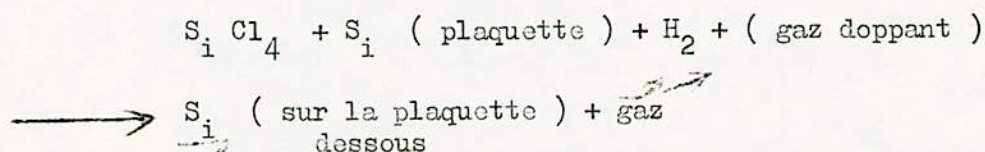


* 1mil # $2,54 \text{ cm} \cdot 10^{-3} \text{ cm}$

Le chauffage se fait par induction. Quatorze à vingt plaquettes de silicium sont déposées sur un support en graphite légèrement incliné suivant un angle prédéterminé et traité dans un four en quartz. On chasse l'air par un gaz neutre (par exemple l'Azote).

Le chauffage étant réglé à 1150°C, on envoie de l'hydrogène pour éliminer les oxydations et décaper la surface des plaquettes ; on injecte des vapeurs de tétrachlorure de silicium (Si Cl₄). Notons au passage qu'il est possible d'utiliser le Si H₄ mais il est évité par mesure de sécurité.

Au même temps que la réaction se produise, on envoie le gaz servant au dopage. La réaction chimique qui se produit est :



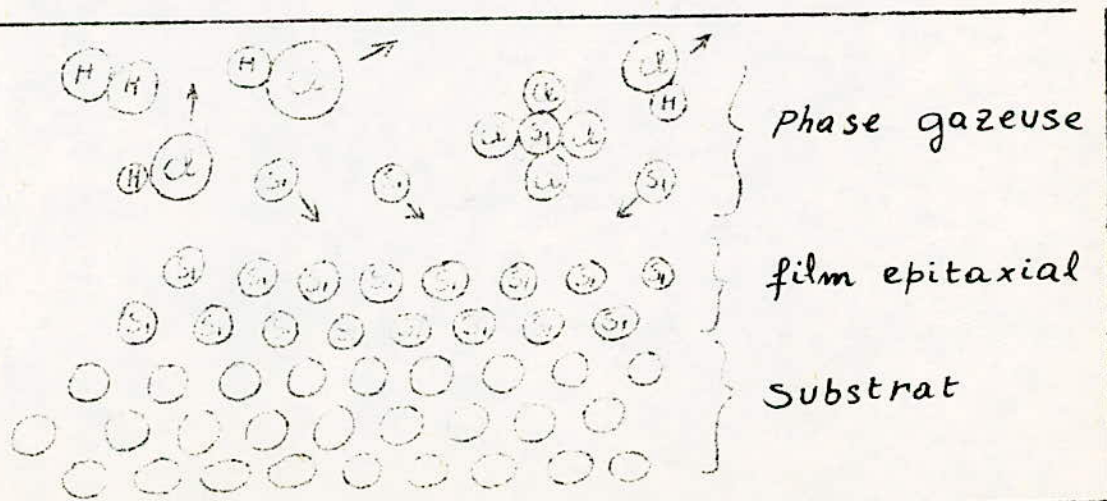
Le schéma de la fig. ci-dessous en donne une illustration. Les paramètres essentiels à contrôler pendant cette opération sont :

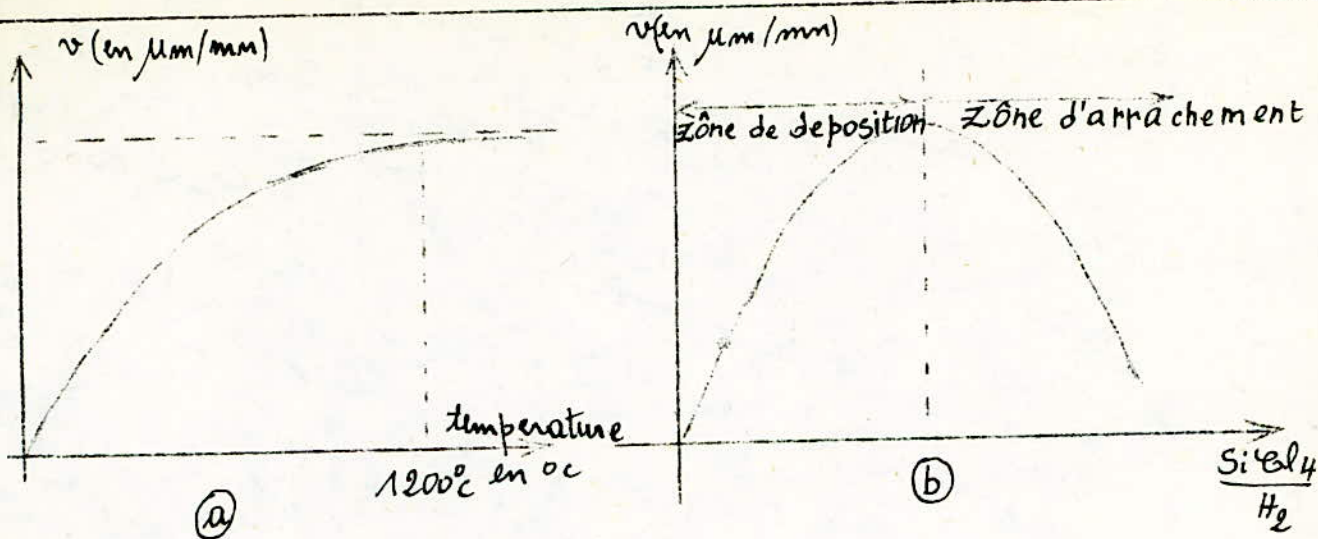
1) Température

Il est difficile de contrôler rigoureusement la température car la réaction chimique suivant son caractère exothermique ou endothermique peut entraîner soit une augmentation soit une diminution de la température. Pour cela on tolère une erreur absolue ne dépassant pas $\pm 20^\circ\text{C}$.

2) Débit du gaz

On préfère contrôler le rapport des débits de vapeur de tétrachlorure de silicium sur le débit d'hydrogène ($\frac{\text{Si Cl}_4}{\text{H}_2}$) qu'on peut facilement garder constant la vitesse de déposition est fonction de la température et du rapport $\frac{\text{Si Cl}_4}{\text{H}_2}$

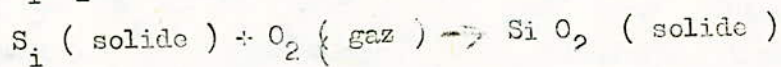




Au environ de 1200°C la vitesse de déposition devient pratiquement constante fig. (a). En général, on travaille à la vitesse de $1,48 \mu\text{m}/\text{min}$. Il est à noter que plus la vitesse de déposition est petite plus la couche est meilleure. Il existe une valeur limite du rapport $\frac{\text{SiCl}_4}{\text{H}_2}$ à partir de laquelle au lieu d'avoir une déposition du silicium on a un arrachement de celui-ci. En fait le rapport $\frac{\text{SiCl}_4}{\text{H}_2}$ n'est que relatif si on tient compte du dopant utilisé (AsH_3). Donc il y a beaucoup de paramètres qui entrent en jeu et dont il faut faire la moyenne des effets.

L'OXYDATION

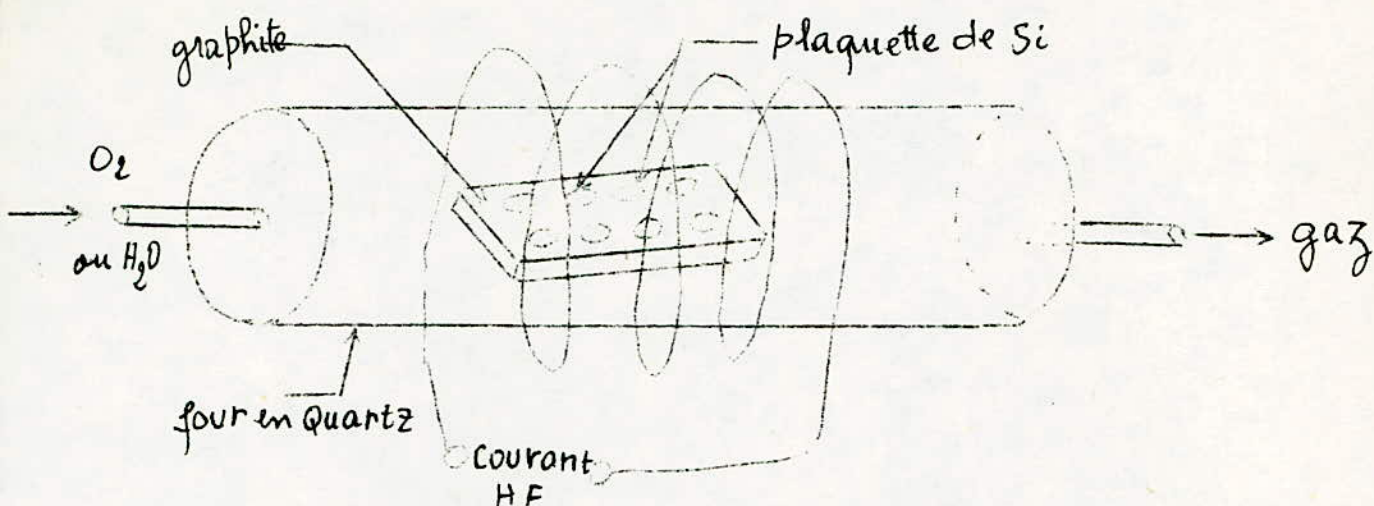
C'est l'accroissement de la plaquette de silicium d'une couche d'oxyde. Pour cela on met la plaquette pendant un certain temps dans un four très chaud. (1100°C pour les diodes et 1190°C pour les transistors et les circuits intégrés), Puis on fait passer un courant d'oxygène ou de vapeur d'eau. Le gaz réagit avec le silicium pour former la couche d'oxyde de silicium (SiO_2).



Ou bien



On opère suivant le schéma de la fig. suivante :



La vitesse des gaz est de l'ordre de 1 cm/S .

Le chauffage se fait par induction. Les paramètres qu'on doit contrôler sont :

- La vitesse de déposition de SiO_2
- L'épaisseur de la couche d'oxyde (SiO_2)

Elle peut être inspectée de deux manières différentes soit en considérant le gain en poids du silicium soit optiquement. (Si l'oxyde sur la plaquette est de couleur foncée la couche est mince ; s'il est de couleur claire la couche est épaisse). L'oxydation est destinée à empêcher le dopant de ne pénétrer que dans les zones désirées pendant la diffusion.

Influence sur la fiabilité

La stabilité de la structure et des propriétés électriques de l'oxyde joue un rôle important dans la détermination des caractéristiques électriques et de la fiabilité du composant semi-conducteur. La contamination de l'oxyde durant et après l'accroissement de la couche d'oxyde augmente la fréquence des pannes. Diminuer la couche d'oxyde a le même effet que la contamination. La nature de charge à la surface de l'oxyde ou à l'interface Oxyde-Silicium, les contaminants ioniques sur ou dans la couche d'oxyde et les groupes polarisables peuvent affecter l'état de la charge d'espace du silicium et cela affecte les paramètres électriques.

PHOTOMASKING (photomasquage)

Le photomasking a pour objet principal de délimiter à la surface de la plaquette, par des couches protectrices les régions non concernées par les opérations de dopage, d'isolation et de métallisation.

Cette opération s'effectue par 4 éléments essentiels à savoir :

- l'oxyde de silicium
- la substance organique photosensible
- un masque
- les rayons U.V.

La substance organique est appelée photorésist . Elle a la propriété d'être sensible aux rayons U.V. , adhésive à la couche d'oxyde et résistante au B.O.E. Elle se compose d'un polymère, de solvant, d'ions, d'une substance sensible et d'une substance brumeuse. Le polymère est l'élément principal du composé. Il est le responsable de l'adhésion, de la résolution (reproduction du masque sur la plaquette), de la résistance au BOE et de la stabilité de l'image. Les polymères généralement utilisés sont :

l'Éthyl Benzène, l'osthoxyène, métaxyène et paraxyène.

Le photorésist est étalé sur la couche d'oxyde déposée sur la plaquette. Le masque comportant des parties opaques et d'autres transparentes est placé sur la couche photosensible. L'ensemble est exposé aux rayons U.V. qui pénètrent à travers les parties transparentes du masque et vont être réfléchies par les régions opaques. Grâce au photorésist les parties touchées par la lumière se durcissent, s'adhèrent à l'oxyde et résistent au B.E.O. qui va attaquer la couche d'oxyde non recouverte de polymère dur. Cette résine photosensible joue un rôle important dans la fabrication du semi-conducteur et doit être rigoureusement contrôlée. On en exige que :

- Les performances d'un lot à l'autre soient satisfaisantes
- Les limites spécifiées soient respectées.

Les paramètres contrôlables dans la résine photosensible sont nombreux. Les plus importants sont :

a) L'adhésion

Cette propriété dépend en grande partie du polymère et du solvant. Son contrôle est effectué au moyen des rayons X.

b) Résolution

C'est le degré de reproduction du dessin du masque sur la plaquette. Ce paramètre dépend aussi du polymère et de la substance brumeuse. (Hetz) que contient le polymère et qui affecte la résolution en diffractant la lumière.

c) Résistance

C'est la propriété de la résine photosensible d'être non sensible à l'acide B.O.E. Le paramètre du polymère, de la substance brumeuse et du solvant.

d) Stabilité de l'image

Elle dépend du poids moléculaire du polymère.

e) Photosensibilité

Cette caractéristique dépend d'un composant additionné au polymère dont la propriété est l'absorption de la lumière ainsi que du polymère lui-même.

f) Épaisseur après cuisson

La cuisson consiste en l'évaporation des solvants se trouvant dans la résine photosensible. Cela provoque un durcissement de la résine et une diminution de son épaisseur.

Le tableau ci-dessous résume les paramètres à contrôler et les propriétés physiques et chimiques de la résine dont ils dépendent.

Caractéristiques	Caract. du polymère	Viscosité	Composants	Subst. brumeuse	Ion métallique	Sensitizer	Solvants	Particules étrangères
Adhésion	X						X	
Résolution	X			X				
Résistance	X			X			X	
Stabilité	X						X	
Pin-hole	X							X
Photosensibilité						X		
Épaisseur					X			

Pin-hole : Bulles d'air qui se trouvent dans la solution et qui faciliteront l'attaque par le B.O.E. des parties non désirées si petites soient-elles, de l'oxyde de silicium.

L'existence de ces "Pin-hole" crée des problèmes sérieux lors de la diffusion.

VI DIFFUSION

a) but et définition

C'est un processus qui, à haute température permet d'introduire dans un monocristal à des profondeurs variables de l'ordre d'une fraction de μm à quelques dizaines de μm des impuretés en quantité convenable pour la formation de jonction.

b) Rappel théorique sur la diffusion

La théorie simple de la diffusion assume que chaque espèce d'impureté se diffusera indépendamment de l'autre et que la constante de diffusion est indépendante de la concentration.

Cette hypothèse n'est pas rigoureusement vraie mais elle peut être une approximation assez exacte pour les calculs.

La quantité de matériau diffusée par unité de temps est proportionnelle au gradient de la concentration et est transportée dans la direction des régions moins concentrées.

-- Cas unidimensionnel

La première loi de Fick s'écrit :

$$J = -D \frac{\partial N}{\partial x} \quad (1)$$

où J = courant de diffusion

D = constante de diffusion

N = concentration d'impuretés (atomes / unité de volume).

x = profondeur de diffusion.

Si D est indépendante de la concentration et que cette dernière dépend du temps, on peut obtenir à partir de la première loi de Fick en raisonnant par continuité une seconde loi de Fick (plus utilisée que la 1ère).

En effet entre 2 plans (1) et (2) espacés de dx, on trouve N dx particules par unité de volume. Si N dépend de x et de t, le nombre de particules qui s'accumule par unité de temps entre les 2 plans est donné par :

$$\frac{\partial N}{\partial t} dx \quad \text{qui par continuité est égal à la différence des débits}$$

traversant les 2 plans. Si J est le flux de courant entrant au niveau du plan (1), le flux de courant sortant par le plan (2) sera :

$$J = \frac{\partial J}{\partial x} dx - \frac{\partial J}{\partial x} dx = + D \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} dx = \frac{\partial N}{\partial t} dx$$

$$D \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} = \frac{\partial N}{\partial t} \quad (2) \quad \text{2ème loi de Fick}$$

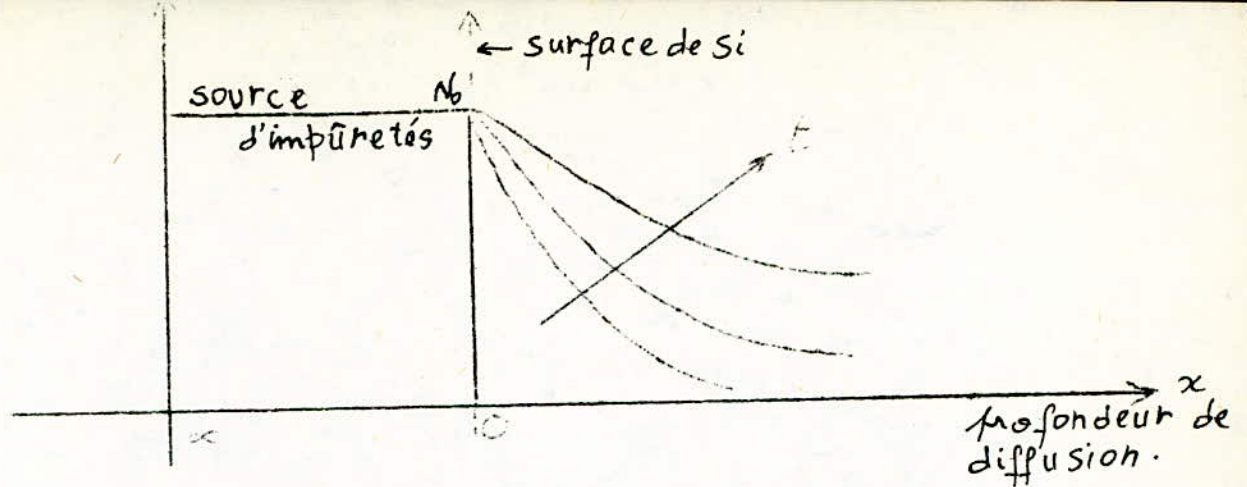
La solution de cette équation pour des conditions aux limites convenables donne l'expression de la concentration d'impurétés N en fonction de la profondeur de diffusion x .

2 ensembles de conditions aux limites se présentent fréquemment dans la diffusion.

Un ensemble donne comme solution la fonction erreur complémentaire. L'autre donne comme solution une fonction gaussienne.

A - Distribution suivant la fonction e r f c

Supposons qu'on élève la température d'une plaquette de silicium à 1200°C et qu'on l'expose à un volume de gaz ayant une concentration uniforme Ng d'impurétés (ex : phosphore). Le volume du gaz est considéré être assez grand pour que la concentration d'impurétés Ng restera constante. Les atomes du phosphore se diffuseront à partir du gaz dans le silicium formant une distribution dans laquelle la concentration du phosphore diminue avec la distance à partir de la surface.



La figure ci-dessus explique qualitativement la pénétration progressive des impuretés dans le cristal lorsque le temps croît.

Si la diffusion se fait pendant un temps suffisamment long, le silicium deviendra uniformément dopé avec du phosphore à une concentration N_0 déterminé par le coefficient de distribution d'équilibre k . Ce coefficient est défini comme étant le rapport de la concentration d'impuretés dans le silicium à la concentration d'impuretés dans la phase gazeuse.

$$k = \frac{N_0}{N_g} \quad (3)$$

Si $k = 1$ $N_0 = N_g$.

Il faut bien noter que N_0 est la concentration d'atomes par unité de volume existante dans une couche infiniment mince de silicium à la surface de la plaquette et non comme étant une concentration d'atomes constantes par unité de surface.

Les conditions limites pour une telle situation peuvent s'écrire :

- N_g constante de $t = 0$ à $t = \infty$
- $N(x) = 0$ pour $t = 0$

$N(x)$ est la concentration de phosphore dans le silicium $N(0) = N_0$ $\forall t$

En résolvant la 2ème loi de Fick en considérant ces conditions aux limites on aboutit à la solution suivante : $\frac{x}{2\sqrt{Dt}}$

$$N(x) = N_0 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x}{2\sqrt{Dt}}} \exp(-z^2) dz \right) \quad (4)$$

où z est la variable d'intégration $N(x)$: concentration du phosphore dans la profondeur du Si. L'intégrale de l'équation (4) s'appelle la fonction erreur et on a $N(x) = N_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right)$ (5)

$$N(x) = N_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (5)$$

$$\text{ou } N(x) = N_0 \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \quad (6)$$

Avec erfc : fonction erreur complémentaire. Ainsi l'équation (6) montre que la répartition des impuretés dépend de 3 paramètres :

- concentration à la surface N_0
- coefficient de diffusion D
- durée de diffusion t .

B - Distribution Gaussienne

Considérons maintenant qu'une quantité d'impuretés Q/cm^2 est déposée à la surface de la plaquette. Cette prédéposition peut être réalisée par une diffusion de faible profondeur et de forte concentration en surface, comme elle peut être réalisée par déposition sur la plaquette de matériaux renforçant la quantité d'impuretés voulue (Si polycristallin dopé ou silice dopée par exemple).

L'opération de prédéposition est ensuite suivie d'une redistribution : les impuretés déposées diffusent dans la plaquette mais sans apport nouveau d'autres impuretés. Il y a, alors, décroissance de la concentration de surface et la distribution $N(x)$ obtenue suit une loi de Gauss.

$$N(x) = \frac{Q}{\sqrt{\pi D t}} \exp \left(- \frac{x^2}{4 D t} \right)$$

Q : quantité d'impureté déposée au départ

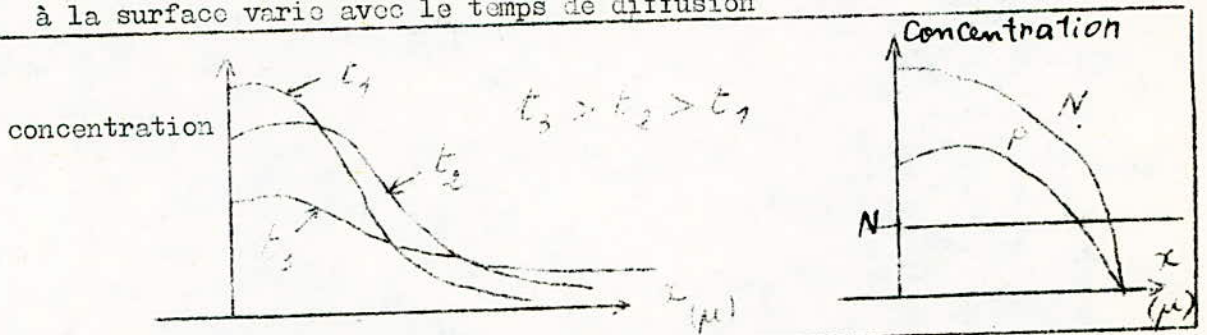
D : coefficient de diffusion

t : durée de diffusion

x : profondeur de la diffusion à partir de la surface par diffusions successives d'impuretés de types opposés on arrive à établir dans la plaquette à partir d'une même surface des couches alternatives N et P. La figure suivante, montre que dans une plaquette initialement dopée N de manière homogène une première diffusion de type P est opérée, la concentration en surface est choisie telle qu'il y ait sur une certaine profondeur non seulement compensation des impuretés type N préexistantes, mais un net excès d'impuretés type P.

Des impuretés de type N sont ensuite diffusées en procédant par un choix convenable des paramètres de diffusion, permettant ainsi la surcompensation des impuretés type P sur une fraction seulement sur la couche P précédemment réalisée.

En comparant le schéma dans le cas d'une distribution gaussienne et distribution suivant la loi erfc on constate que la distribution à la surface varie avec le temps de diffusion

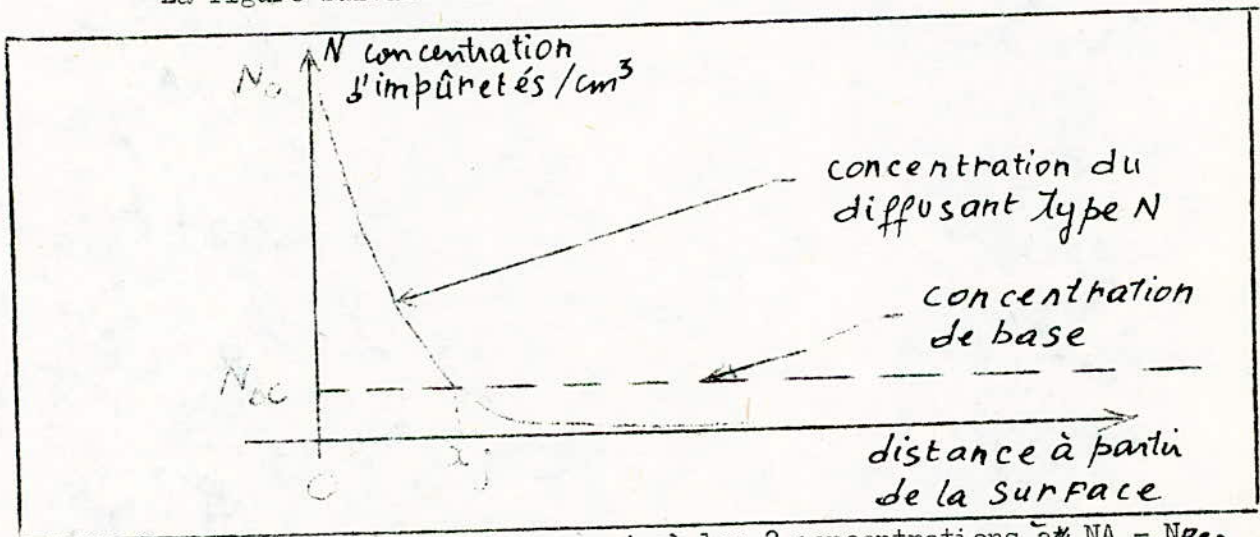


c) Formation de Jonction par diffusion

Dans chacun des cas précédents la plaquette de Si était considérée non dopée au départ. Cependant, il se passerait le même phénomène dans le cas où une impureté de type N est diffusée dans une plaquette de Si initialement dopée P de façon uniforme. Quand on atteint la profondeur de diffusion à laquelle la concentration du type P, N_A , est égale à la concentration de type N, N_D

Il se forme une jonction P-N. (c'est la diffusion même d'une jonction PN)

La figure suivante illustre ce concept important.



La jonction P-N se forme à x_j où les 2 concentrations $N_A = N_{bc}$.
(N_{bc} est la concentration de base).

Effet de process variable sur la distribution diffusée

Le profil de diffusion rencontré dans la fabrication des composants SC dépend d'un certain nombre de paramètres.

- 1 - durée de diffusion
- 2 - température de diffusion
- 3 - solubilité solide des impûretés dans le SC
- 4 - état de la surface et perfection cristalline des plaquettes de Si.

d) Solubilité solide des impûretés

Supposons que pour des raisons de conception, on désire produire une distribution d'impûretés type N dans une plaquette de Si, suivant une erf. On dispose de 3 sources d'impûretés à cet effet ; le phosphore, l'arsenic et l'antimoine. Quand ils sont dissouts dans le Si, les trois s'ionisent complètement et occupent une position substitutionnelle dans le treillis semi-conducteurs à la température ambiante.

Un critère de première importance à vérifier avant le profil de la diffusion est que la plus forte concentration prévue soit inférieure à la solubilité solide de l'impûreté dans le Sc à la température du travail.

Le terme solubilité solide dénote la concentration maximale N_0 de l'élévément qui peut être dissout dans le silicium solide à n'importe quelle température spécifiée.

En exposant la plaquette à une phase où l'impûreté est très concentrée, une partie du silicium passe à l'état liquide.

On note alors que la solubilité solide max. limite la concentration de la surface permise.

Dans la fig. 6* si on considère le phosphore, on voit que sa solubilité solide maximale dans le silicium est approximativement de 10^{21} atomes/cm³.

La silicium pure contient 510^{22} atomes /cm³ la concentration maximum de phosphore dans le Si liquide est alors de 2 % .

D'autre part, si on considère l'Al., on voit que la concentration maximale dans le Si solide est de 0,002 % .

Cette large différence de solubilité entre les éléments du groupe III et ceux du groupe V fournit un choix libéral du potentiel des concentrations à la surface du diffusant à la fois pour les conditions de diffusion suivant erf et la loi gaussienne.

* cf annexe

e - Température de diffusion

La température accélérée de processus de diffusion, en effet, l'augmentation de la température entraîne une augmentation de la constante de diffusion. Elle fait communiquer aux atomes une énergie d'activation plus grande donc une plus grande vitesse de déplacement. L'expression du coefficient de diffusion en fct. de la température s'écrit :

$$D = D_0 \exp \left(- \frac{\Delta H}{RT} \right)$$

Où D_0 et R sont des constantes

T : la température en °K

ΔH : énergie d'activation liée à la diffusion des impuretés.

L'énergie d'activation peut être considérée comme constante et ne dépend que du diffusant et du milieu.

Aussi, les coefficients de diffusion diffèrent en général selon les matériaux, ainsi la fig. 5* montre qu'à 1200°C, par exemple, le coefficient de diffusion pour l'Aluminium est 10 fois plus grand que celui pour le Bore.

La même figure, montre qu'une petite variation de la température entraîne une grande variation du coefficient de diffusion donc une variation significative de la profondeur de diffusion.

C'est pourquoi, il est nécessaire de contrôler très rigoureusement la température du four de diffusion. Dans la (figure 10 à 4)* la concentration à la surface est supposée indépendante de la variation de la température. En fait, elle subit une légère variation dans le même sens que la température (figure 10 à 16)*.

Cette influence critique de la température sur le profil de diffusion exige l'utilisation, en industrie, de fours de diffusion extrêmement sophistiqués et de procéder à un contrôle très serré de la température de telle sorte que celle-ci ne doit pas varier de plus de 5°C de la valeur initiale.

f -- Durée de diffusion

Dans les 2 fonctions de distribution des impuretés erfc et Gaussienne, la durée de diffusion intervient dans le produit Dt . Donc le temps de diffusion, t , agit de la même manière que le coefficient de diffusion D sur la profondeur de diffusion et la densité du diffusant.

* cf : annexe

En pratique, il est facile de contrôler le temps de diffusion qui est en général de quelques minutes.

g) Etat de surface et imperfection cristalline.

L'Etat de surface et l'imperfection cristalline du Si ont une grande influence sur le profil de la diffusion.

La présence de contamination à la surface de la région où la diffusion sera faite, peut perturber sérieusement l'uniformité du profil de la diffusion.

L'imperfection du réseau cristallin par suite de dislocation ou de défauts d'empilement entraînent une accumulation des impuretés diffusées.

Cette concentration élevée d'impuretés localisées provoque la dégradation des propriétés électriques de la jonction diffusée.

La présence de dislocation, affecte le coefficient de diffusion. En effet, le coefficient de diffusion effectif deviendra :

$$D_{eff} = D_e (1 - f) + D_p f$$

Soit $f \ll 1$

$$D_{eff} = D_e + D_p f$$

Où D_e = Coefficient de diffusion normal

D_p = coefficient de diffusion à travers le canal de dislocation.

h) Processus de diffusion

La diffusion se fait en deux étapes :

La précipitation et l'imprégnation.

a) précipitation

Avant que le dopant puisse être imprégné dans la plaquette, on procède à la déposition d'une certaine quantité de ce dopant sur la surface de la plaquette. Cette opération est appelée la précipitation.

On place les plaquettes dans un four en tube étanche, puis on fait entrer dans le four une quantité soigneusement contrôlée, de gaz dopant. Les particules très fines du gaz se déposent sur la surface des plaquettes formant une fine couche.

La quantité du dopant déposée dépend de la température du four et de la durée de l'opération.

Les sources d'impuretés dopantes utilisés sont le trioxyde de Bore (BeO_3) pour former les régions de type P et le pentaoxyde de phosphore (P_2O_5) pour former les régions de types N.

b) Imprégnation

Les plaquettes, après avoir subi l'opération de prédéposition sont décapées par l'acide. Tout excès de dopant est enlevé de la surface des plaquettes. Puis, on place celles-ci dans un autre four chaud en tube, et là, le dopant resté dans la surface des plaquettes est diffusé dans le silicium sous l'effet de la chaleur.

On utilise à cet effet des jets d'oxygène et d'azote ; le premier servant à l'oxydation de Bore ou du phosphore selon les cas et le second servant à l'imprégnation des impuretés.

Le nombre de diffusions différé suivant qu'on veut fabriquer une diode (une seule diffusion), un transistor (deux diffusions) ou un circuit intégré (trois diffusions). (cf exemple).

Entre deux diffusions, il y a une oxydation et une opération de photomasquage.

i) Moyens de contrôle

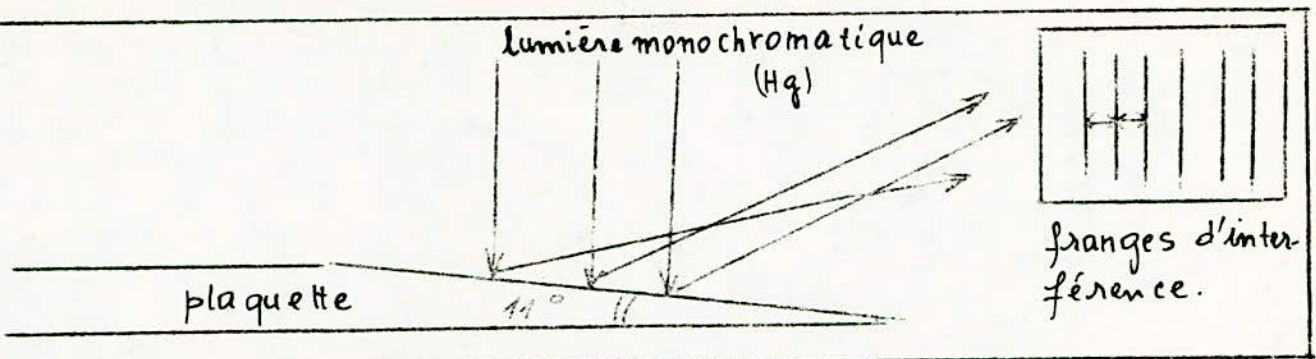
1) Évaluation de la profondeur des couches diffusées :

Une technique fondamentale dans l'évaluation de la profondeur des couches diffusées est le traitement par coloration chimique. Par l'usage de produits chimiques, on colore les régions N et P différemment après avoir taillé la plaquette suivant un angle bien déterminé ($\approx 11^\circ$)
Puis on expose la partie taillée à une lumière monochromatique de mercure de longueur d'onde λ mg . On observe alors sur un écran agrandisseur spécial des franges d'interférences qu'on peut compter. Par cette méthode opticogéométrique, on peut déterminer la profondeur de la diffusion avec une précision de $\pm 0,05 \mu m$ par la formule :

$$x_j = \frac{\lambda \cdot n_s}{2} \cdot (n - 1)$$

où n = nombre de franges observées.

Les schémas suivants illustrent cette méthode =



2) Détermination de x_j à partir de la distribution des impurétés diffusées.

Comme on l'a mentionné avant, une jonction P-N est localisée à la profondeur x_j , à partir de la surface de la plaquette, où les concentrations des impurétés diffusées (type N par exemple) et des impurétés de dopage de la plaquette (type P) sont égales.

Si l'épaisseur de la jonction est mesurée et que la concentration d'impurétés de la base est connue (N_{BC}) alors on possède un point sur le profil de la diffusion, qui est la concentration d'impurétés de type N à la distance x_j . A ce point, la concentration d'impurété type N diffusée est aussi égale à N_{BC} .

Connaissant le coefficient de diffusion D on a alors assez de données pour calculer la concentration à la surface N_0 est supposée être sensiblement la même pour les deux. Si x_{j1} et x_{j2} sont les profondeurs de diffusion mesurées par la méthode chimique précédente. On peut écrire dans la cas de la distribution suivant erfc :

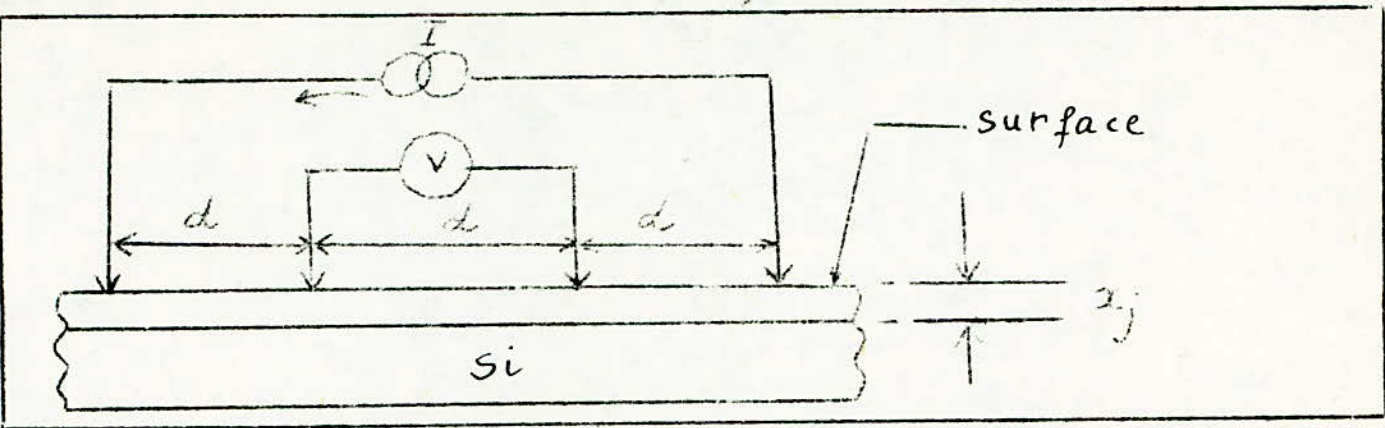
$$\left\{ \begin{array}{l} N_{BC1} = N_0 \operatorname{erfc} \left(\frac{x_{j1}}{2\sqrt{Dt}} \right) \\ N_{BC2} = N_0 \operatorname{erfc} \left(\frac{x_{j2}}{2\sqrt{Dt}} \right) \end{array} \right.$$

La résolution de ce système d'équation permet d'avoir D et N_0 .

La même méthode reste valable dans le cas d'une distribution d'impurétés gaussienne.

3) Mesure de la résistivité des couches diffusées

Cette opération s'effectue par l'usage d'une sonde à quatre points. Le schéma suivant en donne une illustration.



Comme pratiquement $x_j \ll d$ et que la surface d'en bas de la plaquette est supposée non parcourue par le courant provenant de la source (le courant emprunte le chemin le plus court).

La résistivité moyenne de la couche diffusée est donnée par :

$$\bar{\rho} = 4,53 \frac{V}{I} x_j$$

Où $\bar{\rho}$ est en $\Omega \cdot \text{cm}$ si V est en volts I en ampères et x_j en cm.

En fait, il est plus pratique de déterminer plutôt la résistance de la couche diffusée. En effet supposons par exemple, que la couche diffusée est carrée, de dimension a, de surface S et d'épaisseur x_j

$$\text{Alors } R = \bar{\rho} \frac{a}{S} = \bar{\rho} \cdot \frac{a}{x_j \cdot a} = \frac{\bar{\rho}}{x_j}$$

soit $\bar{R} = 4,53 \frac{V}{I}$ \bar{R} en Ohms si $\begin{cases} V \text{ est en volts} \\ I \text{ est en ampères} \end{cases}$

Ainsi \bar{R} déterminée par lecture directe de V et I sur les écrans correspondants de la sonde.

Et comme $\bar{R} = \frac{\bar{\rho}}{x_j} = \frac{1}{\sigma x_j}$

soit $\bar{R} = \frac{1}{q \mu \bar{n}} = \frac{1}{x_j}$ où

\bar{N} : densité moyenne de l'impurété dominante

λ : la mobilité moyenne correspondante

q : la charge électrique unitaire.

On voit que la connaissance de \bar{R} permet de connaître la densité d'impurété diffusées. Ainsi dans le cas d'une distribution gaussienne on a :

$$Q \# \bar{N} x_j = \frac{1}{\bar{R} q \lambda}$$

Dans le cas d'une distribution suivant la fonction erfc, où la densité d'impurété diffusées est donnée par :

$$Q = 1,13 N_0 \sqrt{Dt}$$

Ainsi connaissant N_0 concentration à la surface et le temps de diffusion t au bout duquel la densité nette et absolue d'impurétés sont sensiblement égales on peut déterminer le coefficient de diffusion D .

j) Diffusion de l'Or

Quelquefois, il est désirable, et pour des objectifs précis telle que la commutation d'utiliser comme source d'impurétés pendant la diffusion d'autres éléments que ceux des groupes III et V, du tableau périodique. A titre d'exemple on peut considérer la diffusion de l'or utilisée pour éliminer les minoritaires à courte durée de vie dans le Si

Cette propriété propre à l'or est utilisée pour modifier les caractéristiques des jonctions PN pour minimiser les temps de blocage et de saturation des composants.

Contrairement aux éléments des groupes III et V, les atomes d'or pénètrent dans le treillis de silicium par compression entre les plans d'atomes de silicium.

Les atomes d'or occupent alors les sites vacantes dans le treillis de Si.

L'or possède les 2 propriétés suivantes :

- Il diffuse rapidement dans le Si
- sa solubilité solide dépend de la température.

Il est très important de prendre en considération la solubilité de l'or dans le silicium (cf fig 6)* et d'en considérer une valeur équilibrée.

* cf annexe

VII - METALLISATION

a) but

L'opération de métallisation utilise un masque comportant des régions noires et consiste à obtenir les contacts ohmiques et les liaisons nécessaires entre les éléments du circuit intégré.

b) Choix du métal

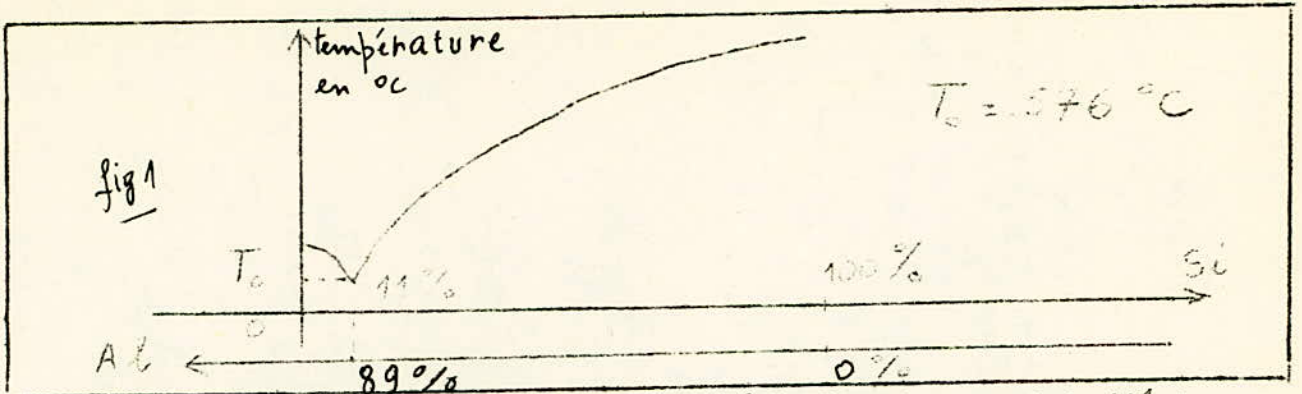
Le métal utilisé doit posséder les caractéristiques suivantes :

- il doit être capable de réaliser un bon contact ohmique
- il doit être un excellent conducteur
- il doit avoir des propriétés métallurgiques convenables.

Il existe beaucoup de métaux qui sont susceptibles de répondre à ces qualités, les plus commodes sont l'or, l'aluminium, le nickel, le plomb, l'argent et le chrome. Pour les composants semi-conducteurs à base de silicium, on préfère l'aluminium à cause de sa température de fusion moins élevée, de sa bonne conductivité et son abondance donc son bas prix.

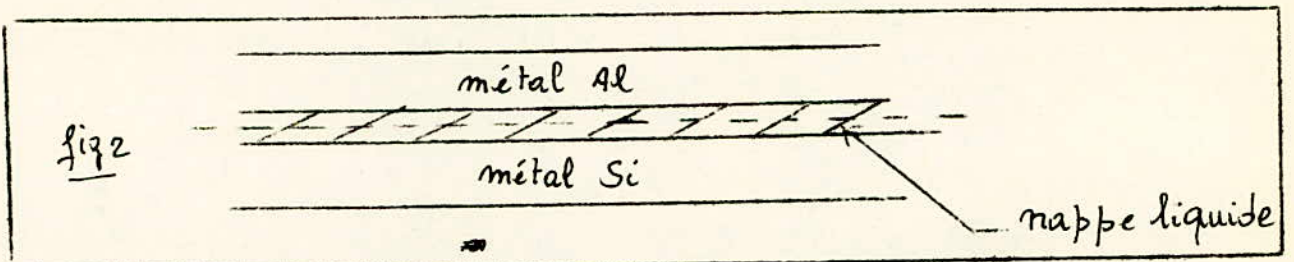
Toutefois en utilisant l'aluminium, il faut faire très attention afin d'éviter la formation de couches de types P (l'aluminium étant un donneur). Cependant si la région de silicium est dopée P, il y n'y a pas de difficultés car l'Aluminium qui a traversé la nouvelle couche, tend à le rendre P^+ . Si le silicium d'origine est dopé N, il doit être fortement dopé afin que les impuretés apportées par l'Aluminium ne perturbent pas trop le dopage du départ.

c) Formation de l'alliage Eutectique



L'alliage Eutectique Al-Si se forme à 576°C . Il est composé de 11% de silicium et 89 % d'Aluminium. Comme le montre le schéma de la Fig. 1 - 1. L'alliage eutectique correspond au point le plus bas que n'importe quelle autre combinaison des deux métaux.

Quand, on s'approche du point critique, les atomes de chaque métal commencent à se diffuser à l'interface. Lorsque l'eutectique est atteint, une très mince couche liquide se forme. Cette phase liquide est le mélange des deux métaux dans les proportions appropriées. (voir fig. 2) .



Lorsque la température dépasse celle de l'eutectique (576°C) tout l'aluminium présent disparaît très rapidement dans la phase liquide. Dans ce cas l'aluminium est un facteur déterminant parce que la couche d'aluminium qui doit participer avec un grand pourcentage à l'eutectique est très mince devant celle du silicium.

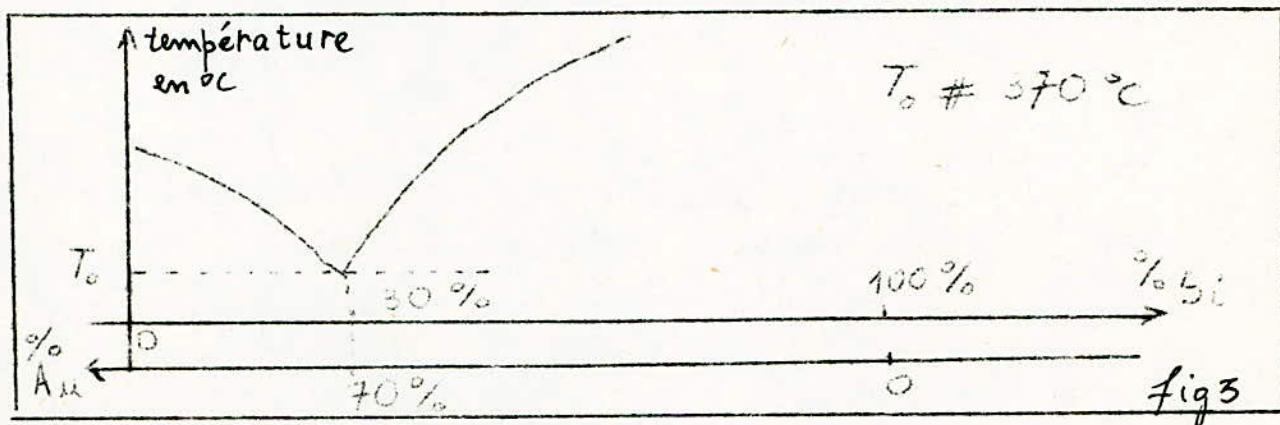
d) Pratique de la métallisation

Après toute diffusion, des ouvertures sont faites dans le dioxyde de semi-conducteur par la technique du photorésist dans les régions où les contacts ohmiques vont être formés. Les plaquettes sont après nettoyées et placées dans une cloche pour une évaporation sous vide.

Au sommet de cette cloche, on place un filament de tungsten sur lequel on dépose des cavaliers d'Aluminium.

A la partie inférieure de la cloche se trouvent les plaquettes éventuellement protégées par une palette mobile que l'on peut commander de l'extérieur par un champ magnétique. On chauffe doucement le filament de tungsten jusqu'à fusion des cavaliers qui forment alors des gouttes sur ce filament. Et en augmentant la température le métal fondu est évaporé et projeté très rapidement sur les circuits. Un moteur entraîne le " porte-plaquette " en mouvement rotatif de vitesse constante durant l'évaporation du métal. Ainsi le métal recouvre uniformément la surface des plaquettes. Les plaquettes métallisées sont une autre fois recouvertes de photorésist, exposées avec un nouveau masques qui est essentiellement l'inverse du précédent à l'hydroxyde de sodium pour enlever l'aluminium des parties non désirées. Par la même procédure d'évaporation, on dépose une couche d'or sur le verso de la plaquette rodée.

Notons que la température d'eutectique Au-Si est de 370°C . L'eutectique se forme avec 30 % de silicium et 70 % d'or. (fig. 3).



e) Déposition de la couche de vapox

Une pellicule de verre appelée vapox est déposée sur la surface de la plaquette. Le but de cette opération est de sceller et protéger les différentes couches de la pastille afin d'éliminer tout risque de contamination et de dommage.

L'opération consiste à placer la plaquette sur une plaque chauffante, qui, mis dans un réacteur vapox, entraîne l'échauffement de la plaquette; en envoyant les gaz, qui, en se refroidissant se déposent sur la plaquette formant ainsi la couche protectrice vapox. Le vapox ne doit pas couvrir les prises de contacts et les canaux d'incision.

VIII / TEST PROB (SONDAGE)

Après métallisation des plaquettes, on procède à un test de sondage qui consiste en une vérification unitaire avant la découpe en pastilles.

Il ne servirait à rien, en effet, de monter un élément défectueux, le prix de revient d'un enrobage plastique et de son montage est souvent plus élevé que celui de la pastille élémentaire. Cette vérification s'effectue par ordinateur suivant un programme donné.

Si les caractéristiques de l'élément sont dans les tolérances, l'ordinateur passe à la vérification de l'élément suivant. Si un ou plusieurs paramètres mesurés s'avèrent incorrects, révélant que le circuit est défectueux, cela déclenche automatiquement le fonctionnement d'un marqueur qui dépose sur le circuit anormal un point d'encre (rouge).

A la fin de l'opération, l'ordinateur fournit tous les résultats nécessaires permettant d'établir des statistiques pour le contrôle de la production (rendement par plaquette).

1) Incision et découpage des plaquettes par les méthodes scribing

a) Incision des plaquettes

Après soudage, et afin de faciliter le découpage en pastilles, il va falloir une opération d'incision.

On procède de la façon suivante :

La plaquette portant les circuits est fixée, par dépression pneumatique, sur une platine et sa direction est soigneusement ajustée (l'incision se fait au niveau des canaux réservés à cette opération).

Après fixation et ajustage, on met en action un bras mobile, portant une pointe en diamant qui va rayer la plaquette au niveau des régions réservés. L'enfoncement de la pointe en diamant doit être précis. Il faut qu'il provoque des fines et courtes rayures (cheveux) de part et d'autre de la ligne principale d'incision tout en n'aboutissant pas aux circuits. Sinon, l'incision ne remplira pas son utilité.

Une fois le bras arrive à l'extrémité du trait, il s'élève, repart en sens inverse pendant que la plaquette avance automatiquement d'un pas dans une direction perpendiculaire au trait qui vient d'être tracé.

Une fois que tous les traits ont été tracés, on tourne la plaquette de 90°, et l'on recommence l'opération, pour que l'ensemble des traits forme un quadrillage régulier.

Une inspection visuelle doit se faire pour éliminer les plaquettes mal incisées.

b) Découpage en pastilles

Les plaquettes convenablement incisées doivent être découpées en pastilles.

L'opération consiste à placer la plaquette entre un papier burette et un papier filtre pour éviter toute contamination. On pose l'ensemble sur une surface dure (section d'un cylindre) et on passe sur le tout, dans un sens puis dans le sens perpendiculaire, une sorte de rouleau à pâtisserie miniature, qui fait casser la plaquette selon les lignes d'incision.

2) Attache des pastilles au support

C'est la soudure du circuit sur son embase. Elle doit être dorée. L'attache se fait par frottement à une température de l'ordre 370°C. Un eutectique entre l'or et le silicium se forme à cette température.

3 types de boîtiers sont utilisés : TO 92
TO 126
MDIP

L'orientation de la pastille doit être aussi proche que possible de l'orientation du support. Si l'orientation n'est pas exacte on acceptera, un angle maximum de 30° pour TO126 et TO92, et un angle maximum de 10° pour MDIP.

Il doit y avoir de l'eutectique tout le long du bord supérieur et du bord inférieur de la pastille pour le TO 92 et TO 126, et 100 % d'eutectique sur le périmètre pour le MDIP.

Avant de passer à la soudure des liens, on procède à une inspection visuelle afin d'éviter un travail inutile. On rejette :

- toute pastille dont l'orientation par rapport au support dépasse 30° pour TO 126 et 10° pour MDIP.
- toute pastille déplacée horizontalement ou verticalement par rapport au centre du support, qui pourrait causer des difficultés pour souder les coussinets aux liens appropriés à la soudure des liens pour le MDIP. Il faut qu'aucune partie du coussinet ne dépasse le bord du boîtier.
- toute pastille dont l'inclinaison par rapport au plan du support est supérieure à 10° .
- toute pastille à laquelle est attaché un morceau d'une autre pastille dépassant 10 % de la pastille entière.
- toute pastille dont l'eutectique est insuffisant ou dépassant les limites.
- toute pastille ayant du préformé sur sa surface, liant 2 régions métallisées non recouvertes de vapox, et toute pastille ayant du préformé liant un coussinet et le périmètre.
- toute unité dont l'or du préformé ou de l'eutectique s'effrite ou s'écaille.
- toute unité qui a une boule de préformé (ou d'or) dépassant la surface de la pastille.
- toute pastille avec un manque de plus de 50 % d'aluminium .
- toute pastille avec de l'aluminium barbouillé qui cause un court circuit entre 2 régions métallisées.

- toute pastille qui a une entaille qui réduit la largeur d'une région métallisée par plus de 50 %, ou qui cause un court-circuit entre 2 régions métallisées.
- toute pastille ayant des débris de métal qui sont attachés à la surface de la plaquette et qui court-circuite 2 régions métallisées ou une région métallisée et le périmètre.
- toute pastille ayant une écaille qui touche une région métallisée active.
- toute diode ayant une écaille qui touche l'anneau protecteur.

Après toutes ces opérations, on passe à la soudure des liens des pastilles acceptées.

3) Soudure des liens

Elle consiste à lier les contacts du circuit aux barettes de connexions.

Elle se fait par des fils d'or.

2 méthodes peuvent être utilisées :

- soudure par thermocompression
- soudure à l'ultra-son.

Celle qui est utilisée au complexe est la soudure à thermocompression.

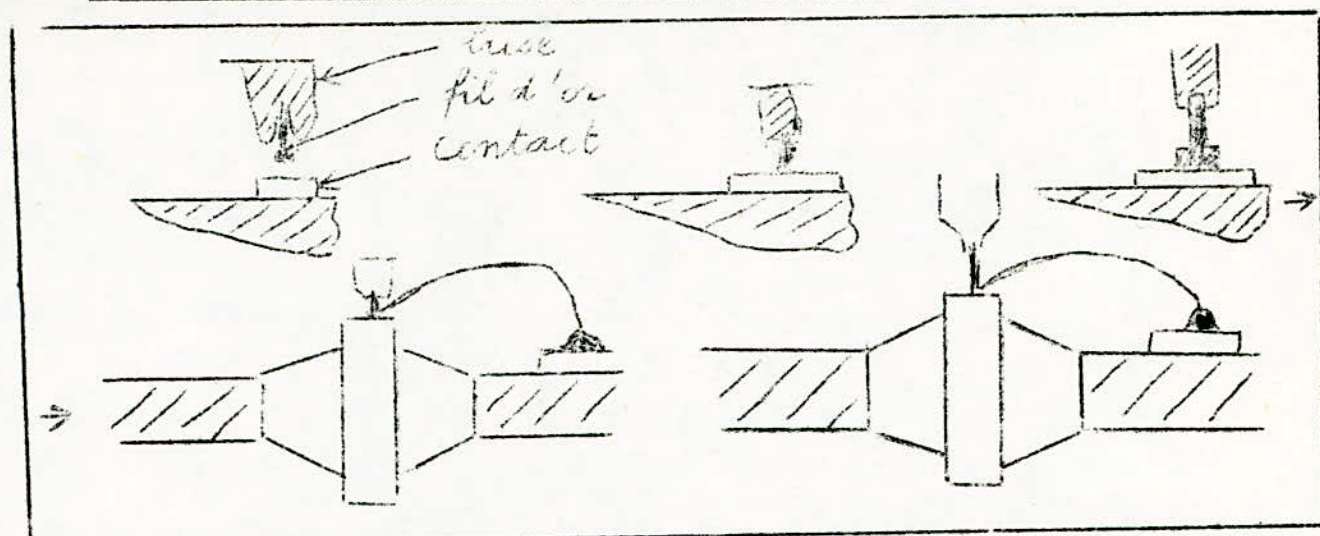
Pour cette méthode, la soudure du fil d'or au contact métallisé est réalisée en appliquant fortement l'or sur la partie métallisée à chaud (300 à 400°C).

Cette température n'endommage ni le circuit ni son attache au support.

La thermocompression peut se faire de 2 façons :

- thermo-compression " en bout "
- thermo-compression " en coin "

Différentes étapes de la thermo-compression " en bout "



La fig. ci-dessus indique la succession des opérations. L'extrémité du fil d'or a la forme d'une boule, obtenue par fusion du fil d'or lors de la thermo-compression précédente.

Cette boule empêche le fil de rentrer à l'intérieur de la buse quand celle-ci écrase la boule sur le cristal chaud. Ensuite on coude le fil et on effectue une thermo-compression sur l'extrémité de la barette de connexion (pièce métallique pénétrant dans le boîtier). Enfin à l'aide d'un minuscule chalumeau, on fait fondre le fil en formant la boule qui servira à la suivante thermo-compression.

Thermo-compression en " coin "

Elle est moins employée pour les circuits intégrés. Elle consiste à amener par un micromanipulateur, un fil d'or parallèlement à la surface métallisée sur laquelle on veut le fixer. Un coin en saphir vient appuyer le fil sur cette zone et réalise la thermo-compression.

Le même procédé est utilisé pour fixer le fil à l'extrémité des pattes de connexion pénétrant dans le boîtier.

Soudure à ultra-son

Elle se pratique en appuyant sur la zone de contact un fil d'Aluminium à froid. La presseuse est reliée à un générateur à ultra-son. Sa vibration fait varier rapidement la pression sur le contact, en même temps des ondes acoustiques transversales font remuer l'ensemble, ce qui assure une véritable soudure de l'or sur la couche métallisée.

Cette méthode est meilleure que la thermo-compression lorsqu'il s'agit d'attacher un fil métallique Aluminium à une zone métallisée en Aluminium.

4 - Encapsulation

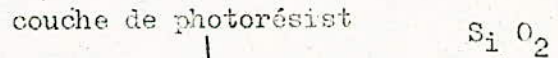
Afin de protéger le composant contre les contraintes d'environnement comme la température, l'humidité, les vibrations mécaniques, pressions, etc.... on le scelle à l'intérieur d'une enceinte étanche par enrobage dans un plastique.

Exemple d'intégration d'un

transistor et d'une résistance

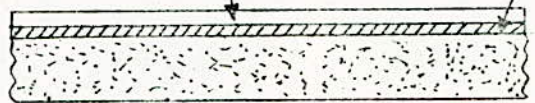
(technologie planar)

- 1) Substrat de silicium d'origine, type P, monocristallin à résistivité élevée ; de 2 à 3 inch de diamètre et de quelques millièmes de inch d'épaisseur (1 inch \approx 2,54cm).

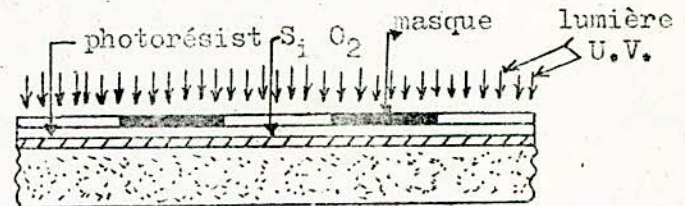


2) OXYDATION :

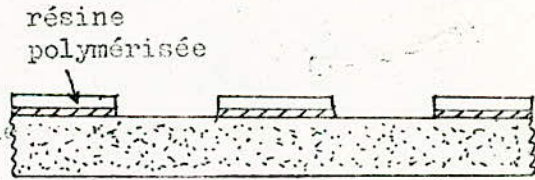
Formation d'une couche d'oxyde de silicium (SiO_2) par attaque du substrat par l'oxygène (gaz) ou la vapeur d'eau dans un four à 1200°C, après l'oxydation une couche de résine photosensible est uniformément répartie sur la plaquette par centrifugation.



- 3) Après séchage par une première cuisson, on recouvre la plaquette d'un premier masque destiné à la réservation des emplacements des couches enterrées. Le tout est ensuite exposé à la lumière U.V. qui traversera les parties transparentes et sera réfléchié par les parties opaques du masque. La partie de la résine traversée par la lumière se polymérise, durcit et s'adhère à l'oxyde.

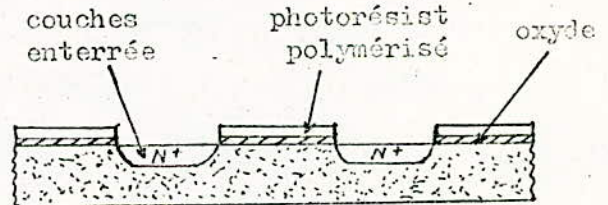


- 4) On enlève le masque puis on attaque la surface de la plaquette par le xylène. Seule la couche non polymérisée de la résine disparaît sous l'effet du xylène. Puis on procède à l'ouverture de fenêtres dans la couche d'oxyde de silicium non protégée par la résine polymérisée. On utilise à cet effet un mélange d'acide : le B.E.O.



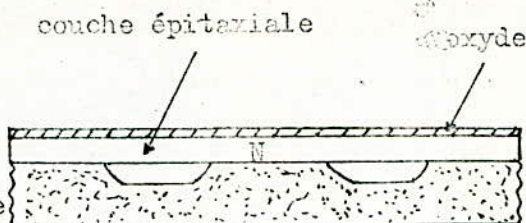
5) DIFFUSION DES COUCHES ENTERREES :

Par prédéposition d'une impurété type N (exp. P_2O_5), puis après décapage, on fait l'imprégnation de ces impurétés dans la plaquette. Cette opération utilise deux fours en tubes : l'un travaillant à une température d'environ 1000°C ; l'autre à environ 1200°C. La résine polymérisée et l'oxyde sont ensuite supprimés respectivement par un mélange d'acide sulfurique et d'eau oxygéné, et, par le B.O.E.

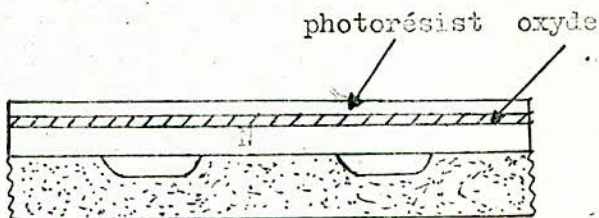


6) ÉPITAXIE :

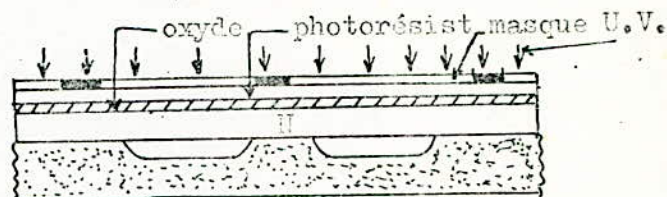
On fait accroître une mince couche de silicium monocristallin de type N sur la plaquette au moyen d'un réacteur épitaxial travaillant aux environs de 1200°C. Puis on procède à une nouvelle oxydation.



7) On recouvre ensuite toute la plaquette par une couche de photorésist.

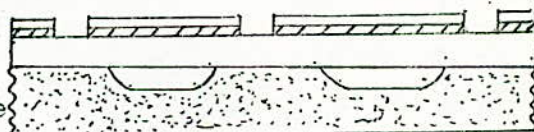


8) Un nouveau masque est placé sur la plaquette pour réserver les régions où seront diffusés les caissons d'isolement. Puis la plaquette est attaquée par la lumière U.V. (idem (3)).



(2e masque)

9) Réserve des fenêtres pour la diffusion des caissons d'isolement par attaque de l'oxyde non protégé par le photorésist polymérisé.



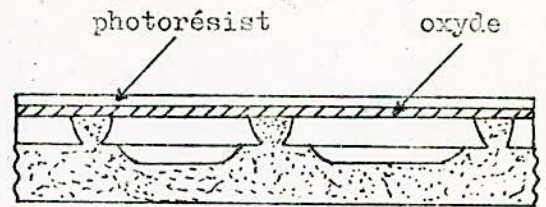
10) DIFFUSION DES CAISSONS D'ISOLEMENT

Un dopant de type P (exp: B_2O_3)

est diffusé à travers les fenêtres réservées.

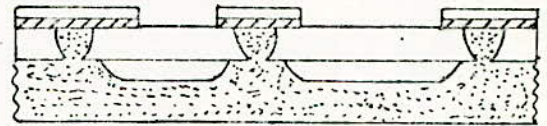
Le substrat est toujours porté au potentiel le plus négatif, aucun courant ne circulera de celui-ci vers les caissons ce qui assurera l'isolement.

- 11) On procède à une désoxydation puis une oxydation. Ensuite on couvre la plaquette par une couche de photorésist

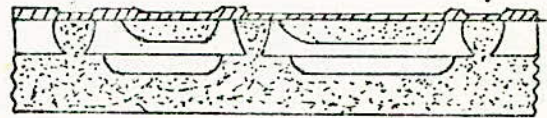


- 12) Réserve de la base par une opération de photogravure .

(3e masque).

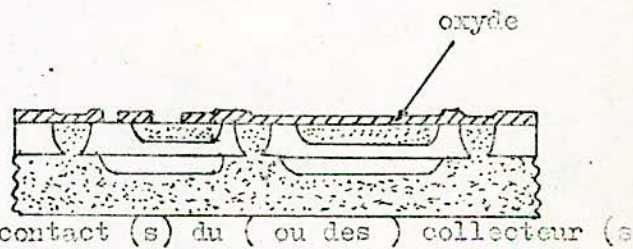


- 13) Après la diffusion type P de la base une nouvelle oxydation est opérée.



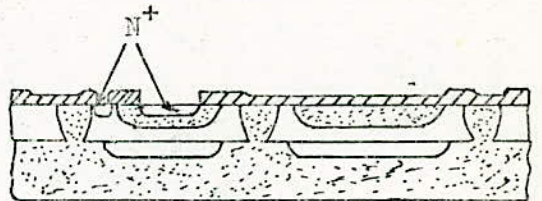
- 14) On couvre ensuite la plaquette avec une couche de photorésist, on masque la plaquette pour réserver la (ou les) fenêtr(e)s où sera diffusé l'émetteur et la (ou les) contact (s) du (ou des) collecteur (s)

(4e masque).



- 15) diffusion N^+ du (ou des) émetteur (s) et du (ou des) contact (s) du (ou des) collecteur (s).

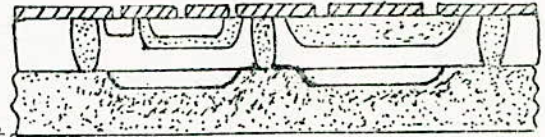
La diffusion N^+ du contact du collecteur sert à compenser le dopage type P apporté par l'aluminium pendant la métallisation.



16) OKYDATION

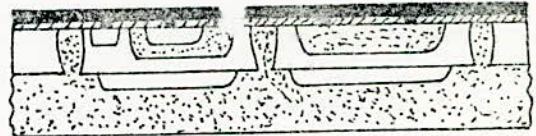


- 17) La plaquette est recouverte par une couche de photorésist, puis attaquée, à travers un masque, à la lumière U.V. pour la réservation des points de contacts et des interconnexions.

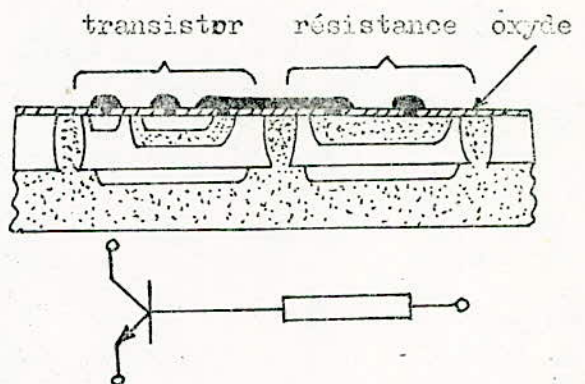


18) METALLISATION :

On fait déposer une couche de métal (Aluminium), par évaporation sous vide, sur toute la surface de la plaquette.



- 19) Après masquage et une attaque par l'acide, l'aluminium subsiste seulement dans les régions de contacts et d'interconnexions.



N.B :

- 1) Pour les C.I. , une couche protectrice de vapox (composé de S_iO_2 et de phosphore) doit être déposée sur la plaquette à l'exception des points de contacts et des chemins de découpage. (7e masque).
- 2) Les résistances sont diffusées au même temps que la base ou l'émetteur selon le process.
- 3) Pour les composants discrets (diodes, transistors) on ne diffuse ni couche enterrée, ni les caissons d'isolation, ni le contact du collecteur qui se fait sur le substrat (contact entre substrat et boîtier).
- 4) Pour les transistors PNP, un dopant N^+ est diffusé dans le lieu de la région N où sera pris le contact de la base.
- 5) Pour les composants discrets (diodes, transistors) un enduit assure la protection de la pastille. La disposition de cet enduit est pratiquée après l'attache de la pastille et la soudure des liens.

1) - INTRODUCTION

Les défauts sont liés à la technologie employée et cette technologie est assujettie à des phénomènes physiques qui entraînent des défaillances. Des réactions chimiques prennent naissance à la suite des contraintes auxquelles est soumis le composant, ce qui peut entraîner une modification des caractéristiques électriques et une augmentation du taux de panne. Chaque défaillance est liée au moins à une des différentes étapes du process de fabrication.

Pour diminuer au maximum les éventuelles avaries durant le fonctionnement d'un composant c'est à dire avoir une bonne fiabilité, il est utile de traiter avec le maximum de soin chaque opération, depuis la purification du silicium jusqu'à l'enrobage du produit, durant la fabrication.

2) - Facteurs influençants la fiabilité au cours des étapes suivantes.1ère étape : Obtention de la plaquette de Si

La modification des propriétés électriques du composant dépend de :

- la proportion de contamination restante dans le silicium
- l'orientation des atomes par rapport au germe ayant servi au tirage
- l'homogénéité de la résistivité sur toute la longueur du monocristal
- nombre de dislocation

-- la densité des crâters (trous microscopiques appelés trous de corrosion).

Si le germe ayant servi au tirage du monocristal ne présente pas de défauts, si la température a été parfaitement réglée, si les impurétés sont bien réparties dans le cristal et s'il n'y a pas de contamination, le monocristal ne devrait pas présenter de dislocation. Comme il est impossible de réaliser parfaitement toutes ces conditions on relève un certain nombre de dislocation. Ce nombre de dislocation varie avec la méthode de tirage utilisée. Les dislocations entraînent l'augmentation du temps de recombinaison. Les process utilisant des couches épitaxiales sur la plaquette doivent être fabriqués de façon à présenter le moins de dislocation. La présence de dislocation provoque une non uniformité de la distribution des impurétés dans la plaquette.

2ème étape : Photomarcage.

La présence des bulles d'air (pin-hole) dans la résine lors de l'ouverture des fenêtres dans la couche d'oxyde pour la diffusion des impurétés dans le silicium peut entraîner des diffusions dans les régions non désirées. Cette diffusion parasite, sous l'effet des contraintes, entraîne une modification des caractéristiques du composant.

3ème étape : Oxydation.

Durant l'opération d'oxydation, la pénétration de corps étrangers dans la couche d'oxyde ou une diminution de l'épaisseur de cette dernière augmente la fréquence de panne .

Les contaminants ioniques à la surface de l'oxyde affectent l'état de la charge d'espace du silicium et cela entraîne l'affectation des paramètres électriques.

4ème étape : Diffusion.

La profondeur de diffusion dépend essentiellement de la température. Une augmentation de température peut provoquer un court-circuit de jonction et sa diminution peut entraîner un circuit ouvert. C'est à dire il y aura une modification des propriétés électriques de l'élément.

Pour obtenir un composant apte à l'utilisation, on doit déterminer avec précision la profondeur de diffusion afin d'éviter la disparition de l'effet de jonction.

5ème étape : Métallisation.

L'existence des trous d'air (pin-hole) à l'intérieur du métal, des rayures à sa surface, d'une partie de pastille non recouverte de métal, des cratères, des déformations du chemin métallique et des fontes sur le vapox, peut entraîner au cours du temps des défaillances.

6ème étape : Assemblage.

La majorité des défaillances provient d'un mauvais assemblage. Toute pièce acceptée et ayant un léger défaut d'assemblage après inspection visuelle est plus risquée que les autres pièces de tomber en panne au cours d'utilisation. Un mauvais attachement de pastille au boîtier, un mauvais découpage de la plaquette en pastilles ou une mauvaise soudure des liens entre contacts ohmiques et pattes du boîtier, entraîne généralement des avaries infantiles.

La protection par le plastique assurant une meilleure tenue climatique et conduisant à des contraintes mécaniques beaucoup plus faibles.

L'herméticité est le facteur majeur d'encapsulation. L'humidité aboutissant au vapox (composé de S_iO_2 et de phosphore) attaque le phosphore en donnant un acide phosphorique qui détériore la jonction.

Pour éviter des tensions de claquages, on exige que le coefficient d'expansion thermique du plastique soit du même ordre que celui de l'oxyde (S_iO_2).

En conclusion, pour éviter tout ennui de défaillance, on doit protéger la plaquette de silicium du début jusqu'à la fin de fabrication contre toute contamination, contrôler tous les paramètres des différentes étapes et enfin protéger les éléments par un plastique de bonne qualité.

CONCLUSION

Le processus de fabrication des SC ainsi exposé a été traité d'une façon brève et qualitative dans le but de donner au lecteur de ce document, d'une façon générale, les différentes opérations jusqu'à présent pratiquées pour fabriquer un semi-conducteur.

Il a été volontairement omis de parler de toute la physique des semi-conducteur, ou de détailler inutilement les différentes étapes du processus.

En fait, chaque partie à elle seule constitue tout un domaine de recherche et exige un temps beaucoup plus long.

Toutefois, pour les intéressés, il est possible de consulter les documents indiqués à la fin de l'ouvrage pour satisfaire leur curiosité.

CHAPITRE III

APPLICATION DE LA FIABILITE SUR LES

SEMI-CONDUCTEURS

SOMMAIRE DU CHAPITRE

TITRES

- I - Introduction
- II - Essais de fiabilité en laboratoire
 - * différents essais pratiqués au laboratoire
 - * caractéristiques des équipements utilisés
- III - Relevé des résultats des essais
 - * données des essais comparatifs
 - * calcul des paramètres de fiabilité
 - * influence de chaque contraintes sur le process pour chaque type d'essai
 - * comparaison des degrés de résistance des éléments achetés et fabriqués pour chaque type d'essai
 - * facteurs d'accélération :
 - de la température
 - de l'humidité
 - de la tension appliquée
- IV - Analyse de quelques composants défectueux et interprétation des résultats.
- V - Conclusion.

I - INTRODUCTION

Pour pouvoir apporter des actions correctives sur les composants électroniques semi-conducteurs de la production nationale et améliorer celle-ci, il est indispensable de connaître en chiffre leur comportement vis-à-vis des contraintes qu'ils peuvent rencontrer durant leur fonctionnement. En plus une étude comparative avec d'autres produits étrangers est nécessaire car elle permet de situer le niveau d'acceptance du produit par rapport à ceux existants dans le monde afin de le rendre meilleur.

Cette étude peut être faite en laboratoire par des essais accélérés dont les résultats seront exploités non pas pour donner un jugement définitif car cela demande de nombreuses expériences et une grande diversité de fournisseurs. Toutefois cette initiative prise pour la première fois, appelle à être répétée plusieurs fois. On en a donné un exemple d'application dans le but de constituer un modèle de travail ouvert à toute amélioration.

II - ESSAIS DE FIABILITE EN LABORATOIRE

En laboratoire, pour prévoir la fiabilité d'un type de composant, on utilise le plus souvent la technique d'essais accélérés. Cette technique consiste à mettre un échantillon de composants choisis au hasard parmi un lot de taille beaucoup plus grande que celle de l'échantillon dans des équipements destinés aux tests de fiabilité. Les composants sont soumis à des contraintes beaucoup plus sévères que celles normalement rencontrées au cours de l'utilisation. C'est cette augmentation de contraintes qui entraîne l'accélération des réactions physico-chimiques à l'intérieur du composant. Il en résulte alors des modifications rapides des caractéristiques spécifiées. Le but des essais accélérés est aussi de raccourcir la durée de l'essai donc maximiser leur nombre et optimiser ainsi leur coût.

Les résultats de l'essai nous permettent seulement de déterminer les paramètres de fiabilité propres aux contraintes de l'essai accéléré. Mais l'objectif qu'on désire atteindre est de prévoir le comportement du matériel au cours de son utilisation normale. Pour cela il serait intéressant de trouver une relation donnant la variation des paramètres de fiabilité en fonction de l'augmentation des contraintes.

En réalité il n'existe pas de formules rigoureuses donnant la variation du taux de panne en fonction des contraintes, mais il existe une formule empirique basée sur la loi d'Arrhénius et la loi de la 5^{ème} puissance déduite des essais sur un type de condensateurs, (CF 1^{er} chapitre) qui a pour expression :

$$\lambda_2 = \lambda_1 \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^n K^{(T_2 - T_1)}$$

Les principaux essais accélérés pratiqués au niveau de la division "Fabrication des semi-conducteurs" sont :

- 1) L'emmagasinage à haute température
(High temperature storage).
- 2) Le choc thermique
(Thermal shock).
- 3) L'emmagasinage à haute température avec polarisation en inverse
(High temperature with reverse bias).
- 4) L'emmagasinage à 85°C et 85 % d'humidité relative avec polarisation
- 5) Le cycle de température
(Temperature cycle).
- 6) Pot de pression
(Pressure pot).

Ces essais permettent de connaître le degré de la résistance des composants électroniques aux contraintes pouvant provoquer des avaries accidentelles et cela durant la vie utile. Ce sont principalement, les surtensions et les températures de fonctionnement élevées. Elles comprennent également les chocs thermiques, les chocs mécaniques et l'humidité. Mais les effets des chocs mécaniques peuvent être éliminés, ^{ou} minimisés grâce à une bonne technologie d'assemblage et plus particulièrement une bonne encapsulation qui assure une protection contre l'humidité et minimise l'effet de corrosion et de vieillissement.

CARACTERISTIQUES DES EQUIPEMENTS UTILISES POUR CHAQUE TEST

ESSAI	EQUIPEMENT	CAPABILITE	CONDITIONS	DUREE
Emmagasillage à haute température (Storage)	Bleu M		150°C	168 h ; 500 h
Choc thermique	Liquide: Nitrogène; isopropyl; alcool; glycérine.		de -65°C à 125°C	10 cycles; 20 cycles
Emmagasillage à haute température avec polarisation en inverse.	TERMOTRON	- 50 à 200°C 0 à 120 V 0 à 50 V 0 à 40 V 0 à 25 V 0 à 15 V	150°C Voltage dépend du composant à tester.	48 h ; 96 h 168 h ; 500 h
Emmagasillage à 85°C et 85 % d'humidité relative avec polarisation.	BLEU M	0 à 40 V 0 à 100°C	85°C et 85 % H.R voltage dépend du composant à tester.	48 h ; 168 h
Cycle de température	RANSO INDUSTRIES	100 à 200	- 55°C à 150°C 15 mm/ 15 mm -- temps de transfert < 30 S	100 cycles; 200 cycles 500 cycles.
Pot de pression	PRESSUR POT	0 à 30 P sig	15 p sig 110°C	4 h ; 24 h

III - RELEVÉ DES RESULTATS DES ESSAIS

1) Données des essais comparatifs

Cf - première partie de l'annexe).

Ces mesures sont effectuées par ordinateur. Au moyen d'un ordinateur, d'une imprimante et d'un programme, spécifique au type de l'élément à tester, enregistré sur cassette magnétique; on ne prend que les mesures relatives aux composants de "BIN 1", c'est à dire que les composants sélectionnés à subir l'essai sont initialement tous bons. Les équipements servant à effectuer les essais sont réglés selon les conditions des tests. Une surveillance périodique de ces réglages est assurée par l'expérimentateur. A la fin des essais on relève, une deuxième fois, par ordinateur les data finaux. Par comparaison des "data" finaux et "data" initiaux et en suivant les spécifications de contrôle préétablies pour chaque type d'essai

On compte le nombre d'éléments défectueux parmi l'échantillon soumis à l'essai. On arrive ainsi à établir les tableaux récapitulatifs suivants:

Tableau 1

Comparaison des nombres de défauts et des modes de défaillances en fonction des différents types d'essais pour les transistors produits localement et ceux de fabrication étrangères

- process 04/77 (voir page 113)
- n° 423-3005
- type BC 238
- boîtier T092 (en plastique)
-

Tableau 2

Comparaison des moyennes et des écarts types des variations des paramètres testés selon les essais pour les transistors ci-dessus.

Tableau 3

Calcul des paramètres de fiabilité selon chaque essai pour le type des transistors ci-dessus.

Tableau 4

Comparaison des nombres de défauts et des paramètres de fiabilité pour les circuits intégrés de productions locale et étrangère, selon chaque type d'essai.

- n° 425-0121
- type TBA 120 S
- boîtier M-DIP.

Tableau 5

Comparaison des nombres de défauts et des paramètres de fiabilité, selon chaque type d'essai, pour les diodes produites localement et celles produites par I.T.T.

- process A₂R (voir page 112)
- n° 421-1001
- type BY 135
- boîtier TO 126

Tableau 6

Influence de chaque contrainte sur les différentes étapes du process.

Tableau 7

Comparaison des degrés de résistance des produits achetés et fabriqués à chaque essai.

Tableaux 8, 9 et 10

Résultats de quelques essais de fiabilité pratiqués respectivement sur trois types de boîtiers.

- diodes (TO126)
- Transistors (TO92)
- C.I M-DIP.

TABLEAU 1

ESSAI	VALEURS DES CONTRAINTES DE L'ESSAI	Durée de l'essai	LIMITES TOLEREES	Taille de l'échantillon	Nbr de Déf.		MODES DE DEFAILLANCES				
					Ach.	Fab.	VALEURS TESTEES	PRODUIT ACHETE		PRODUIT FABRIQUE	
								BONS	MAUVAIS	BONS	MAUVAIS
Emmagasinage à haute Température (High Temperature Storage)	Température 150 °C	48 heures	$\Delta I_{CBO} < 1\mu A \text{ à } 50V$ $\Delta I_{CES} < 1\mu A$ $\Delta V_{CES} < \pm 10\% \text{ à } 100mA/1mA$ $\Delta h_{FE1} < +30\% \text{ à } 100\mu A/5V$ $\Delta h_{FE2} < +30\% \text{ à } 2mA/5V$ $\Delta h_{FE3} < 30\% \text{ à } 100mA/5V$	25	110	11	ΔI_{CBO}	25	0	25	0
							ΔI_{CES}	25	0	24	1
							Δh_{FE1}	25	0	19	6
							Δh_{FE2}	25	0	21	4
							Δh_{FE3}	25	0	22	3
							ΔV_{CES}	25	0	15	9
							Emmagasinage à haute température avec polarisation en inverse. (High Temperature Reverse Bias HTAB)	Température 150 °C Voltage 40.V	48 heures	Idem	
ΔI_{CES}	25	0	25	0							
Δh_{FE1}	25	0	16	9							
Δh_{FE2}	25	0	20	5							
Δh_{FE3}	25	0	22	3							
ΔV_{CES}	23	2	16	9							

Tableau 1 (suite)

Essai	Contraintes de l'essai	Durée de l'essai	Limites tolérées	Taille de l'échantillon	nbre déf		paramètres testés	modes de défaillances							
					Ach.	Fab.		Produit acheté		Produit fabriqué					
								Bon	Mauvais	Bon	Mauvais				
Pot de pression (mesure Pot)	15 sig	24 heures puis 48 heures	$\Delta I_{CBO} < 1 \mu A$ $\Delta I_{CES} < 1 \mu A$ $\Delta V_{CEsat} \pm 10\% \text{ à } 10mA/1mA.$ $\Delta h_{FE1} \pm 30\% \text{ à } 100\mu A/5V$ $\Delta H_{FE2} \pm 30\% \text{ à } 2mA/5V$ $\Delta H_{FE3} \pm 30\% \text{ à } 100mA/5V$	25	06/48h	15/48h	ΔI_{CBO}	25	22	0	3	25	25	0	0
							ΔI_{CES}	25	24	0	1	25	25	0	0
							Δh_{FE1}	24	24	1	-1	16	18	9	7
							Δh_{FE2}	25	24	0	1	17	18	8	7
							Δh_{FE3}	25	24	0	1	21	20	4	5
							ΔV_{CES}	24	24	1	1	18	13	7	12
Emmagasinage 85°C 80 85% Humidité relative avec clarification 85°C/85% R.H with bias)	Voltage 40 Volts (V_{CER}, R_{BE}^{-K})	96 Heures	idem	25	13	2	ΔI_{CBO}	25		0		25		0	
							ΔI_{CES}	25		0		25		0	
							Δh_{FE1}	13		12		24		1	
							Δh_{FE2}	13		12		24		1	
							Δh_{FE3}	25		0		25		0	
							ΔV_{CES}	25		0		24		1	
Cycle de température (température cycle)	de - 55°C à 150°C	100 cycles	idem	25	0/100 cycles / 200 cycl.	4/100 cycles / 200 cycl.	ΔI_{CBO}	25		0		25		0	
							ΔI_{CES}	25		0		24		1	
							Δh_{FE1}	25		0		24		1	
							Δh_{FE2}	25		0		25		0	
							Δh_{FE3}	25		0		24		1	
							ΔV_{CES}	25		0		24		1	

T A B L E A U 2

ESSAI	$x = \Delta I_{CBO}$ (nA)		$x = \Delta I_{CES}$ (nA)		$x = \Delta h_{FE 1}$		$x = \Delta h_{FE 2}$		$x = \Delta h_{FE 3}$		$x = \Delta V_{CES}$ (mV)		
	Ach.	Fab.	Ach.	Fab.	Ach.	Fab.	Ach.	Fab.	Ach.	Fab.	Ach.	Fab.	
Emmagasinage à haute température	///												
	\bar{X}	0,02	0,82	0,56	27,07 uA	20,23	40,07 /24	20,90	41,28/24	9,12	28,27/24	0,32	3,12
	6	0,098	1,11	0,496	13,256	10,128	34,98/24	8,299	34,18/24	3,585	24,56/24	0,240	3,207
	X max	0,5	9	1	67,67 u	41	O.R.	41	O.R.	17	O.R.	0,5	14
	X min	0	0	0	0	3	0	7	1	1,2	1	0	0
Emmagasinage haute tempéra- ture jonction polaris.inverse	\bar{X}	0,42	0,42	0,64	0,5	15,25	46,9	11,56	45,70	5,49	32,93	1,1	2,72
	6	0,688	0,833	0,539	0,489	15,595	47,635	7,156	45,512	4,385	25,280	2,592	1,662
	X max	1,5	3	2	1	45,3	208,2	30	209,9	21,2	82,8	12	6,5
	X min	0	0	0	0	0	6,3	0	0	0,2	3	0	0
P O T DE PRESSION	\bar{X}	32,16 493	9,88 2,76	19,02 289,58	7,84 3,2	11,23 165,48	42,49 39,50	9,44 13,04	57,70 53,89	5,90 156,13	39,16 37,91	0,36 0,84	3,66 6,22
	6	99,31 1045,9	28,800 11,825	59,940 696,68	21,869 9,591	22,853 733,57	34,805 34,569	17,013 13,07	44,920 45,146	11,57 725,54	28,078 28,95	0,755 1,007	3,618 7,938
	X max	431 5,12 u	134 60,5	220 3,52 u	101 49	111 3758,7	140,2 OR	71 OR	134 OR	41,4 3710	99 OR	3,5 3,5	11,5 35,5
	X min	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	1,9 2,8	0 0	0 4	0 0	1 0	0 0	0 0

TABLEAU 2 (Suite)

ESSAI	$x = \Delta I_{CBO}$ (nA)		$x = \Delta I_{CES}$ (nA)		$x = \Delta h_{FE1}$		$x = \Delta h_{FE2}$		$x = \Delta h_{FE3}$		$x = \Delta Y_{CES}$ (mV)		
	Ach.	Fab.	Ach.	Fab.	Ach.	Fab.	Ach.	Fab.	Ach.	Fab.	Ach.	Fab.	
EMAGASINAGE A 85 °C \pm 0,5% D'HUMIDITE RELATIVE AVEC POLARISATION	\bar{x}	1,56	0,12	1,44	0,42	84,02	25,49	62,70	14,28	17,43	5,68	0,5	0,86
	σ	7,04	0,25	4,84	0,56	89,37	84,55	60,90	20,5	15,37	5,95	1,75	2,81
	x_{max}	36	1	25	2	242,5	439,6	166	114	38	34	9	12
	x_{min}	0	0	0	0	3,2	3	4	3	2	1	0	0
CYCLE DE TEMPERATURE	\bar{x}	0,06	0,14	0,44	2,7 μ	24,28	11,23	14,69	13,85	3,60	13,188	0,4	1,74
	σ	0,215	0,436	0,496	13,256K	28,810	15,25	22,43	11,564	6,694	27,824	1,067	5,855
	x_{max}	1	2	1	67,65 μ	77,4	81,8	110	55	36	146	5,5	30
	x_{min}	0	0	0	0	0	0,1	0	3	1	3	0	0

2) Calcul des paramètres de fiabilité

La méthode utilisée en essais accélérés sur les composants de production nationale ainsi que sur les composants achetés, est du type : essais tronqués sans remplacement.

La formule donnant le taux de défaillance est la suivante :

$$\hat{\lambda} = \frac{\ln (n / n - r)}{t_r}$$

alors

$$MTBF = \hat{m} = \frac{t_r}{\ln (n / n - r)}$$

L'intervalle de confiance de la vraie valeur de m correspondant à l'essai tronqué sans remplacement est :

$$\text{Limite inférieure} : m_i = \frac{2r \hat{m}}{\chi^2_{\alpha/2 ; 2(r+1)}}$$

$$\text{limite supérieure} : m_s = \frac{2r \hat{m}}{\chi^2_{(1-\frac{\alpha}{2}) ; 2r}}$$

pour un intervalle bilatéral.

Dans le cas d'un intervalle unilatéral, la limite est :

$$m_u = \frac{2r \hat{m}}{\chi^2_{\alpha ; 2(r+1)}}$$

où α : risque d'avoir le MTBF hors intervalle

r : nombre de défauts observés.

en appliquant ces résultats pour un niveau de confiance de 95 %, on dresse les tableaux donnant les valeurs du M.T.B.F. et du taux de pannes et leurs intervalles de confiances pour chaque type d'essai.

T A B L E A U - 3 -

E S S A I	DUREE DE L'ESSAI (h)	TAILLE DE L'ECHANTILLON (n)		NOMBRE DE DEFAUTS (n)		PRODUIT ACHETE						PRODUIT FABRIQUE					
		ACHETE	FABRIQUE	ACHETE	FABRIQUE	TAUX DE PANNES $\times 10^3$			M.T.R.F. (h)			TAUX DE PANNES $\times 10^{-3}$			M.T.R.F. (h)		
						LIMITE INFER.	VALEUR ESTIM.	LIMITE SUP.	LIMITE INFER.	VALEUR ESTIM.	LIMITE SUP.	LIMITE INFER.	VALEUR ESTIM.	LIMITE SUP.	LIMITE INFER.	VALEUR ESTIM.	LIMITE SUP.
Emmagasinage à haute température "storage"	48	25	25	0	11	-	0	-	-	∞	-	6,03	12	39,6	25,85	82,72	1658
Emmagasinage à haute température avec polarisation en inverse "HTPB"	48	25	25	2	15	0,21	1,73	6,27	150,36	575,66	4757,52	10,6	10	25,3	30,52	52,29	935
Petite pression "pp"	24	25	25	2	11	0,42	3,47	12,6	70,68	287,92	2372,96	12	24	43,2	23,13	41,4	829
	48	25	25	6	15	2,09	5,71	12,4	80,35	174,9	476,56	10,6	10	25,3	30,52	52,29	935
Emmagasinage à 85° et 85% d' H.R.	96	25	25	13	2	4,07	7,64	13	76,48	130,79	245,63	0,1	0,87	3,13	312,73	1151,33	21515,6
Cycle de température "I.C"	100 cycle	25	25	0	4	-	0	-	-	∞	-	0,47	1,74	4,46	224	573,54	2104,75

N.B : En cycle de température le MTRF s'exprime en cycle
le λ en (cycle) - 1

TABLEAU - 4 -

E S S A I	VALEURS DES CONTRAINTES DE L'ESSAI	DUREE DE L'ESSAI (h)	TAILLE DE L'ECHANTILLON (n)		NOMBRE DE DEFAUTS (n)		PRODUIT ACHETE						PRODUIT FABRIQUE					
			ACHETE	FABRIQUE	ACHETE	FABRIQUE	TAUX DE PANNES x 10 ⁻³ (h-1)			MTRF (h)			TAUX DE PANNES x 10 ⁻³ (h-1)			MTRF (h)		
							LIMITE INFER.	VALEUR ESTIM.	LIMITE SUP.	LIMITE INFER.	VALEUR ESTIM.	LIMITE SUP.	LIMITE INFER.	VALEUR ESTIM.	LIMITE SUP.	LIMITE INFER.	VALEUR ESTIM.	LIMITE SUP.
Magasinage à haute température "storage"	température constante 150°C	168	53	54	2	5	2,77.10 ⁻²	0,229	0,827	1209,07	4367,47	36094,70	0,187	0,578	1,35	740,90	1729,04	
Magasinage à haute température avec polarisation en inverse (HTRB)	température 150°C Voltage 12V	48	26	25	3	1	0,526	2,55	7,46	133,06	391,51	1898,99	0,34.10 ⁻³	0,369	2,06	485,95	2707,47	
Choc de pression (P.P)	Pression 15 psig	48	52	52	0	16	-	0	-	-	-	-	1,86	3,33	5,35	186,88	300,56	
Magasinage à 100% et 85% d'humidité relative	voltage 12V	168	43	43	2	8	3,43.10 ⁻²	0,283	1,02	976,46	3527,33	29151,48	0,529	1,22	2,41	414,195	816,12	
Cycle de température (T.C.)	250 cycles - 55°C	250 cycles	53	53	14	8	0,65	1,22/cycle	2,06	485,78	815,05 cycles	1537,10	0,282	0,65/cycle	1,29	775,40	1527,84	
Choc thermique (T.S.)	10 cycles - 10°C à 125°C	10 cycles	25	25	0	0	-	0	-	-	8	-	-	0	-	-	8	

1890,26 538,40 107014,61 5325,03
 3538,71

TABLEAU - 5 -

E S S A I	VALEURS DES CONTRAINTES DE L'ESSAI	DUREE DE L'ESSAI (h)	TAILLE DE L'ECHANTILLON (n)		NOMBRE DE DEFAUTS (n)		PRODUIT ACHETE						PRODUIT FABRIQUE					
			ACHETE	FABRIQUE	ACHETE	FABRIQUE	TAUX DE PANNES $\times 10^{-3}$ (h ⁻¹)			M.T.B.F. (h)			TAUX DE PANNES $\times 10^{-3}$ (h ⁻¹)			M.T.P.F. (h)		
							LIMITE INFER.	VALEUR ESTIM.	LIMITE SUP.	LIMITE INFER.	VALEUR ESTIM.	LIMITE SUP.	LIMITE INFER.	VALEUR ESTIM.	LIMITE SUP.	LIMITE INFER.	VALEUR ESTIM.	LIMITE SUP.
magasinage à température constante "storage"	150°C	168	75	78	10	2	0,4	0,85	1,56	638,36	1173,99	2448,10	0,018	0,15	0,56	1790,47	6467,65	53451,63
magasinage à haute température avec polarisation en inverse (HTRB)	150°C voltage	48	32	32	0	2	-	0	-	-	8	-	0,16	1,34	4,85	205,89	743,74	6416,61
test de pression (P.P.)	15 psig	24	25	25	4	12	1,98	7,26	18,6	53,76	137,65	505,14	14	27,25	47,59	21	36,7	74
magasinage à 80°C et 85% humidité relative	110V Voltage	96	38	38	6	3	6,57	1,79	3,89	256,65	558,62	1522,12	0,17	0,85	2,5	399,43	1167,34	5669,11
Cycle de température (T.S.)		250 cycles	43	43	2	3	0,02	0,19	0,68	1453,52	5249	43380,16	0,059	0,29	0,84	1182,82	3450,82	16767,09

TABLEAU -6 -

TESTS ENVIRONNEMENT	DEFAUTS POUVAINT RESULTER (EFFETS DU TEST)	PROCESS		CAUSES
		FABRICATION DU WAFER	ASSEMBLAGE	
T.R.B. Magasinage à haute température avec polarisation en inverse	Courts circuits Élévation du courant de fuite des jointions	SiO ₂ Diffusion Métallisation		Faible épaisseur ou manque SiO ₂ Temps d'attaque du SiO ₂ par H.F ou séquence de nettoyage non respectée Contamination ou existence de matériaux étranger sur la surface de la pastille. Défaut de masques.
Chocs de température	Changement dans les caractéristiques électriques dû aux déformations mécaniques tel que : Détachement des liens, craquement de la pastille, rupture des matières isolantes (SiO ₂).		Qualité de l'eutectique Soudure de liens encapsulation	Variation des dimensions mécaniques dus aux compression et dilatation des matériaux.
Climat thermique	Même effects que 2, plus pénétration l'humidité a travers le boitier causant la corrosion du métal		Encapsulation	La mauvaise qualité de l'époxy entraine l'infiltration de goutlette du liquide utilisé à l'intérieur et leur déposition sur la pastille.
85 °C/85% H.R	Corrosion du métal. Distorsion physique et décomposition des matériaux organiques. Changement dans les tensions d'avalanche et la valeur des résistances et matériaux diélectriques à la suite d'électrolyse.	Tout le process		Réaction chimique accélérée par les conditions serveres de ce test

T A B L E A U - 7 -

ESSAI	D I O D E S		T R A N S I S T O R S		C I R C U I T S I N T E G R E S	
	FABRIQUE	ACHETE	FABRIQUE	ACHETE	FABRIQUE	ACHETE
Emmagasinage à haute température "storage"	BON	BON	FAIBLE	TRES BON	BON	BON
Emmagasinage à haute température avec polarisation en inverse "H.T.R.B."	ASSEZ BON	TRES BON	FAIBLE	BON	BON	BON
Emmagasinage à 85°C et 85 % d'humidité relatif.	BON	FAIBLE	BON	FAIBLE	FAIBLE	BON
Pot de pression "p.p"	TRES FAIBLE	FAIBLE	TRES FAIBLE	BON	FAIBLE	TRES BON
Cycle de température "t.c"	BON	BON	BON	TRES BON	BON	BON
Choc thermique "t.s"					TRES BON	TRES BON

TEST	CONDITION DU TEST	DUREE h	Echantil. Nbre de défauts	MODE DE DEFAILLANCES						OBSERVATIONS (Process/Boitier)	
				Δ ICBO	Δ ICES	Δ HFE1	Δ HFE2	Δ HFE3	Δ VGES		
Pot de pression	Voir page	4	43	1	X	X	X	X		X	04/77
		24	43	14	X X	X X	X X X	X X	X	X X X X X	
		48	43	12	X	X	X X	X X	X X	X X X X X	
Emmagasinage à 150° C "Storage"	"	168	52	6	X X X	X X X	X X X X	X X X	X X X	04/77	
Emmagasinage à haute tempéra- ture avec polari- sation inverse (H.T.R.B)	"	48	52	5			X X	X X X X	X X	04/77	
Emmagasinage à 85° C & 85 % d'H.R.	"	168	38	8	X X	X X	X X	X	X	X X X	04/77
Cycle de tem- pérature	"	100 cycles	52	1			X	X	X	X	04/77
		200 cycles	52	2			X		X		

T A B L E A U - 10 -

TEST	TYPE	DUREE DU TEST "h"	Echantillon	Nbre de def. après le test	AVANT LE TEST : NBRE DE		APRES LE TEST : NBRE DE			MODE DE DEFAILLANCE N° du test où est survenu la défaillance
					BIN1	BIN 0 "18"	BIN1	BINO	BIN 0 "18"	
POT DE PRESSION	LM 1001 (TBA 120S) M - DIP	48	52	8	22	30	22	30	22	12 6-7-17-19-20-21-23 11-12 17-20-21-25-30 10-12-15-17-19-20-22-23-29 19 11-12 17-19-21-25-30
EMMAGASINAGE A 150° C " STORAGE"	"	168	52	6	20	32	15	37	31	10-21 21 1 1 12-15-17-19-20-21-22-23-29 10-12-14
EMMAGASINAGE A 85° C & 85 % D'HUMIDITE RE- LATIVE " POLARISATION"	"	168	44	9	23	21	4	40	31	1 14-17-20-21-23-29-30 6-7-17-19-20-21 1 6-7-10-12-15-17-20-21-29 19 12 7-12 4-5-6-7-8-9-10-17-21-23-30
EMMAGASINAGE A HAUTE TEMPERATU- RE POLARISATION EN INVERSE	"	168	25	3	12	13	14	11	8	
CYCLE DE TEMPERATURE	"	200 CYCLES	52	1	19	33	21	31	30	17

3) Facteurs d'accélération

3-1) Facteurs d'accélération de température

Une formule empirique basée sur la loi d'Arrhénius liant le MTBF en test accéléré et le MTBF en fonctionnement normal (champ d'application) est donnée par :

$$m = m_0 \exp \left\{ \frac{E}{K} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right\}$$

avec m : MTBF à la température de jonction T

m₀ : MTBF à la température de jonction T₀

T₀ et T : température de jonction en °K

E : énergie d'activation en eV

K : constante de Boltzmann = 8,617 x 10⁻⁵ eV / °K

Pour les circuits linéaires et MOS E = 0,7 eV.

A partir de cette formule et de plusieurs essais, des facteurs d'accélération ont été déterminés. Le tableau suivant en donne quelques uns de ces facteurs d'accélération.

Champ d'application en Laboratoire T ₀ (°C)	25	40	45	50	55	60	70	85
85	96,41	26,10	17,36	11,69	7,98	5,49	2,69	1
125	942	255	170	114	77	54	26	9,7
130	1298	330	219	141	101	69	34	12,6
135	1559	422	281	189	129	88	84	16
140	1984	537	357	240	169	113	55	20,5
145	2510	680	452	314	207	143	70	26
150	3159	855	569	383	261	180	88	32,5

Ce tableau nous donne les valeurs avec lesquelles en multipliant le MTBF en fonctionnement accéléré, on obtient le MTBF en fonctionnement normal.

3-2) Facteurs d'accélération d'humidité

Par de multiples expériences, quelques valeurs de facteurs d'accélération d'humidité pour la valeur standard 85 % d'humidité relative ont été obtenues.

Ces valeurs se trouvent dans le tableau suivant :

Champ d'application	en laboratoire	facteur d'accélération
65	85	3X
50	85	10X
20	85	700X
15	85	2800X
12	85	6000X

3-3) Facteurs d'accélération de tension appliquée.

Ils se déterminent à une température fixe par le réseau de courbes (voir page tracé à partir de la formule expliquée auparavant . $\lambda_2 = \lambda_1 \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^x K (T_2 - T_1)$)

Pour un taux de défaillance rapporté à 25°C , on a les facteurs d'accélération, pour différentes tensions appliquées, suivants :

% Voltage normal	Facteur multiplicatif (d'accélération)
20 %	0,02
40 %	0,07
60 %	0,20
80 %	0,44
100 %	0,1
120 %	1,8

Exemple de calcul du MTBF pour les 3 types de composants de production nationale en fonctionnement normal.

En fonctionnement normal, un composant est soumis à des contraintes d'environnement et à des contraintes de fonctionnement ; donc seuls les 2 essais OHL(HTRB) et 85°C 85% d'H.R. qui peuvent donner une bonne estimation de la vraie fiabilité vis à vis de ces contraintes.

Le tableau qui suit regroupe les différentes valeurs du MTBF en fonctionnement normal calculées à partir des essais accélérés HTRB rapporté à 25°C, 85°C/85% d'HR rapporté à 20°C avec polarisation nominale.

Remarque. Pour les composants électroniques, on applique toujours en essai accéléré une tension de polarisation égale à 80% de la tension nominale. Alors le facteur multiplicatif est donné par

$$\frac{\lambda (80\%)}{\lambda (100\%)} = \frac{1,3 \cdot 10^{-5}}{3 \cdot 10^{-5}} = 0,43$$

ESSAI	D I O D E S Polarisation 110 V				T R A N S I S T O R S Polarisation 40 V				C I R C U I T S I N T E G R E S Polarisation 12 V			
	MTBF Accéléré (h)	Facteur Multipli- catif	MTBF Normal(h)	Fiabilité	MTBF Accéléré (h)	Facteur X	MTBF Normal(h)	Fiabilité	MTBF Accéléré (h)	Facteur X	MTBF Normal(h)	Fiabilité
O P L (HTRB) 150° C	743,74	0,43x3159 = 1358,37	1.010. 274,1	$e^{-99 \cdot 10^{-7} t}$	52,38	0,43x3159 = 1358,37	71151,42	$e^{-1,4010^{-5} t}$	2707,47	0,43x3159 = 1358,37	3.677.746	$e^{-2,710^{-7} t}$
859C/85°/HR	1167,34	46052,99	53.759.504	$\text{Exp}(-1,86 \cdot 10^{-8} t)$	1151,33	46.052,99	53.022.195	$\text{Exp}(-1,89 \cdot 10^{-8} t)$	816,12	46.052,99	37.584.771	$\text{Exp}(-2,66 \cdot 10^{-8} t)$

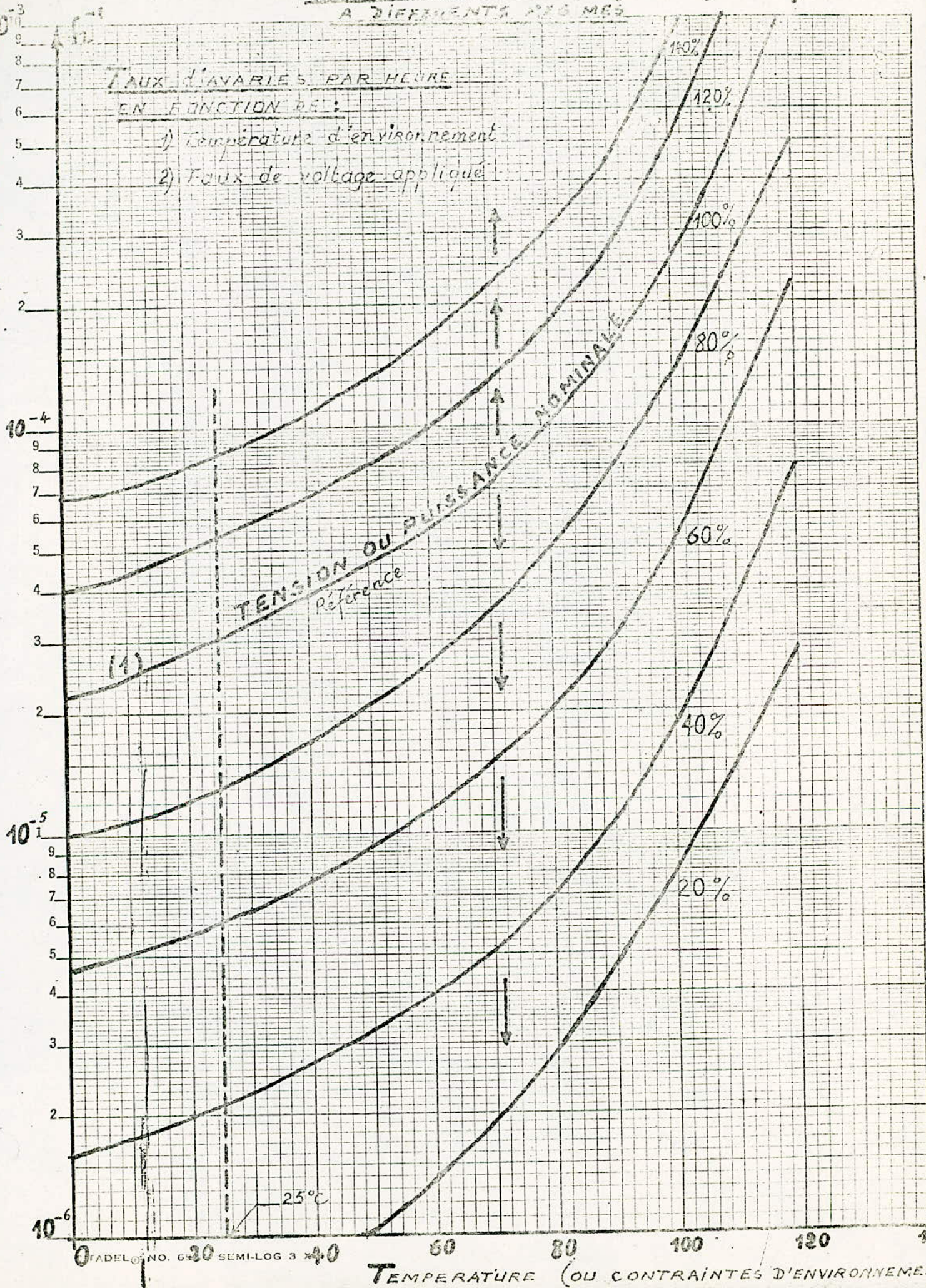
N.B. : - 1°) O P L = Opérating life = Mode opératoire.

Courbes de Taux d'Avaires (Derating curves)

A DIFFERENTS REGIMES

TAUX D'AVAIRES PAR HEURE
EN FONCTION DE :

- 1) Température d'environnement
- 2) Taux de voltage appliqué



IV - ANALYSE DE QUELQUES ELEMENTS DEFECTUEUX

Les éléments défectueux sont retestés une seconde fois, avant toute opération d'analyse, pour la confirmation de leur défectuosité.

Ce test peut être effectué au moyen de l'ordinateur ou d'un traceur de courbes et d'une sonde de mesure, selon le besoin.

Puis on procède soit à une crossection en profil de la pastille pour visualiser, après coloration chimique, les différentes couches diffusées et vérifier la qualité de l'eutectique ($A_u - S_i$) et ($Al - S_i$); soit à l'enlèvement du plastique encapsulant la pastille pour visualiser certains défauts tels que : les cassures de la pastille, dues en général à une mauvaise incision, les mauvaises soudures, la présence de contamination à la surface de la pastille sous la couche de vapox (pour les CI) ... etc.... Dans ce cas aussi une coloration chimique (staining) permet de distinguer les différentes régions de diffusions.

Outre, les microscopes servant à l'inspection visuelle, on dispose d'un appareil assez sophistiqué permettant de prendre des photos des phénomènes observés qui constitueront ainsi une source de données pour l'analyse et contribueront à la détermination des causes de défaillances.

Des tests de vérification de la rigidité de la soudure des liens doivent être entreprises aussitôt après l'enlèvement du plastique d'encapsulation. Une défaillance peut être la conséquence de plusieurs défauts commis soit pendant le processus de fabrication du " Wafer " soit pendant l'assemblage. Dans cette approche d'analyse, seulement les éléments les plus défaillants ont été choisis pour des raisons d'indisponibilité des équipements et du temps.

Pratiquement, tous les défauts constatés sont dus à un mauvais assemblage. Ainsi, tous les éléments défaillants (diodes, transistors ou C.I) ouverts présentent une cassure, un craquement ou une égratignure de la couche de métallisation. Cela est dû en général à une mauvaise incision ou à une négligence de précaution pendant le transport de la plaquette (problème de handling)

Ces défauts sans influence avant l'essai, se sont manifestés après les essais par une augmentation considérable de la tension direct pour les diodes, par une variation remarquable du gain, de la tension de saturation ($V_{CE\ sat}$) ou du courant de fuite (I_{CBO}) pour les transistors et par une grande variation de certains paramètres électrique pour les circuits intégrés.

V - CONCLUSION

D'après l'étude comparative précédente, il s'avère que les composants de la production nationale se comportent au même niveau que les composants de production étrangères vis à vis des contraintes auxquelles ils étaient soumis. Les quelques faiblesses qui ont apparus sont pratiquement dues à l'inattention durant les opérations de l'assemblage, notamment au cours du découpage et le transport des plaquettes (handling).

CONCLUSION

La détermination des paramètres de fiabilité du lot des composants semi-conducteurs de la production nationale dont nous venons de faire l'étude nous permet de situer leur niveau d'acceptance par rapport à ceux de production étrangère.

En effet, nos composants se comportent de façon satisfaisante vis-à-vis des contraintes auxquelles ils étaient soumis. Les quelques défauts constatés sont dus essentiellement aux opérations de l'assemblage.

Une étude très complète de la fiabilité exige des équipements spéciaux et un temps très long, pour le calcul de durée de vie (garantie), chose qui nous a contraint à n'exprimer la fiabilité dans la présente étude que par les paramètres MTBF et taux de pannes.

Toutefois la connaissance de ces paramètres donne un renseignement assez complet sur le comportement d'un composant durant son utilisation.

Nous avons constaté que les diodes fabriquées selon le process A_2R (BY135) voient leurs paramètres varier en fonction de la température ambiante.

Pour parer à certains problèmes de fiabilité, la substitution du process A_2 par le process D_2 qui permet aux diodes de conserver leurs caractéristiques électriques (même process que le process A_2 mais avec une géométrie plus réduite) présente une bonne solution dans ce sens.

De plus, l'amélioration de la fiabilité des semi-conducteurs par l'adjonction d'un test de chauffage de 24 heures à $150^\circ C$ permet d'éliminer les composants présentant des défauts d'assemblage.

Cette étude ne se limite pas seulement aux composants semi-conducteurs mais elle peut se généraliser à d'autres matériels électroniques tels que les composants passifs, les tubes cathodiques, etc...

La réunion de données de fiabilité de tous les éléments constituant un système tel que le téléviseur peut contribuer au calcul de durée de vie et de garantie pour que le système remplisse de façon satisfaisante la mission qui lui est requise.

La complexité du système exige souvent l'intervention de l'ordinateur pour le calcul de sa fiabilité.

L'exigence de fiabilité pour un système dépend de la fonction à laquelle il est destiné.

Enfin, le présent travail constitue une première contribution ouverte à toute suite en vue de son amélioration.

PROCESS SUMMARY SHEET

PROCESS N° 04

STARTING MATERIAL	THICKNESS RESISTIVITY SIZE	Mil Ω cm Inch	17 + 1 .01 - .02 3	DOPANT	Sb	
EPI LAYER	THICKNESS RESISTIVITY	μ Ω cm	12.7 - 15.3 5.48 - 7.4		AsH ₃	
INITIAL OXIDATION	THICKNESS	Å°	7500 - 8500			
BASE	DEPTH	μ	4.7 - 5.3		DOPANT	B.N.
	RESISTIVITY	Ω	36 - 44			
	BASE AREA	Mil ² cm ²	100 6.45 10 ⁻⁴			
	BASE PERIPHERY	Mil cm	100 2.54 10 ⁻¹			
	WB	μ	1.4 - 2.0			
	OXIDE THICKNESS	Å°	6300			
EMITTER	DEPTH	μ	3.3		DOPANT	POCl ₃
	RESISTIVITY	Ω	.4 - .5			
	E. AREA	Mil ² cm ²	27 1.74 10 ⁻⁴			
	E. PERIPHERY	Mil cm	21 5.33 10 ⁻²			
	PE/PA	Mil ⁻¹ cm ⁻¹	.777			
	OXIDE THICKNESS	Å°	2700			
PYRO	OXIDE THICKNESS	Å°	0			
DIE	SIZE	Mil	17 x 17			
	THICKNESS	Mil	4 - 6			
GEOMETRY	Non-Overlay					
AL EVAP	THICKNESS	Å°	11000 - 13000			
GOLD EVAP	THICKNESS	Å°	8000		As/Au	

NUMERO	COOL	DATE
PAGE	17	
DE		

PROCESS A2 and D2 (BY135, 421-1001)

- 1.0 HIGH TEMPERATURE STORAGE
- 150°C for 168 hours
 - Qualification: LTPD - 10, sample size - 52, accept. no. - 2
Sustaining: LTPD - 10, sample size - 78, accept. no. - 4
 - ΔI_R at 110V < 500nA
 ΔV_F < 100mV at 100mA, 500mA, 1A and 2A
HIO, Opens and Shorts
- 2.0 THERMAL SHOCK
- 55°C to 125°C - 20 cycles
 - Qualification: LTPD - 10, sample size - 38, accept. no. - 1
Sustaining: LTPD - 10, sample size - 38, accept. no. - 1
 - ΔV_F < 100mV or $\pm 15\%$ (whichever is greater) at 100mA, 500mA, 1A and 2A
Opens and Shorts at 10 and 20 cycles
- 3.0 HIGH TEMPERATURE REVERSE BIAS (HTRB)
- 150°C for 48 hours at 110V BIAS
 - Qualification: LTPD - 10, sample size - 52, accept. no. - 2
Sustaining: LTPD - 20, sample size 32, accept. no. - 3
 - ΔI_R at 110V < 1mA or 10x initial reading
 ΔV_F < 100mV or $\pm 15\%$ (whichever is greater) at 100mA, 500mA, 1A and 2A.
- 4.0 PRESSURE POT
- 15 psig for 4 and 24 hours
 - Qualification: LTPD - 15, sample size - 43, accept. no. 3
Sustaining: LTPD - 20, sample size - 25, accept. no. - 2
 - 4 hours: ΔV_F < 100mV at 500mA, 1A and 2A
 ΔI_R < 1/1A or 10x initial reading at 110V
24 hours: Opens and Shorts (HIO)
- 5.0 85/85 WITH BIAS
- 85°C, 85% R.H. at 110V bias for 168 hours (qual. only)
 - Qualification: LTPD - 10, sample size - 38, accept. no. - 1
Sustaining (96 hours): LTPD - 10, sample size - 38, accept. no. - 1
 - ΔV_F < 100mV at 100mA,
 ΔI_R < 1/1A or 10x initial reading at 110V
- 6.0 TEMPERATURE CYCLE
- 55°C to 150°C for 250 and 500 cycles
 - Qualification: LTPD - 10, sample size - 52, accept. no. - 2
Sustaining: LTPD - 15, sample size - 43, accept. no. - 3
 - ΔV_F < 100mV at 500mA and 2A
Opens and Shorts

NUMBER	DATE	REV
42D-1819		
INTERNATIONAL	26	33
		A

PROCESS 04 (BC 203B or BC 237B or BC 238B or CS 9011)

1.0 HIGH TEMPERATURE STORAGE

- A. 150°C for 168 hours
- B. Qualifications: LTPD - 10, sample size - 52, accept. no. - 2
Sustaining: LTPD - 10, sample size - 78, accept. no. - 4
- C. Δ ICBO $< 500\text{nA}$ at 50V
 Δ VSAT $\pm 10\%$ at 10mA/1mA
 Δ HFE 1 $\pm 30\%$ at 100 μ A/5V
 Δ HFE 2 $\pm 30\%$ at 2mA/5V
 Δ HFE 3 $\pm 30\%$ at 100mA/5V

2.0 THERMAL SHOCK

- A. -55°C to 125°C 10 and 20 cycles
- B. Qualification: LTPD - 10, sample size - 38, accept. no. - 1
Sustaining: LTPD - 10, sample size 38, accept. no. - 1
- C. Δ VSAT $\pm 10\%$ at 10mA/1mA
Opens and Shorts (HIO)

3.0 HIGH TEMPERATURE REVERSE BIAS (HTRB)

- A. 150°C for 48 hours at 40V BIAS
- B. Qualification: LTPD - 10, sample size - 52, accept. no. - 2
Sustaining: LTPD - 20, sample size - 32, accept. no. - 3
- C. Δ ICBO $< 1\mu\text{A}$ or 10x initial reading at 50V
 Δ HFE 1 $\pm 30\%$ at 100 μ A/5V
 Δ HFE 2 $\pm 30\%$ at 2mA/5V
 Δ HFE 3 $\pm 30\%$ at 100mA/5V
 Δ VSAT $\pm 10\%$ at 10mA/1mA

4.0 PRESSURE POT

- A. 15 psig for 4 and 24 hours
- B. Qualification: LTPD - 15, sample size - 43, accept. no. - 3
Sustaining: LTPD - 20, sample size - 25, accept. no. - 2
- C. 4 hours: Δ ICBO, Δ ICES $< 1\mu\text{A}$ or 10x initial reading at 50V
 Δ HFE 1 $\pm 30\%$ at 100 μ A/5V
24 hours: Opens and Shorts (HIO)

5.0 85/85 WITH BIAS

- A. 85°C, 85% R.H. at 40V (VCER, RBE - 1K) BIAS for 168 hrs. (qual. only)
- B. Qualification: LTPD - 10, sample size - 38, accept. no. - 1
Sustaining, 96 hours: LTPD - 10, sample size - 38, accept. no. - 1
- C. Δ ICBO $< 1\mu\text{A}$ or 10x initial reading at 50V
 Δ VSAT $\pm 10\%$ at 10mA/1mA
 Δ HFE 1 $\pm 30\%$ at 100 μ A/5V

6.0 TEMPERATURE CYCLE

- A. -55°C to 150°C for 100 and 200 cycles
- B. Qualification: LTPD - 10, sample size - 52, accept. no. - 2
Sustaining: LTPD - 15, sample size - 43, accept. no. - 3
- C. Δ VSAT $\pm 10\%$ at 10mA/1mA
Opens and Shorts (HIO)

NUMERO 42D-1819	CODE	DATE
		PAGE 13 of 33

```

1 000001 AIF #=300
2 /TEST SEQUENCE AND LIMITS
3 /VCC=12V UNLESS OTHERWISE NOTED
4 /QA B1 1001 QA PROGRAM
5 /*****
6 NAME QA425-0121
7 /*****
8
9 /T1: CONTINUITY OPEN
0 400001 T1LO= 400001 /NO LIMIT
1 776030 T1HI= 0 -1000 /-100.0UA
2
3 /T2: CONTINUITY SHORT
4 776030 T2LO= 0 -1000 /-100.0UA
5 377777 T2HI= 377777 /NO LIMIT
6
7 /T3: I11 SUPPLY CURRENT DP5 OPEN
8 001750 T3LO= 0 1000 /10.00MA
9 003410 T3HI= 0 1800 /18.00MA
0
1 /T4: I11 SUPPLY CURRENT DP5 GND
2 001750 T4LO= 0 1000 /10.00MA
3 003720 T4HI= 0 2000 /20.00MA
4
5 /T5: V13 DC VOLTAGE DP13
6 000252 T5LO= 0 170 /1.70V
7 000360 T5HI= 0 240 /2.40V
8
9 /T6: V2 DC VOLTAGE DP2 COMPARE V13
0 777160 T6LO= 0 -400 /-40.0MV
1 000620 T6HI= 0 400 /40.0MV
2
3 /T7: V14 DC VOLTAGE DP10 COMPARE V6
4 777324 T7LO= 0 -300 /-30.0MV
5 000454 T7HI= 0 300 /30.0MV
6
7 /T8: V6 DC VOLTAGE DP6
8 000252 T8LO= 0 170 /1.70V
9 000360 T8HI= 0 240 /2.40V
0
1 /T9: V7 DC VOLTAGE DP7
2 000454 T9LO= 0 300 /3.00V
3 000620 T9HI= 0 400 /4.00V
4
5 /T10: V5 DC VOLTAGE DP5
6 000454 T10LO= 0 300 /3.00V
7 000620 T10HI= 0 400 /4.00V
8
9 /T11: ZENER RESISTANCE @Iz=5mA
0 400001 T11LO= 400001 /NO LIMIT
1 002002 T11HI= 0 50 /50R
2
3 /T12: V12 ZENER VOLTAGE
4 002140 T12LO= 0 1120 /11.20V
5 002500 T12HI= 0 1360 /13.60V
6

```

/T13: BVCEO MIN 15V CHECK

400001 T13LO= 400001 /NO LIMIT
000764 T13HI= 0 500 /5000A

/T14: BETA @IC=1MA

000062 T14LO= 0 52 /50
377777 T14HI= 377777 /NO LIMIT

/T15: INTERNAL LOAD RESISTOR

000312 T15LO= 0 202 /1.90K+120 OHMS
000525 T15HI= 0 342 /3.30K+120 OHMS

/TUNING SET UP

/T16: DISTORTION

400061 T16LO= 400001 /NO LIMIT
377777 T16HI= 377777 /NO LIMIT

/T17: RECOVERED AUDIO

001274 T17LO= 0 720 /700MV
377777 T17HI= 377777 /NO LIMIT

/T18: LIMITING SENSITIVITY

000334 LMT1= 0 220 / (90UV)

/T19: AM REJECTION @VIN=500UV

400001 T19LO= 400001 /NO LIMIT
777014 T19HI= 0 -500 /-50.0DB

/T20: AM REJECTION @VIN=10MV

400001 T20LO= 400001 /NO LIMIT
777014 T20HI= 0 -500 /-50.0DB

/T21: VOLUME CONTROL RANGE R=1K

400001 T21LO= 400001 /NO LIMIT
776504 T21HI= 0 -700 /-70.0DB

/T22: VOLUME CONTROL LIMIT R=4.7K

777766 T22LO= 0 -10 /-1.0DB
377777 T22HI= 377777 /NO LIMIT

/T23: VOLUME CONTROL V5=2.5V

777766 T23LO= 0 -10 /-1.0DB
377777 T23HI= 377777 /NO LIMIT

/T24: VOLUME CONTROL R=3.3K

777324 T24LO= 0 -300 /-30.0DB
377777 T24HI= 377777 /NO LIMIT

/T25: VOLUME CONTROL R=2.5K

777324 T25LO= 0 -300 /-30.0DB
377777 T25HI= 377777 /NO LIMIT

/T26: VOLUME CONTROL R=2.0K

400001 T26LO= 400001 /NO LIMIT
377777 T26HI= 377777 /NO LIMIT

#=000300 10 NOV 1979

425-0121(LN1001)

/T27: VOLUME CONTROL R=2.15K

400001 T27LO= 400001 /NO LIMIT
377777 T27HI= 377777 /NO LIMIT

/T28: VOLUME CONTROL R=1.9K

400001 T28LO= 400001 /NO LIMIT
377777 T28HI= 377777 /NO LIMIT

/T29: DC OUTPUT LEVEL DP8

001154 T29LO= D 620 /6.20V
001510 T29HI= D 840 /8.40V

/T30: DIFF DC OUT LEVEL V8-V5

777014 T30LO= D -500 /-500MV
000764 T30HI= D 500 /500MV

ANNEXE N° 6

TABLE DE χ^2

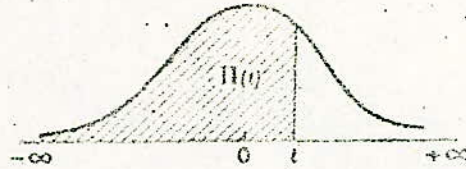
α	0,99	0,98	0,975	0,95	0,90	0,80	0,70	0,50	0,30	0,20	0,10	0,05	0,025	0,02	0,01	α/v
1	0,0011	0,0006	0,0010	0,0039	0,0158	0,0642	0,148	0,455	1,074	1,642	2,706	3,841	5,024	5,412	6,635	1
2	0,0201	0,0404	0,0596	0,101	0,211	0,416	0,713	1,386	2,408	3,219	4,605	5,991	7,378	7,824	9,210	2
3	0,115	0,185	0,216	0,352	0,584	1,005	1,424	2,366	3,665	4,642	6,251	7,815	9,348	9,837	11,345	3
4	0,297	0,429	0,454	0,711	1,064	1,619	2,195	3,357	4,878	5,989	7,779	9,488	11,142	11,632	13,277	4
5	0,554	0,752	0,831	1,145	1,610	2,343	3,000	4,351	6,064	7,289	9,216	11,070	12,832	13,388	15,086	5
6	0,872	1,134	1,237	1,635	2,204	3,070	3,828	5,348	7,231	8,558	10,645	12,592	14,449	15,033	16,812	6
7	1,239	1,564	1,690	2,167	2,833	3,822	4,671	6,346	8,385	9,803	12,017	14,067	16,013	16,622	18,475	7
8	1,646	2,032	2,180	2,733	3,490	4,594	5,527	7,344	9,524	11,030	13,362	15,507	17,535	18,168	20,090	8
9	2,088	2,532	2,700	3,325	4,168	5,380	6,393	8,243	10,656	12,242	14,684	16,919	19,023	19,679	21,666	9
10	2,558	3,039	3,247	3,940	4,865	6,179	7,267	9,242	11,781	13,442	15,957	18,347	20,483	21,161	23,209	10
11	3,053	3,609	3,816	4,575	5,578	6,989	8,156	10,341	12,899	14,631	17,275	19,675	21,920	22,618	24,725	11
12	3,571	4,178	4,404	5,226	6,304	7,807	9,034	11,340	14,011	15,812	18,549	21,026	23,337	24,051	26,217	12
13	4,107	4,765	5,009	5,802	7,042	8,631	9,926	12,340	15,119	16,985	19,812	22,362	24,736	25,472	27,688	13
14	4,660	5,368	5,629	6,571	7,790	9,467	10,821	13,339	16,222	18,151	21,064	23,685	26,119	26,873	29,141	14
15	5,229	5,985	6,262	7,261	8,547	10,307	11,721	14,339	17,322	19,311	22,307	24,996	27,488	28,259	30,578	15
16	5,812	6,614	6,908	7,952	9,312	11,152	12,624	15,338	18,418	20,465	23,542	26,296	28,845	29,633	32,000	16
17	6,409	7,255	7,564	8,672	10,085	12,002	13,531	16,338	19,511	21,615	24,769	27,587	30,191	30,995	33,409	17
18	7,015	7,936	8,231	9,390	10,865	12,337	14,440	17,338	20,601	22,760	25,989	28,849	31,526	32,346	34,805	18
19	7,633	8,567	8,907	10,117	11,651	13,716	15,352	18,338	21,689	23,900	27,204	30,144	32,852	33,687	36,191	19
20	8,260	9,237	9,591	10,851	12,443	14,578	16,266	19,337	22,775	25,038	28,412	31,410	34,170	35,020	37,566	20
21	8,897	9,915	10,283	11,591	13,240	15,445	17,182	20,337	23,858	26,171	29,615	32,671	35,479	36,343	38,932	21
22	9,542	10,600	10,982	12,338	14,041	16,314	18,101	21,337	24,939	27,301	30,813	33,924	36,781	37,659	40,289	22
23	10,196	11,293	11,688	13,091	14,848	17,187	19,021	22,337	26,018	28,429	32,007	35,172	38,076	38,968	41,638	23
24	10,856	11,992	12,401	13,848	15,659	18,062	19,943	23,337	27,096	29,553	33,196	36,415	39,364	40,270	42,980	24
25	11,524	12,697	13,120	14,611	16,472	18,940	20,867	24,337	28,172	30,675	34,382	37,652	40,646	41,566	44,314	25
26	12,198	13,409	13,844	15,379	17,292	19,820	21,792	25,335	29,246	31,795	35,563	38,885	41,923	42,856	45,662	26
27	12,879	14,125	14,573	16,151	18,114	20,703	22,719	26,336	30,319	32,912	36,741	40,113	43,194	44,140	46,963	27
28	13,565	14,847	15,308	16,928	18,939	21,588	23,647	27,336	31,391	34,027	37,916	41,337	44,461	45,419	48,278	28
29	14,256	15,574	16,047	17,708	19,768	22,475	24,577	28,336	32,461	35,139	39,087	42,557	45,722	46,693	49,588	29
30	14,953	16,306	16,791	18,493	20,599	23,364	25,508	29,336	33,530	36,250	40,256	43,773	46,979	47,962	50,892	30

Pour $v > 30$ utiliser l'approximation de la loi normale réduite :

$$\chi^2_{\alpha;v} = \frac{1}{2} [u_{1-\alpha} + \sqrt{2v-1}]^2$$

III. EXTRAITS DE LA TABLE DE LA FONCTION INTÉGRALE DE LA LOI NORMALE CENTRÉE, RÉDUITE N(0,1)

$$H(t) = \Pr \{ T < t \}.$$



t	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	0,7290	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	0,8078	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	0,9293	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	0,9555	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	0,9712	0,9719	0,9726	0,9732	0,9738	0,9744	0,9750	0,9756	0,9761	0,9767
2,0	0,9772	0,9779	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	0,9982	0,9983	0,9983	0,9984	0,9985	0,9985	0,9986	0,9986

TABLE FOUR LES GRANDES VALEURS DE t

t	3,0	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6	3,8	4,0	4,5
H(t)	0,998 65	0,999 04	0,999 31	0,999 52	0,999 66	0,999 76	0,999 84	0,999 928	0,999 968	0,999 997

Nota. — La table donne les valeurs de H(t) pour t positif. Lorsque t est négatif il faut prendre le complément à l'unité de la valeur lue dans la table.

Exemple : pour t = 1,37 H(t = 1,37) = 0,9147
 pour t = -1,37 H(t = -1,37) = 0,0853

BIBLIOGRAPHIE

- P. CHAPOUILLE ET R. DE. PAZZIS
fiabilité des systèmes.
Edition MASSON (1968).

- I. BAZOVSKY
Fiabilité.
DUNOD (1966).

- BERNARD GUY PEYRET
La fiabilité industrielle, ses bases mathématiques.
Eyrolles (1969)

- A. POLLARD ET C. RIVOIRE
Fiabilité et statistiques prévisionnelles. La méthode de WEIBELL
Eyrolles (1971).

- B. GNEDENKO, Y BELIAEV ; A. SOLONIEV
Méthode mathématique en théorie de la fiabilité Edition de MOSCOU (1972).

- Revue PROCEEDINGS OF THE IEEE.
Reliability of semi-conductor devices
FEBRUARY 1974

- R. BESSON
Technologie des composants électroniques : diodes, transistors et
circuits intégrés;
tome II
Edition Radio (1977).

- P. LECTURCQ G. REY
Physique des composants actifs à semi-conducteur
DUNOD Université (1978).

- RAYMOND M. WARNER , Jr
JAMES N. FORDENWALT
intégrés Circuits, design principles
and fabrication.
MOTOROLA (1965).

- J.M. JURAN
Quality control
Hand book.

- QC2
Contrôle qualité pour ingénieurs du service qualité.

- TRUONG
Cours de MO34 enseigné à l'ENPA (1977-1978).

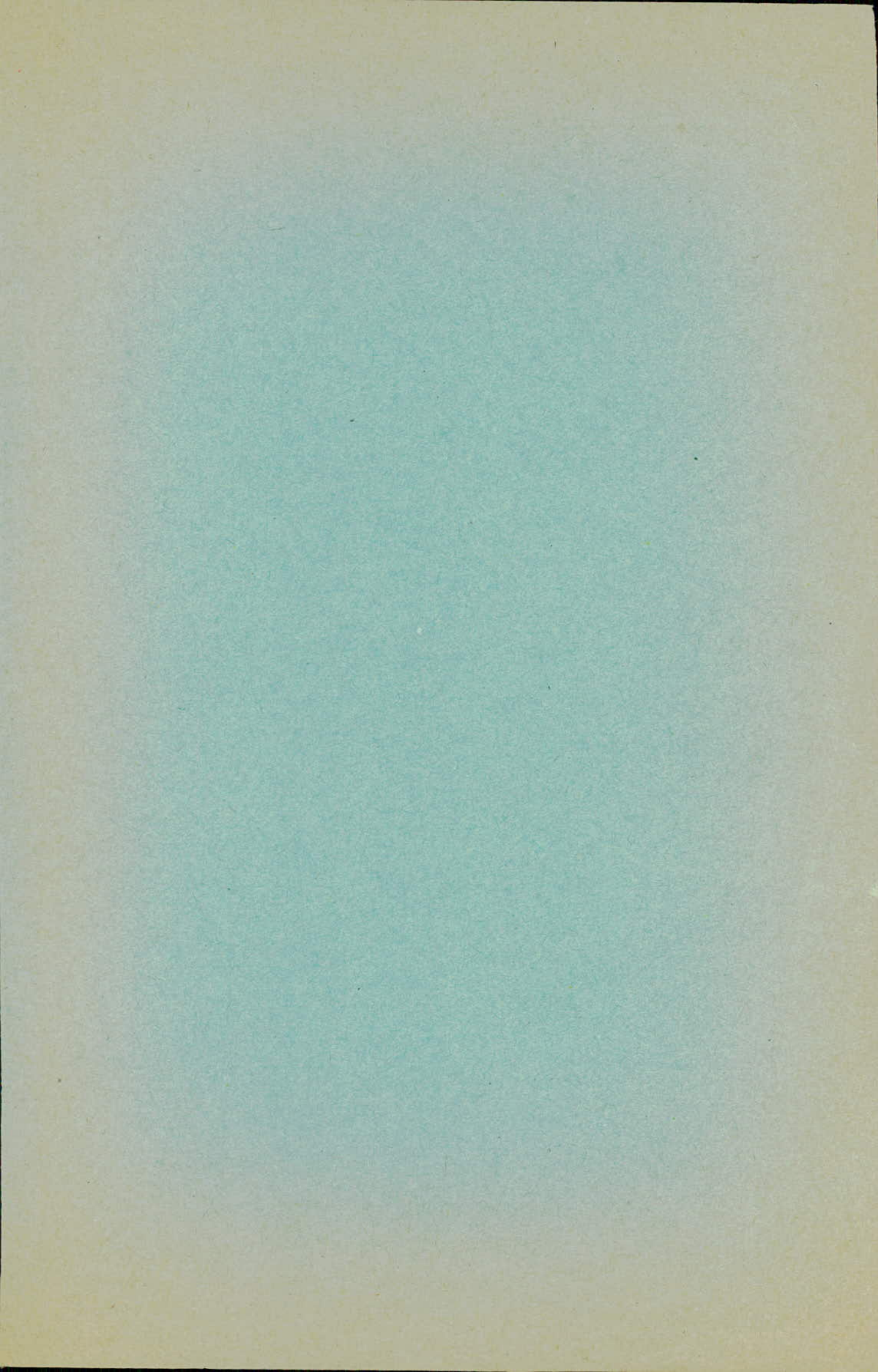
- JP. OEHMICHEN

Emploi rationnel des C.I.
Edition Radio (1974).

-- W.R. RUNYAN

Silicon s. Conductor techlogy
Mc GRAW-HILL BOOK COMPANY.





25/80



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

201
T2

DEPARTEMENT ELECTRONIQUE / ELECTROTECHNIQUE

INGENIORAT EN ELECTRONIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES



SUJET

ETUDE DE LA FIABILITE
DES SEMI CONDUCTEURS DE
LA PRODUCTION NATIONALE.

ANNEXE

PROPOSE PAR:

MT. BAGHLI
INGENIEUR D'ETAT
CHARGE DE COURS ASSOCIE

REALISE PAR:

Med. MAHROUG-ERRAS
Med. BOUGRINAT

UNIVERSITE HOUARI BOUMEDIENE

ALGER



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT ELECTRONIQUE / ELECTROTECHNIQUE

INGENIORAT EN ELECTRONIQUE

**PROJET DE FIN
D'ETUDES**

SUJET

**ETUDE DE LA FIABILITE
DES SEMI CONDUCTEURS DE
LA PRODUCTION NATIONALE.**

ANNEXE

PROPOSE PAR:

Mr. BAGHLI

INGENIEUR D'ETAT

CHARGE DE COURS ASSOCIE

REALISE PAR:

Med. MAHROUG-ERRAS

Med. ROUGINAT

UNIVERSITE HOUARI BOUMEDIENE

ALGER



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT ELECTRONIQUE / ELECTROTECHNIQUE

INGENIORAT EN ELECTRONIQUE

**PROJET DE FIN
D'ETUDES**

SUJET

**ETUDE DE LA FIABILITE
DES SEMI CONDUCTEURS DE
LA PRODUCTION NATIONALE.**

ANNEXE

PROPOSE PAR:

MT. BAGHLI

INGENIEUR D'ETAT

CHARGE DE COURS ASSOCIE

REALISE PAR:

Med. MAHROUG-ERRAS

Med. BOUGRINAT

JUN 80

ANNEXE I

Complément du chapitre II : Process de fabrication des S.C.

- fig 1 à 4 : Courbes donnant le produit Dt en fonction des rapports de concentrations $\frac{c}{c_0}$ (c_0 est la concentration de base) et la profondeur de diffusion X_j .
(note 1 mil # $2,54 \cdot 10^{-3}$ cm)
- fig 5 : Coefficient de diffusion pour différentes températures et différents types d'impuretés
- fig 6 : Solubilité solide dans le Si pour différents types d'impuretés et différentes températures
- fig 7 : Résistivité du Si en fonction de la température d'impuretés à 300°K .
- fig 8 : Epaisseur de la couche d'oxyde en fonction du temps pour différentes températures.
(cas de la vapeur de H_2O)
- fig 9 : Idem fig 8
(cas du gaz oxygène O_2)
- fig 10 à 13 : Coefficient de diffusion en fonction de la température pour différentes concentrations de bases et différentes concentrations diffusées
(cas du Bore)
- fig 14 à 16 : Idem (10 à 13)
(cas du Phosphore)

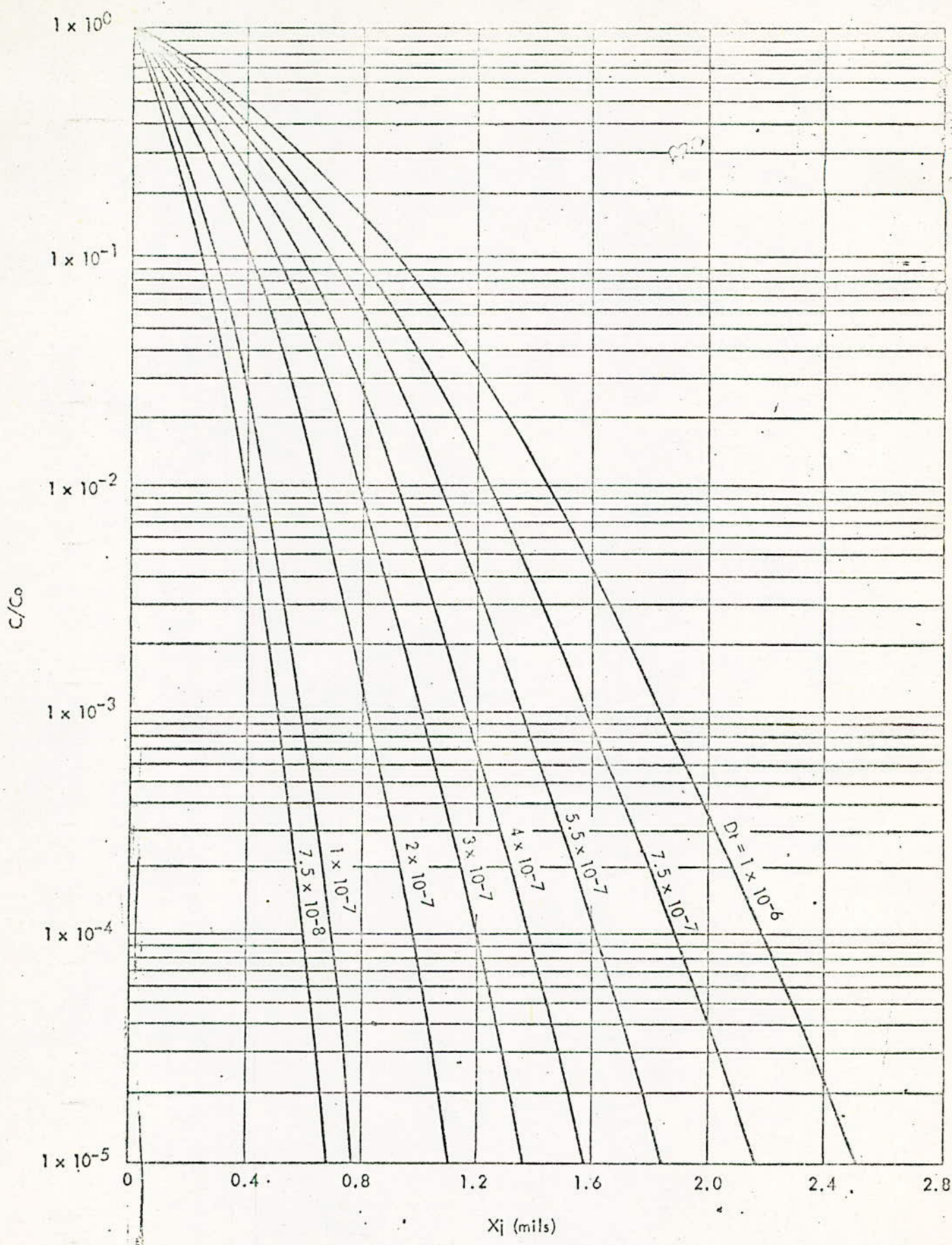


fig 1 D_t as a function of $\frac{C}{C_0}$ and X_j

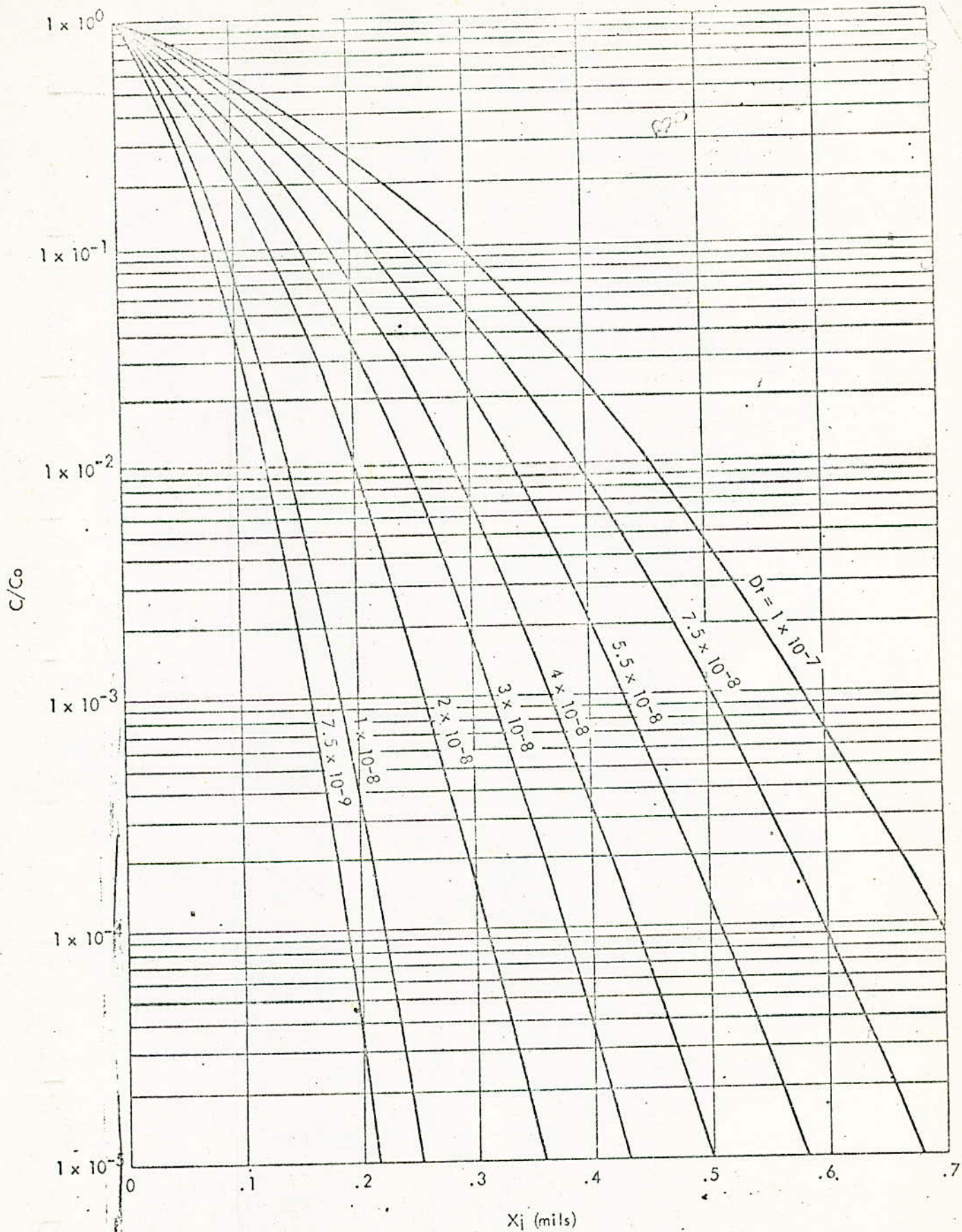


fig 2

D_t as a function of $\frac{C}{C_0}$ and X_j

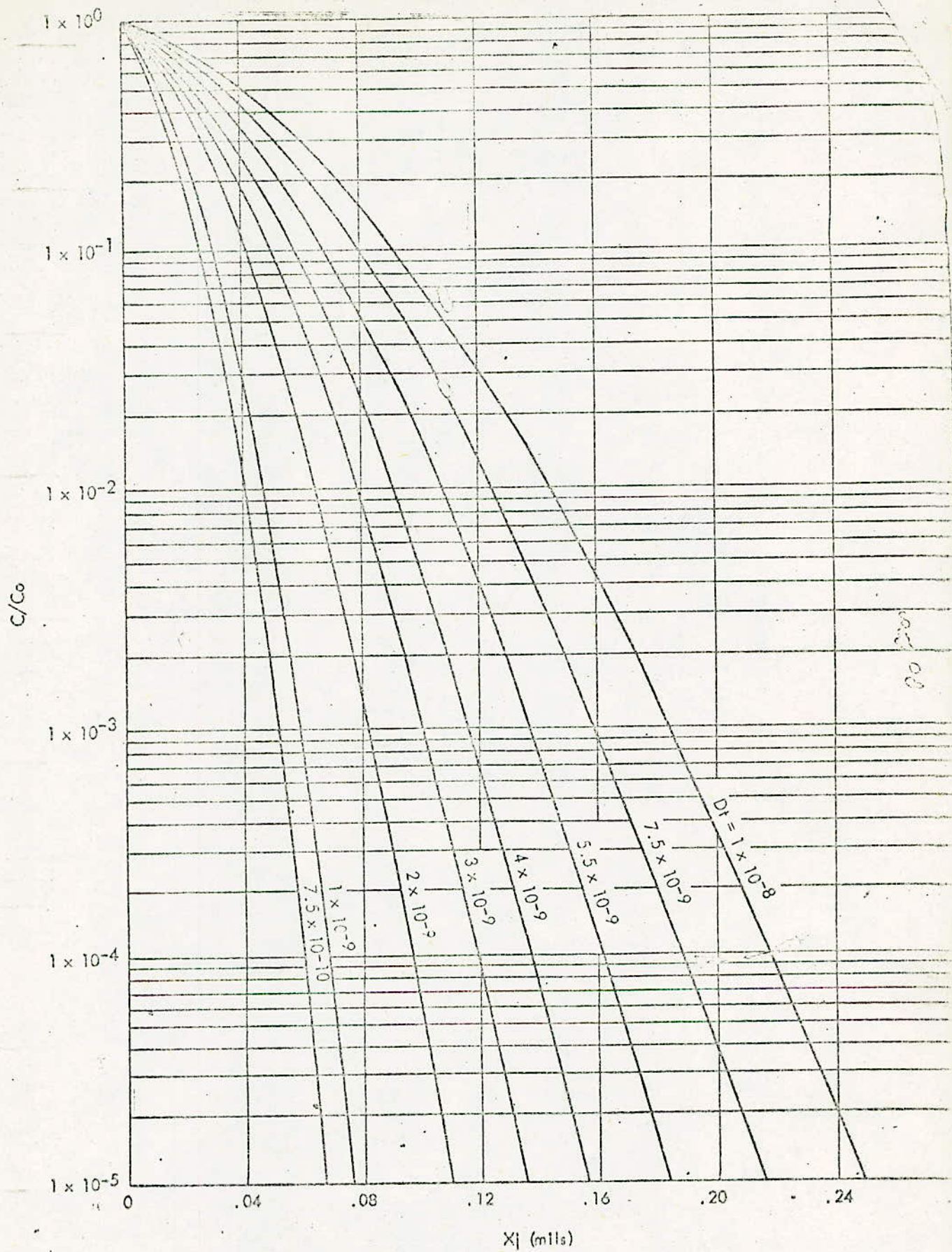


fig 3

D_t as a function of $\frac{C}{C_0}$ and X_j

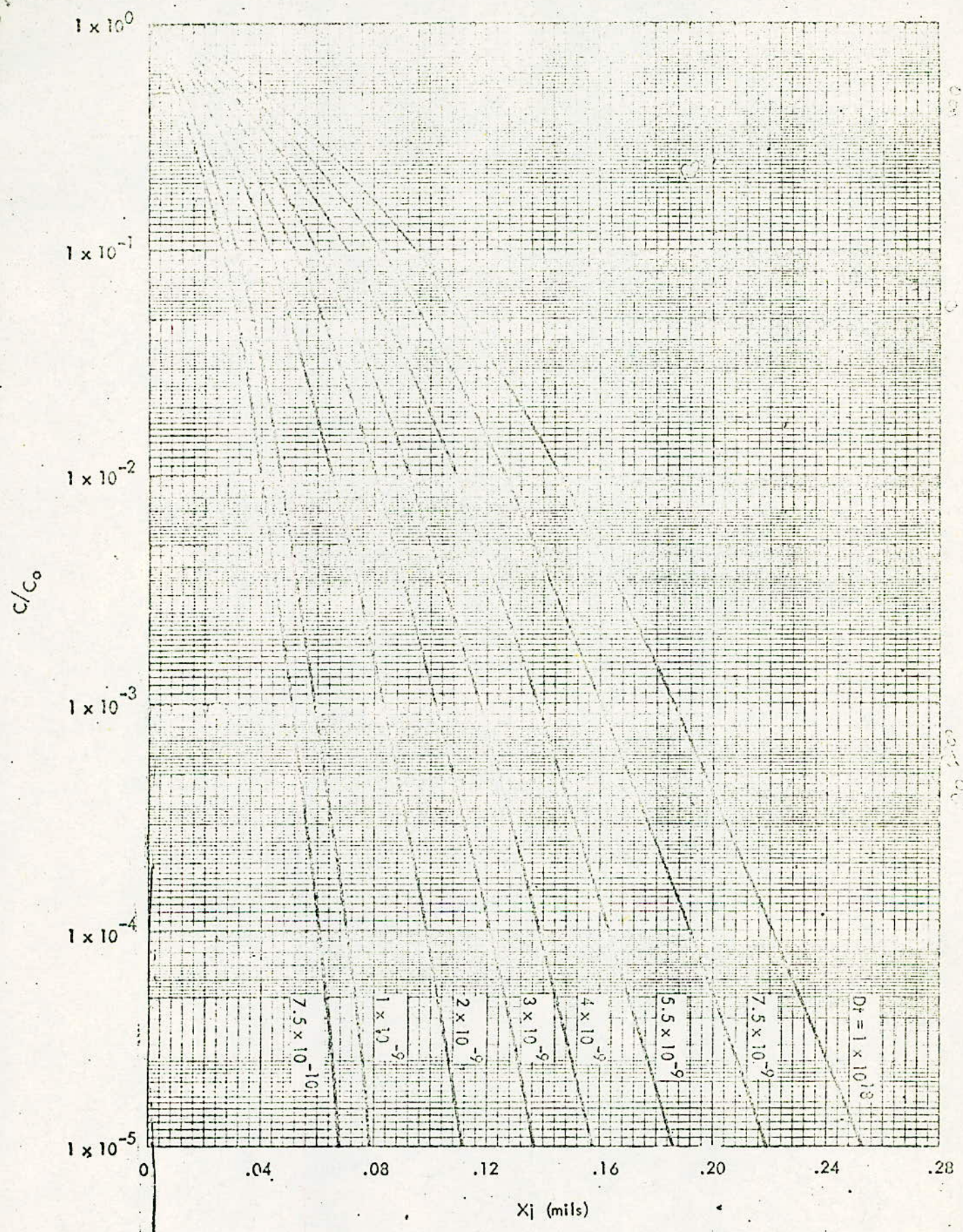


fig 4 Dt as a function of $\frac{c}{c_0}$ and x_j .

1 mil $\# 2,54 \cdot 10^{-3}$ cm

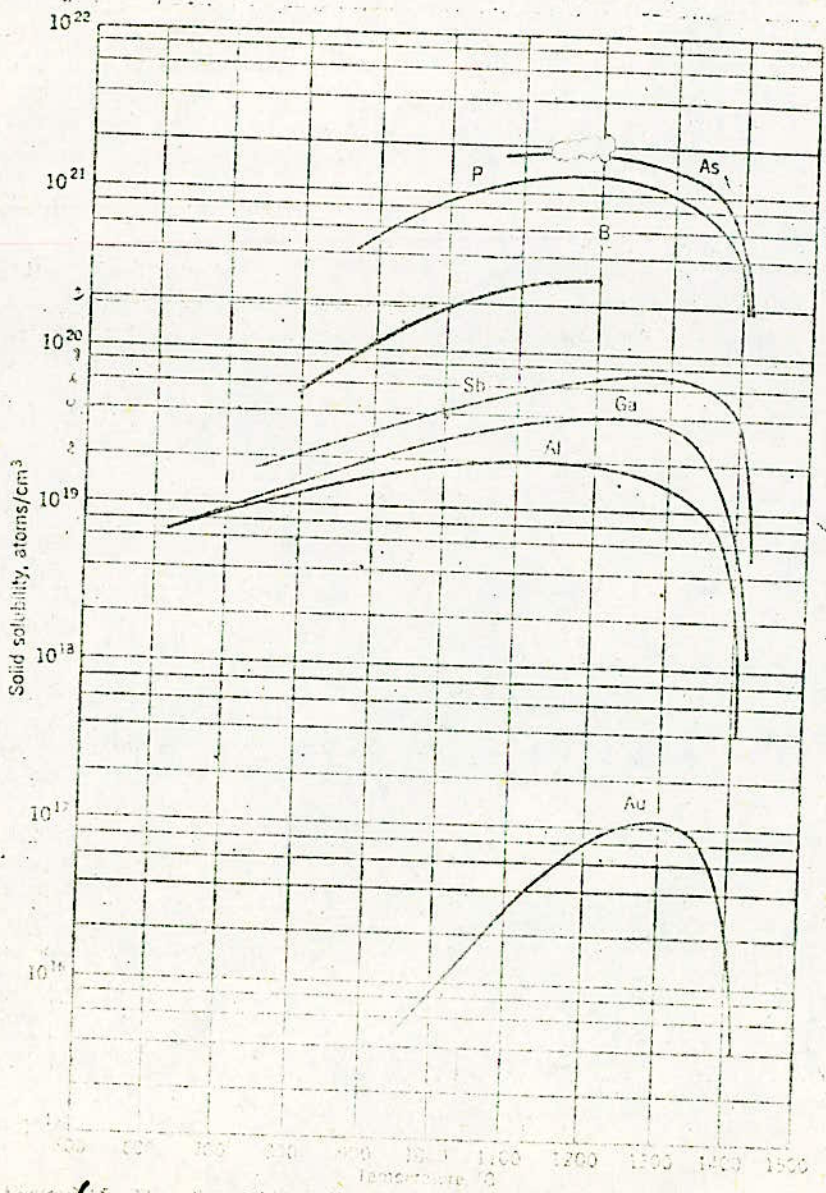


Figure 6 The solid solubility of impurities in silicon collected from Trumbore [50].

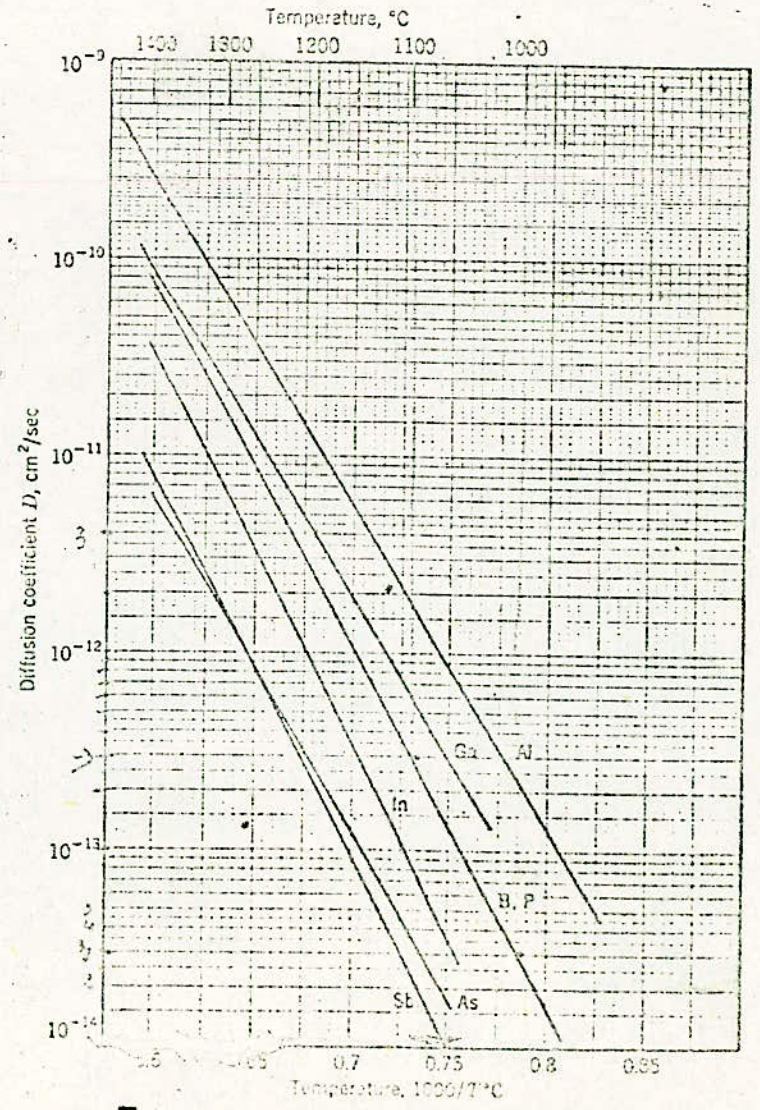


Figure 5 Diffusion coefficients of substitutional diffusers in silicon.

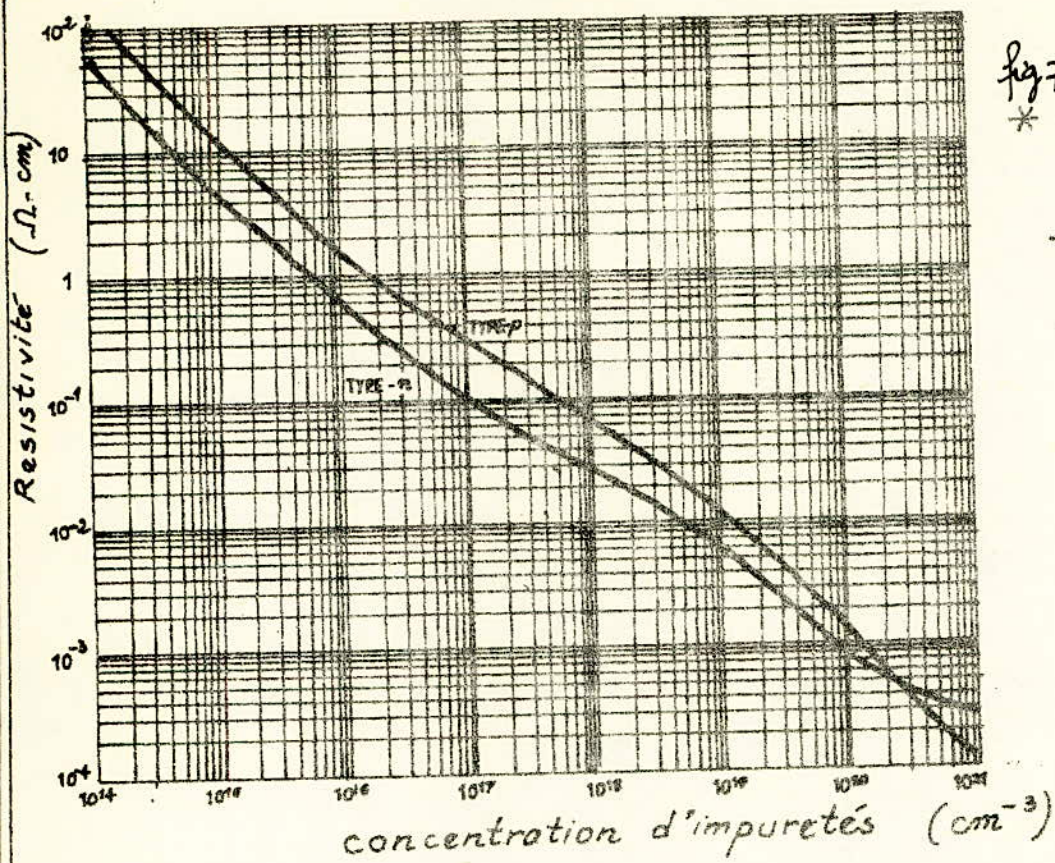


fig 7

* Résistivité du
Si en fonction
de la concentra-
-tion d'impuretés
à 300°K

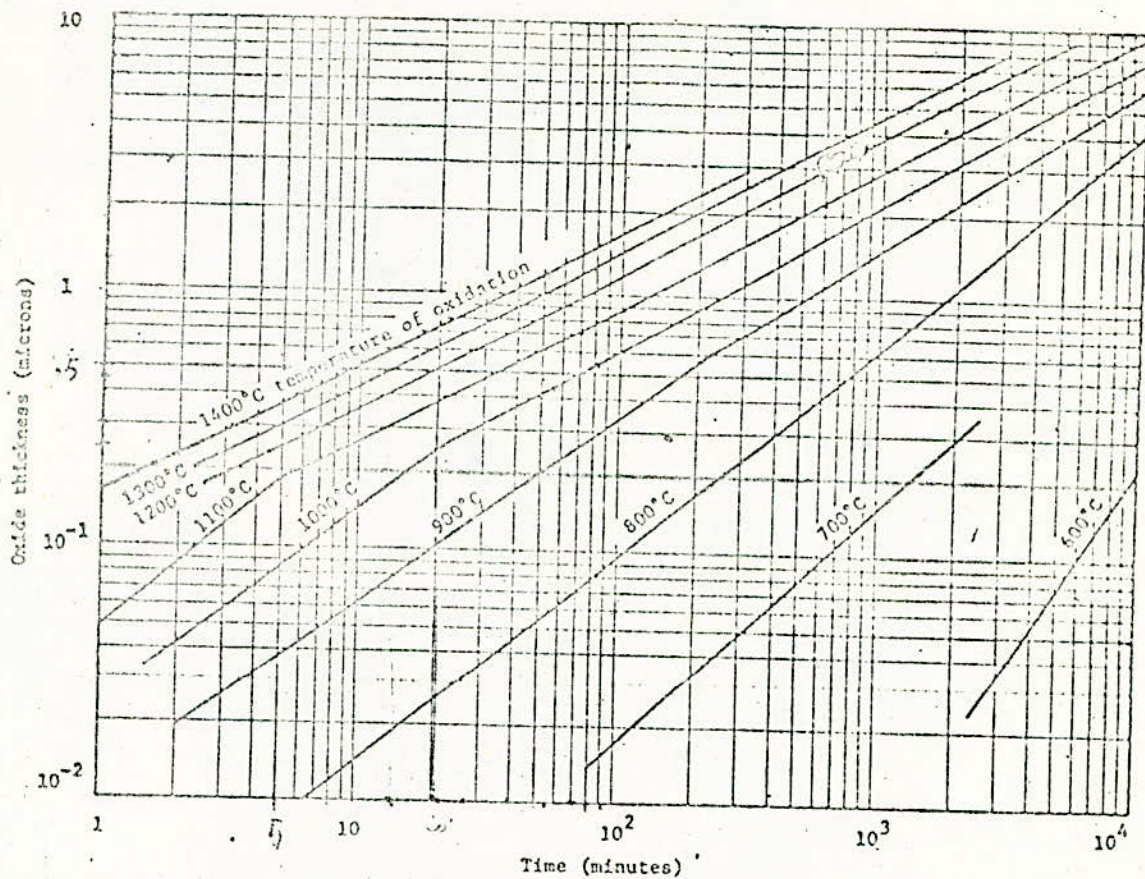


Fig. 8. Oxide growth in atmospheric steam.

From Burger and Donovan (1967) pp.41, 49.

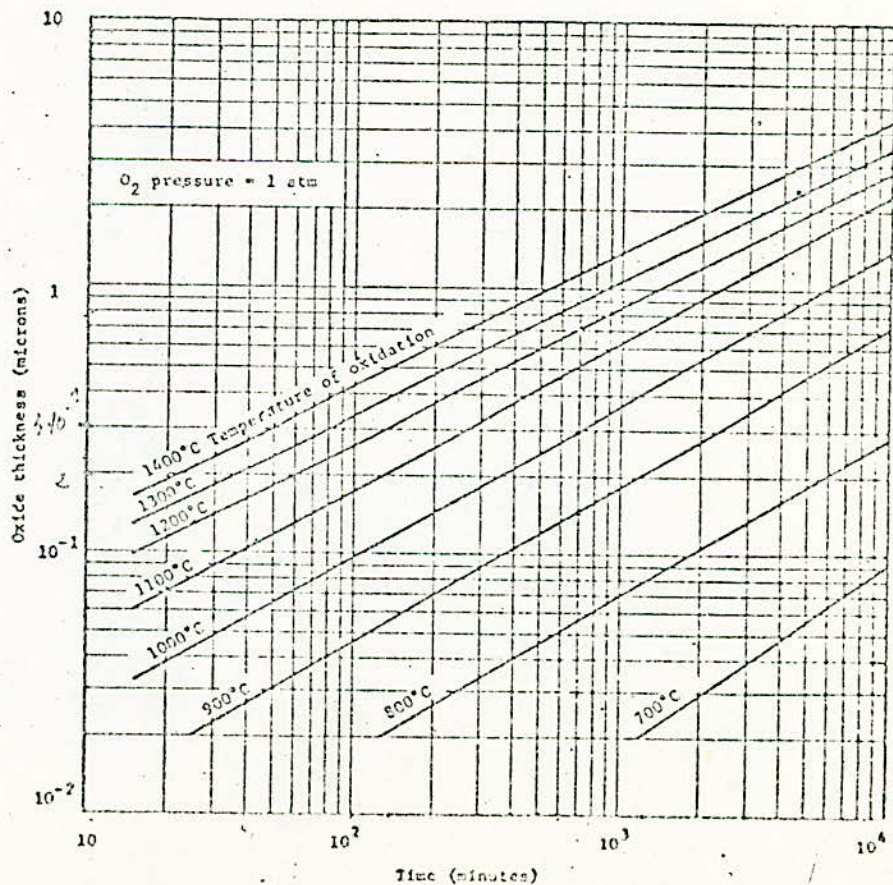


Fig. 9. Oxide growth rate in dry oxygen [Refs. 2-5, 2-6, 2-7].

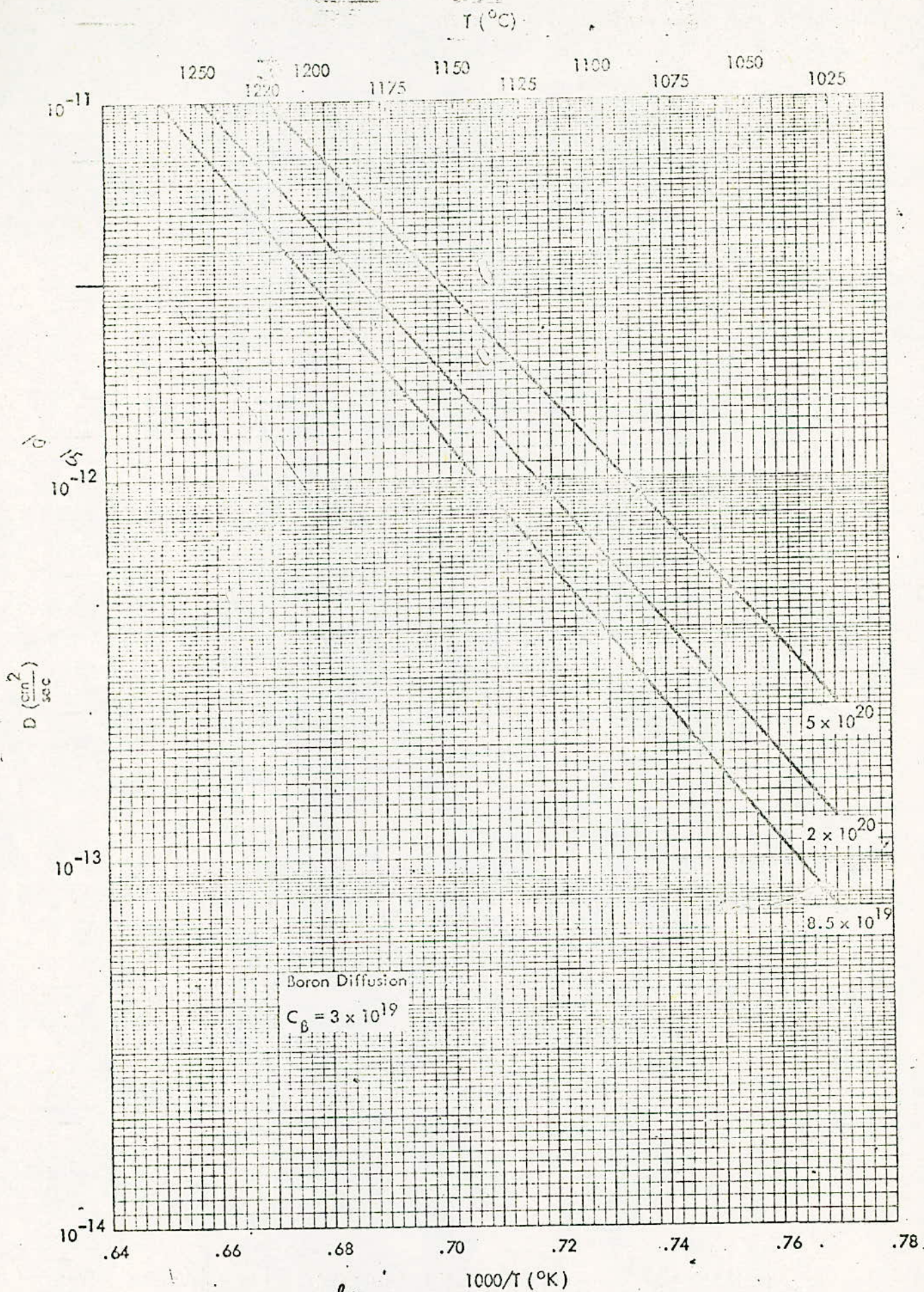


fig 10

T (°C)

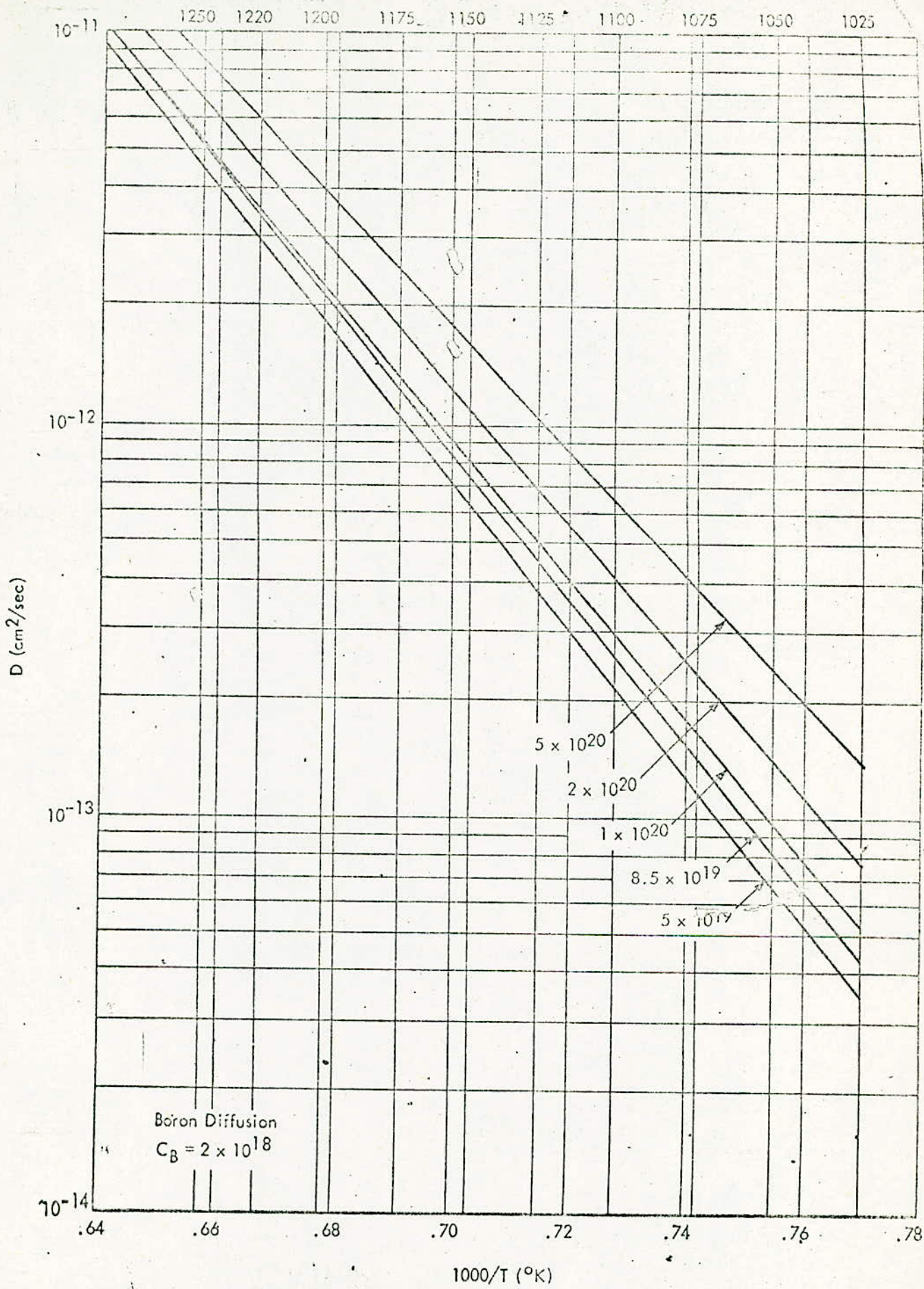


fig 11

Temperature ($^{\circ}\text{C}$)

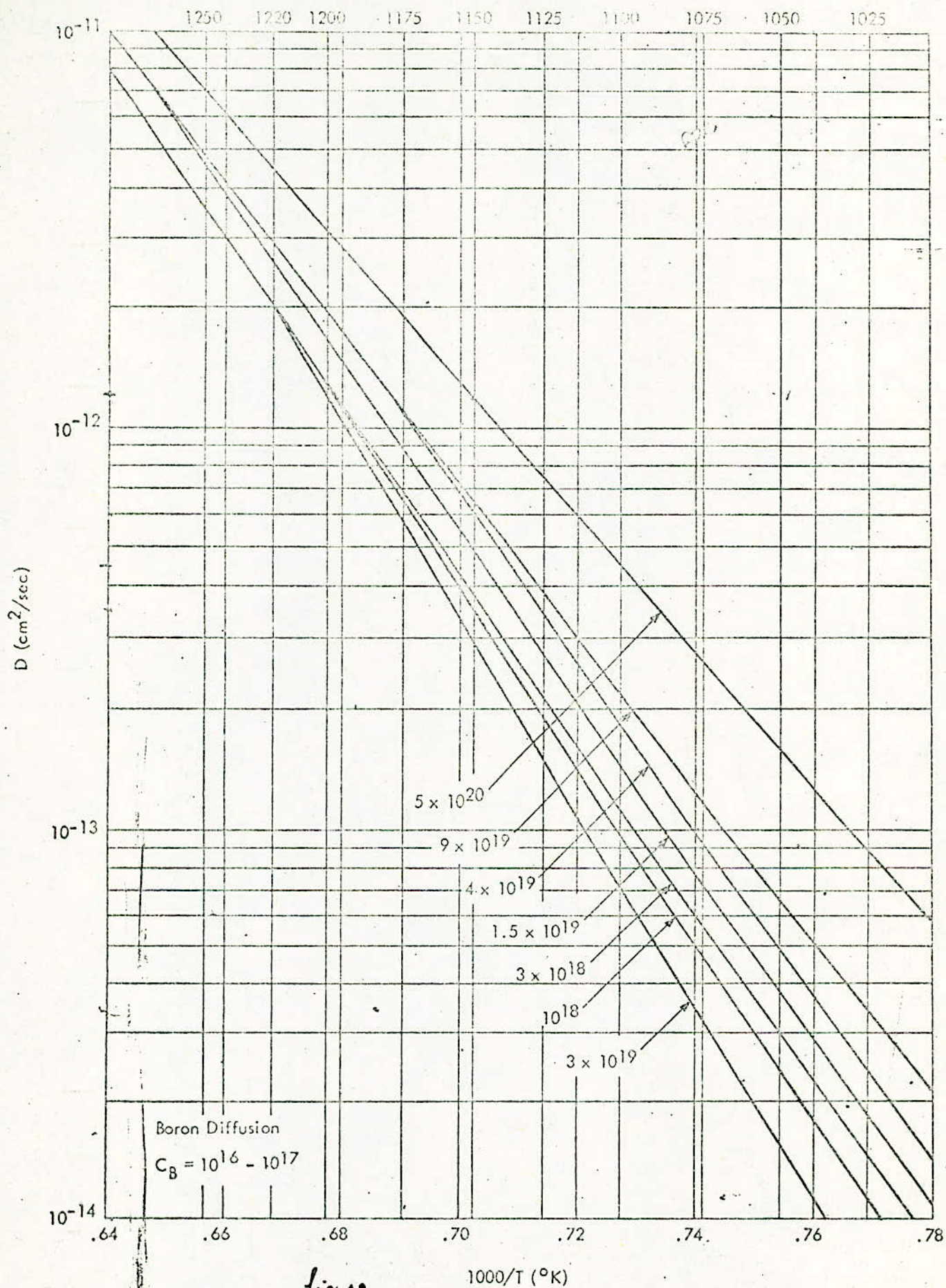


fig 12

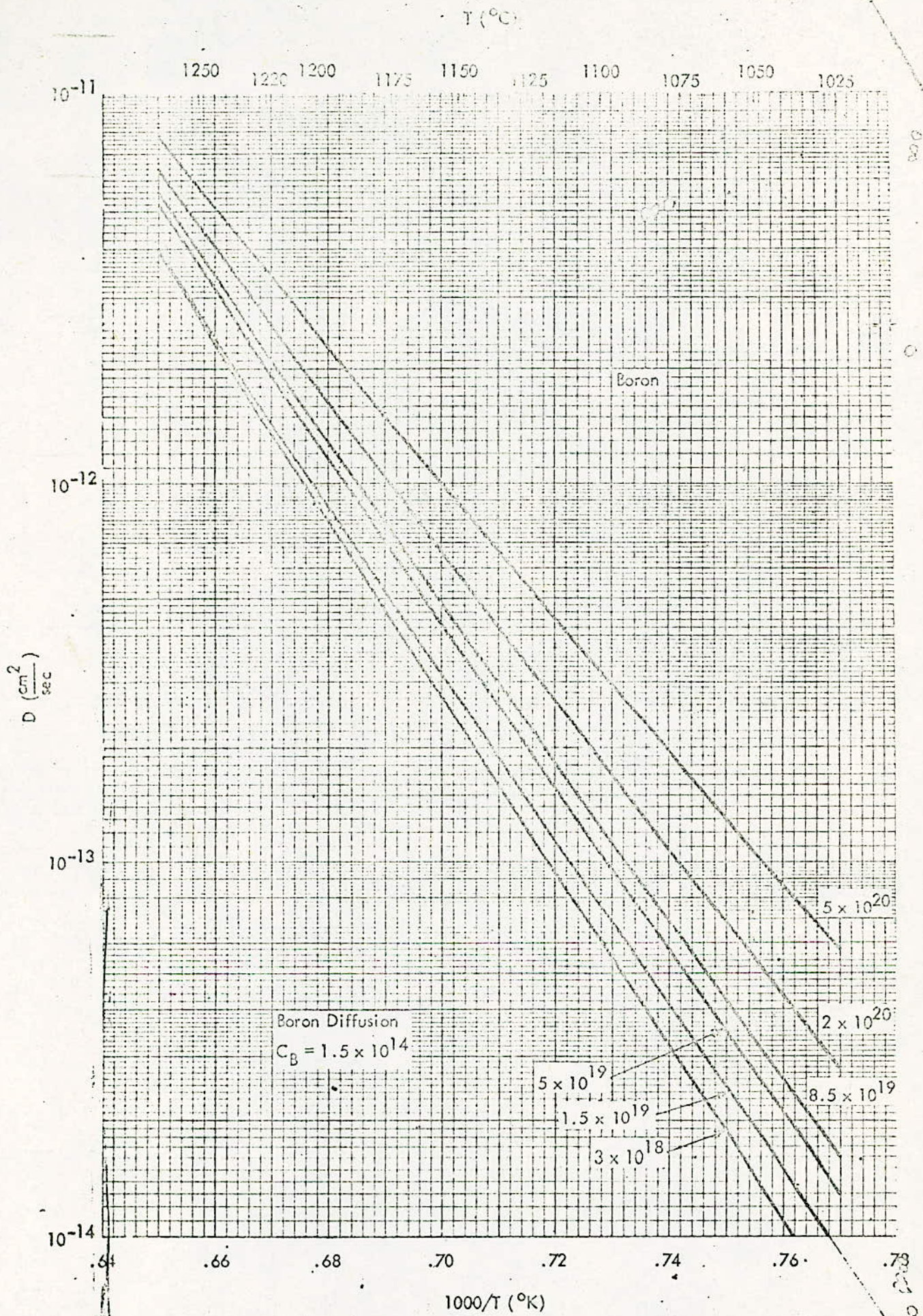


fig 13

Temperature (°C)

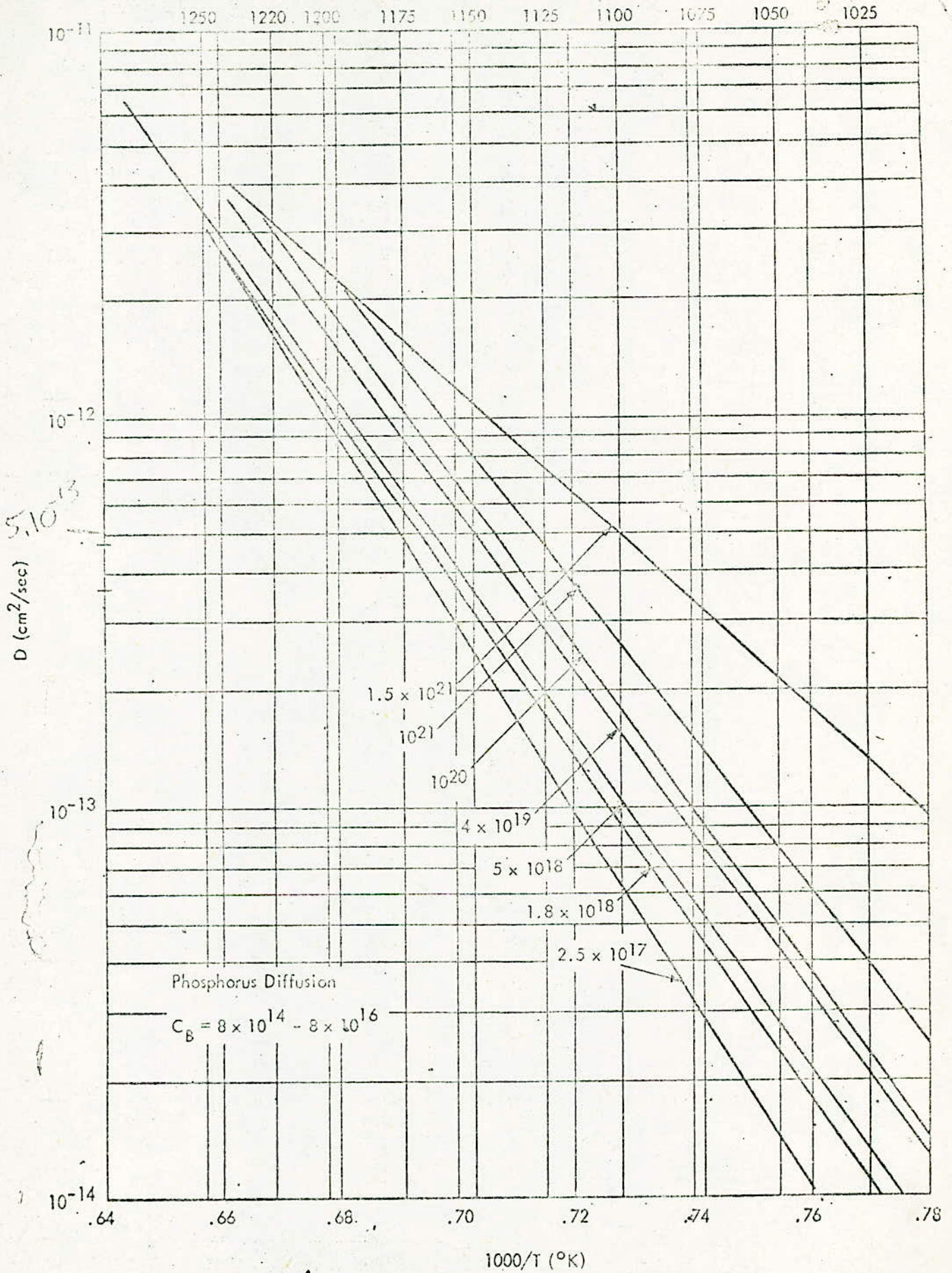


fig 14

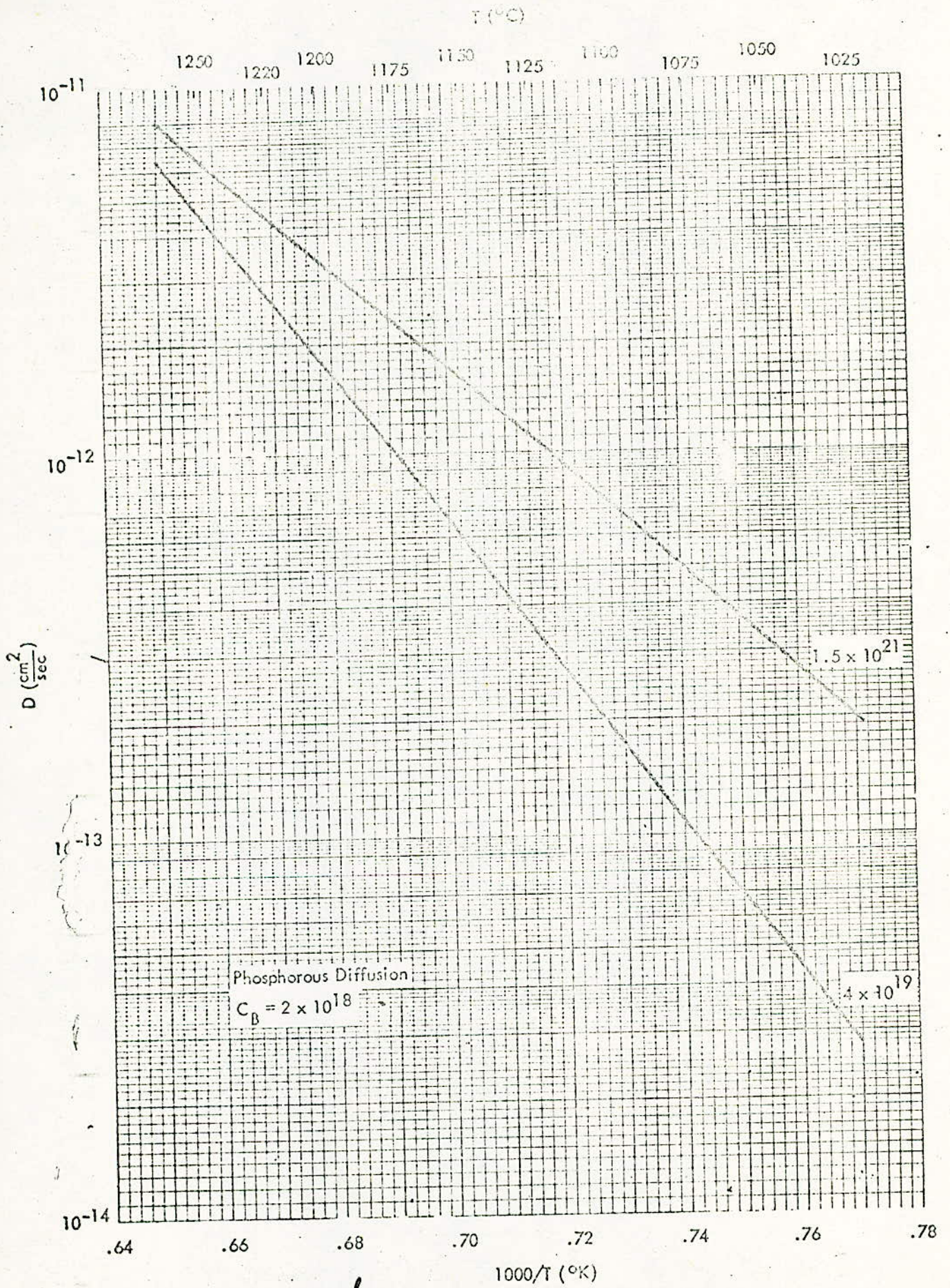


fig 15

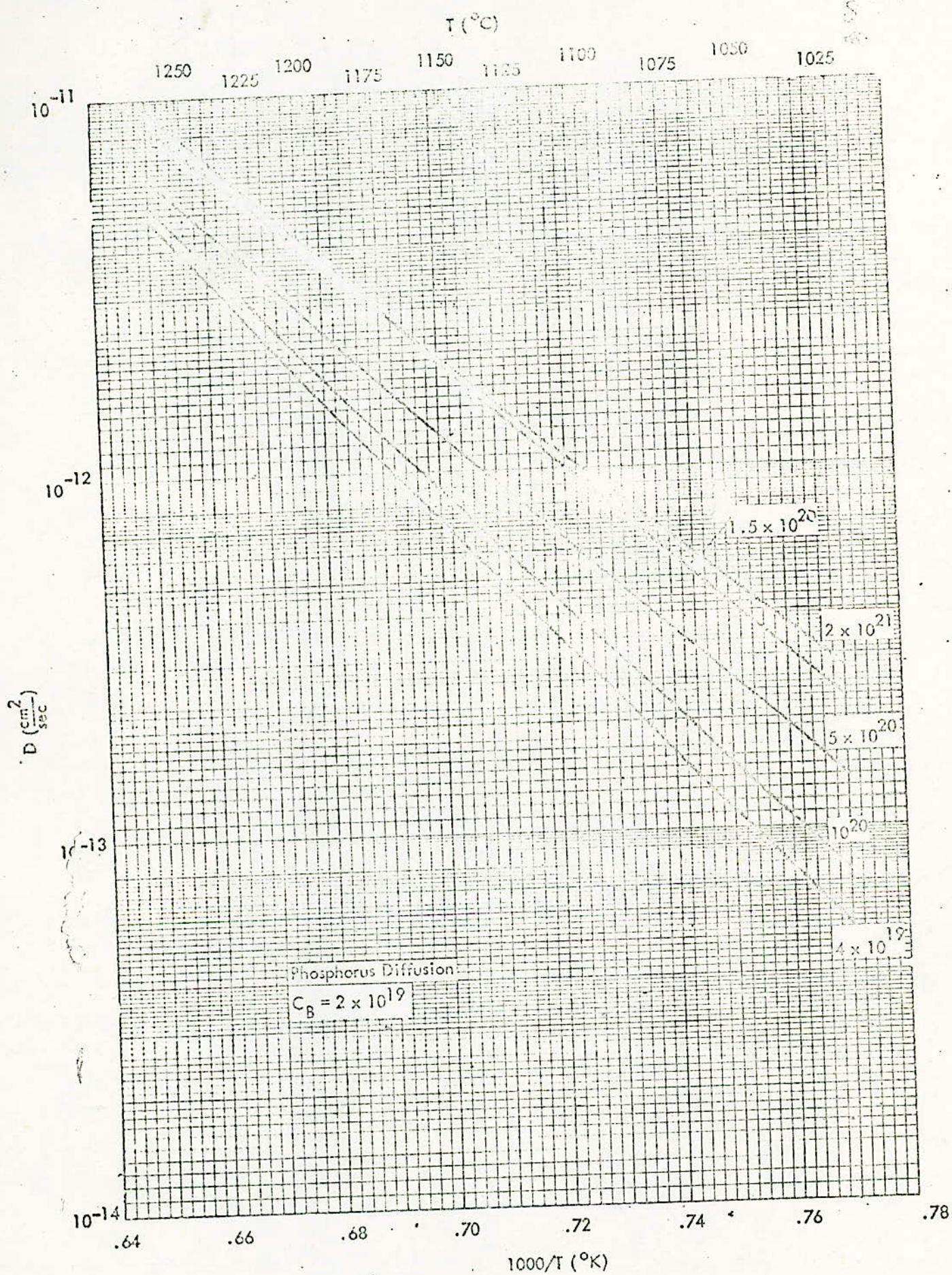


fig 16

ALGERIAN PRODUCTS

Process / Pkg	TYPE	EGP NO
04-77	IN4001	421-5007
	BY206	421-5001
	BA145	421-5000
	BY135	421-1001
	NT9967	421-5006
	HR31	421-1000
13-79	ZPD 6.2	421-3010
	ZPD 6.2	421-3004
06-79	ZPD 8.2	421-3021
	ZPD 10	421-1031
06-79	ZY12	421-3000
05-79	TBA550	425-0120
07-79	ZPD 15	421-3012
	IN5261A	421-3002
	11292-15P	421-3025
01-79	BA204	421-1005
	BAV10	421-1006
04-77	B2102-IV4	421-1016
	B2X CIV1	421-3005
05-79	ZFSVI	421-3022
	ZPDS C	421-3023
01-79	IN4142	421-1003
	SD4	421-1002
	FDH666	421-1002
	BA31E	421-3007
01-79	BA31A	421-3006

INTEGRATED CIRCUITS

LM1001-22	TBA1205	425-0121
LM1006-23	TBA510	425-0102
LM1007-23	TBA530	425-0103
LM1008-23	TBA540	425-0104
LM1009-23	TBA920	425-0105
LM11950-22	TBA950	425-0106
LM11970-23	TBA970	425-0111
LM1010-23	TBA990	425-0112
LM1005-23	TDA440	425-0107
LM1341-12-23	TBA140-12	425-0124
LM1305P-22	MC1305P	425-0115

TRANSISTORS

Process / Pkg	TYPE	EGP NO
04-77	BC208B	423-3024
	BC209C	423-3059
	BC237	423-3011
	BC237A	423-3002
	BC237B	423-3005
	BC238A	423-3006
	BC238B	423-3007
	BC238C	423-3008
	BC239B	423-3025
	BC413B	423-3022
	2N3900	423-3032
	CS9014	SEE CS FAMILY LIST
	CS9011	SEE CS FAMILY LIST
11-77	MP1A1E	423-3009
12-77	2N5056	423-3054
	MP5A05	423-3015
	MP5A05	423-3014
12-77	BC174A	423-3000
14-77	BC337	423-3028
	BC337-16	423-3012
14-77	CS9013	SEE CS FAMILY LIST
	2N2022	423-3022
15-78	BF458	423-1022
	BF459	423-1023
15-77	BSS32	423-3017
44-77	CS9016	SEE CS FAMILY LIST
46-78	BF254	423-3051
	BF255	423-3019
46-72	A3901	423-3026
47-78	BF199	423-3001
	BF240	423-3022
	BF241	423-3023
49-78	BF235	423-3064
66-77	BC152	423-3073
67-77	CS9012	SEE CS FAMILY LIST
	BC327-16	423-3031
67-77	BC328-16	423-3013
71-77	BC307	423-3061
	BC307A	423-3063
	BC307B	423-3010
	BC308B	423-3004
	BC302C	423-3013

[Handwritten signature]
28/10/77

CS FAMILY TYPES

CS FAMILY	PROCESS	CS FAMILY TYPES	EGP-Nº
CS 9011	04-72	CS 9011G CS 9011H CS 9011I CS 9011J	423-3035 423-3066 423-3067 423-3068
CS 9012	67-72	CS 9012D CS 9012E CS 9012F CS 9012G CS 9012H CS 9012GH	423-3073 423-3074 423-3075 423-3076 423-3077 423-3037
CS 9013	14-72	CS 9013D CS 9013E CS 9013F CS 9013G CS 9013H CS 9013GH	423-3078 423-3079 423-3080 423-3081 423-3082 423-3036
CS 9014	04-72	CS 9014	423-3043
CS 9016	44-72	CS 9016E CS 9016F CS 9016G CS 9016H	423-3069 423-3070 423-3071 423-3072

423-3042

423-3060

423-3061

423-3044

[Signature]
28 June 79

- A N N E X E II -

—○○— CONTROLE - DE - LA - QUALITE —○○—

SOMMAIRE DU CHAPITRE

- I - Introduction et objectif :

- II- Différentes méthodes utilisées en contrôle de la qualité:

1)- Contrôle par échantillonnage.

1.1)- Généralités :

1.1.1)- Types de prélèvements :

1.1.2)- Efficacité :

1.1.3)- Aspect de contrôle :

1.2)- Contrôle par attribut :

1.2.1)- Risques et efficacités :

1.2.2)- Plans de contrôle par échantillonnage :

1.2.2.1)- Prélèvement simple :

1.2.2.2)- " double :

1.2.2.3)- " multiple :

1.2.2.4)- " séquentiel :

1.2.3)- Comparaison des avantages et inconvénients des échantillonnage, simple, double et multiple :

1.2.4)- Mil - STD 105 D (ou Standards ABC) :

1.2.5)- Exemple :

1.3)- Contrôle de réception par mesure :

1.3.1)- Généralités :

1.3.2)- Différents types d'échantillonnage :

1.3.3)- Avantages et inconvénients du contrôle par mesure :

2)- Contrôle en cours de fabrication :

2.1)- Généralités :

2.2)- Principe de construction de la carte de contrôle :

CONTROLE DE LA QUALITE

- I - Introduction et objectif :

La qualité d'un matériel est son aptitude à l'emploi auquel il est destiné. Cette aptitude dépend des propriétés du matériel et des conditions de son emploi ainsi que de l'environnement dans lequel il sera utilisé.

La qualité peut se présenter sous deux aspects qualitatif et quantitatif. C'est au niveau du bureau d'étude que naît pour la première fois la qualité, puis elle devra accompagner la fabrication du matériel jusqu'à sa finition. La qualité d'un système dépend de celle de ses composants.

Éléments psychologiques, forme, couleur, esthétique etc..., sont tous des facteurs de la qualité.

Toutefois on doit noter que l'amélioration du niveau de la qualité coûte très chère. Ainsi ne doit-on pas se contenter du nécessaire d'un niveau de qualité tout en cherchant par là à optimiser ce coût ?.

Ainsi le but du contrôle de la qualité est d'assurer un niveau de qualité acceptable à un prix de revient optimum, son rôle est de prévenir les sources de défauts et de subvenir à temps pour les éliminer.

L'outil essentiel qu'utilise le contrôle de la qualité est le calcul statistique.

La fiabilité est née de la qualité dans ce sens qu'elle donne la probabilité qu'à un matériel de conserver sa bonne qualité dans le temps.

Ainsi la fiabilité n'est d'autre qu'une caractéristique technique parmi d'autres. Ainsi avant de faire l'étude de la fiabilité d'un matériel n'est-il pas important et renseignant d'avoir une idée sur le contrôle de qualité que subit ce matériel pendant sa fabrication ?.

En effet, la fabrication des semi-conducteurs est suivie de très près par le contrôle de la qualité. Comme notre travail consiste non seulement à l'étude de la fiabilité des semi-conducteurs mais aussi de celle d'un poste TV N/B nous avons jugé nécessaire de faire un exposé très bref des différentes méthodes utilisées pour le contrôle de la qualité et leur comparaison.

- II - DIFFERENTES METHODES UTILISEES EN CONTROLE DE LA QUALITE :

- 1)- Contrôle par échantillonnage :

1.1)- Généralités :

Ce contrôle consiste à prendre une décision d'acceptation ou de refus à partir d'un échantillon d'un lot en définissant l'A.Q.L (en anglais Acceptable Quality Level = niveau de qualité acceptable N.Q.A).

Pour avoir une bonne idée sur la qualité, il faut que le prélèvement de l'échantillon soit effectué au hasard à partir d'une population homogène.

1.1.1)- Types de prélèvement :

On peut distinguer trois classes de prélèvement :

- Prélèvement simple.

La décision qui en découle correspond à une acceptation ou à un refus.

- Prélèvement multiple :

C'est une suite de prélèvements simples.

Trois possibilités de décision peuvent avoir lieu :

- Accèpter.
- Rejeter.
- Faire un prélèvement complémentaire.
- Prélèvement progressif :

Il y a également trois possibilités de décision :

- Accèpter.
- Rejeter.
- Continuer.

1.1.2)- Efficacité :

Quelque soit le système de contrôle, il est utile de considérer la courbe d'efficacité de ce test donnant la variation de la probabilité d'accèpter le lot en fonction de la valeur réelle du paramètre considéré (proportion de produits défectueux, le plus souvent).

La courbe d'efficacité est caractérisée par trois points remarquables :

- Risque du Fournisseur :

C'est la probabilité de se voir refuser un bon lot.

- Risque de l'acheteur :

C'est la probabilité d'accèpter un mauvais lot.

- Pourcentage d'indifférence :

Il correspond à une qualité d'un lot qui a une chance sur deux d'être accèpté, donc également une chance sur deux d'être refusé : c'est à dire la probabilité d'accèptation est égale à la probabilité de refus.

1.1.3) Aspects de contrôle :

Suivant la nature des observations, on distingue deux aspects de contrôle :

- Contrôle par attribut.

Il consiste à juger si le matériel est bon ou mauvais.

- Contrôle par mesure :

Il est beaucoup plus riche en renseignement que le contrôle par attribut. On peut en effet savoir non seulement combien de pièces sont mauvaises, mais aussi quel est leur écart par rapport à la limite accèptable.

1.2)- Contrôle par attribut :

1.2.1)- Risques et efficacité :

Ayant un lot homogène on veut savoir si le paramètre qui le caractérise satisfait à ce que l'on demande. A cet effet on effectue un prélèvement d'un échantillon et on va essayer d'en tirer une conclusion sur le lot.

a)- Notion de risque :

Dans le cas d'un jugement par attribut bon ou mauvais on dispose par exemple d'un lot sorti de fabrication contenant une proportion connue de défectueux $p_0 = 4\%$ et sur lequel on effectue un prélèvement de $n = 25$, on est en droit d'attendre 01 produit défectueux car : Si k est le nombre de défectueux attendu en a : $k = \frac{25 \times 4}{100} = 1$, si le lot a effectivement cette proportion 4% de défectueux, il y aura d'après la loi binomiale :

- Une probabilité de $C_{25}^0 P_0^0 (1 - P_0)^{25} = 0,3604$ que l'échantillon de 25 contiendra 0 défectueux.

- Une probabilité de $C_{25}^1 P_0^1 (1 - P_0)^{24} = 0,3754$ que l'échantillon de 25 contiendra 1 défectueux.

Donc la probabilité que l'échantillon de 25 contiendra 0 ou 1 produit défectueux sera :

$$P_a (k < 1 : 4\%) = C_{25}^0 P_0^0 (1 - P_0)^{25} + C_{25}^1 P_0^1 (1 - P_0)^{24} \\ = 0,7358$$

C'est la probabilité d'acceptation, si on refuse le lot au delà d'un défectueux dans l'échantillon.

Si le lot n'a pas exactement la valeur de la proportion de défectuosité prévue et si :

$P = p_1 = 3\%$ la probabilité d'acceptation sera :

$$P_a (k < 1 ; 3\%) = C_{25}^0 (0,03)^0 (0,97)^{25} + C_{25}^1 (0,03)^1 (0,97)^{24} = 0,82804$$

$p = p_2 = 9\%$ la probabilité d'acceptation sera :

$$P_a (k < 1 ; 9\%) = C_{25}^0 (0,09)^0 (0,91)^{25} + C_{25}^1 (0,09)^1 (0,91)^{24} = 0,3286$$

En conclusion, dans le cas de $p = p_1 = 3\%$, le lot bien que meilleur risque d'être refusé, ce risque correspond à une probabilité de refus de

$$1 - P_a (k < 1 ; 3\%) = 0,17196 \\ = 0,172$$

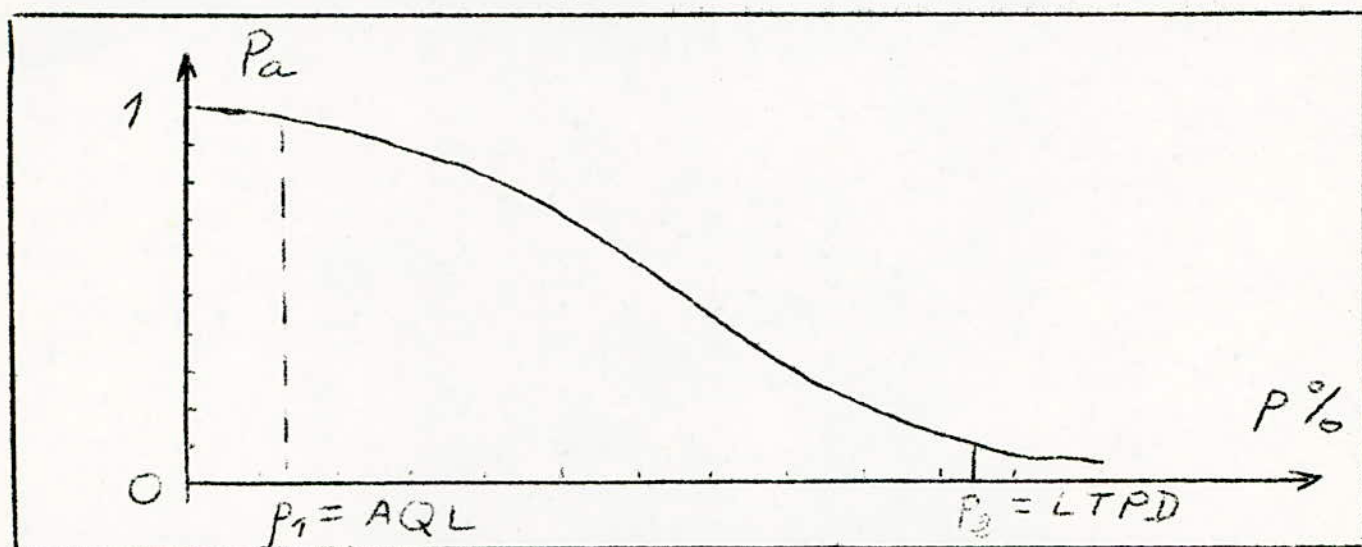
On appelle cette éventualité le risque du fabricant et on le note α .

Dans le cas de $p = p_2 = 9\%$, le lot n'est pas conforme et malgré cela on risque de l'accepter; ce risque correspond à une probabilité d'acceptation : $P_a (k < 1 ; 9\%)$. On appelle cette éventualité le risque de l'utilisateur et on le note β .

b)- Courbe d'efficacité :

A partir des probabilités d'acceptation calculées précédemment, celles-

ci étant fonction de la vraie valeur du paramètre proportion de défectuosité dans le lot, du nombre de produits défectueux tolérés dans l'échantillon et de la taille de l'échantillon, on peut tracer une courbe donnant cette probabilité d'acceptation.



On déduit en abscisse trois valeurs particulières avec leurs correspondances en ordonnées, ce sont :

- Un niveau de qualité acceptable N.Q.A (AQL). A ce niveau correspond par définition le risque du fournisseur α et donc une probabilité d'acceptation $(1 - \alpha)$ d'un lot conforme de proportion de défectuosité $P_1 = A.Q.L$

Certains ouvrages définissent l'A.Q.L comme étant la proportion de défectuosité p_1 dans le lot correspondante à un risque de fournisseur $\alpha = 0,05$.

- Un niveau de qualité tolérée L.T.P.D (en Anglais: Lot Tolérance par Cent défective). A ce niveau correspond par définition le risque du client B ou probabilité d'acceptation d'un lot non conforme de proportion de défectuosité $p_2 = L.T.P.D$.

- Un pourcentage d'indifférence :

C'est la proportion de défectuosité P_0 dans le lot correspondante à une probabilité d'acceptation \pm La probabilité de refus = $1/2$.

Formule donnant la courbe d'efficacité :

La courbe d'efficacité d'un système de contrôle est donnée par la formule :

$$P_a (k \leq K; p^0 k) = \sum_{k=0}^K P(k) = \sum_{k=0}^K C_n^k P^k (1 - P)^{n - k}$$

En traçant les courbes d'efficacité pour différentes valeurs de n et

différentes valeurs de K on constate que le système de contrôle est moins efficace pour des échantillons moins élevés et pour nombre de produits défectueux accepté élevé.

La forme de la courbe d'efficacité détermine le degré de discrimination du plan considéré, plus la courbe est à pente forte, meilleure est la discrimination entre bons et mauvais. Le rapport de discrimination est par définition :

$$R . D = \frac{P1}{P2} = \frac{A.Q.L}{L.T.P.D}$$

La pente des courbes croît avec l'effectif contrôlé n, donc plus n augmente, mieux le plan de contrôle discrimine les lots de qualité par acceptation des lots de qualité acceptable.

Cette courbe d'efficacité s'applique à diverses sortes de prélèvements

1.2.2)- Plans de contrôle par échantillonnage :

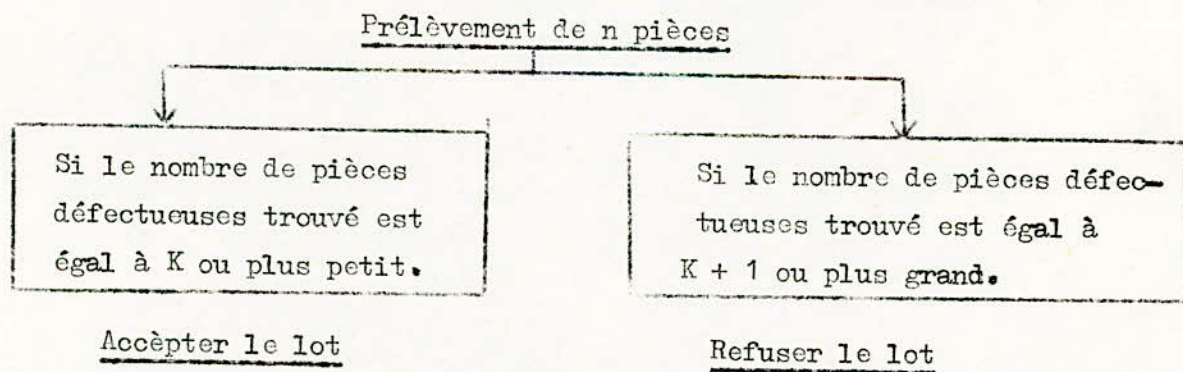
Pour aboutir à une décision d'acceptation ou de refus on peut procéder soit par :

- Un prélèvement simple d'un échantillon.
- Un prélèvement double.
- Un prélèvement multiple.
- Un prélèvement progressif.

1.2.2.1)- Prélèvement simple :

On prélève un seul échantillon, et on prend la décision suivante le résultat trouvé sur cet échantillon unique.

Schéma d'un plan de contrôle par simple échantillonnage



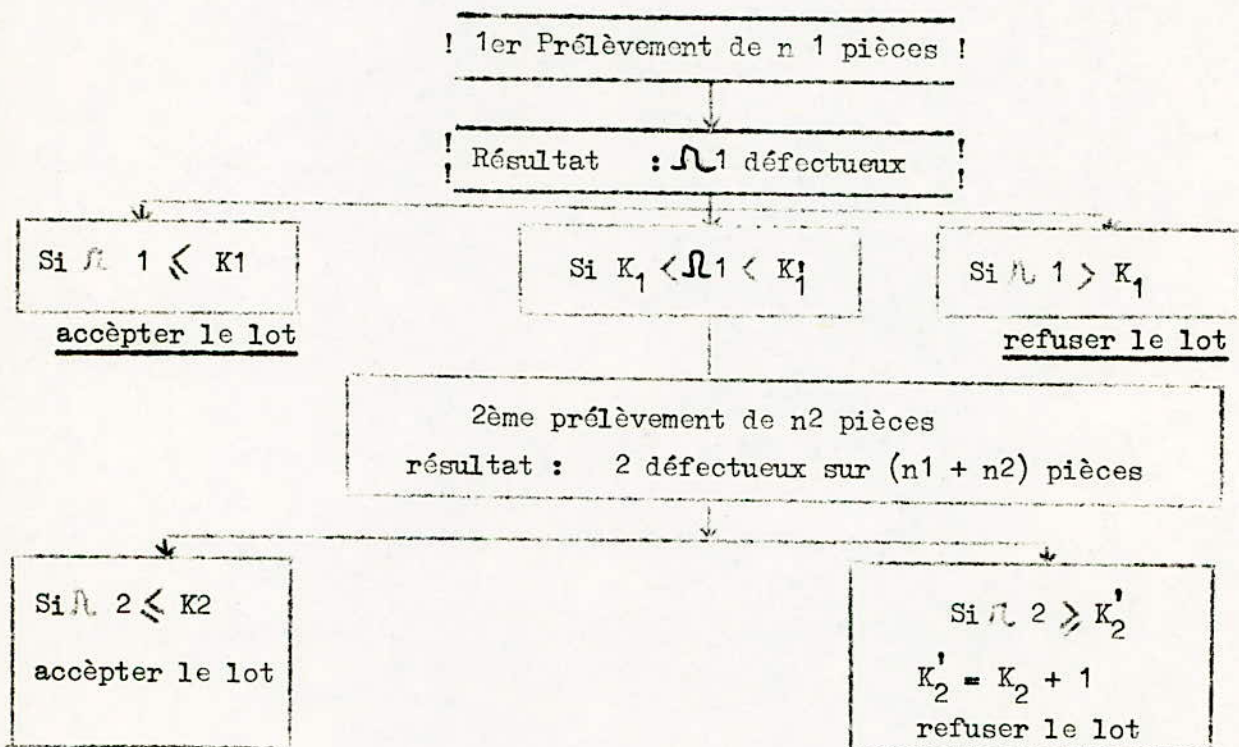
Le nombre de défectuosité maximum acceptable K est donné par $K=np1$ avec n taille de l'échantillon et $p1 = A.Q.L$, c'est le prélèvement le plus utilisé.

1.2.2.2)- Prélèvement double :

Le prélèvement est effectué en deux fois. Après contrôle du premier échantillon trois décisions peuvent être prises :

- Accèpter.
- Refuser.
- Continuer.

Schéma d'un plan de contrôle par double échantillonnage



1.2.2.3)- Prélèvement multiple :

Les principes sont les mêmes que dans le plan double, mais le prélèvement est constitué d'une série d'échantillons successifs.

La décision d'accèptation ou de refus peut être prise après plusieurs prélèvements d'échantillons.

Schéma d'un plan de contrôle par échantillonnage multiple

1er Prélèvement de n_1 pièces
 résultat : \mathcal{N}_1 défectueux sur n_1 pièces

Si $\mathcal{N}_1 \leq K_1$
 accèpter le lot

Si $K_1 < \mathcal{N}_1 < K'_1$

Si $\mathcal{N}_1 \geq K'_1$
 $K'_1 = K_1 + 1$
 refuser le lot

2ème Prélèvement de n_2 pièces
 résultat : \mathcal{N}_2 défectueux sur $(n_1 + n_2)$ pièces

Si $\mathcal{N}_2 < K_2$
 accèpter le lot

Si $K_2 < \mathcal{N}_2 < K'_2$
 3° inspection de n_3 pièces
 résultat : \mathcal{N}_3 défectueux sur
 $(n_1 + n_2 + n_3)$ pièces

Si $\mathcal{N}_2 \geq K'_2$
 $K'_2 = K_2 + 1$
 refuser le lot

Si $\mathcal{N}_3 \leq K_3$
 accèpter le lot

i ème Prélèvement de n_i pièces
 résultat : \mathcal{N}_i défectueux sur
 $(n_1 + n_2 + \dots + n_i)$ pièces

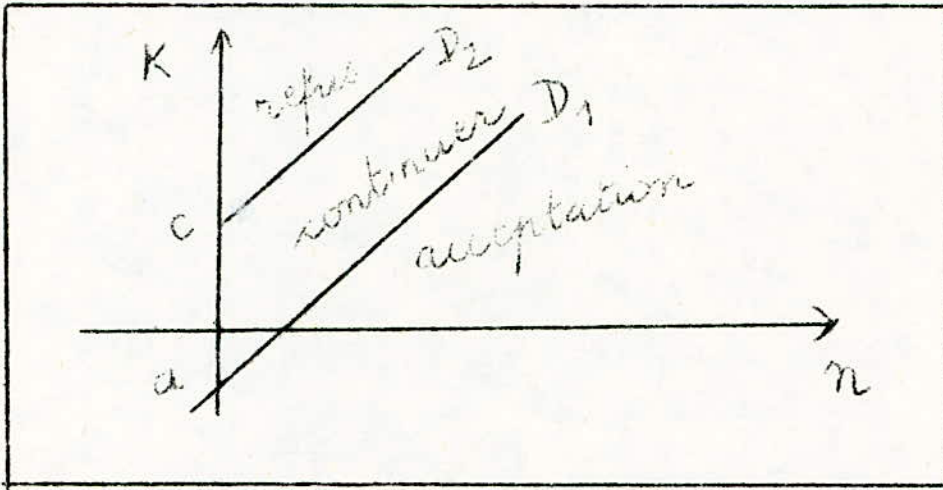
Si $\mathcal{N}_3 \geq K'_3$
 $K'_3 = K_3 + 1$
 refuser le lot

Si $\mathcal{N}_i < K_i$
 accèpter le lot

Si $\mathcal{N}_i \geq K'_i$
 $K'_i = K_i + 1$
 refuser le lot

1.2.2.4)- Prélèvement séquentiel ou progressif :

Une décision d'acceptation ou d'un refus dans un échantillonnage progressif peut être obtenue à partir de deux droites parallèles portés sur le plan formé par deux axes, l'un comportant le nombre de pièces défectueuses rencontrées et l'autre la taille de l'échantillon.



A K pièces défectueuses trouvées dans un échantillon de taille n, trois décisions peuvent se présenter :

- Accepter si un point (n, K) se trouve au dessous de D.1.
- Refuser si un point (n, K) se trouve au dessus de D2.
- Continuer en prélevant une pièce supplémentaire si un point (n, K) se trouve entre les deux droites D1 et D2.

Les équations des deux droites sont données par :

$$(D1) : K = - a + bn$$

$$(D2) : K = c + bn$$

$$\text{avec } a = \log \frac{1 - p_1}{1 - p_2}$$

$$b = \frac{\log \frac{1 - p_1}{1 - p_2}}{\log \frac{p_2}{p_1} + \log \frac{1 - p_1}{1 - p_2}}$$

$$a = \frac{\log \frac{1 - \alpha}{\beta}}{\log \frac{p_2}{p_1} + \log \frac{1 - p_1}{1 - p_2}}$$

$$c = \frac{\log \frac{1 - \beta}{\alpha}}{\log \frac{p_2}{p_1} + \log \frac{1 - p_1}{1 - p_2}}$$

α est le risque du fournisseur

β est le risque de l'utilisateur.

P1 = A.Q.L (Niveau de Qualité acceptable).

P2 = L.T.P.D (Pourcentage de défautuosité toléré).

Toutes ces formules sont analogues à celles trouvées dans la partie test séquentiel en fiabilité (1). Pour le détail (voir cette partie chapitre -I-).

Nombre moyen de pièces contrôlées :

On démontre que le nombre moyen \bar{n} de pièces prélevées pour obtenir une décision (acceptation ou refus) est donné par :

$$1) \bar{n} = \frac{(a + c) p - c}{b - p} \quad \text{si } p \neq b$$

$$2) \bar{n} = \frac{ac}{b(1 - b)} \quad \text{si } p = b$$

Le plan progressif est plus économique que le plan simple et le plan double. Il est plus économique que le plan multiple pour les qualités très bonnes ou très mauvaises.

1.2.3)- Comparaison des avantages et inconvénients des échantillonnages simple, double et multiple :

	Simple	Double	Multiple
Taille de l'échantillon.	généralement très grand.	En général 10 à 50% de moins que le cas simple.	En général inférieur de 30% au cas du double échantillonnage.
Coût	Bas	Plus élevé que dans le cas d'un échantillonnage simple.	Très élevé

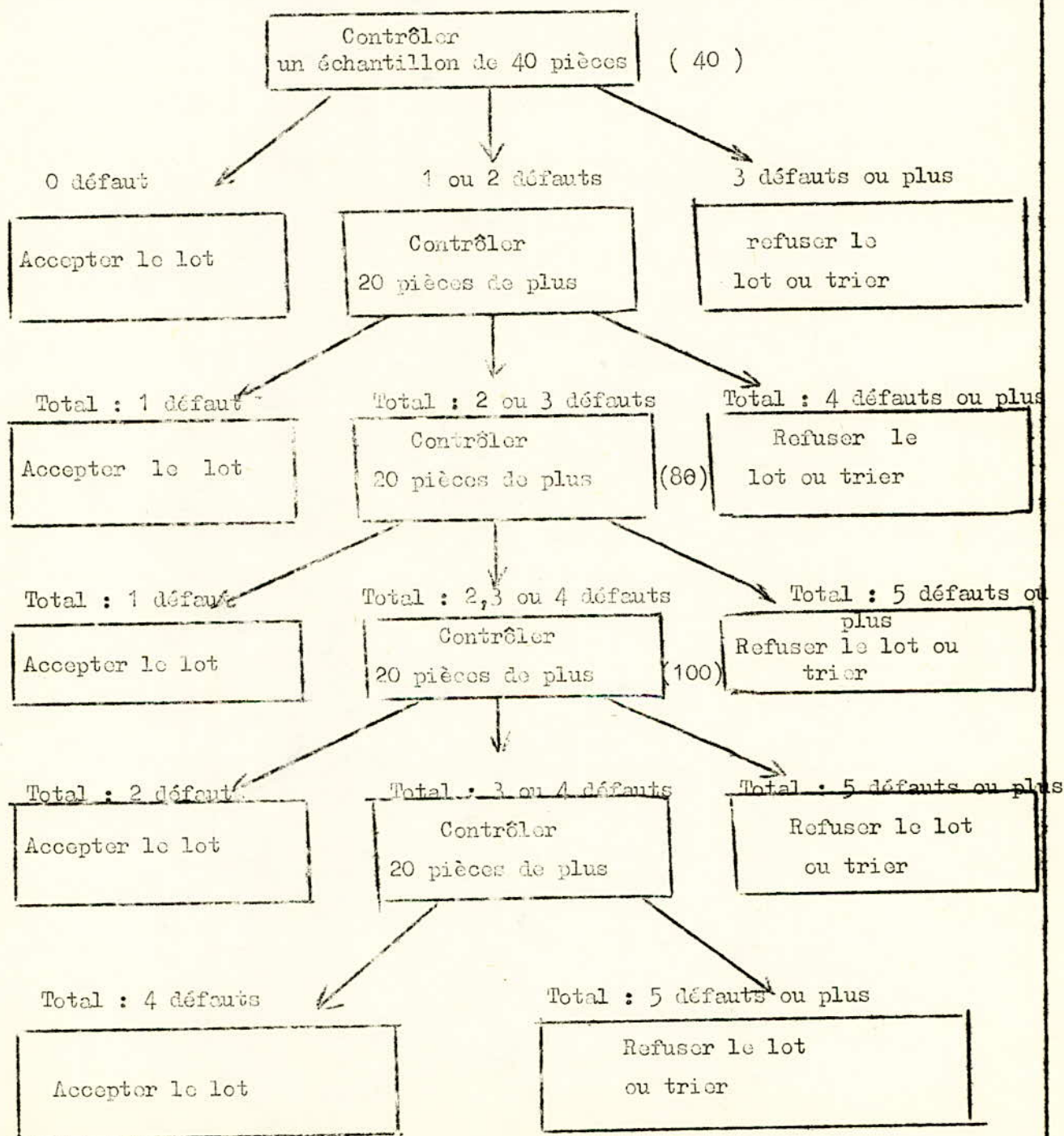
1.2.4)- Tables MILITARY STANDARD 105 D (ou Standards ABC):

Au lieu de faire le calcul chaque fois pour aboutir à une décision d'acceptance ou de refus, des tables ont été préparées une fois pour toute pour arriver au but.

Connaissant le niveau de qualité acceptable et l'effectif du lot, on peut déterminer à partir de ces tables (MILITARY STANDARD 105.D) le nombre de pièces à partir duquel on refuse le lot et le nombre de pièces défectueuses minimum au delà duquel on ne peut pas prendre une décision d'acceptance.

1.2.5)- Exemple d'un plan d'échantillonnage multiple (en utilisant les tables Military Standard 105.D):

Supposons le N.Q.A = 2% et la taille des lots de 750 pièces, la taille d'échantillon est indiquée dans la table :
40 puis 60 puis 80 puis 100 puis 120.



1-3 Contrôle de réception par mesures

1-3-1 Généralités

Elle consiste à prendre un échantillon d'un lot et à mesurer la caractéristique à contrôler. On calcule la moyenne \bar{X} et l'écart type S des mesures.

Si les X_i sont les valeurs trouvées par mesure l'estimation de la vraie moyenne et celle du vrai écart type sont données par :

$$\bar{X} = \frac{\sum v_i}{n}$$

$$S = \left[\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \right]^{1/2}$$

n est l'effectif de l'échantillon

Le critère d'acceptation ou de refus est basé sur les valeurs trouvées pour \bar{X} et S ; l'application de ce critère suppose que la caractéristique contrôlée suit, au moins approximativement, une loi normale. Les pièces defectueuses sont celles dont la caractéristique a une valeur inférieure à une limite inférieure T_i ou elle a une valeur supérieure à une limite supérieure T_s .

Pour déterminer le critère de refus ou d'acceptation, on utilise la variable réduite :

$$t = \frac{T_s - \bar{X}}{S} \quad \text{pour limite supérieure.}$$

$$t = \frac{\bar{X} - T_i}{S} \quad \text{pour limite inférieure.}$$

Dans les 2 cas limite supérieure ou inférieure t doit être \geq à une valeur K pour accepter le lot et ou refuse si $t < K$.

1-3-2 Différents types d'échantillonnage.

Il existe l'échantillonnage simple , l'échantillonnage double et l'échantillonnage progressif.

1-3-2-1 Echantillonnage simple

Schéma d'échantillonnage

limite supérieure T_s

prélever n pièces
calculer \bar{X} et S

Si $\bar{X} + Ks \leq T_s$
accepter le lot

Si $\bar{X} + Ks > T_s$
refuser le lot

limite inférieure T_i

prélever n pièces
calculer \bar{X} et S

Si $\bar{X} - Ks \geq T_i$
accepter le lot

Si $\bar{X} - Ks < T_i$
refuser le lot

1-3-2 2 - Echantillonnage double

Limite supérieure T_s

Prélever un 1er échantillon de n_1 pièces. Calculer \bar{X}_1 et S_1

$\bar{X}_1 + K_a S_1 \leq T_s$
Accepter le lot

$\bar{X}_1 + K_r S_1 < T_s < \bar{X}_1 + K_a S_1$
prélever un 2e échantillon de n_2 pièces. Calculer \bar{X}_t et S_t pour l'échantillon total de $n_1 + n_2$ pièces.

$\bar{X}_1 + K_r S_1 > T_s$
refuser le lot

$\bar{X}_t + K_t S_t \leq T_s$
accepter le lot

$\bar{X}_t + K_t S_t > T_s$
refuser le lot

limite inférieure T_i

Prélever un 1er échantillon de n_1 pièces. Calculer \bar{X}_1 et S_1

$\bar{X}_1 - K_a S_1 \geq T_i$
accepter le lot

$\bar{X}_1 - K_a S_1 < T_i \leq \bar{X}_1 - K_r S_1$
prélever un 2e échantillon de n_2 pièces. Calculer \bar{X}_t et S_t pour l'échantillon total de $n_1 + n_2$ pièces.

$\bar{X}_1 - K_r S_1 < T_i$
refuser le lot

$\bar{X}_t - K_t S_t \geq T_i$
Accepter le lot

$\bar{X}_t - K_t S_t < T_i$
refuser le lot.

Les valeurs de n et K (échantillonnage simple) ainsi que de n_1 , n_2 , K_a , K_r , K_t (échantillonnage double) sont données pour différentes conditions de contrôle, dans des "tables d'échantillonnage " . Ces tables sont celles de BOWKER et GOODE.

1-3-2 3) Prélèvement séquentiel ou progressif

Les pièces sont prélevées une à une, on mesure sur chacune d'elles la caractéristique à contrôler.

La décision d'acceptation ou de refus comme pour les autres types de contrôle peut être obtenue sur le graphique.

2 droites D_1 et D_2 délimitent 3 régions :

- région d'acceptation du lot
- région de refus
- région d'indécision impliquant le prélèvement d'une pièce supplémentaire.

On démontre que les équations des 2 droites sont données par :

$$a_n = a_1 + b_n$$

$$r_n = c + b_n$$

avec
$$b = \frac{m_1 + m_2}{2}$$

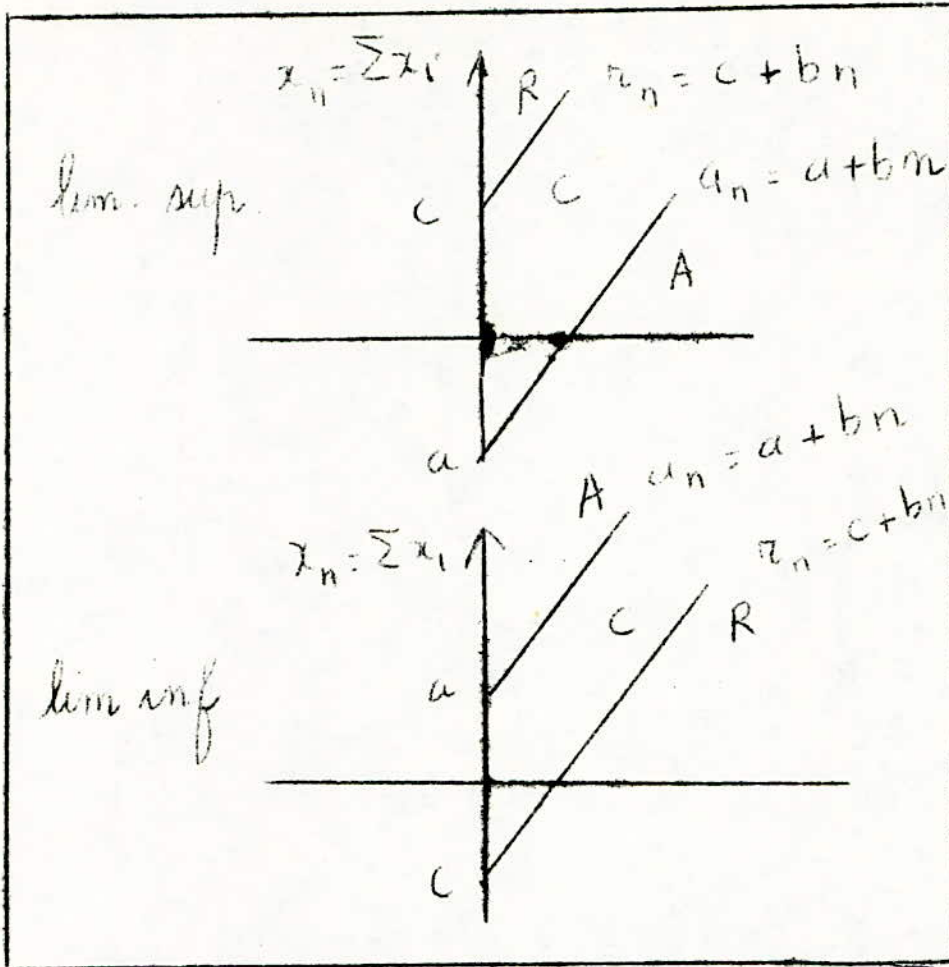
$$a = 2,3 \frac{\sigma^2}{m_1 - m_2} - \log \frac{1 - \alpha}{\beta}$$

$$b = 2,3 \frac{\sigma^2}{m_2 - m_1} \text{ LOG } \frac{1 - \beta}{\alpha}$$

m_1 moyenne correspondant à une probabilité d'acceptation $= (1 - \alpha)$;
risque du fournisseur.

m_2 moyenne correspondant à une probabilité d'acceptation = β risque
du client .

est l'écart type.



1-3-3 Avantages et inconvénients du contrôle par mesure

L'inspection par mesure, malgré sa précision et la réduction de la taille de l'échantillon, est moins utilisée car elle est coûteuse et prend beaucoup de temps par rapport au contrôle par attribut.

2) Contrôle en cours de fabrication

2-1) Généralités

L'emploi des méthodes statistiques pour le contrôle de la qualité est basé sur les idées principales suivantes :

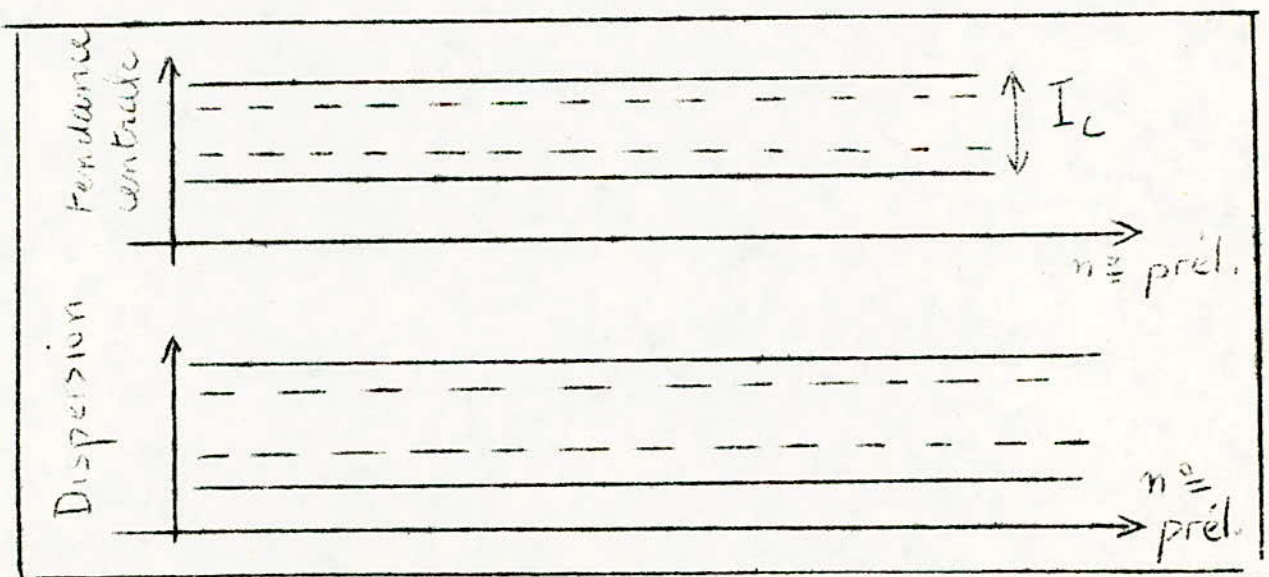
- Prévenir les effets néfastes des déréglages de la fabrication au lieu de trier les produits mauvais à la fin de cette fabrication.
- Utiliser les méthodes scientifiques d'usage simple qui seront plus avantageuses du point de vue économique : grande efficacité à coût égal ou coût minimum à efficacité égale.

-- Organiser correctement l'ensemble du service de contrôle selon l'importance de l'entreprise et la nature du produit fabriqué.

Afin de prévenir les effets néfastes des dérèglages, il suffit d'effectuer un contrôle continu au fur et à mesure de la fabrication. L'usage des méthodes statistiques faisant appel à la théorie d'échantillonnage et considérant la variabilité du processus de fabrication c'est la loi de distribution de la grandeur contrôlée permet de surveiller de plus près la fabrication et de connaître avec une précision relativement bonne sa tendance centrale et dispersion réelles. Pour se faire il suffit d'opérer en 2 étapes . * Dans un premier stade, on estime la variabilité, c'est à dire la loi de distribution de la grandeur contrôlée et en déduire les intervalles I_C et I_D à l'extérieur desquels ont très peu de chances (risque α faible) de trouver chacun des paramètres de la distribution s'il n'y a pas de dérèglement. Si toutes les valeurs expérimentales sont à l'intérieur de ces intervalles, la fabrication est dite sous contrôle. Dans le cas contraire on doit passer à la seconde étape pour chercher la cause du dérèglement.

* Dans cette seconde étape, dès qu'une valeur expérimentale se trouve à l'extérieur des intervalles I_C et I_D , on arrête la fabrication pour nouveau réglage et contrôle à 100 % ce qui a été fabriqué depuis le contrôle précédent.

Pour faciliter l'application de cette méthode, on utilise des cartes de contrôle sur lesquelles on reporte les points représentatifs des estimations et les limites de contrôle (I_C et I_D), ainsi que les limites dites de surveillance ou d'alerte qui signalent l'approche d'un dérèglement. Les limites d'alerte sont bien sûr à l'intérieur des intervalles I_C et I_D ;



• principe des cartes de contrôle : ——— limite du contrôle
 - - - - - limite de surveillance.

En considérant que les résultats successifs individuels sont indépendants ou tout au moins dépendants de façon négligeable. On suppose que les produits fabriqués sont normalement distribués I_D et I_C représentent la dispersion de l'écart type et de la moyenne.

Moyenne :

Limite supérieure de contrôle

C'est la limite telle que l'étendue d'un échantillon à 99,9 % de chances de lui être inférieure par suite des seules fluctuations de l'échantillonnage.

Limite supérieure de surveillance

C'est la limite telle que l'étendue d'un échantillon à 97,5 % de chances de lui être inférieure.

2- 2) Principe et construction de la carte de contrôle

On n'expose ici que la méthode par mesure de l'étendue qui à efficacité relativement égale est plus économique et plus pratique dans l'industrie que la méthode par mesure de l'écart type.

On note par :

x : l'effectif de l'échantillon

\bar{X} : la moyenne de l'échantillon

$\bar{\bar{X}}$: la moyenne des moyennes de r échantillons: estimation de moyenne de la fabrication

\bar{W} : moyenne des étendues de r échantillons

$S = \frac{\bar{W}}{A_n}$: estimation de l'écart type de la fabrication.

a_n : coefficient tabulé pour la loi normale .

Dans le paragraphe : (rappel de math) , on a vu que :

$$\bar{x} - t \frac{\sigma}{\sqrt{n}} < m < \bar{x} + t \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

$t =$ risque imposé $\left\{ \begin{array}{l} t_c = 0,1 \% \text{ pour chaque limite de contrôle} \\ t_s = 0,25 \% \text{ pour chaque limite de surveillance.} \end{array} \right.$

connaissant la moyenne m et l'écart type de fabrication on détermine ces limites.

soit $m \pm t_c \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ (risque $t_c = 0,1 \%$)

ou $m \pm A_c \sigma$ avec $A_c = \frac{3,09}{\sqrt{n}}$

et $m \pm t_s \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ (risque $t_s = 0,25 \%$)

soit $m \pm A_S \sigma$ avec $\frac{1,96}{\sqrt{n}} = A_S$

A_C et A_S peuvent être tabulés pour diverses valeurs de n .

Dans le cas où m et σ sont estimés par \bar{X} et \bar{W} , les limites de contrôle et de surveillance deviennent :

$$\bar{X} \pm A_C S = \bar{X} \pm A_C \frac{\bar{W}}{a_n} = \bar{X} \pm A'_C \bar{W} \quad \bar{X} \pm A_C S = \bar{X} \pm A_C \frac{\bar{W}}{a_n} = \bar{X} \pm A'_C \bar{W}$$

$$\text{et } \bar{X} \pm A_S S = \bar{X} \pm A_S \frac{\bar{W}}{a_n} = \bar{X} \pm A'_S \bar{W}$$

$$\text{Avec } \frac{A_C}{A'_C} = \frac{A_S}{A'_S} = a_n$$

A'_S ; A'_C ; a_n sont tabulés suivant les valeurs de n ;

De la même façon on détermine les limites de contrôle et de surveillance de l'étendue.

On aboutit aux coefficients.

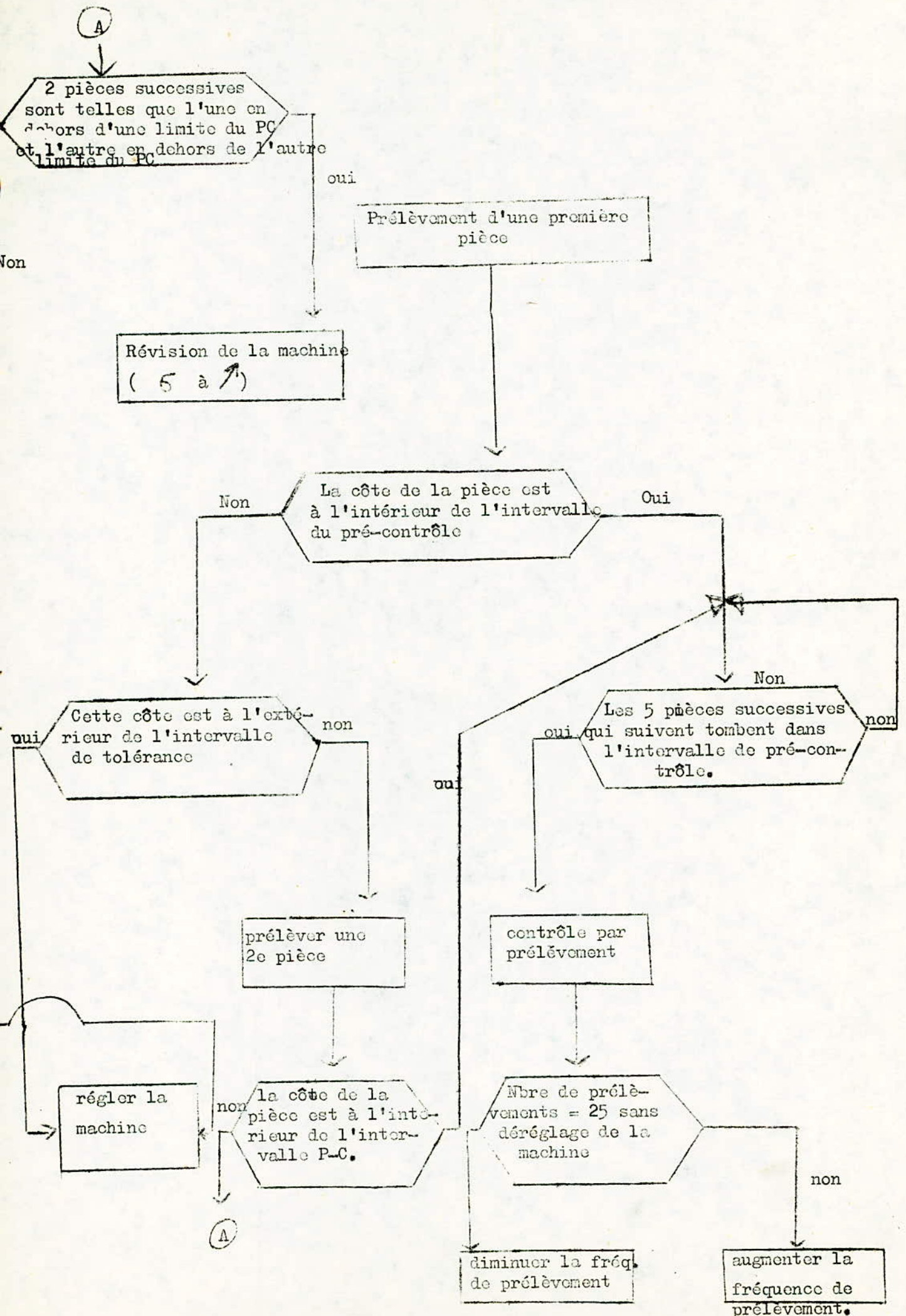
D'_c1 ; D'_c2 ; D'_s1 ; et D'_s2 qui peuvent aussi être tabulés. On a toujours :

$$\left(\frac{D}{D'} = a_n \right)$$

1-3) Méthodes utilisées dans le contrôle de la qualité

3-1) Pré-contrôle

Le but du pré-contrôle est de définir une méthode permettant de déterminer à quel moment la machine doit être réglée ou révisée par un simple contrôle au calibre. Cette méthode consiste à diviser la tolérance de la dimension en 4 parties égales et procéder comme l'indique l'organigramme suivant :



On remarque que cette méthode très pratique permet un centrage de la moyenne avec un respect des tolérances normales sans conduire à leur resserement par rapport au plan de définition.

Le régleur (technicien) doit suivre et respecter la méthode avec rigueur et attention.

3-2) Cartes de contrôle

3-2-1) Cartes de W.A. SHEWHART

Le principe de construction de ces cartes a été exposé dans la partie " contrôle en cours de fabrication " ~~11~~ et dans la partie 2.2. L'utilisation de ces cartes permet d'intervenir rationnellement pour maintenir la qualité à un niveau désiré.

Différents types de cartes :

* Contrôle par mesure

- carte de contrôle de la moyenne
- carte de contrôle de la médiane
- carte de contrôle de l'étendue
- carte de contrôle de l'écart-type.

* Contrôle par attributs

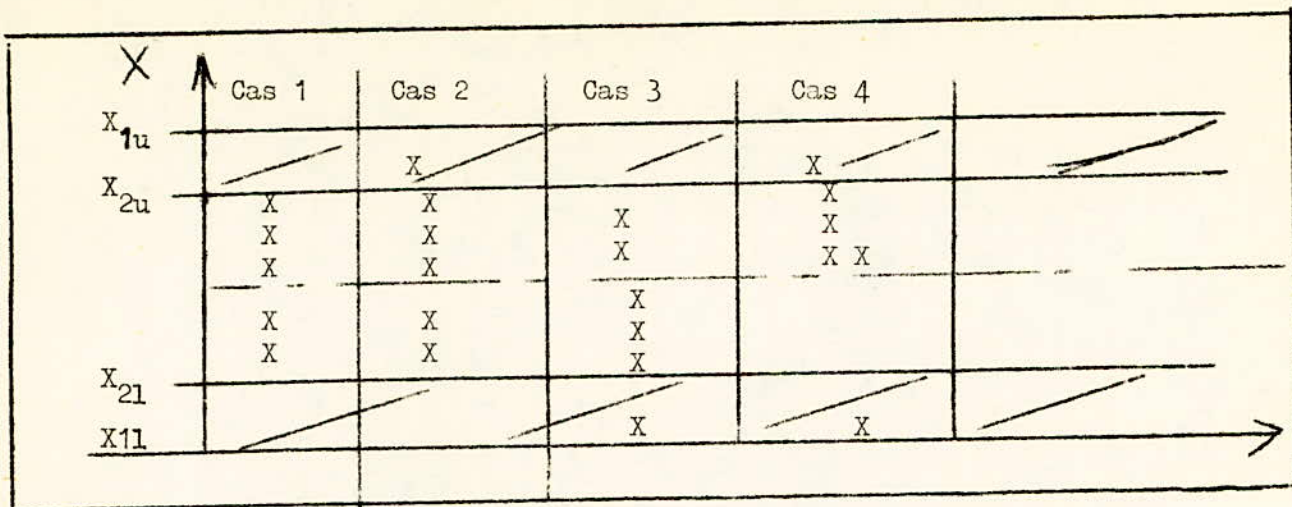
- carte de contrôle du nombre de défectueux
- carte de contrôle de la proportion de défectueux
- carte de contrôle du nombre de défauts par unité

Dans les paragraphes précédents on a fait un exposé sur les notions de risques et sur les différents types de contrôle. En effet pour comprendre l'usage de ces cartes de contrôle, il faut avoir une certaine connaissance sur ces notions.

3-2-2) Carte de contrôle basée sur les valeurs individuelles de l'échantillon :

3.2.2.1) Principe

Une méthode de contrôle statistique basée sur les valeurs individuelles observées dans un échantillon par différents chercheurs. Cette méthode à l'avantage, sur les autres méthodes classiques utilisant la moyenne et l'écart type, de n'exiger aucun calcul des caractéristiques de l'échantillon et de permettre de noter directement toutes valeurs observées sur cette carte d'où une analyse plus détaillée du procédé de fabrication.



On considère que la fabrication se poursuit normalement tant que la disposition des valeurs individuelles de l'échantillon est conforme à la figure ci-dessus.

On accepte (quelque soit la taille de l'échantillon) pour une ou deux valeurs dans chaque zone ombrée les autres étant à l'intérieur. Dans tout autre cas, on a un dérèglement et il faut subvenir pour le corriger.

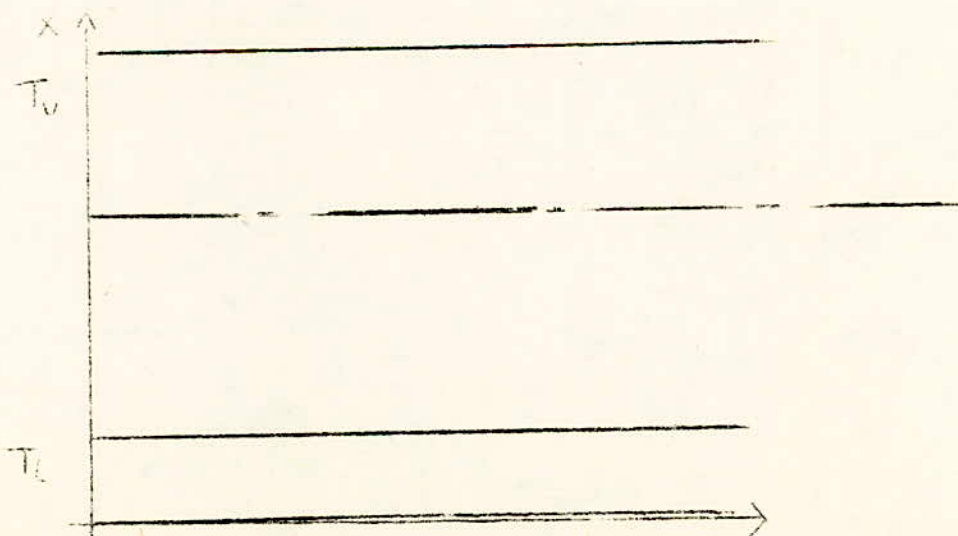
Les limites X_{iu} dépendent de la dimension de l'échantillon et des risques de découvrir un dérèglement qui n'existe pas ou de considérer que la fabrication est réglée alors qu'elle ne l'est pas.

L'hypothèse de base de cette méthode est que le procédé de fabrication, quand tout se passe normalement, permette de tenir une certaine tolérance admise.

C'est à dire on connaît σ et la tolérance $T_u - T_l > 5\sigma$

Dans ces conditions, il faut qu'on ait toujours :

$$m_i = \frac{T_u + T_l}{2}$$



3 -2.2.2) Calcul des limites du contrôle

Soit une variable aléatoire X dont les valeurs sont distribuées normalement.

$$E(X) = 0$$

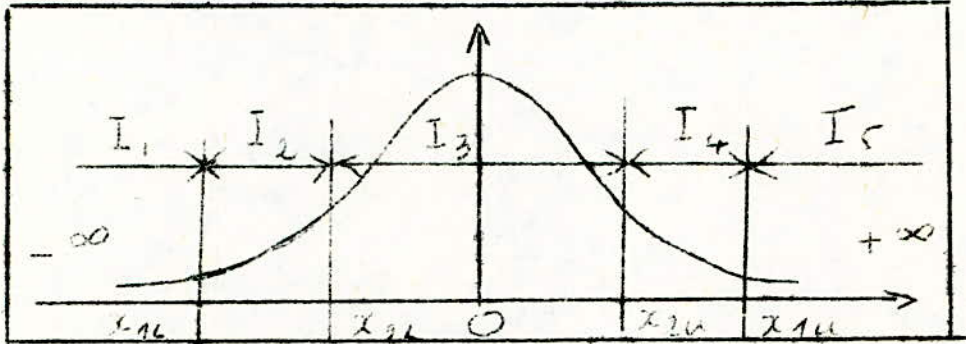
$$m_1 = u_1 = E(X^2) = 1 = \sigma^2$$

La fonction de distribution s'écrit alors :

$$F(X) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx$$

soient deux valeurs x_{1u} et x_{2u} ($x_{2u} < x_{1u}$)

et on a $x_{12} = -x_{1u}$ et $x_{21} = -x_{2u}$



soient x observations de la v.a. X

posons les hypothèses :

$$H_0 : " X \text{ est une v.a. } \in \mathcal{L}P(0,1) "$$

comme on a 2 inconnues à déterminer il faut 2 équations

posons

$$1 - \alpha = \text{Probabilité d'accepter } H_0 \text{ quand } H_0 \text{ est vraie.}$$

comme exemple prenons

$$1 - \alpha = 0,95$$

alors

$$1 - \alpha = P(I/H_0) + P(II/H_0) + P(III/H_0) + P(IV/H_0).$$

I, II, III, IV, sont les quatre cas qui peuvent se présenter (exemple du § 221 à quand écrit la probabilité qu'aucune valeur ne se trouve dans les intervalles I_1 et I_2 et que l'on trouve au plus une valeur dans l'un ou l'autre des intervalles et (ou bien dans les 2 intervalles) les autres étant dans l'intervalle.

Les quatre cas par exemple du § 221 s'écrivent

	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5
I	0	0	n	0	0
II	0	1	n-1	0	0
III	0	0	n-1	1	0
IV	0	1	n-2	1	0

Rappelons que $F(-X) = 1 - F(X)$

On aura :

$$P(I/H_0) = \left[F(X_{2u}) - F(X_{2l}) \right]^n = \left[2F(X_{2u}) - 1 \right]^n$$

$$P(II/H_0) = P(III/H_0) = n \left[2F(X_{2u}) - 1 \right]^{n-1} \left[F(X_{1u}) - F(X_{2u}) \right]$$

$$P(IV/H_0) = n(n-1) \left[2F(X_{2u}) - 1 \right]^{n-2} \left[F(X_{1u}) - F(X_{2u}) \right]^2$$

d'où l'équation

$$1 - \alpha = \left[2F(X_{2u}) - 1 \right]^n + 2n \left[2F(X_{2u}) - 1 \right]^{n-1} \left[F(X_{1u}) - F(X_{2u}) \right] + n(n-1) \left[2F(X_{2u}) - 1 \right]^{n-2} \left[F(X_{1u}) - F(X_{2u}) \right]^2$$

Pour une valeur donnée de α l'équation contient 2 inconnues X_{2u} et X_{1u} .
 Trouvons une autre équation. Pour cela on écrit que la probabilité pour qu'une des valeurs dépasse X_{2u} est égale à $1 - \alpha$

$$1 - \alpha = n \left[F(X_{2u}) \right]^{n-1} \left[1 - F(X_{2u}) \right] + \left[F(X_{2u}) \right]^n$$

(1) et (2) permettent ainsi de déterminer X_{1u} et X_{2u}

donc aussi x_{1l} et x_{2l}

Les valeurs de x_{2u} pour $\alpha_1 = 0,025$ et $\alpha_1 = 0,005$ sont tabulées (cf table).

1) Si $X' \in \mathcal{N}(m_1, \sigma)$ alors $X \in \mathcal{N}(0,1)$ se déduit de X' par le changement variable $X = \frac{X' - m_1}{\sigma}$

$$d'où \begin{cases} X'_{1u} = X_{1u} \sigma + m_1 \\ X'_{2u} = X_{2u} \sigma + m_1 \end{cases}$$

2) Si T_u et T_l sont fixées

$$m_1 = T_0 = \frac{T_u + T_l}{2} \quad 2K = T_u - T_l = T$$

Alors

$$X'_{1u} = T_0 + X_{1u} \frac{T}{2K} = T_u - l_1 T$$

$$X'_{2u} = T_0 + X_{2u} \frac{T}{2K} = T_u - l_2 T$$

$$\text{Avec } L_1 = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{X_{1u}}{K} \right) \quad L_2 = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{X_{2u}}{K} \right)$$

L_1 et L_2 peuvent aussi être tabulées selon les risques et la taille de l'échantillon et les pourcentages de déféctuosité acceptables (c'est à dire : les valeurs de K).

cf table 8)

n	$\alpha_1 = 0,005$	$\alpha_1 = 0,025$
4	$X_{1u} = 2,54$	$X_{1u} = 00$
	$X_{2u} = 1,89$	$X_{2u} = 1,49$
6	$X_{1u} = 2,68$	$X_{1u} = 00$
	$X_{2u} = 2,08$	$X_{2u} = 1,71$
10	$X_{1u} = 2,84$	$X_{1u} = 00$
	$X_{2u} = 2,30$	$X_{2u} = 1,96$

$$\alpha = 0,05$$

3-3) Etude de la variabilité de la fabrication

Mode de fréquence des prélèvements

Pour rechercher les causes de variations et les réduire, il faut pouvoir varier un élément et savoir si un résultat a été obtenu et dans quel sens ? Disposons de plusieurs chiffres de densité et de plusieurs graphiques de type normal (1).

Comment savoir s'il y a eu un changement et dans quel sens il est intervenu.

On collectionne plusieurs mesures dans un graphique du type normal (2) sur graphique est choisie une échelle de mesure puis une croix dans un carré pour chaque mesure en commençant par le haut on construit ainsi un graphique du type normal (3) la courbe ainsi obtenue est la courbe de distribution.

Elle suit en générale une loi normale. Cela est très intéressant et simplifie en général le travail.

En calculant la moyenne et la dispersion des mesures on peut, quand on modifie des conditions de la fabrication, savoir si le résultat obtenu est meilleur.

Ainsi on définit par

$$C.V. = \frac{\sigma}{M}$$

Le coefficient de variation. La connaissance de σ et C.V. permet alors d'apprécier la dispersion des mesures autour de la moyenne.

Cette méthode demande un choix judicieux de l'échelle. Le choix dépendra du C.V. de la quantité mesurée et de la précision de l'appareil de mesure.

Aussi ne faut-il pas savoir quand est-il possible de faire de tel calcul ? En fait, étant donné que la distribution gaussienne est une distribution du hasard. Donc on n'aura une telle distribution si les produits fabriqués sont régies par une loi cyclique ou autre.

Le prélèvement doit être fait au hasard à des intervalles de temps bien choisis. Aussi n'avons nous pas deux solutions nous permettons de vérifier notre droit à cette méthode.

- a) la loi de gauss
- b) la droite de Henry.

3-4) Contrôle de rebuts de fabrication et ses limites de confiance

Ayant un lot, on en relève n échantillons dont n' sont hors tolérances.

Alors $p = \frac{n'}{n + n'}$ est la proportion de pièces hors tolérances.

Dans le cas où $n + n' < 400$ on ne peut utiliser les méthodes précédentes. Ainsi dans ce cas connaissant p les abaques (annexe 1 et 2) 255.256 permettent de trouver le % de pièces hors tolérances du lot en donnant la zone dans laquelle le % réel est compris.

La précision est fonction seulement de la taille de l'échantillon et non pas de son importance relative par rapport à la population. Ainsi on peut, malgré un nombre d'échantillon assez limité, avoir une estimation de la réalité ce qui permet de raisonner. On établit souvent des tableaux en partant des abaques pour faciliter le travail de gestion.

5) Limite de surveillance et de contrôle

Ayant défini la moyenne M , la variabilité (σ et C.V.) et fixé le pourcentage maximal de déchets admis (% hors tolérances) les limites de surveillance et de contrôle sont fixées comme indiqué dans le ~~VI.~~ § 2.2
Les coefficients A_c et A_s sont tabulées et na.

Rappelons que :

$M \pm A_c$ = limite du contrôle

$M \pm A_s$ = limite de surveillance.

Ecart-type

Les limites de contrôle de l'écart type :

B_{c1} et B_{c2}

Les limites de surveillances de l'écart types

B_{s1} et B_{s2}

(CF VII)

B_{s1} , B_{s2} , B_{c2} peuvent être tabulées.

Les abaques qui suivent donnent la lecture directe des limites de contrôle et de surveillance : C_1 , C_2 , S_1 , S_2 .

Abaque A : Limite de surveillance et de contrôle quand le nombre de rebut est très faible. (x très grand)

Abaque B : Limite de contrôle quand la proportion P (proportions de rebuts déterminé par la variabilité) est comprise entre 0 et 10 %

Abaque C : Limite de surveillance quand OCPC 10 %

Abaque D : Limite de contrôle quand 10 % CP 100 %

Abaque E : Limite de surveillance quand 10 % CPC 100 %

Limite de contrôle = $C_1 - C_2$

Limite de surveillance = $S_1 - S_2$

VALEUR DES COEFFICIENTS A_s et A_c EN FONCTION

DE n

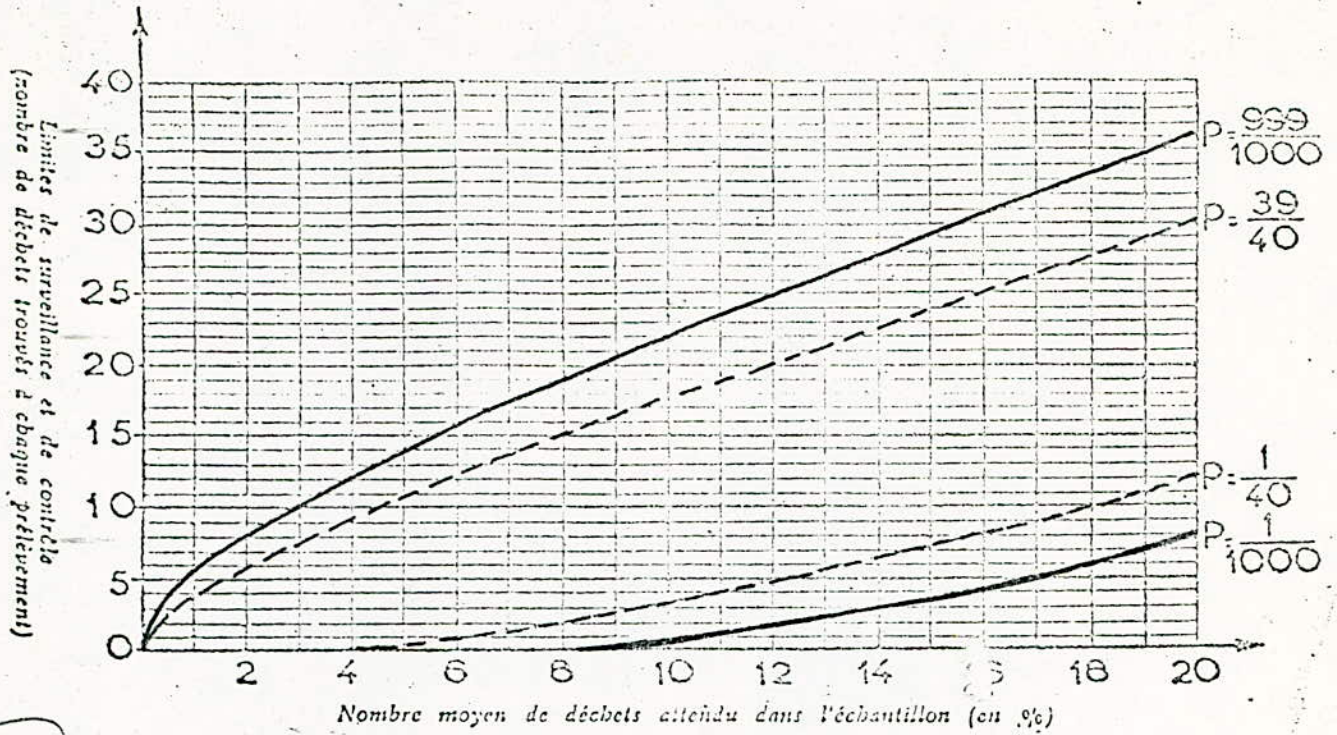
n	A_s	A_c	n	A_s	A_c
1	1,96	3,09	16	0,490	0,773
2	1,386	2,185	17	0,475	0,750
3	1,132	1,784	18	0,462	0,728
4	0,980	1,545	19	0,450	0,709
5	0,876	1,382	20	0,438	0,696
6	0,800	1,262	21	0,428	0,674
7	0,741	1,168	22	0,418	0,659
8	0,693	1,092	23	0,409	0,644
9	0,653	1,030	24	0,400	0,631
10	0,620	0,977	25	0,392	0,618
11	0,591	0,932	26	0,384	0,606
12	0,566	0,892	27	0,377	0,595
13	0,544	0,857	28	0,370	0,584
14	0,525	0,826	29	0,364	0,574
15	0,506	0,798	30	0,358	0,564

VALEUR DES COEFFICIENTS B_{s2} et B_{c2} EN FONCTION

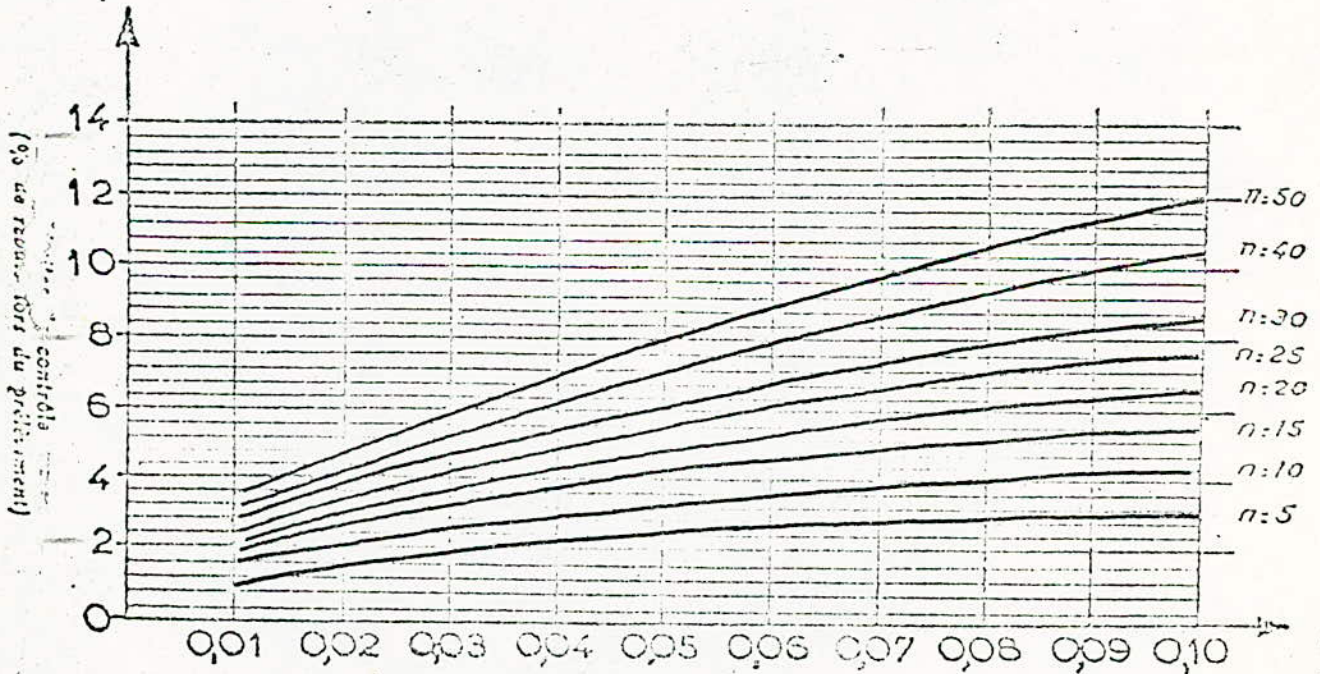
DE n

n	B_{s2}	B_{c2}	n	B_{s2}	B_{c2}
13	1,340	1,457	21	1,270	1,458
14	1,329	1,470	22	1,265	1,449
15	1,320	1,481	23	1,260	1,439
16	1,311	1,492	24	1,255	1,431
17	1,300	1,500	25	1,250	1,425
18	1,296	1,508	26	1,246	1,415
19	1,288	1,492	27	1,242	1,408
20	1,282	1,480	28	1,238	1,401
21	1,278	1,469	30	1,235	1,394

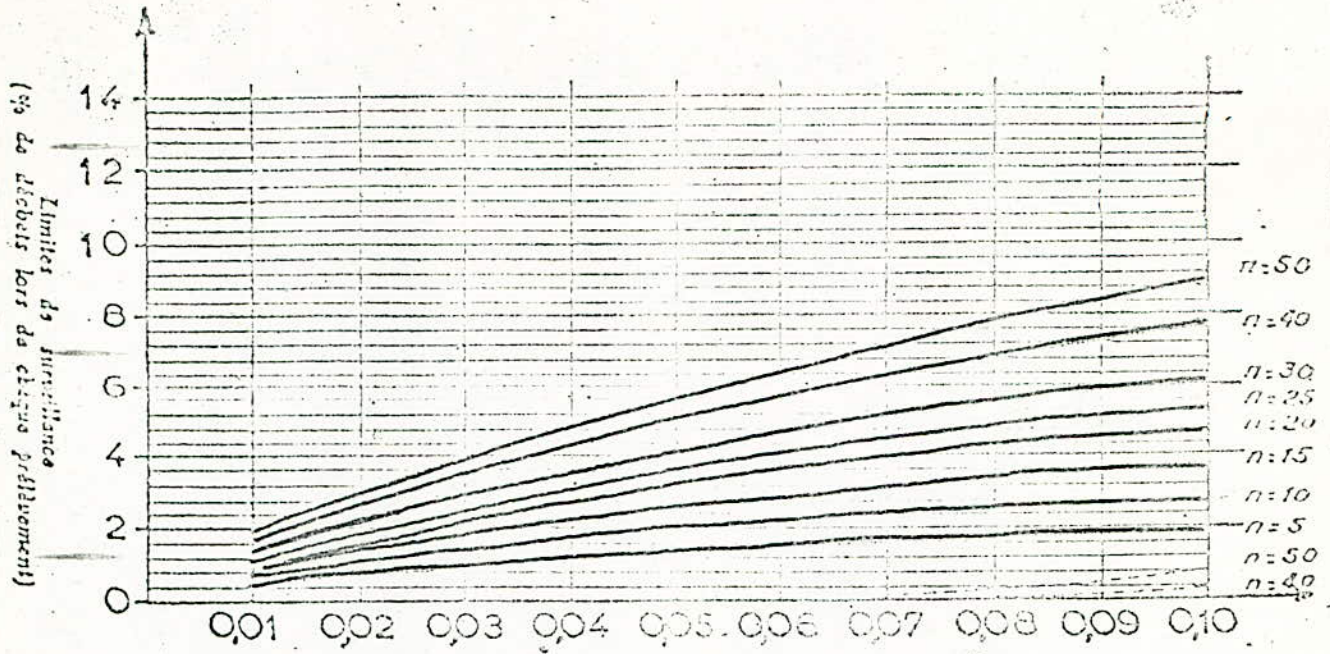
ABOQUE A : limite de surveillance et de contrôle lorsque l'échantillon est important



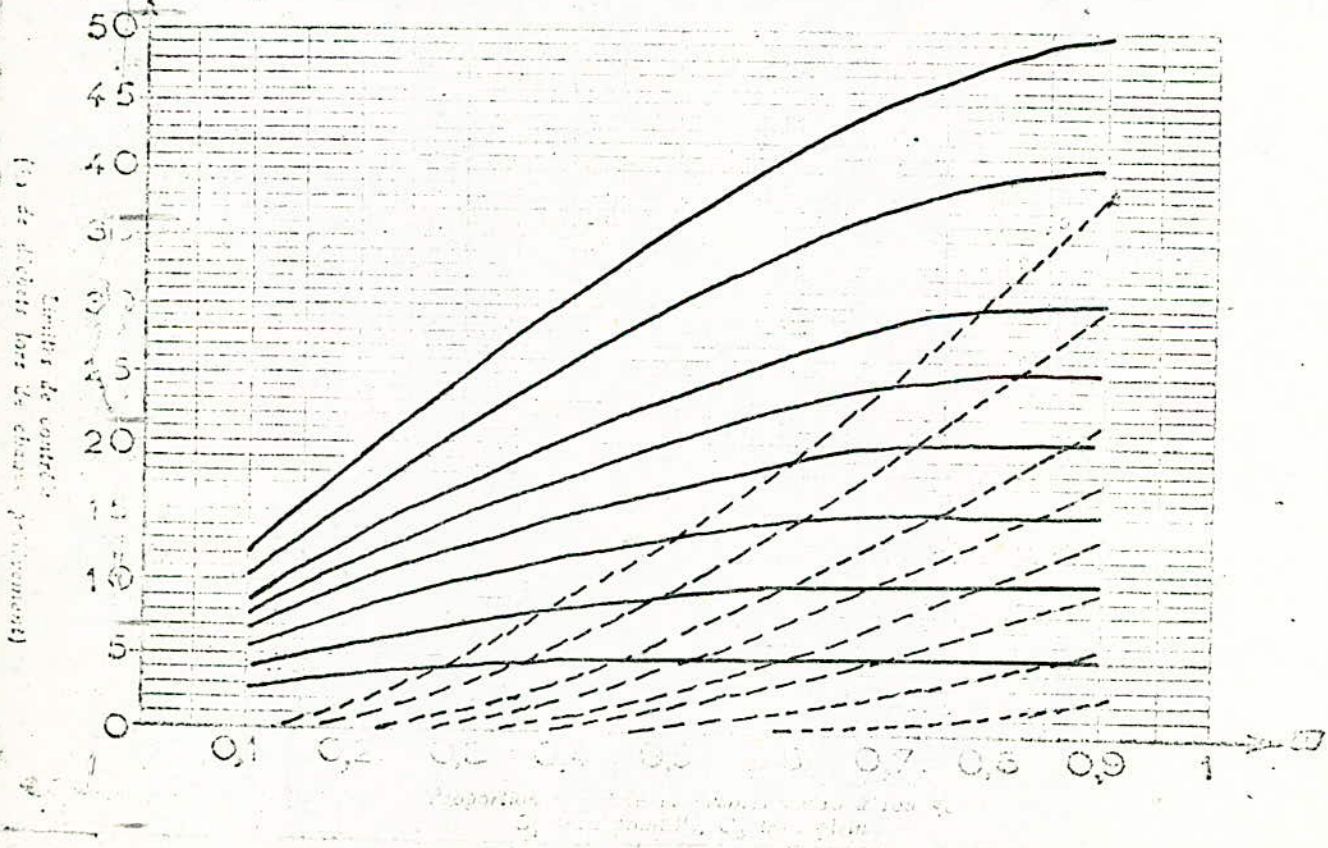
ABOQUE B : limite de contrôle lorsque P est compris entre 0 et 10 %
Proportion moyenne de déchets de 1 à 10 %
 C_0 : trait plein, C_1 : pointillé (n'existe pas ici)



ABaque C: limites de surveillance lorsque P est compris entre 0 et 10 %
 Proportion moyenne des achats de 1 à 10 %

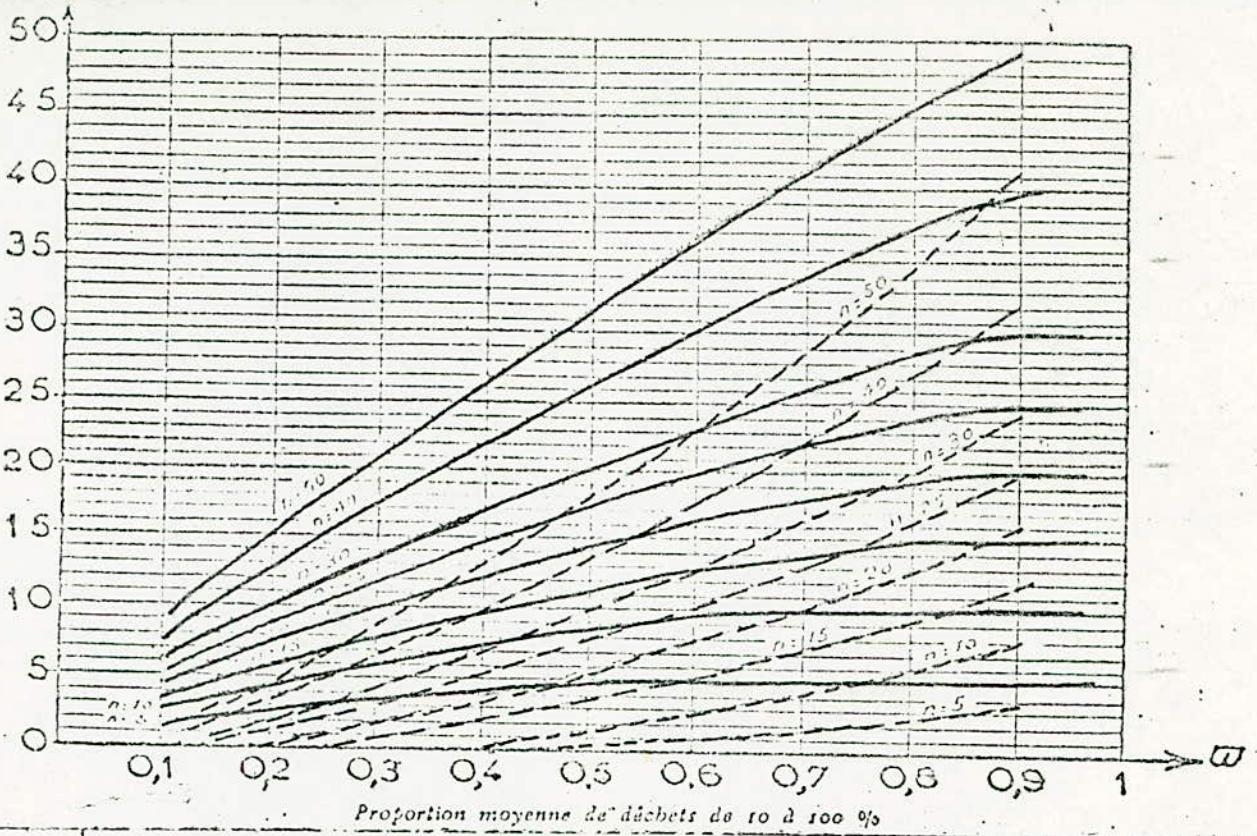


ABaque D: limites de surveillance lorsque P est compris entre 10 et 100 %
 Proportion moyenne des achats de 10 à 100 %



(% de déchets lors de chaque prélèvement)

Limites de surveillance



Proportion moyenne de déchets de 10 à 100 %

Taille de l'échantillon	Niveau de qualité acceptable (N.Q.A.)	Niveau de qualité acceptable (N.Q.A.)														
		0,25	0,5	0,75	1	1,5	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12
		A R	A R	A R	A R	A R	A R	A R	A R	A R	A R	A R	A R	A R	A R	A R
inférieur ou égal à 499	40	↓	↓	↓	0 2	0 2	0 3	1 4	1 4	1 6	2 6	2 7	3 7	3 8	4 9	4 9
	50	↓	↓	↓	0 2	0 3	1 3	1 4	2 5	2 6	3 7	3 8	4 9	4 9	5 10	5 11
	60	↓	↓	↓	0 3	1 3	1 3	2 5	2 6	3 7	4 8	4 9	5 10	5 11	7 12	7 13
	70	↓	↓	↓	1 3	1 3	1 4	2 5	3 6	4 8	5 9	5 9	6 10	7 11	8 13	8 13
	80	↓	↓	↓	2 3	3 4	3 4	4 5	5 6	7 8	8 9	8 8	9 10	10 11	12 13	12 13
500 à 799	40	↓	↓	* 1	* 2	0 3	0 3	0 4	1 5	1 5	1 6	1 7	2 8	2 8	2 9	4 10
	60	↓	↓	* 1	0 2	0 3	1 4	1 5	2 6	2 7	3 8	3 9	4 10	5 11	6 12	
	80	↓	↓	0 2	1 3	1 4	1 5	1 6	3 7	3 8	5 10	5 11	6 12	7 13	8 14	
	100	↓	↓	0 2	1 3	2 4	2 5	2 6	4 8	5 9	6 11	7 13	8 14	9 16	10 17	
	120	↓	↓	1 2	2 3	3 4	4 5	5 6	7 8	8 9	10 11	12 13	13 14	15 16	16 17	
De 800 à 1299	40	↓	* 1	* 1	* 2	* 3	0 3	0 4	0 5	0 6	1 6	1 7	1 8	2 9	2 10	
	60	↓	* 1	0 2	0 2	0 3	0 4	1 5	1 6	2 7	2 8	3 9	3 10	4 11	4 12	
	80	↓	0 2	0 2	0 3	1 4	1 5	2 6	2 7	3 8	4 10	5 11	5 12	6 13	6 14	
	100	↓	0 2	0 2	0 3	1 4	1 5	2 6	3 8	5 10	5 11	7 13	8 14	9 15	10 17	
	160	↓	1 2	2 3	3 4	4 5	5 6	7 8	9 10	10 11	13 14	15 16	16 17	18 19	19 20	
De 1300 à 3199	50	* 1	* 1	* 2	* 3	* 3	* 4	0 4	0 5	0 6	1 7	1 8	2 9	2 10	3 10	
	75	* 1	0 2	0 2	0 3	0 4	0 5	1 5	2 7	2 8	3 9	4 10	4 12	5 12	6 14	
	100	* 1	0 2	1 3	1 4	1 4	1 5	2 6	3 8	4 9	5 11	6 12	6 14	8 15	9 17	
	125	0 2	0 2	1 3	1 4	2 5	2 6	3 7	4 9	5 11	7 13	8 15	9 16	11 18	12 20	
	200	1 2	1 2	2 3	3 4	4 5	5 6	6 7	8 9	10 11	13 14	17 18	17 18	20 21	22 23	
De 3200 à 7999	50	* 1	* 2	* 2	* 3	* 3	* 4	* 5	0 6	0 7	0 8	1 9	1 10	1 11	2 11	
	100	* 1	* 2	0 3	0 4	1 4	1 5	1 7	2 8	3 10	4 12	5 13	5 15	6 16	8 17	
	150	0 2	0 3	1 4	1 5	2 5	2 7	2 8	5 11	5 13	8 15	9 17	10 19	11 21	13 23	
	200	0 2	1 3	2 4	2 5	3 6	3 6	4 10	7 13	8 16	12 19	11 21	15 24	16 26	19 29	
	250	0 2	1 4	2 5	2 6	4 8	5 9	6 11	9 15	11 18	15 22	17 25	19 28	22 32	25 35	
De 8000 à 21999	100	* 2	* 3	* 3	* 4	0 5	0 6	0 7	1 9	1 11	3 12	3 14	4 16	5 17	↑	
	150	* 2	* 3	0 4	0 5	1 6	2 7	2 9	3 11	4 14	6 16	7 17	9 20	10 22	↑	
	200	0 2	0 3	0 5	1 6	2 7	3 8	3 10	6 13	7 17	10 19	11 22	13 24	16 27	↑	
	250	0 2	0 4	1 5	2 6	2 8	4 9	5 12	8 16	10 19	13 22	15 25	18 29	19 32	↑	
	300	0 3	1 4	2 6	2 7	3 8	5 11	6 13	10 18	12 22	16 26	19 29	22 33	24 37	↑	
De 22000 à 99999	100	* 2	* 3	* 4	* 5	* 6	* 8	0 8	0 11	1 13	2 16	↑	↑	↑	↑	
	200	* 3	* 4	0 5	0 6	1 7	1 10	3 11	3 15	6 18	8 20	↑	↑	↑	↑	
	300	0 3	0 4	1 6	1 8	2 9	3 12	5 14	7 19	11 23	14 26	↑	↑	↑	↑	
	400	0 3	1 5	2 7	3 9	4 11	5 14	8 17	11 23	16 28	21 33	↑	↑	↑	↑	
	600	1 4	2 6	3 9	5 11	7 14	10 18	14 23	19 31	27 38	34 46	↑	↑	↑	↑	
100000 et plus	200	* 3	* 5	* 7	* 8	0 9	0 13	2 13	2 18	↑	↑	↑	↑	↑	↑	
	400	* 4	0 6	0 8	0 10	3 12	3 17	7 18	9 25	↑	↑	↑	↑	↑	↑	
	600	0 4	1 7	2 10	2 12	5 15	7 20	12 22	17 33	↑	↑	↑	↑	↑	↑	
	800	1 5	2 8	4 11	5 14	8 18	11 24	18 29	24 40	↑	↑	↑	↑	↑	↑	
	1000	1 5	3 9	5 13	7 17	11 21	15 28	23 35	32 47	↑	↑	↑	↑	↑	↑	

Table K Sample size code letters—MIL-STD-105D (AEC Standard)

Lot or batch size	Special inspection levels				General inspection levels		
	S-1	S-2	S-3	S-4	I	II	III
2-8	A	A	A	A	A	A	B
9-15	A	A	A	A	A	B	C
16-25	A	A	B	B	B	C	D
26-50	A	B	B	C	C	D	E
51-90	B	B	C	C	C	E	F
91-150	B	B	C	D	D	F	G
151-280	B	C	D	E	E	G	H
281-500	B	C	D	E	F	H	J
501-1,200	C	C	E	F	G	J	K
1,201-3,200	C	D	E	G	H	K	L
3,201-10,000	C	D	F	G	J	L	M
10,001-35,000	C	D	F	H	K	M	N
35,001-150,000	D	E	G	J	L	N	P
150,001-500,000	D	E	G	J	M	P	Q
500,001 and over	D	E	H	K	N	Q	R

Table M Master table for tightened inspection (single sampling)—MIL-STD-105D (AEC Standard)

Sample size code letter	Sample size	Acceptable quality levels (tightened inspection)																											
		0.010	0.015	0.025	0.040	0.065	0.10	0.15	0.25	0.40	0.65	1.0	1.5	2.5	4.0	6.5	10	15	25	40	65	100	150	250	400	650	1,000		
A	2	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓		
B	3	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓		
C	5	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓		
D	8	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓		
E	13	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓		
F	20	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓		
G	32	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓		
H	50	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓		
J	80	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓		
K	125	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓		
L	200	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓		
M	315	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓		
N	500	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓		
P	800	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓		
Q	1,250	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓		
R	2,000	0 1	↑	↓	1 2	2 3	3 4	5 6	8 9	12 13	18 19	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑		
S	3,150	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓		

↓ = use first sampling plan below arrow. If sample size equals or exceeds lot or batch size, do 100% inspection.
 ↑ = use first sampling plan above arrow.
 Ac = acceptance number.
 Re = rejection number.

Table L Master table for normal inspection (single sampling)—MIL-STD-105D (ABC Standard)

Sample size code letter	Sample size	Acceptable quality levels (normal inspection)																											
		0.010	0.015	0.025	0.040	0.065	0.10	0.15	0.25	0.40	0.65	1.0	1.5	2.5	4.0	6.5	10	15	25	40	65	100	150	250	400	650	1,000		
		Ac	Re	Ac	Re	Ac	Re	Ac	Re	Ac	Re	Ac	Re	Ac	Re	Ac	Re	Ac	Re	Ac	Re	Ac	Re	Ac	Re	Ac	Re	Ac	Re
A	2																												
B	3																												
C	5																												
D	8																												
E	13																												
F	20																												
G	32																												
H	50																												
J	80																												
K	125																												
L	200																												
M	315																												
N	500																												
P	800																												
Q	1,250																												
R	2,000																												

↓ = use first sampling plan below arrow. If sample size equals, or exceeds, lot or batch size, do 100% inspection.
 ↑ = use first sampling plan above arrow.
 Ac = acceptance number.
 Re = rejection number.

Table N Master table for reduced inspection (single sampling)—MIL-STD-105D (ABC Standard)

Sample size code letter	Sample size	Acceptable quality levels (reduced inspection) [†]																											
		0.010	0.015	0.025	0.040	0.065	0.10	0.15	0.25	0.40	0.65	1.0	1.5	2.5	4.0	6.5	10	15	25	40	65	100	150	250	400	650	1,000		
		Ac	Re	Ac	Re	Ac	Re	Ac	Re	Ac	Re	Ac	Re	Ac	Re	Ac	Re	Ac	Re	Ac	Re	Ac	Re	Ac	Re	Ac	Re	Ac	Re
A	2																												
B	2																												
C	2																												
D	3																												
E	5																												
F	8																												
G	13																												
H	20																												
J	32																												
K	50																												
L	80																												
M	125																												
N	200																												
P	315																												
Q	500																												
R	800																												

↓ = use first sampling plan below arrow. If sample size equals or exceeds lot or batch size, do 100% inspection.
 ↑ = use first sampling plan above arrow.
 Ac = acceptance number.
 Re = rejection number.
 † If the acceptance number has been exceeded but the rejection number has not been reached, accept the lot but reinstate normal inspection.

Table V Average outgoing quality limit factors for tightened inspection (single sampling)—MIL-STD-105D (ABC Standard)

Code letter	Sample size	Acceptable quality level																										
		0.010	0.015	0.025	0.040	0.065	0.10	0.15	0.25	0.40	0.65	1.0	1.5	2.5	4.0	6.5	10	15	25	40	65	100	150	250	400	650	1,000	
A	2																											
B	3																											
C	5														7.4	12			17	27	42	69	97	160	260	400	620	
D	8																											
E	13																											
F	20										1.8	2.8	4.6															
G	32																											
H	50																											
J	80										0.46	0.74	1.2	1.8	2.8	4.6	6.5	11	17	24	40	61	99	160	240	380		
K	125																											
L	200																											
M	315					0.12	0.18	0.29			0.42	0.69	1.1	1.6	2.5	4.1	6.4	9.9										
N	500				0.074																							
P	800			0.048		0.11	0.17	0.27	0.39	0.63	1.0	1.6	2.5															
Q	1,250	0.029			0.067	0.11	0.16	0.25	0.41	0.64	0.99	1.6																
R	2,000	0.018			0.042	0.069	0.097	0.16	0.26	0.40	0.62																	
S	3,150			0.027																								

NOTE: For the exact AOQL, the above values must be multiplied by $\left(1 - \frac{\text{sample size}}{\text{lot or batch size}}\right)$.

Table W Limit numbers for reduced inspection—MIL-STD-105D (ABC Standard)

Number of sample units from last 10 lots or batches	Acceptable quality level																									
	0.010	0.015	0.025	0.040	0.065	0.10	0.15	0.25	0.40	0.65	1.0	1.5	2.5	4.0	6.5	10	15	25	40	65	100	150	250	400	650	1,000
20-29	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†	0	0	2	4	8	14	22	40	68	115	181
30-39	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†	0	1	3	7	13	22	36	63	105	178	277
50-59	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†	0	0	2	3	7	14	25	40	63	110	181	301
80-89	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†	0	0	2	4	7	14	24	42	68	105	181	297		
130-139	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†	0	0	2	4	7	13	25	42	72	115	177	301	490		
200-319	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†	0	0	2	4	8	14	22	40	68	115	181	277	471			
320-499	†	†	†	†	†	†	†	†	†	0	0	1	4	8	14	24	39	68	113	189						
500-799	†	†	†	†	†	†	†	†	†	0	2	3	7	14	25	40	63	110	181							
800-1,249	†	†	†	†	†	†	†	†	0	2	4	7	14	24	42	68	105	181								
1,250-1,999	†	†	†	†	†	0	0	2	4	8	14	24	40	69	110	169										
2,000-3,149	†	†	†	†	†	0	0	2	4	8	14	22	40	68	115	181										
3,150-4,999	†	†	†	†	0	0	1	4	8	14	24	38	67	111	186											
5,000-7,999	†	†	†	0	0	2	3	7	14	25	40	63	110	181												
8,000-12,499	†	†	0	0	2	4	7	14	24	42	68	105	181													
12,500-19,999	†	0	0	2	4	7	13	24	40	69	110	169														
20,000-31,499	0	0	2	4	8	14	22	46	68	115	181															
31,500-49,999	0	1	4	8	14	24	38	67	111	186																
50,000 and over	2	3	7	14	25	40	63	110	181	301																

† Denotes that the number of sample units from the last 10 lots or batches is not sufficient for reduced inspection for this AQL. In this instance more than 10 lots or batches may be used for the calculation, provided that the lots or batches used are the most recent ones in sequence, that they have all been on normal inspection, and that one has been rejected while on original inspection.

