

UNIVERSITE des SCIENCES et de la TECHNOLOGIE HOUARI BOUMEDIENNE

30/82

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT D'ELECTRICITE

FILIERE INGENIEUR EN ELECTRONIQUE

2er

PROJET DE FIN D'ETUDES



**REGULATION AUTOMATIQUE DE
LA TEMPERATURE DANS LES
VOITURES DES CHEMINS DE FER**

Proposé par :
Z. BARSKI Docteur ès sciences

Etudiés par :
- HADDAD Boualem
- ARBOUZ Med Nassim

PROMOTION JANVIER 1982

UNIVERSITE des SCIENCES et de la TECHNOLOGIE HOUARI BOUMEDIENNE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT D'ELECTRICITE

FILIERE INGENIEUR EN ELECTRONIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

**REGULATION AUTOMATIQUE DE
LA TEMPERATURE DANS LES
VOITURES DES CHEMINS DE FER**

Proposé par :
Z. BARSKI Docteur és sciences

Etudiés par :
- HADDAD Boualem
- ARBOUZ Med Nassim

PROMOTION JANVIER 1982

DEDICACES

A mes parents,

A mes amis,

Nassim

A mes parents,

A mon neveu Rabah

A mes amis

Boualem

REMERCIEMENTS

Nous exprimons toute notre reconnaissance à Monsieur Z. BARSKI, Docteur-ès, pour sa sollicitude et ses conseils éclairés qu'il nous a prodigué tout au long de cette étude.

Nous remercions le Personnel de la S.N.T.F. et de la S O N I C - BABA ALI, et plus particulièrement Madame AKTOUF qui s'est occupée avec gentillesse de la frappe de cette thèse, ainsi que Monsieur Y. SIAMANI, qui n'a cessé de nous encourager tout au long de cette étude.

TABLE DE MATIERES

=====

INTRODUCTION /

1. CHOIX DE LA REGULATION APPROPRIEE

- 1.1. Régulation tout ou rien
- 1.2. Systèmes auto-adaptatifs.

2. CLIMATISATION

- 2.1. Alimentation de l'installation de climatisation.
- 2.2. Chauffage
- 2.3. Installation de climatisation.

3. ANALYSE DES PROPRIETES DYNAMIQUES ET STATIQUES DU PROCESSUS.

- 3.1. Introduction.
- 3.2. Etude statique : Equilibre thermique.
- 3.3. Etude dynamique

4. ANALYSE DES REGULATEURS A DEUX POSITIONS SANS CORRECTIONS /

- 4.1. Introduction
- 4.2. Analyse

5. CHOIX ET MISE AU POINT DES REGULATEURS

- 5.1. Régulateur électronique auto-adaptatif à 2 positions avec variation des coefficients d'amplification en escalier en fonction des perturbations.
- 5.2. Régulateur électrique auto-adaptatif à 2 positions avec variation continu d'1 coefficient d'amplification en fonction des perturbations extérieurs
- 5.3. Régulateur électrique auto-adaptatif à 2 positions avec variation en escalier des coefficients d'amplification en fonction des perturbations

Conclusion

Annexes :

- 1.- Condition générale de confort.
- 2.- Normes UIC - ORE - Année 81

Bibliographe

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Qu'il s'agisse de trains de grande ligne ou de trains urbains, la tendance de rendre le séjour des voyageurs et surtout les conditions climatiques aussi agréable que possible s'est renforcée ces dernières années.

Pour pouvoir utiliser les moyens disponibles aussi économiquement que possible, il faut tenir compte des facteurs déterminants pour créer de bonnes conditions climatiques.

Le confort thermique optimal dépend de variables suivantes

- Niveau d'activité de la personne.
- Résistance thermique de l'habillement de la personne.
- Température de l'air.
- Température moyenne de rayonnement des surfaces avoi-

sinantes.

- Vitesse de l'air par rapport à la personne.
- Humidité de l'air.

La température ambiante considérée souvent comme la seule condition pour le confort n'est qu'une des six (6) variables mentionnées.

De plus les conditions climatiques dans les voitures sont influencés par :

- Les voyageurs (chaleur et humidité émises).
- Température et humidité de l'air extérieur.
- Rayonnement solaire.
- Vitesse du train
- Vitesse du vent.
- Position de la voiture par rapport au rayonnement solaire
- Manque d'étanchéité.
- Portes et fenêtres.
- Vibrations et secousses
- Variation de la haute et basse tension

L'installation de climatisation doit :

- Assurer la stabilité de la température intérieure avec une précision d'environ de $\pm 1^{\circ}\text{C}$
- Etre économique et fiable.

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية
المكتبة

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
BIBLIOTHEQUE

CH A P I T R E 1. -

CHOIX DE LA REGULATION APPROPRIEE

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية
المكتبة

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
BIBLIOTHEQUE

1. - Choix de la régulation appropriée :

1.1. - Régulation tout ou rien.

Vu le nombre de la variété des perturbations auxquelles sont soumises les conditions climatiques dans la voiture, le critère d'économie auquel on est astreint et que les puissances mises en jeu pour le chauffage et la réfrigération sont de l'ordre de quelques dizaines de kilowatts, la régulation tout ou rien avec adaptation aux perturbations convient bien au problème.

En effet, la régulation tout ou rien qui est surtout utilisée pour la régulation de température (d'une manière générale pour les processus présentant un faible rapport $\frac{T_0}{T}$) est caractérisée par les avantages suivants :

- Intérêt principal : coût réduit du régulateur.
- Commute aisément les puissances de l'ordre du Kw.
- Elimination de l'influence des frottements et des jeux.
- Bonne précision et rapidité de réponse.
- Gains en puissance élevés.
- Rendement excellent (leur impédance est pratiquement nulle).

1.2. - Systèmes Auto-adaptatifs :

On distingue en général deux (2) catégories de systèmes auto-adaptatifs:

1.2.1. - Systèmes complexes, équipés d'éléments de recherche et de simulation qui sont capables de déterminer à chaque instant les propriétés dynamiques et statiques du processus (si ces propriétés ne varient pas, les systèmes auto-adaptatifs ne sont pas nécessaires), et de corriger automatiquement en fonction de ces variations les propriétés dynamiques du régulateur (sa mise au point).

De tels systèmes très complexes, ne sont utilisés que dans des cas bien particuliers.

1.2.2. - Systèmes simples, où les propriétés dynamiques du régulateur varient automatiquement en fonction des perturbations extérieurs et intérieurs; ce qui permet de s'accorder avec les propriétés dynamiques et statiques du processus qui varient justement en fonction de ces perturbations; ce qui est le cas pour notre processus. on optera donc pour 1 régulation tout ou rien auto-adaptative.

CHAPITRE 2. -

CLIMATISATION

2. - INSTALLATION DE CLIMATISATION ET DE CHAUFFAGE DANS LES VOITURES DE CHEMIN DE FER /

2.1. - Introduction :

Des exigences les plus diverses sont posées aux installations de climatisation suivant le climat sous lequel la voiture circule, suivant la construction de celle-ci et les désirs en confort d'une part et en rentabilité d'autre part. Les solutions techniques correspondantes, également, sont nombreuses.

2.2. - Alimentation de l'installation de climatisation.

En traction diesel (la seule utilisée en Algérie), la production de l'énergie peut être assurée par :

- * Le moteur diesel principal.
- * Un groupe diesel auxiliaire accouplé à une génératrice.
- * Une génératrice entraînée par l'essieu. Cet équipement comporte toujours une batterie d'accumulateurs intermédiaires pour assurer le fonctionnement aux points d'arrêt.

2.3. - Chauffage :

Actuellement, dans les installations modernes, le chauffage électrique s'est imposé grâce aux progrès réalisés sur les éléments chauffants. Le chauffage à la vapeur étant peu utilisé du fait qu'il présente de sérieux inconvénients, à savoir :
Nécessité de sources à eau encombrantes, manque d'étanchéité dans les canalisations, danger de gel, vidange de la canalisation, etc....

Mais l'adoption du chauffage électrique sur les lignes non électrifiées pose deux problèmes importants.

2.3.1. Influence du courant de retour sur les installations de signalisation :

Si on adoptait un retour du courant de chauffage par la masse en traction diesel, un courant de plusieurs ampères est appelé à circuler dans la voie, entre les voitures et le véhicule portant le groupe générateur. Un tel courant risque de perturber dangereusement le fonctionnement des installations de signalisation, laquelle, sur les lignes non électrifiées n'a pas été établie en conséquence.

2.3.2. - Choix du courant de chauffage :

Il faut s'en tenir aux normes UIC, à savoir :

- Courant continu : 1500 à 3000 V avec variation possible de $\left\{ \begin{array}{l} +20\% \\ -30\% \end{array} \right.$
- Courant monophasé : 1000 à 1500 V, avec fréquence comprise entre 48 et 51 Hz.
- Courant monophasé : 1000 V avec variation possible de $\left\{ \begin{array}{l} + 10\% \\ - 20\% \end{array} \right.$
et la fréquence comprise entre 15 et 17,5 Hz.

Aujourd'hui il y a des solutions satisfaisantes techniquement et économiquement aux méthodes de production d'énergie et de retour du courant de chauffage; à noter que pour ce dernier ce serait le courant continu (sans harmoniques) qui aurait la faveur des services de signalisation.

2.3.3. - Chauffage par air chaud :

Vu que le chauffage électrique par convection (surfaces chauffantes dans le compartiment) provoquait des concentrations de puissance,

(chaleur communiquée à une faible quantité d'air), on utilise un mode de chauffage mieux adapté : Le chauffage électrique par air chaud. L'air neuf chauffé à l'extérieur de l'espace réservé aux voyageurs sert de caloporteur, et est insufflé à travers des canaux répartiteurs appropriés sans causer de courant d'air.

Les principaux avantages du chauffage par air chaud sont :

- structure et régulation simple de l'installation, haute fiabilité, suppression de manipulation.

- Aucun échauffement exagéré grâce à une meilleure évacuation de la chaleur.

- Chauffage uniforme de l'intérieur de la voiture.

- Court temps de préchauffage.

- Apport d'air neuf d'une façon continue, sans courant d'air et indépendamment de la vitesse de la voiture.

2.3.4. - Mélange forcé de l'air neuf avec l'air ambiant :

L'apport d'air neuf (extérieur) et l'évacuation de l'air vicié sont difficiles, car les orifices d'entrée et de sortie d'air ne peuvent être disposés qu'à de faibles distances des voyageurs. Par conséquent on risque d'avoir des vitesses d'air très élevées. C'est pourquoi il est très important d'effectuer un mélange forcé avec l'air ambiant lorsque la température de l'air neuf introduit est inférieure à la température ambiante. Sans quoi, il peut arriver que l'air plus froid, se trouvant en haut dans le compartiment, descende à cause de sa densité spécifique plus élevée à une vitesse relativement élevée, provoquant ainsi des courants d'air en des points limités.

2.3.5. - Préchauffage :

C'est le chauffage initial intense au moment du départ pour atteindre rapidement la température de consigne. C'est une condition indispensable pour que le confort soit assuré pendant les premières heures du voyage.

2.4. - CONFORT CLIMATIQUE DANS LES TRAINS DE BANLIEUE /

A l'heure actuelle les voitures de train de banlieue sont équipées de chauffage par air chaud et de ventilation forcée. Ceci étant considéré comme suffisant, pour des voyages de moins d'une heure.

2.4.1. - Ventilation forcée :

Si on introduit l'air froid (extérieur) par plafond perforé de forme spéciale, et si une ventilation permet d'avoir une vitesse de l'air suffisamment élevée; l'installation fonctionne en régime de refroidissement et permet de maintenir un confort thermique optimal jusqu'à des températures ambiantes atteignant 28°C. L'important est que toute la masse d'air ait la même vitesse, sinon, on constaterait des "courants d'air" localisés désagréables.

2.5. - CONFORT CLIMATIQUE DANS LES TRAINS DE GRANDES LIGNES /

Les voitures de grandes lignes sont actuellement équipées d'installations de climatisation comprenant la partie chauffage par air chaud et les parties frigorifiques pour le refroidissement et la déshumidification de l'air. Cet équipement s'est imposé du fait qu'il était nécessaire en été, et qu'il rendait le voyage agréable environ les 2/3 de l'année par le refroidissement de l'air dans la voiture.

Les installations de climatisation peuvent être classées suivant 2 groupes principaux, qui diffèrent les uns des autres, principalement par le mode d'introduction de l'air :

- mode classique d'introduction de l'air.
- Introduction de l'air selon le principe de l'induction.

2.5.1. - Mode classique de l'introduction de l'air :

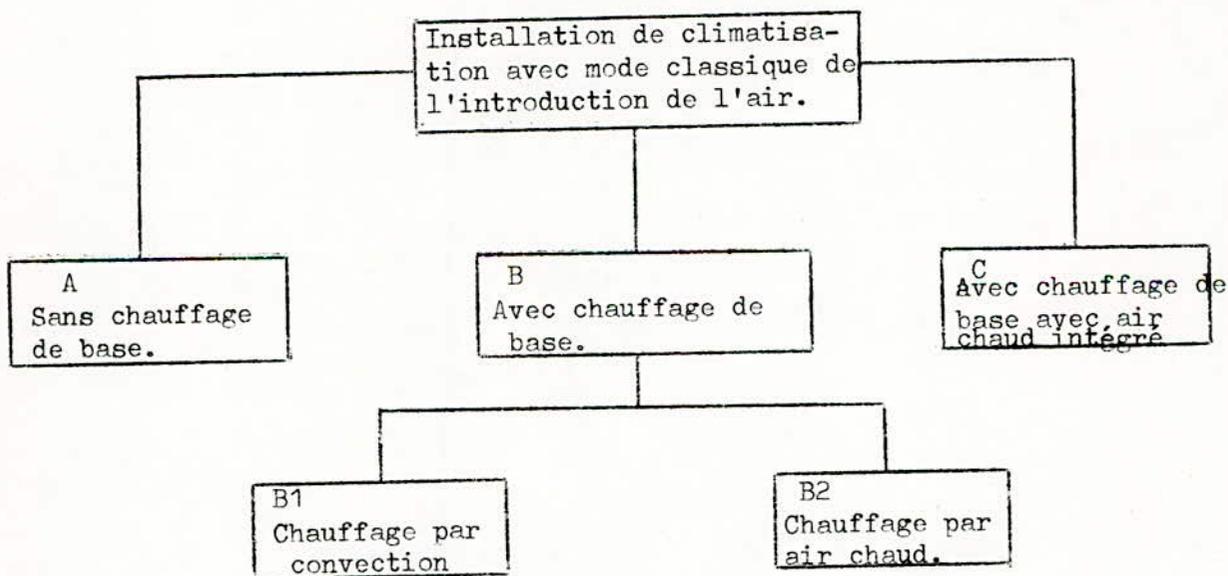


Fig. 2.3. Installation de climatisation avec introduction de l'air selon le mode classique.

La figure (2.3.) donne un aperçu des différentes formes d'exécution au sein du premier groupe. Le mode classique d'introduction de l'air est surtout utilisé dans les régions tropicales. L'air est soufflé dans le compartiment du haut, par un canal de plafond.

Au besoin il est refroidi et déshumidifié en même temps ou légèrement réchauffé en hiver. Une telle installation suffit pour les pays tropicaux où en hiver les besoins en chaleur sont très réduits.

Dans le cas où on a besoin d'un chauffage intense, on ajoute à cette installation un chauffage de base (B). Le but de celui-ci est d'introduire de la chaleur au bas du compartiment, car il n'est pas possible d'introduire la chaleur nécessaire, par le canal du plafond. Si on le faisait l'air chaud resterait dans la partie supérieure du compartiment, tandis que la température au dessus du plancher, resterait basse.

Le chauffage de base peut être réalisé sous forme d'un chauffage par convection (B¹).

Mais du fait des bons résultats obtenus avec le chauffage par air chaud, on utilise ce dernier comme chauffage de base (B²).

On peut intégrer le chauffage par air chaud dans l'installation de climatisation (C). Ce système apporte d'autres avantages.

Un seul réchauffeur d'air est nécessaire. Il réchauffe l'air dans le canal de plafond légèrement au dessus de la température intérieure indépendamment de la température extérieure et porte en même temps la température de l'air chaud dans les canaux de distribution au dessus du plancher à des valeurs dépendantes de la température extérieure;

2.5.2. Installation de climatisation avec introduction de l'air selon le principe de l'induction.

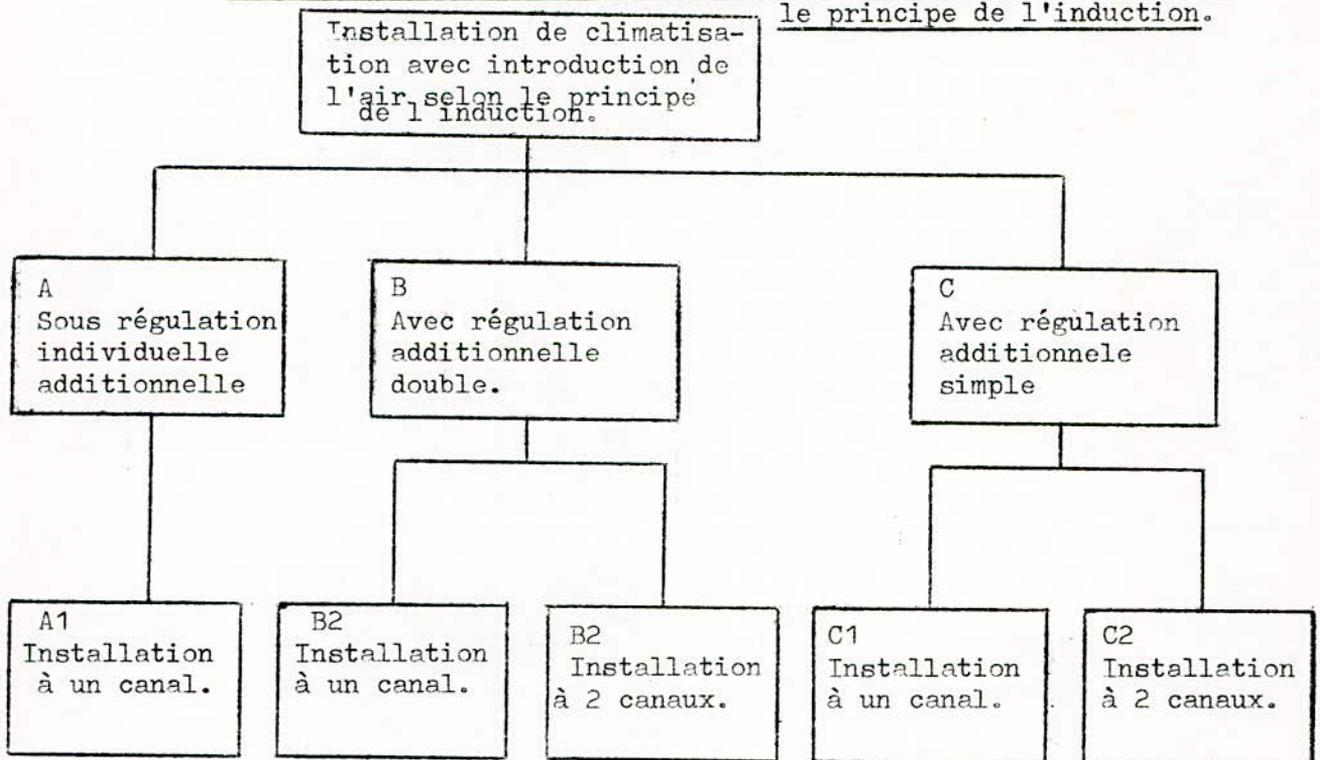
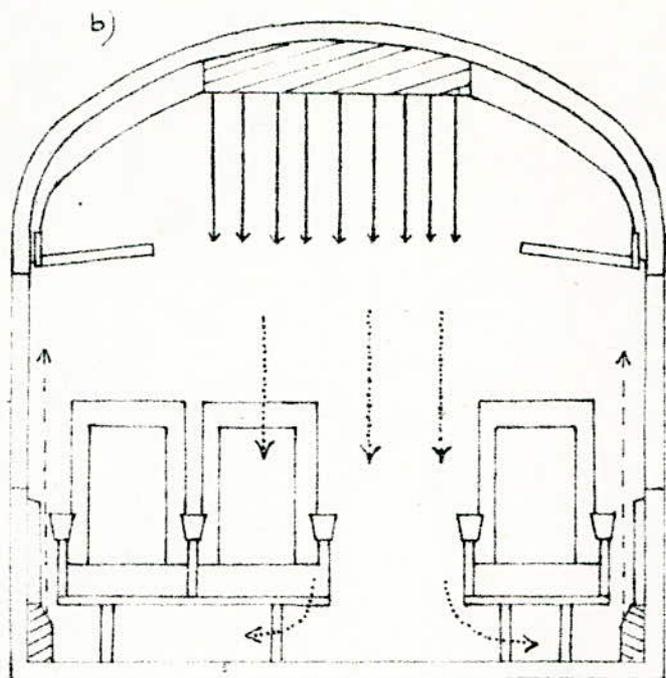
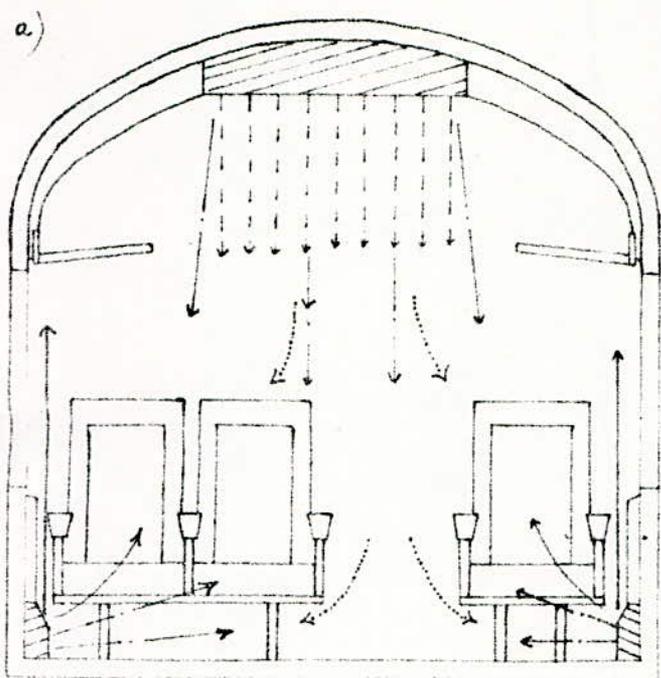


Fig. : 2.6. - Installation de climatisation avec introduction d'air selon le principe de l'induction;



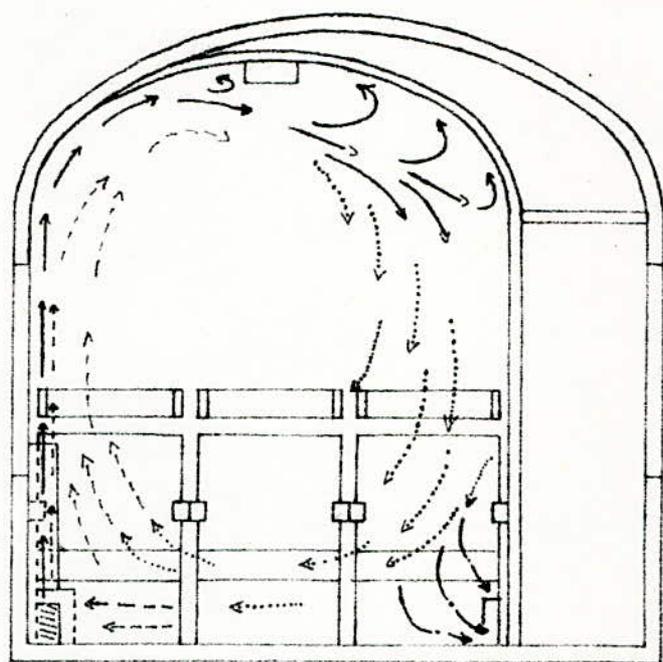
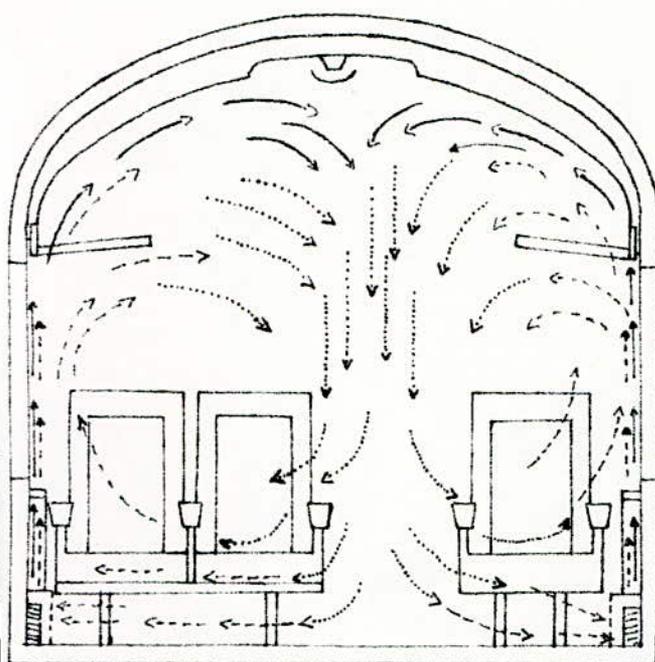
——— : air fortement réchauffé
 - - - - : chaleur rayonnée
 ······ : air légèrement réchauffé
 ······ : air intérieur

——— : air introduit refroidi
 - - - - : air introduit déshumidifié
 ······ : air intérieur

a) : Régime de chauffage

b) : Régime de refroidissement

Fig 2.3 - Installation de climatisation pour voitures à grand compartiment. Représentation schématique de l'écoulement de l'air.



——— : air introduit réchauffé
 - - - - : air secondaire
 ······ : air intérieur
 - - - - : air rejeté

Fig 2.4 - Installations de climatisation avec introduction de l'air selon le principe de l'induction. Représentation schématique de l'écoulement en régime de chauffage (voitures à grand compartiment et compartimentée).

Dans ces installations, l'air est introduit seulement par des canaux de plancher, disposés, le long des parois à fenêtres (système éjecto-convecteur). L'air sort des buses dans un caisson arrivant jusqu'à la partie inférieure du châssis de la fenêtre. Du fait de la vitesse de sortie élevée de l'air dans les buses, une quantité d'air secondaire à peu près égale est aspirée au bas du compartiment et soufflée vers le haut à travers le caisson avec l'air introduit. La vitesse de l'air à la sortie du caisson, sous la fenêtre est choisie de telle sorte que l'air monte jusqu'au plafond. Sous l'effet de son poids spécifique plus élevé, l'air refroidi descend du plafond et balaie le compartiment. Il est repris comme air secondaire ou est évacué du compartiment..

En hiver, lorsque la température de l'air introduit est très supérieure à la température intérieure, l'air chaud a la tendance de rester dans les parties supérieures du compartiment. Pour éviter les refroidissements des pieds, le plancher doit être muni d'une isolation thermique de haute qualité.

Sans mesures appropriées, la différence de température intérieure entre les compartiments serait trop élevée. C'est pourquoi différents systèmes de régulation additionnelle individuelle sont utilisés.

Il existe 2 groupes de régulation additionnelle individuelle : systèmes avec régulation double et système avec régulation simple. Dans les 2 groupes, il faut distinguer les systèmes avec traitement thermique additionnel de l'air introduit, appelés installation à un canal (B1 et C1) et ceux sans traitement thermique additionnel dits installations à 2 canaux (B2 et C2).

a) - Installation à un canal avec régulation double : pour le traitement thermique additionnel, des échangeurs de chaleur sont souvent montés dans le caisson ~~à~~ dessous des fenêtres; ces échangeurs sont parcourus selon les besoins du compartiment concerné par de l'eau refroidie ou réchauffée centralement. Ils permettent le refroidissement et le réchauffage individuels additionnels de l'air introduit. De telles installations exigent donc des circuits d'eau intermédiaires avec tuyauteries de départ et de retour séparées pour l'eau chaude et l'eau froide. Pour éviter ce genre d'installations relativement coûteuses, on a déjà utilisé des solutions qui consistent à provoquer le refroidissement additionnel directement par des évaporateurs et le chauffage additionnel par des éléments chauffants électriques.

b) - Installation à 2 canaux avec régulation double : L'air provenant de l'installation centrale de préparation est envoyé aux différents compartiments par un canal double. La température de l'air introduit dans le canal froid est maintenue en permanence à la valeur correspondant aux besoins d'énergie minimaux d'un compartiment. Par contre, dans le canal chaud, la température est suffisamment élevée pour répondre aux besoins du compartiment nécessitant la plus grande quantité d'énergie. Les buses de sortie sont construites de telle sorte qu'elles peuvent, selon les besoins du compartiment concerné, mélanger l'air provenant des 2 canaux, le débit total d'air restant à peu près constant.

c) - Installation à 2 canaux avec régulation simple : L'air provenant de l'installation de préparation d'air est envoyé aux différents compartiments par un canal double. Le débit d'air introduit par le canal principal dans chaque compartiment est constant. La température de l'air fourni par ce canal correspond en permanence aux besoins minimaux du compartiment. Le canal d'air supplémentaire est utilisé pour l'air chaud avec la température maximale admissible.

Le débit d'air chaud supplémentaire introduit dans chaque compartiment varie en fonction des besoins d'énergie du compartiment. C'est pourquoi le débit d'air introduit dans chaque compartiment n'est pas constant non plus. Pour diminuer le danger de refroidissement des pieds en hiver une partie de l'air introduit peut (au lieu d'être dirigée contre le plafond par les buses) être soufflée sous les sièges.

d) Installation à 1 canal avec régulation simple :

L'installation centrale de préparation d'air porte en continu le débit d'air à introduire, dans la voiture entière, à la température correspondant aux besoins d'énergie minimaux. Dans les compartiments avec des besoins de chaleur élevés l'air introduit est réchauffé au moyen d'appareils de chauffage électrique.

2.5.3. - Conclusion :

Chacun des systèmes qu'on vient de décrire possède ses avantages et inconvénients spécifiques. Pour le choix du système le plus favorable; il faut tenir compte non seulement des conditions d'exploitation et climatiques de la voiture, mais encore du type de la voiture et des conditions de place, qui jouent un rôle important.

2.6.- Proposition d'une conception, d'une installation de climatisation pour voitures compartimentées :

Dans tout ce qui suivra, on se limitera au système proposé (Fig.2.B)

Le système proposé est une installation à un canal avec régulation double (introduction de l'air selon le principe de l'induction).

2.6.1.- Disposition de l'installation (Fig. 2.7)

Le climatiseur (A) central est monté sur la plate-forme d'accès de la voiture. Le groupe compresseur - condenseur est disposé sous le chassis. L'air neuf passe par la grille d'aspiration (1), le filtre (2) et le canal de liaison (3). Dans le mélangeur l'air recyclé (provenant du canal de plafond (9)) est mélangé à l'air neuf. Ce mélange passe par le refroidisseur d'air (5), le réchauffeur d'air (6) et est envoyé par le ventilateur (7) à travers l'absorbant acoustique (8) dans le système des canaux de plancher (12).

Dans chaque compartiment, l'air introduit est réchauffé au besoin par un réchauffeur électrique.

2.6.2. - Mélangeur (4)

Le clapet du mélangeur peut prendre 3 positions :

- position air recyclé (préchauffage).
- position air neuf.
- position intermédiaire (mélange de l'air recyclé et l'air neuf dans le rapport 1/1).

Le clapet est positionné par 2 électro-aimants, eux mêmes commandés par les thermostats extérieurs.

a) Préchauffage :

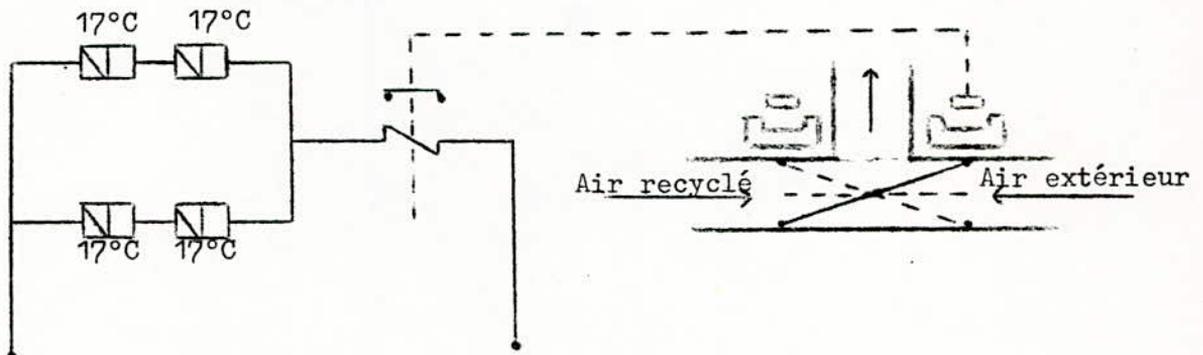


Fig. 2.9 Circuit de préchauffage.

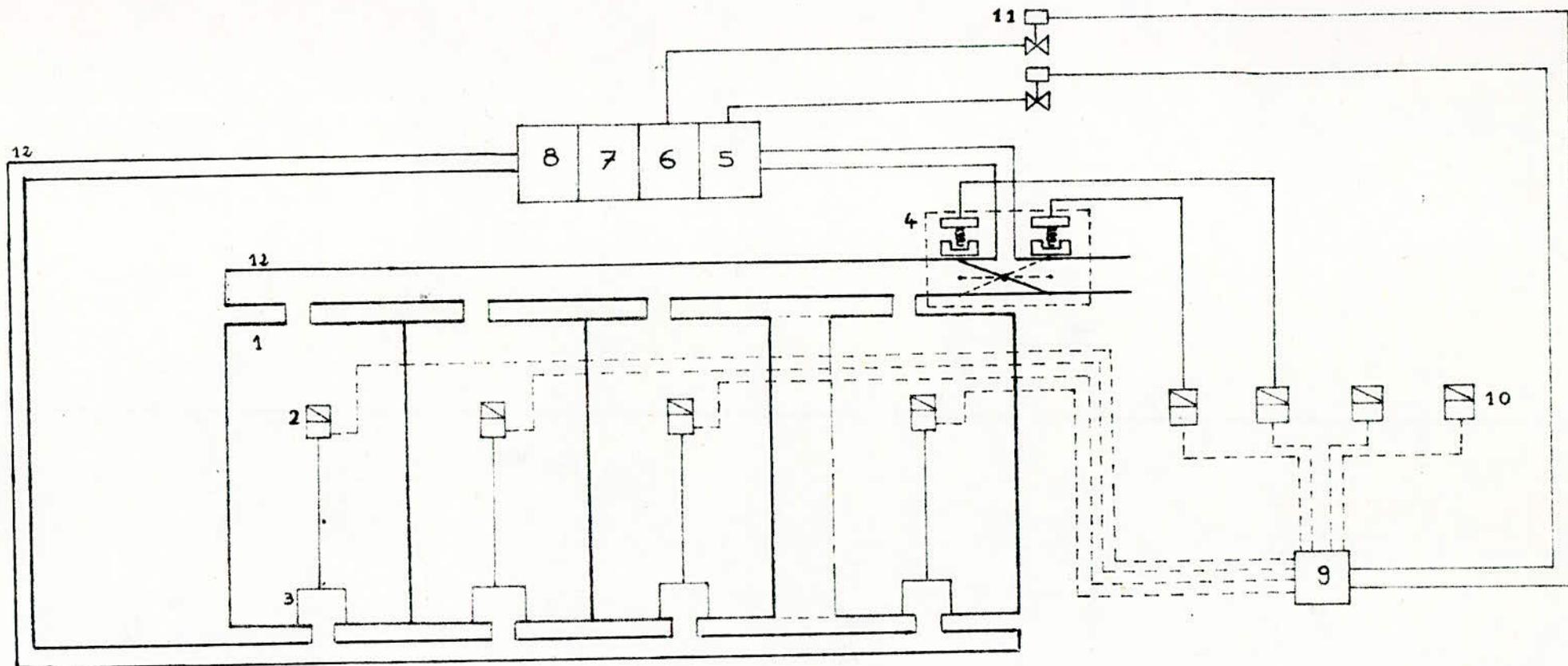


Fig 2.5 - Schéma bloc du système de commande de l'installation de climatisation d'une voiture compartimentée.

- 1 : Compartiment
- 2 : thermostat à contact intérieur
- 3 : Réchauffeur électrique (régulation adaitionnelle)
- 4 : Mélangeur
- 5 : Refroidisseur d'air
- 6 : Réchauffeur d'air

- 7 : Ventilation pour canaux de plancher
- 8 : Absorbant acoustique
- 9 : Régulateur central
- 10 : thermostat à contact extérieur
- 11 : Element d'action : contacteur (chauffage electri-
electrique)
- 12 : Canaux

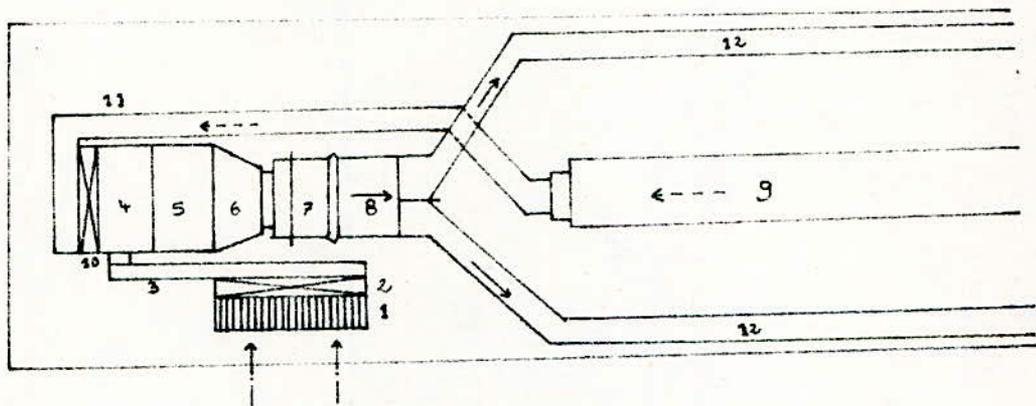
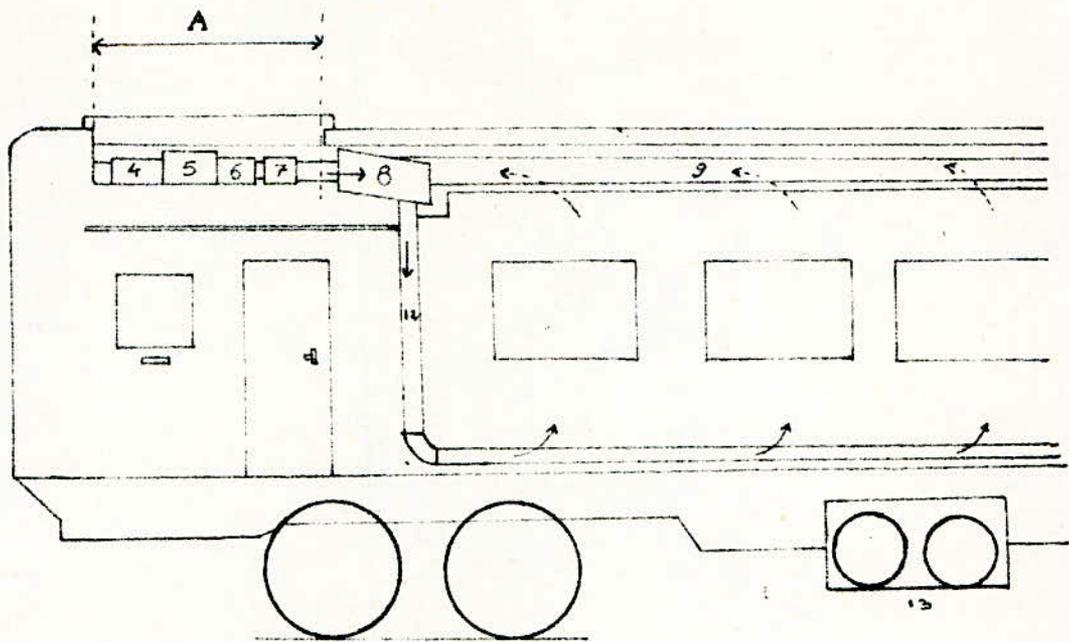


Fig 2.6 - Disposition de l'installation de climatisation d'une voiture compartimentée.

- A: Climatiseur.
- 1: Grille d'aspiration.
- 2: Filtre d'air extérieur (neuf)
- 3: Canal de liaison.
- 4: Mélangeur.
- 5: Refroidisseur d'air
- 6: Réchauffeur d'air
- 7: Ventilation pour canaux de plancher (air insufflé)
- 8: Absorbant acoustique
- 9: Canal de plafond (Air recyclé)
- 10: Filtre d'air recyclé
- 11: Canal de liaison
- 12: Canal de plancher
- 15: Groupe Compresseur.

On dispose de 2 thermostats à contact dans chaque compartiment, et de 2 autres dans le couloir, consignés à 17°C.

Tant que la température de 17°C n'est pas atteinte, le relais reste enclenché, et le clapet du mélangeur est en position air recyclé. Dans cette même période la puissance de chauffe est maximale. Ceci assure donc un préchauffage rapide.

2.6.3. - Principe de la régulation :

La régulation principale est assurée par le régulateur central (9), qui saisit la température extérieure et la température intérieure de tous les compartiments.

La régulation additionnelle est assurée par les thermostats à contact des compartiments, qui commandent les réchauffeurs électriques.

Examinons un fonctionnement en chauffage :

Pendant la période initiale (de préchauffage), alors que tous les thermostats à contact des compartiments signalent que les températures sont trop basses, l'installation de chauffage est enclenchée à plein débit (Air recyclé uniquement).

La température dans les canaux est très élevée, et il s'en suit un accroissement rapide de la température dans les différents compartiments (ainsi que leur résultante moyenne). Puis au fur et à mesure que le nombre de thermostats, signalant que la température est trop basse, diminue la température moyenne de l'air dans les canaux commence à baisser, et en même temps les températures dans les différents compartiments atteignent la valeur de consigne. Ainsi, le régulateur central (tout ou rien) commandant l'enclenchement et le déclenchement du réchauffeur d'air central, adapte la température moyenne de l'air dans les canaux aux besoins en chaleur des compartiments.

On prévoit dans le canal, un thermostat de sécurité, dont le contact se déclenchera lorsque la température excédera 90°C, et provoquera l'arrêt de l'installation.

CHAPITRE 3. -

ANALYSE DES PROPRIETES STATIQUES
ET DYNAMIQUES DU PROCESSUS.

III. - ANALYSE DES PROPRIETES STATIQUES ET DYNAMIQUES DU PROCESSUS /

3.1. - Introduction :

Si on désigne par "thermostatique" une température variant dans des limites plus ou moins larges, autour d'une température fixée d'avance (température de confort T_c); on peut admettre que la thermostaticité est l'aptitude d'une voiture d'être thermostatique pour la température de confort T_c .

Et on constate que la thermostaticité de l'air n'est possible que dans un domaine limité. En dehors de ce domaine, la température de l'air tend à se rapprocher des températures limites qui dépendent des caractéristiques de la voiture et des circonstances où elle se trouve.

3.1.2. - Températures limites :

Au point de vue thermique, la voiture de chemin de fer se compose : d'une enceinte isolée dont une partie est vitrée de cloisons du mobilier, d'un système de climatisation; elle est alimentée par une source d'énergie de forte puissance, habituellement sous forme de vapeur ou d'électricité, et dispose de courant électrique à basse tension mais à faible puissance.

Le milieu dans lequel la voiture évolue peut être caractérisé par : la température et l'humidité de l'air extérieur, le rayonnement solaire et du ciel, la vitesse du train, les tensions électriques et la pression de vapeur disponible le nombre et la répartition des voyageurs, le degré d'ouverture des portes et fenêtres et la position des rideaux.

Nous avons ainsi énuméré des facteurs qui par leur combinaison vont déterminer la température limite dans la voiture.

Une température limite est celle qui est atteinte par l'air lorsque les différents facteurs cités restent constants. Lorsque les facteurs cités n'ont pas eu chaque endroit la même grandeur, les températures limites locales qui dépendent de ces facteurs ne seront pas toutes les mêmes.

3.1.3. - Remarque :

Dans l'étude qui suivra, pour des raisons de simplification, nous considérerons que le fonctionnement en chauffage de notre unité de climatisation, le fonctionnement en réfrigération étant équivalent.

3.2. - Etude statique : Equilibre thermique :

3.2.1. - Equilibre thermique :

La température de l'air restera constante, si à chaque instant il y a équilibre pour tout le véhicule entre l'apport de chaleur et la chaleur dissipée.

L'équation de cet équilibre s'écrit :

$$Q_c + Q_v + Q_s - Q_p - Q_a = 0 \text{ (KW)} \quad (3.1)$$

- a) Q_c : chaleur apportée par la source de chaleur.
Elle est exprimée par $Q_c = x' x'' P_c$ (KW) (3.2)

P_c : puissance calorifique nominale installée (KW)

x'' : rapport entre la puissance calorifique nominale installée et la puissance calorifique disponible.
Ce rapport dépend de la tension (ou de la pression de vapeur).

x' : rapport entre la puissance calorifique utilisée et la puissance calorifique disponible.

Dans notre cas, la régulation étant par "tout ou rien" x' prendra alors les valeurs instantanées de 0 ou 1.

- b) Q_v : chaleur apportée par les voyageurs.
C'est l'énergie dégagée par les processus d'oxydation ayant lieu dans le corps humain. Elle dépend de l'activité de la personne.

Dans une voiture, cette chaleur est pour l'ensemble :

$$Q_v = y M N \cdot 10^{-3} \quad (\text{KW}) \quad (3.3)$$

M : chaleur produite par le métabolisme de chaque voyageur (W/voyageur).

N : capacité nominale de la voiture en nombre de voyageurs.

y : rapport entre le nombre d'occupants et la capacité nominale (peut dépasser 1 lorsque la voiture est surchargée).

- c) Q_s : chaleur apportée par le soleil.

$$Q_s = z \cdot s \cdot R \cdot q \cdot S_b \quad (3.4)$$

R : rayonnement solaire de référence : $R = 0,785 \text{ KW/m}^2$

z : Rapport entre le rayonnement solaire réel et le rayonnement solaire de référence. Ce coefficient doit tenir compte de l'effet des nuages et de l'angle formé entre la direction des rayons solaires et la perpendiculaire au plan de vitre.

s : coefficient de correction, il doit tenir compte des effets secondaires du soleil sur la déperdition (ou apport) par les parois et le sol.

S_b : surface des baies vitrées.

q : rapport entre les rayons calorifiques frappant les vitres et ceux entrant dans la voiture (Filtration des vitres).

- d) Q_p : chaleur dissipée par les parois.

Si la température de l'air dans la voiture est uniforme, cette déperdition peut s'exprimer par :

$$Q_p = K_o \cdot K_v \cdot S \cdot (T_i - T_e) \cdot 10^{-3} \quad (\text{KW}) \quad (3.5)$$

K_o : Coefficient de déperdition de chaleur par les parois à l'arrêt.

K_v : Coefficient par lequel il faut multiplier K_o lorsque le train roule à la vitesse v (Km/h).

S : Surface extérieure de la voiture (m²)

Ti : Température de l'air à l'intérieur de la voiture (°C)

Te : Température de l'air à l'extérieur de la voiture (°C)

e) Qa : chaleur perdue par le renouvellement de l'air.

L'air de renouvellement est introduit à la température de l'air extérieur, et est évacué à la température de l'air intérieur.

$$Q_a = 1,16 \cdot \gamma \cdot C_p \cdot V_a (T_i - T_e) \cdot 10^{-3} \text{ (KW)} \quad (3.6)$$

$1,16 \cdot 10^{-3}$: Rapport entre 1 Kcal/h et 1 KW

Cp : 0,24 Kcal/Kg °C : chaleur spécifique de l'air à pression constante.

γ : poids spécifique de l'air.

Va : volume du renouvellement d'air (m³ / h.véhicule).

3.2. - Remarque :

Pour l'étude du fonctionnement en réfrigération, il faudra remplacer x'. x''.Pc par un terme négatif représentant l'utilisation de la puissance frigorifique et remplacer les déperditions de chaleur par les parois par l'apport de chaleur par les parois lorsque:

$$T_i - T_e < 0$$

3.3.3. - Ecart entre la température limite de l'air dans la voiture et la température extérieure :

Lorsque l'équilibre thermique est atteint, la température de l'air dans la voiture (Ti) est déterminée par l'équation (1) qui peut s'écrire :

$$x' x'' Pc + y.M.N.10^{-3} + z R s q Sb = Ko.Kv S. (T_i - T_e) 10^{-3} + 1,16 \cdot \gamma C_p \cdot V_a (T_i - T_e) 10^{-3} \quad (3.7)$$

Cette température sera toujours atteinte, quelque soit la température de départ, c'est pourquoi nous l'appellerons "température-limite" (lim: Ti). L'équation (3.7) montre que les températures limites dépendent à la fois des caractéristiques de construction de la voiture par les paramètres Pc, N, q, Sb, Ko, S, Va minimum et Va maximum; des circonstances par x'', y, z, Te et la vitesse du train influençant Kv et Va, du système de régulation agissant sur x', enfin de Va qui dépend à la fois des voyageurs qui ouvrent les fenêtres, portes et aérateurs, de la vitesse du train et de la régulation lorsque celle ci peut agir sur la position de certains clapets du circuit d'air.

De l'équation (3.7) on a :

$$\lim (T_i) - T_e = \frac{x' x'' Pc + y.M.N.10^{-3} + z.R.s.q.Sb}{Ko.Kv.S.10^{-3} + 1,16 \gamma C_p.V_a.10^{-3}} \quad (3.8)$$

qui montre que l'écart entre la température limite et la température extérieure est indépendante de la température extérieure et que cet écart n'est jamais négatif (fonctionnement en chauffage).

Les températures limites peuvent être scindées en 2 groupes :

Le premier groupe comprend toutes les températures limites que l'on peut atteindre avec le chauffage seul (en absence de voyageurs et de rayonnement solaire. C A D pour $y + z = 0$)

$$\lim_{y+z=0} Ti - Te = \frac{x' x'' Pc}{Ko Kv.S.10^{-3} + 1,16 \delta Cp.Va 10^{-3}} \quad (3.9)$$

Le second groupe comprend toutes les températures limites qui sont atteintes lorsque le chauffage est coupé, CAD : $x' = 0$

$$\lim_{x'=0} Ti - Te = \frac{y.M.N.10^{-3} + z.R.s.q.Sb}{Ko Kv.S.10^{-3} + 1,16 \delta Cp.Va 10^{-3}} \quad (3.10)$$

Les 2 groupes ensembles comprennent toutes les températures limites; elles ont pour valeur :

$$\lim_{y+z=0} Ti - Te = (\lim_{y+z=0} Ti - Te) + (\lim_{x'=0} Ti - Te) \quad (3.11)$$

$$\text{Posons : } z' = \frac{R s q Sb}{M.N.10^{-3}} \cdot z \quad (3.12)$$

L'équation 3.10 s'écrit :

$$\lim_{x'=0} Ti - Te = \frac{(y + z').M.N.10^{-3}}{Ko Kv.S.10^{-3} + 1,16 \delta Cp.Va.10^{-3}} \quad (3.13)$$

. Diagrammes des températures limites de l'Air :

Etablissons les diagrammes permettant de déterminer les températures limites de l'air qui seront atteintes avec des renouvellements d'air de 0, 300, 1000, 2000, 3000, 5000, 10.000, 15.000(m³/h véhicule) pour la voiture de référence.

Soit une voiture qui nous servira de référence dans tout ce qui suivra, possédant les caractéristiques suivantes :

Ko = 1,4 W/m ² . h.°C	s = 1
Kv = 1	R = 0,785 Kw/m ²
S = 280 m ²	q = 0,85
N = 68 voyageurs	Sb = 8,8 m ²
M = 80 W/voyageurs	Pc = 30 KW

$$\text{alors : } z' = \frac{R s q Sb}{M N} \cdot z = 1,08 z$$

En appliquant les formules (3.9) et (3.13), on obtient 2 diagrammes (Fig.3.1).

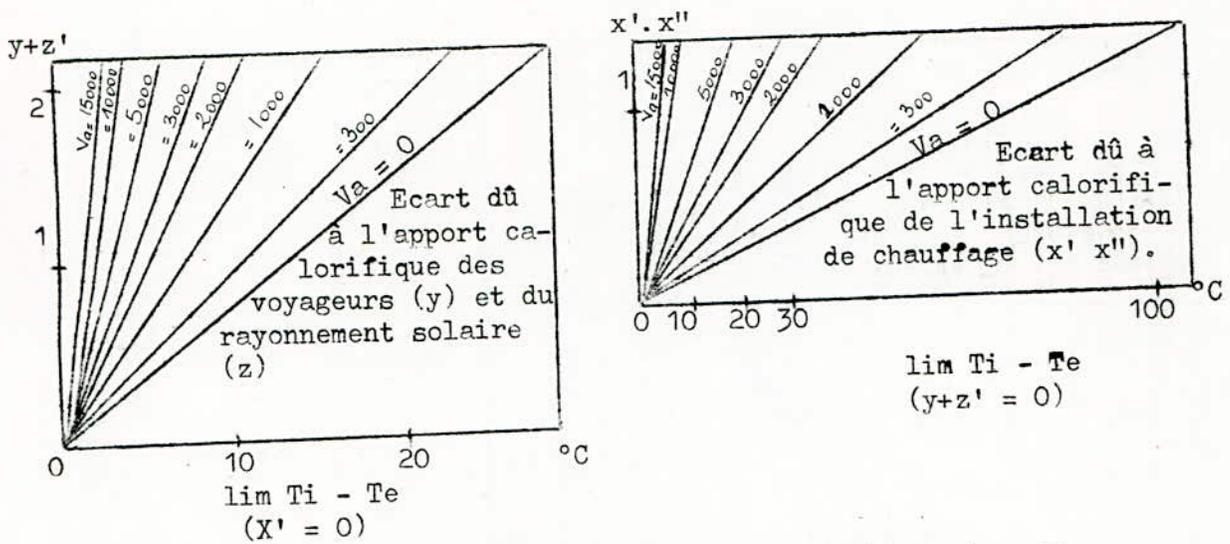


Fig.3.1. Ecart entre la température limite de l'air dans la voiture (T_i) et la température extérieure (T_e)

Lorsqu'il y a simultanément : occupation par les voyageurs du rayonnement solaire, et du chauffage; les écarts s'ajoutent :

3.2.4. - Influence relative des différents facteurs sur les températures limites :

La température désirée dans la voiture ne pourra être obtenue que si les caractéristiques de la voiture et les circonstances dans laquelle elle se trouve permettant de disposer à la fois d'une température limite supérieure à la température désirée et d'une température limite inférieure à la température désirée. C'est la raison pour laquelle l'étude des températures limites est si importante.

On peut connaître l'influence relative des différents facteurs en calculant la dérivée partielle des expressions (3.9) et (3.10) par rapport au facteur à étudier. Les résultats obtenus sont complexes mais portés en diagramme leur usage est commode car ils donnent par l'augmentation d'une unité du facteur considéré.

L'influence relative de tous les facteurs dépendant toujours au moins du niveau de renouvellement d'air, tous les diagrammes sont établis en fonction de ce niveau. Lorsqu'il y a lieu les autres facteurs sont introduits sous forme de paramètres.

Des exemples de diagramme ont été établis pour notre voiture de référence. (Fig.3.2.3.5.)

a) Conclusion :

L'examen des diagrammes fait immédiatement apparaître la chute impressionnante de l'influence relative des différents facteurs lorsque le renouvellement d'air varie entre 0 et environ 4 à 5.000 m³/h véhicule. A partir de 6.000 m³/h véhicule l'augmentation a des effets notablement moindres.

Si l'influence relative de chaque facteur dépend toujours du niveau du renouvellement d'air, elle dépend également du niveau d'énergie calorifique dissipée dans la voiture.

Par exemple, on remarque que l'influence relative de la déperdition (K_0) (Fig. 3.4 et 3.5) dépend chauffage coupé, du niveau d'aérage (V_a), du niveau d'occupation (y) et du niveau du rayonnement solaire (z), tandis qu'avec chauffage seul, cette influence dépend du niveau d'aérage, de la tension (ou pression de vapeur) (x'') et de la durée d'enclenchement du chauffage (x').

b) Application :

Par un aménagement différent de notre voiture de référence on désire augmenter sa capacité de 20 voyageurs, tout en maintenant pour une température extérieure quelconque, les mêmes températures limites avec chauffage seul permanent ($y + z = 0$, $x' x'' = 1$) et sans chauffage avec occupation maximale et rayonnement de référence ($x' = 0$, $y + z = 2,08$) lorsque le train marche à 120 km/h et que les fenêtres sont fermées (dans ces conditions le renouvellement d'air est de 1000 m³/h véhicule).

Le diagramme de la fig. 3.2. indique que pour une augmentation de la capacité (N) de 1 voyageur, lorsque l'occupation est complète ($y = 1$); la température limite chauffage coupé augmentera de 0° 11, quand le niveau d'aérage est de 1000 m³/h véhicule. Pour 20 voyageurs en plus cela fait :

$$0^{\circ}11 \cdot 20 = 2^{\circ}2$$

Pour empêcher cette hausse, on peut agir sur V_a et sur K_0 , sur q et sur S_b .

* Si on veut agir sur l'isolation de la voiture, on voit à l'aide du diagramme de la figure (3.4) qu'une hausse de 2°2 lorsque le chauffage est coupé et que $y + z' = 2;08$ peut être compensée par une augmentation de K_0 de $\frac{2^{\circ}2}{6^{\circ}6} = 0,33$ W/h.m²°C.

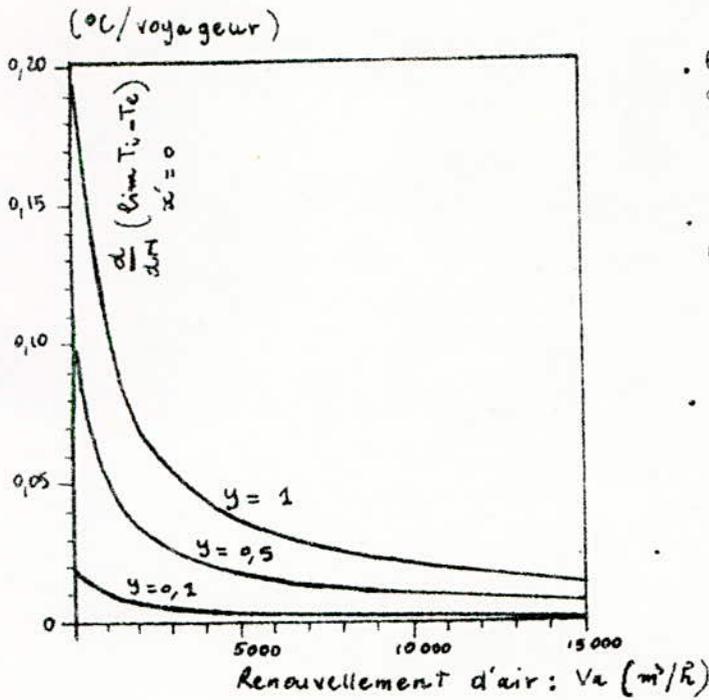
A son tour cette diminution de l'isolation provoquera d'après le diagramme fig. 3.5. pour le chauffage permanent seul ($x'x''=1$) et un renouvellement d'air de 1000 m³/h véhicule, une baisse de la température de 15°5 . $0,33 = 5^{\circ}2$.

Pour compenser cette baisse, on pourra ajuster P_c de la valeur calculée à l'aide du diagramme fig. 3.3

On trouve pour $x' x'' = 1$ et $V_a = 1000$ m³/h véhicule, il faut augmenter P_c de $\frac{5^{\circ}2}{1^{\circ}38} = 3,75$ KW

On pourra donc maintenir les températures limites de l'ancienne voiture en diminuant l'isolation de 0,33 W/h.m²°C et en même temps en augmentant la puissance de chauffage de 3,75 KW.

* On pourrait également étudier une combinaison de modifications à apporter aux différents facteurs étudiés. Toutes ces solutions sont thermiquement valables, mais il faudra encore les confronter avec des aspects physiologiques et technologiques.



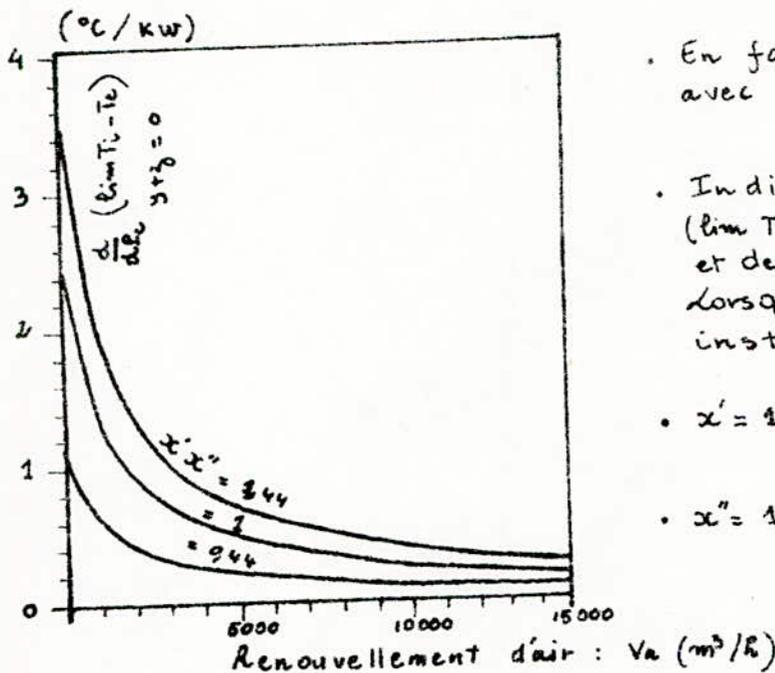
• En fonction du renouvellement d'air avec comme paramètre l'occupation en voyageurs (y).

• Indique la modification de l'écart ($\lim T_i - T_e$), chauffage coupé ($x'=0$) lorsque la capacité en voyageurs est augmentée de 1 voyageur.

• $y=1$: occupation complète de la voiture.

$$\frac{d}{dV_a} (\lim_{x'=0} T_i - T_e) = \frac{y \cdot M \cdot 10^3}{K_o \cdot K_v \cdot 5 \cdot 10^3 + 4,16 C_p \cdot V_a \cdot 10^3}$$

Fig 3.2 - Influence de la capacité en voyageurs (M) sur la température limite de l'air quand le chauffage est coupé ($x'=0$)



• En fonction du renouvellement d'air avec comme paramètres x' et x'' .

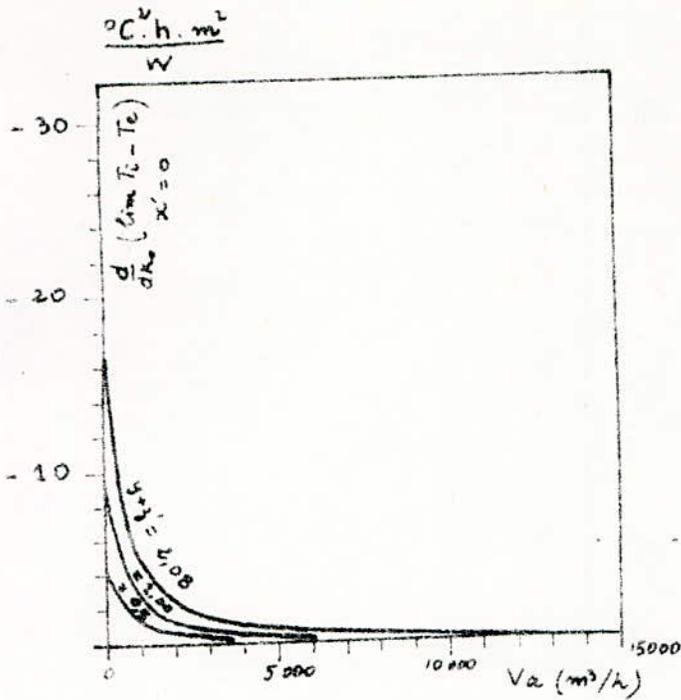
• Indique la modification de l'écart ($\lim T_i - T_e$) en l'absence de voyageurs et de rayonnement solaire ($y+z=0$), lorsque la puissance du chauffage installé est augmentée de 1kw.

• $x'=1$: correspond à l'enclenchement du chauffage.

• $x''=1$: correspond à une tension égale à la valeur nominale.

$$\frac{d}{dP_c} (\lim_{y+z=0} T_i - T_e) = \frac{x' x''}{K_o \cdot K_v \cdot 5 \cdot 10^3 + 4,16 \delta \cdot C_p \cdot V_a \cdot 10^3}$$

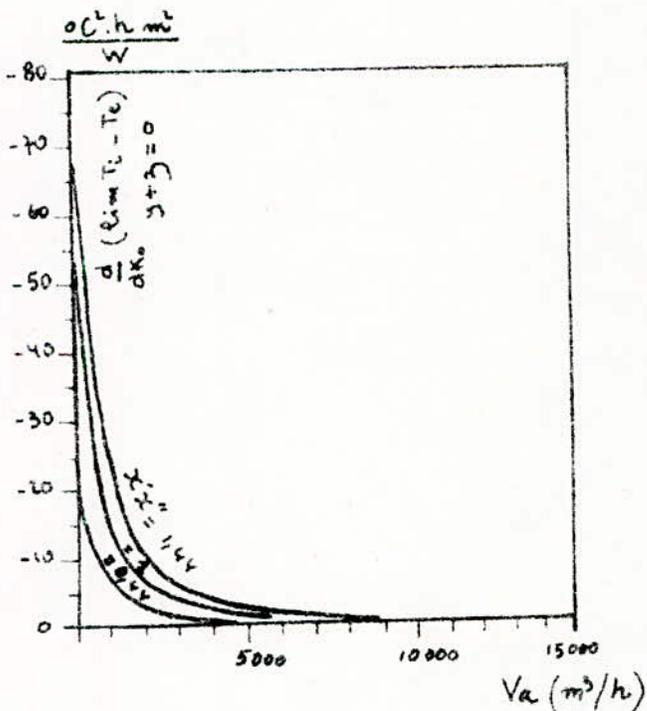
Fig 3.3 - Influence de la puissance de chauffage (P_c) sur la température limite de l'air dans la voiture en l'absence de voyageurs et de rayonnement solaire.



- En fonction du renouvellement d'air avec comme paramètres : l'occupation en voyageurs (y) et le rayonnement solaire (z).
- Indique la modification de l'écart ($\lim T_i - T_e$), chauffage coupé ($x'=0$) lorsque la déperdition (K_0) par les parois est augmentée de $2 \text{ W/m}^2 \text{ h}^\circ \text{C}$.
- $y=1$: correspond à une occupation complète.
- $z=1$: correspond au rayonnement de référence.
- $z'=1,08 z$.

$$\frac{d}{dK_0} (\lim T_i - T_e)_{x'=0} = - \frac{(y+z') \cdot H \cdot 10^3 \cdot K_v \cdot 5 \cdot 10^3}{(K_0 \cdot K_v \cdot 5 \cdot 10^3 + 1,168 c_p V_a 10^3)^2}$$

Fig 3.4 - Influence de la déperdition de la voiture (K_0) sur la température limite de l'air, lorsque le chauffage est coupé.



- En fonction du renouvellement d'air avec comme paramètres : x' et x''
- Indique la modification de l'écart ($\lim T_i - T_e$), en l'absence de voyageurs et de rayonnement solaire, lorsque la déperdition par les parois (K_0) est augmentée de $2 \text{ W/m}^2 \text{ h}^\circ \text{C}$.
- $x'=1$: correspond à l'enclenchement du chauffage.
- $x''=1$: correspond à une tension égale à la valeur nominale.

$$\frac{d}{dK_0} (\lim T_i - T_e)_{y+z=0} = - \frac{x'x'' K_v \cdot 5 \cdot 10^3}{(K_0 \cdot K_v \cdot 5 \cdot 10^3 + 1,168 c_p V_a 10^3)^2}$$

Fig 3.5 - Influence de l'isolation de la voiture (K_0) sur la température limite, lorsque la voiture n'est pas occupée et qu'il n'y a pas de rayonnement solaire.

ETUDE DYNAMIQUE /

En dehors de l'équilibre thermique, la température de l'air dans la voiture se modifie constamment.

Considérons une partie élémentaire de la voiture de poids dP et de chaleur spécifique c . Pour élever la température T de cette partie élémentaire, de dT , il faudra lui faire absorber l'énergie calorifique $dTc dP$. Si de plus, cette élévation se réalise pendant le temps dt avec un apport d'énergie par unité de temps dq ; on aura :

$$dq dt = dTc dP \quad (3.14)$$

$$\text{d'où} \quad dq = \frac{dT}{dt} c dP \quad (3.15)$$

Pour l'ensemble de la voiture y compris l'air intérieur, on peut écrire :

$$\int_0^Q dq = \int_0^P \frac{dT}{dt} c dP \quad (3.16)$$

Reprenons l'expression (3.1), et exprimons par (3.17) qu'en dehors de l'équilibre thermique, la chaleur disponible est utilisée pour modifier les températures de la voiture :

$$Qc + Qv + Qs - Qa = \int_0^P \frac{dT}{dt} c dP \quad (3.17)$$

$\frac{dT}{dt}$ dépend de l'endroit où est situé la partie élémentaire. En effet si tout les $(\frac{dT}{dt})$ étaient égaux, cela signifierait que le gradient

de température conserve la même forme. Or, ce gradient se modifie jusqu'au moment où l'équilibre thermique est réalisée; mais à l'approche de l'équilibre thermique la forme de ce gradient ne se modifie déjà plus que très lentement/ Nous pouvons donc admettre que dans la zone d'approche de l'équilibre thermique les vitesses de modifications de température de toutes les parties élémentaires sont presque égales, ce qui s'exprime par :

$$\frac{dT}{dt} \approx \frac{dT_i}{dt} \quad (3.18)$$

Ce qui permet d'écrire :

$$\int_0^P \frac{dT}{dt} c dP \approx \frac{dT_i}{dt} \int_0^P c dP = C \frac{dT_i}{dt} \quad (3.19)$$

ou : $C = \int_0^P c dP$ est la capacité thermique de la voiture.

En utilisant (3.7) et (3.12), l'expression 3.17 peut s'écrire :

$$C \frac{dT_i}{dt} + (K_0.K_v.S + 1,16 \delta C_p.V_a) 10^{-3} . T_i = (K_0.K_v.S + 1,16 \delta C_p.V_a) 10^{-3} . T_e + x' x'' P_c + y.M.N. 10^{-3} + z.R.s.q.S_b. 10^{-3} \quad (3.20)$$

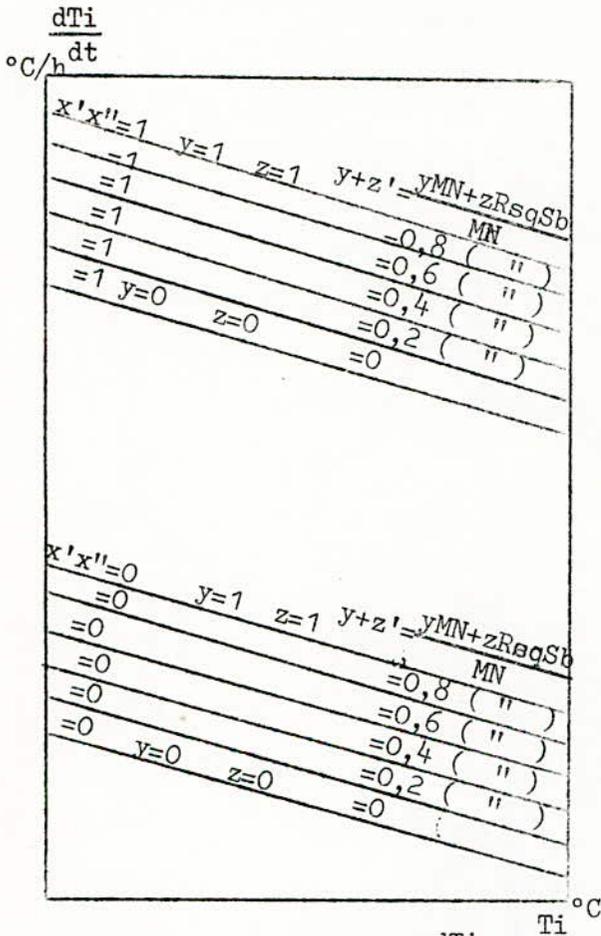
Dans une voiture donnée Ko, S, Pc, M, N, R, q, Sb, et C sont constants. Si on se trouve dans des conditions telles que Te, x'', v (et par conséquent Kv), s et Va restent aussi constants, alors l'équation (3.20) qui est de la forme :

$$C \frac{dT_i}{dt} + A T_i = B$$

représente dans le plan $T_i, \frac{dT_i}{dt}$; un faisceau de droites parallèles (fig.3.6) dont les positions relatives ne dépendent plus que de x, y et z.

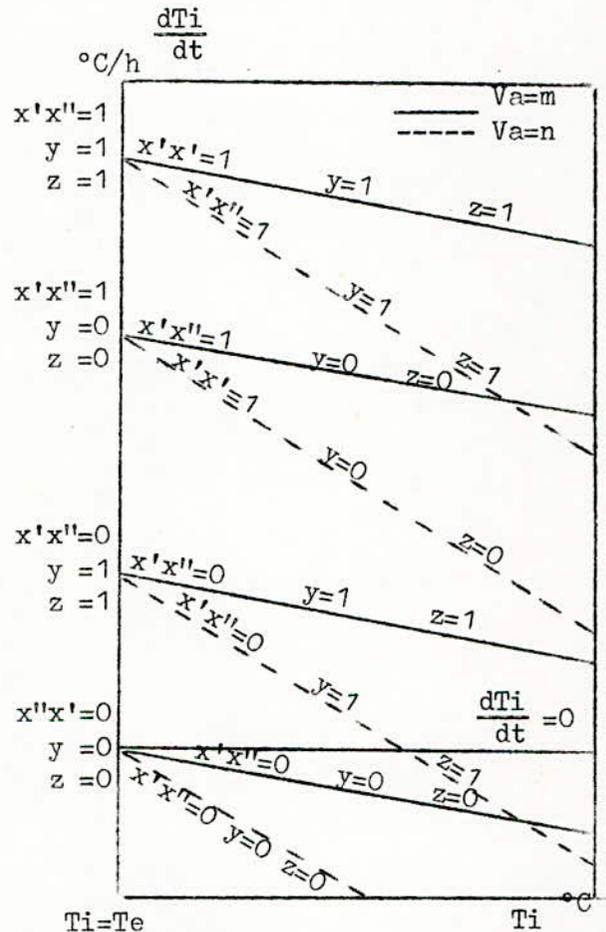
Si pour une même vitesse du train, nous faisons varier le renouvellement d'air (V_a); nous obtiendrons un nouveau faisceau de droites parallèles (fig. 3.7).

Nous avons ainsi défini des graphes qui permettent de prévoir l'évolution de la température de l'air; que nous définirons comme graphes d'évolution de la température



Faisceau de droites $T_i, \frac{dT_i}{dt}$

Fig. 3.6.



Faisceau de droites $T_i, \frac{dT_i}{dt}$ pour $V_a = m$ et n .

Fig. 3.7

Ces graphes sont valables quantitativement lorsquell'hypothèse (3.18) est vérifiée. Lorsque ce n'est pas le cas, ces graphes indiquent toujours avec certitudes le signe de $\frac{dT_i}{dt}$ et la valeur de T_i pour laquelle $\frac{dT_i}{dt}$ s'annule. Cette valeur de T_i est d'ailleurs la température limite qui, comme nous l'avons déjà vu est bien définie.

On remarque que le même graphe d'évolution de la température reste valable quelle que soit la température extérieure; il suffit de faire débiter l'origine des abscisses avec la température de Te. Dans ce cas, tous les droites représentant la même combinaison x' et $y + z'$ se couperont sur l'axe des ordonnées.

Remarquons aussi que tous les droites de même pente ont trait à la même valeur de renouvellement d'air.

L'utilisation de ces graphes permet d'étudier la répercussion des phénomènes thermiques dans la voiture sur la température de l'air.

Nous allons illustrer l'utilisation de ces graphes, à l'aide d'exemples pour la voiture de référence déjà décrite, sachant de plus que sa capacité thermique $C = 1 \text{ KW h}/^\circ\text{C}$ et que le thermostat coupe le chauffage à 22° et le réenclenche à 21° (on supposera aussi que $x'' = 1$.)

Nous avons choisi un écart assez grand (1°) entre l'enclenchement et le déclenchement du chauffage pour plus de clarté dans les dessins. En pratique, cet écart n'est que de quelques dixièmes de degré.

3.3.1 - Application 1. (Fig.3.8)

Etudions l'évolution de la température de l'air dans la voiture roulant à 120 Km/h , assurant ainsi un renouvellement d'air de $1000 \text{ m}^3/\text{h}$ si l'occupation en voyageurs est de 100% et la température extérieure de 0° . Les deux cas : temps couvert et rayonnement solaire de référence vont être envisagés.

- Temps couvert : nous utiliserons dans le graphe d'évolution de la température, les droites :

$$\begin{array}{llll} \text{a) } x' = 1 & y = 1 & z = 0 & (y + z' = 1.) \\ & & V_a = 1000 \text{ m}^3/\text{h} & \end{array}$$

$$\begin{array}{llll} \text{b) } x' = 0 & y = 1 & z = 0 & (y + z') = 1 \\ & & V_a = 1000 \text{ m}^3/\text{h} & \end{array}$$

Commençons le cycle (Fig.3.8) par exemple à 21° chauffage enclenché : la température de l'air s'élève en suivant la droite (a). A 22° , le thermostat coupe le chauffage, mais la température monte encore légèrement pendant que les corps chauffants se refroidissent (Inertie).

La température baisse ensuite rencontre la droite (b), la suit jusqu'à 21° où le thermostat enclenche le chauffage.

Malgré cela, la voiture se refroidit encore légèrement, s'échauffe ensuite, atteint la droite (a) et la suit. Le cycle est terminé.

Le système est thermostatique.

Au soleil : nous utilisons dans le graphe les droites :

$$\begin{array}{llll} \text{c) } x' = 1 & y = 1 & z = 1 & (y + z' = 2,08) \\ & & V_a = 1000 \text{ m}^3/\text{h} \text{ véhicule} & \end{array}$$

$$\begin{array}{llll} \text{d) } x' = 0 & y = 1 & z = 1 & (y + z' = 2,08) \\ & & V_a = 1000 \text{ m}^3/\text{h} \text{ véhicule} & \end{array}$$

Nous obtenons un cycle de même type qu'avec temps couvert (Fig.3.8)

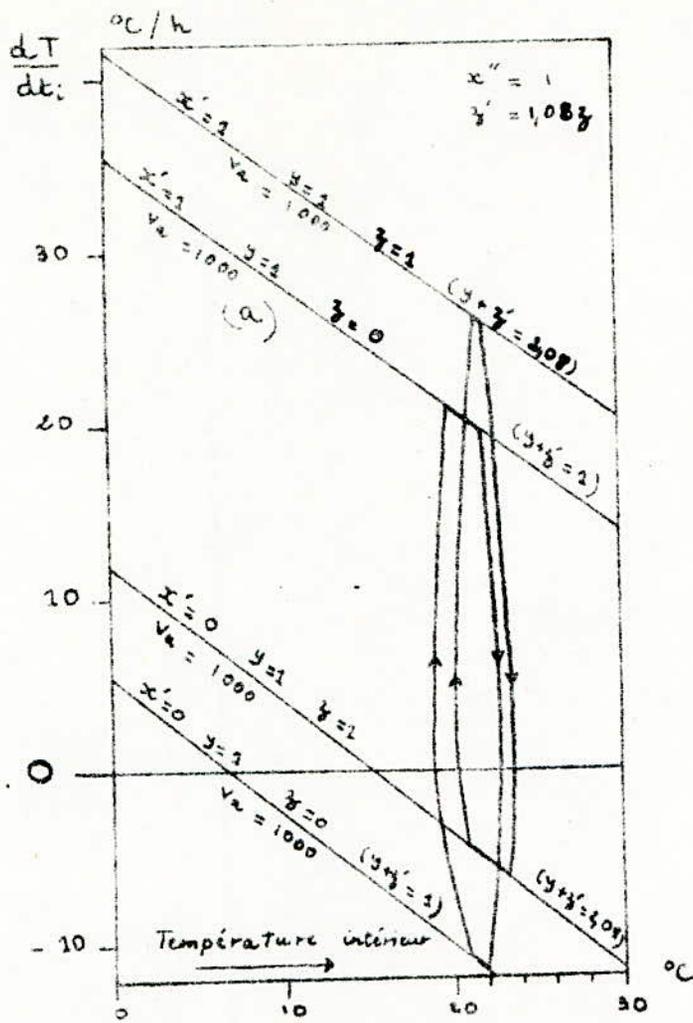


Fig 3.8 - Evolution de la température de l'air : application 1

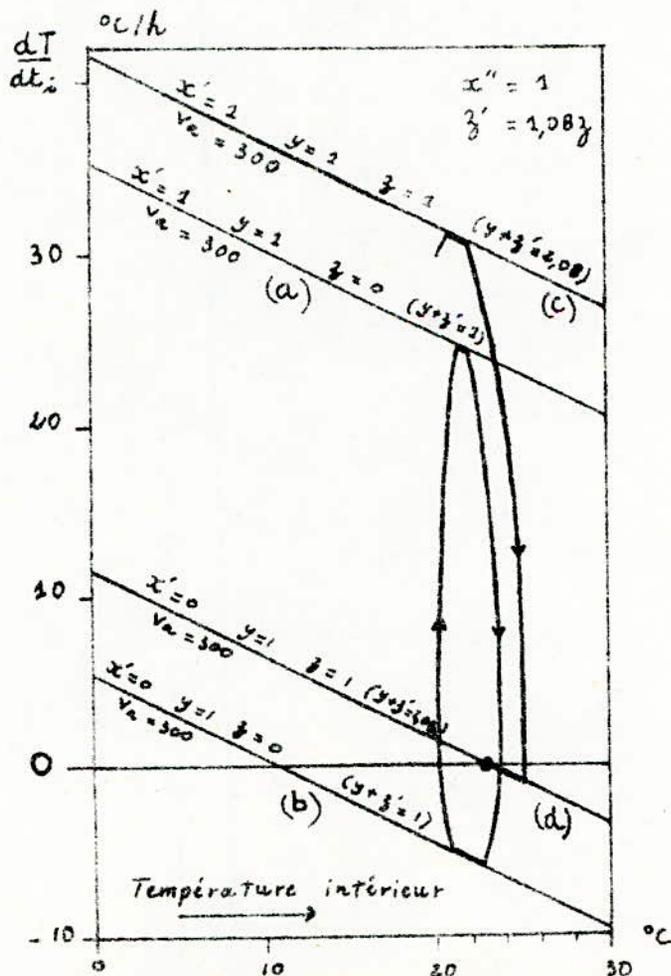


Fig 3.9 - Evolution de la température de l'air : application 2.

3.3.2 - Application 2 : (Fig. 3.9)

Etudions dans la voiture de référence, les variations de la température de l'air à l'arrêt, lorsque l'occupation est de 100 % et la température extérieure de 0°. Sachant qu'à l'arrêt l'aéragage est de 300 m³/h véhicule. (temps couvert et temps ensoleillé).

• Temps couvert : on utilise dans le graphe les droites :

$$\begin{array}{llll} \text{a) } x' = 1 & y = 1 & z = 0 & (y + z' = 1) \\ & & & Va = 300 \text{ m}^3/\text{h véhicule} \end{array}$$

$$\begin{array}{llll} \text{b) } x' = 0 & y = 1 & z = 0 & (y + z' = 1) \\ & & & Va = 300 \text{ m}^3/\text{h véhicule} \end{array}$$

Le cycle obtenu (Fig. 3.9) est thermostatique, et du même type que l'exemple 1 (Fig. 3.8)

• Temps ensoleillé : on utilise les droites :

$$\begin{array}{llll} \text{c) } x' = 1 & y = 1 & z = 1 & (y + z' = 2,08) \\ & & & Va = 300 \text{ m}^3/\text{h véhicule} \end{array}$$

$$\begin{array}{llll} \text{d) } x' = 0 & y = 1 & z = 1 & (y + z' = 2,08) \\ & & & Va = 300 \text{ m}^3/\text{h véhicule} \end{array}$$

Supposons la voiture à 21°5 enclenché (Fig. 3.9) La température de l'air s'élève en suivant la droite (c). A 22° le chauffage est coupé par le thermostat. Par suite de l'Inertie des corps de chauffe la température s'élève encore, mais moins rapidement, s'abaisse ensuite et suit la droite (d). La température s'abaisse encore mais très lentement pour atteindre la température limite de 22°5, qui sera maintenue aussi longtemps qu'aucun paramètre influant sur cette température limite ne sera modifié.

3.3.3 Application 3. (Fig. 3.10)

Examinons l'évolution de la température dans la voiture pour une température extérieure de 13°5, quand le train roule à 120 Km/h (renouvellement d'air Va = 1000 m³/h véhicule) quand l'occupation en voyageurs est de 100 % (par temps couvert et ensoleillé).

• Temps couvert : on utilise les droites du graphe.

$$\begin{array}{llll} \text{a) } x' = 1 & y = 1 & z = 0 & (y + z' = 1) \\ & & & Va = 1000 \text{ m}^3/\text{h véhicule} \end{array}$$

$$\begin{array}{llll} \text{b) } x' = 0 & y = 1 & z = 0 & (y + z') = 1 \\ & & & Va = 1000 \text{ m}^3/\text{h véhicule} \end{array}$$

Partons (Fig. 3.10) de la température de 21°5 chauffage enclenché (sur la droite (a)); à 22° coupure du courant; la température suit une courbe descendante et ensuite la droite (b) jusqu'à 21° où le chauffage sera réenclenché. On voit que 21° est précisément la température limite pour x' = 0, donc il suffira de peu de choses, par exemple un rayon de soleil pour que la température ne descende pas à 21° et le chauffage ne se réenclenchera plus, c'est pourquoi la seconde partie du cycle qui est incertaine a été dessinée en traits interrompus.

. Avec soleil : on utilise les droites :

$$c) \quad x' = 1 \quad y = 1 \quad z = 1 \quad y + z' = 2,08$$

$$Va = 1000 \text{ m}^3/\text{h} \text{ véhicule}$$

$$d) \quad x' \neq 0 \quad y = 1 \quad z = 1 \quad y + z' = 2,08$$

$$Va = 1000 \text{ m}^3/\text{h} \text{ véhicule}$$

Partons (Fig. 3.10) de la température de 21° chauffage enclenché. A 22° coupure du chauffage, par inertie la température continue à s'élever moins rapidement. La ligne représentant le phénomène rencontre la droite (d) et l'accroissement de température persiste mais très lentement et tend vers la température limite qui est de 29° Mais cette température ne sera pas atteinte car z est continuellement modifié.

3.3.4 - Analyse de la thermostaticité :

Nous avons montré à l'aide d'exemples, que la thermostaticité d'une voiture n'est possible que si dans le diagramme T_i , $\frac{dT_i}{dt}$, on dispose au moins de 2 droites telles que la première comprend

des points tels que :

$$\text{Si } T_i < T_c \quad : \quad \text{on a } \frac{dT_i}{dt} > 0$$

et la seconde des points tels que :

$$\text{Si } T_i > T_c \quad : \quad \text{on a } \frac{dT_i}{dt} < 0$$

La première droite doit pouvoir assurer l'élévation de la la température de l'air lorsque la température intérieure est en deça de la température de confort (T_c). La seconde doit assurer le refroidissement de l'air lorsqu'il est plus chaud que T_c .

Les lignes assurant le chauffage sont celles représentant $x' = 1$, elles doivent nécessairement couper l'axe des abscisses pour $T_i > T_c$, ce qui s'exprime par :

$$T_i = T_e + \frac{x'' P_c + (y + z') M.N. 10^{-3}}{K_o K_v.S. 10^{-3} + 1,16 \gamma C_p V_a 10^{-3}} > T_c \quad (3.21)$$

Par contre les droites qui, lorsque le chauffage est coupé ($x' = 0$), peuvent assurer un abaissement de la température intérieure doivent couper l'axe des abscisses pour des valeurs de T_i inférieurs à T_c , ce qui peut s'écrire :

$$T_i = T_e + \frac{(y + z') M.N. 10^{-3}}{K_o K_v.S. 10^{-3} + 1,16 \gamma C_p V_a 10^{-3}} < T_c \quad (3.22)$$

La thermostaticité de la voiture n'est possible que si les inégalités (21) et (22) sont satisfaits; ce qui n'a lieu que pour certaines combinaisons de T_e , T_c , x'' , $(y + z')$ et V_a .

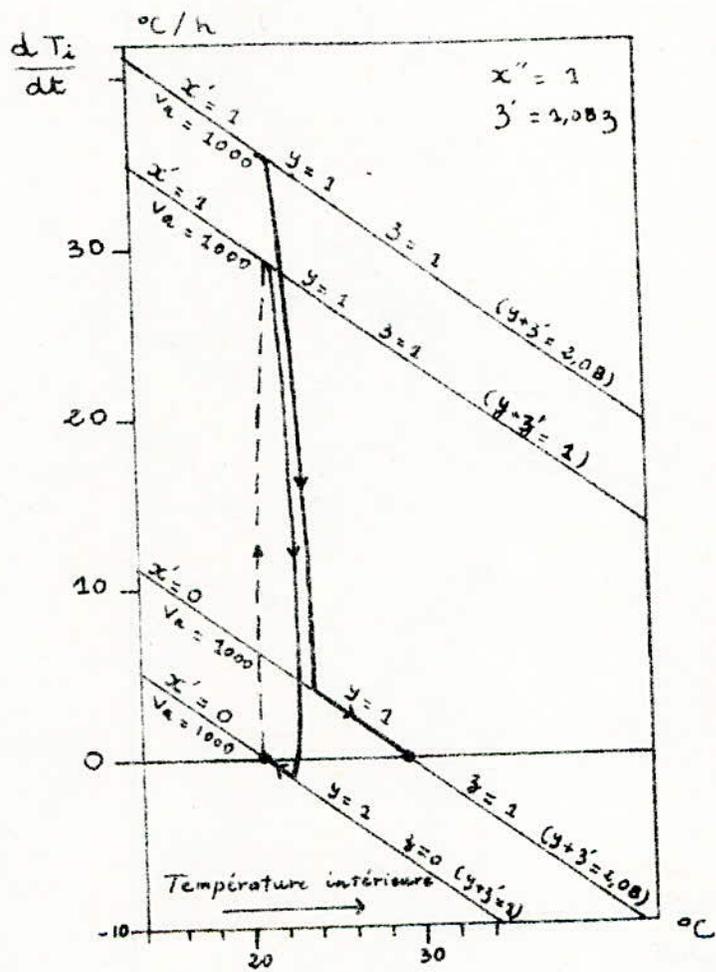


Fig 3.10. Evolution de la température de l'air : application 3

CHAPITRE 4. -

ANALYSE DES REGULATEURS A DEUX POSITIONS
SANS CORRECTION.

4. ANALYSE DES SYSTEMES DE REGULATION A 2 POSITIONS SANS CORRECTION /

4.1. - Introduction :

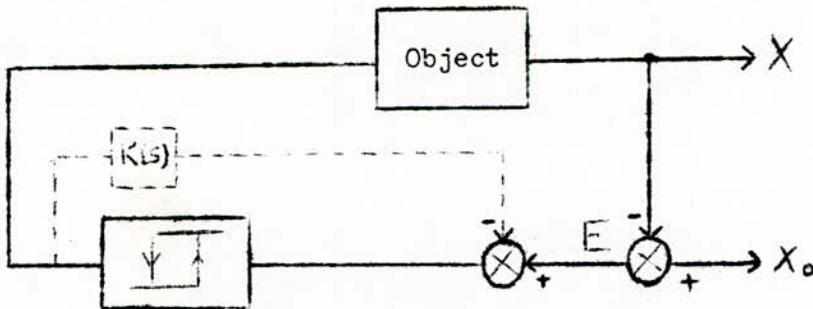


fig. 4.1. Système avec régulation à 2 positions

Les régulateurs à 2 positions sont caractérisés par la non continuité du signal de commande y . En dépit de la simplicité pratique de leur structure, les systèmes avec régulation à deux positions conduisent à une formulation mathématique délicate à cause de la nature discontinue du signal de commande et leur étude débouche sur des problèmes non linéaires. Un problème important résulte du fait qu'en régime permanent, seules les valeurs moyennes des entrées de commandes peuvent être constantes. De plus, dans les applications industrielles, on s'intéresse à la valeur moyenne de la variable commandée (\bar{X}). Les écarts entre la valeur moyenne et la consigne constituent des erreurs qu'il est souhaitable de réduire.

Dans la littérature, on trouve plusieurs méthodes permettant l'analyse de systèmes pareils avec des précisions différentes.

Dans notre cas, on s'intéressera aux propriétés du régulateur afin de déterminer l'efficacité de la régulation par rapport aux perturbations extérieures (c'est-à-dire l'indice de régulation).

On retiendra la méthode proposée par Botchera (2) et Wierbieckigo (7) qui consiste à analyser le parcours par rapport au temps à l'aide de variations lentes des signaux d'entrée.

4.2. - ANALYSE DES SYSTEMES /

Dans les systèmes de régulation à deux positions sans correction, on s'intéresse aux paramètres d'oscillation du système :

L'amplitudes, la fréquence et les valeurs moyennes caractérisent la qualité de la régulation.

Le parcours de la fig (4.3) peut être déterminé par l'analyse du changement d'état du relais.

Les grandeurs à régler varient entre X_1 et X_2 avec

$\Delta X = X_2 - X_1$. La valeur moyenne $X_{sr} = \bar{X}$ est différente de X_0 (consigne) et la différence donne l'écart moyen $\bar{E} = X_0 - \bar{X}$. Les oscillations sont caractérisées par $X_a = \frac{1}{2} (X_1 + X_2)$. La relation $d = \frac{t_a}{t_a + t_b}$ détermine la valeur moyenne : $\bar{X} = X_m \cdot d$

t_a : temps d'enclenchement.

t_b : temps de déclenchement.

$t_a + t_b$: période d'oscillation.

X_m : valeur maximale de la grandeur de sortie obtenue pour un temps infini.

Le signal enclenché par le relais est exprimé en unité de la grandeur réglée X_m .

L'hysteresis est exprimée par X_h et les valeurs relatives d'hysteresis par $h = \frac{X_h}{X_m}$

L'analyse du parcours de la fig (4.3) donne les relations 4.1., 4.2., 4.3., et 4.4. Ces résultats sont obtenus en utilisant le modèle $G(S) = \frac{e^{-T_0 s}}{1 + T \cdot S}$

$$* X_1 = \left(X_0 - \frac{X_h}{2} \right) e^{-\frac{T_0}{T}} \quad (4.1)$$

$$\frac{X_1}{X_m} = \left\{ \frac{X_0}{X_m} - \frac{h}{2} \right\} e^{-\frac{T_0}{T}}$$

$$* X_2 = \left(X_0 + \frac{X_h}{2} \right) + \left(X_m - X_0 - \frac{X_h}{2} \right) \left(1 - e^{-\frac{T_0}{T}} \right)$$

$$X_2 = \left(X_0 + \frac{X_h}{2} \right) + X_m \left(1 - e^{-\frac{T_0}{T}} \right) - X_0 - \frac{X_h}{2} + \left(X_0 + \frac{X_h}{2} \right) e^{-\frac{T_0}{T}}$$

$$\frac{X_2}{X_m} = \left(\frac{X_0}{X_m} + \frac{h}{2} \right) e^{-\frac{T_0}{T}} + \left(1 - e^{-\frac{T_0}{T}} \right) \quad (4.2)$$

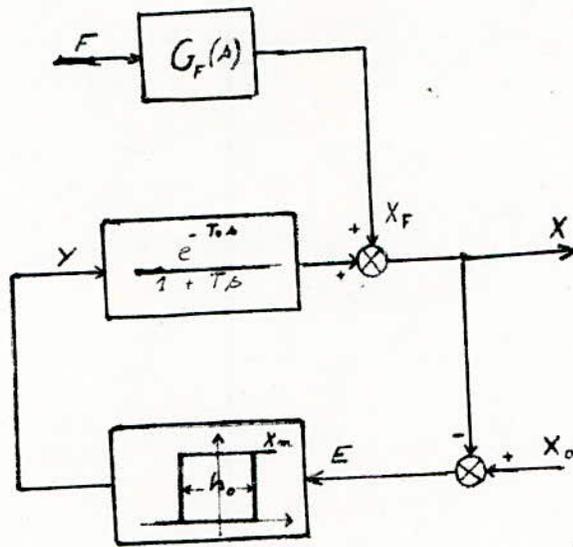


Fig 4.2 - Système de regulation à deux positions

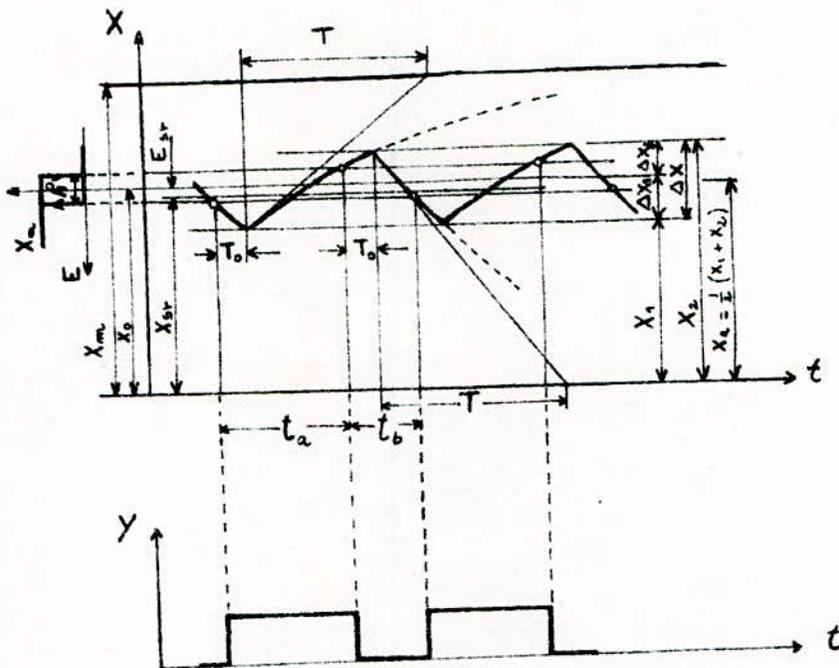


Fig 4.3 - Parcours dans le système 4.2 de la grandeur réglée X.

$$\begin{aligned}
 * \frac{X_a}{X_m} &= \frac{1}{2} \left(\frac{X_1}{X_m} + \frac{X_2}{X_m} \right) = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{X_0}{X_m} + \frac{h}{2} \right) e^{-\frac{T_0}{T}} + \left(\frac{X_0}{X_m} - \frac{h}{2} \right) e^{-\frac{T_0}{T}} + (1 - e^{-\frac{T_0}{T}}) \right] \\
 &= \frac{X_0}{X_m} e^{-\frac{T_0}{T}} + \frac{1}{2} (1 - e^{-\frac{T_0}{T}}) \quad (4.3)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 * \frac{\Delta X}{X_m} &= \frac{X_2}{X_m} - \frac{X_1}{X_m} = \left(\frac{X_0}{X_m} + \frac{h}{2} - \frac{X_0}{X_m} + \frac{h}{2} \right) e^{-\frac{T_0}{T}} + (1 - e^{-\frac{T_0}{T}}) \\
 &= h e^{-\frac{T_0}{T}} + (1 - e^{-\frac{T_0}{T}}) \quad (4.4)
 \end{aligned}$$

D'après les relations (4.3) et 4.4), on remarque que les oscillations constantes dépendent des propriétés de l'objet ($\frac{T_0}{T}$), de la valeur du signal enclenché (X_m) et de l'hysteresis du relais (h).

Selon la formule (4.4), on peut diminuer l'amplitude des oscillations par diminution de l'hysteresis. Mais l'application d'une hysteresis négative est limitée.

La figure (4.4) donne les courants selon SMITH pour déterminer $\frac{\Delta X}{X_m}$, pour les différentes valeurs de h , en fonction de $\frac{T_0}{T}$ du processus; on arrive à l'expression de la limite d'oscillation qui est caractérisée par la droite.

$$\frac{\Delta X}{X_m} = \frac{T_0}{T} + h \quad (4.5)$$

En dessous de cette droite, on n'aura pas d'oscillation et le relais prendra une position constante; on peut aussi constater selon la fig. (4.4), que la valeur maximale d'hysteresis est égale à $\frac{1}{2} \frac{T_0}{T}$

L'étude de l'évolution de $X(t)$ aux instants t_a et t_b , permet de déterminer la valeur moyenne d et la période d'oscillation $t_a + t_b$.

$$X_2 = X_1 + (X_m - X_1) \left(1 - e^{-\frac{t_a}{T}} \right)$$

$$X_2 = X_1 + (X_m - X_1) - (X_m - X_1) e^{-\frac{t_a}{T}}$$

$$\frac{t_a}{T} = \text{Log} \frac{X_m - X_1}{X_m - X_2}$$

$$t_a = T \cdot \text{Log} \frac{2X_m - (X_2 + X_1) + (X_2 - X_1)}{2X_m - (X_2 - X_1) - (X_2 - X_1)}$$

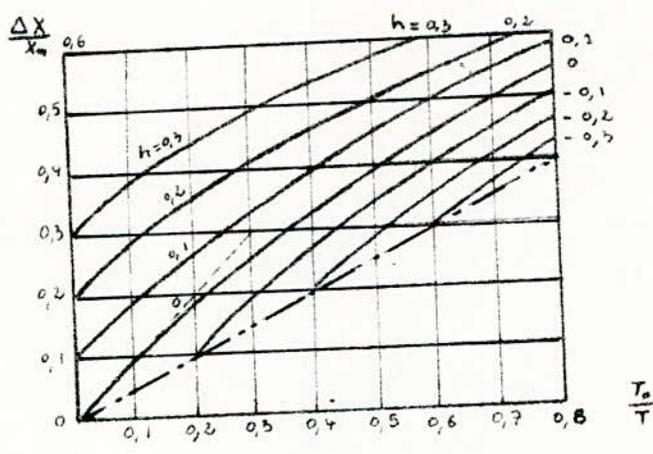


Fig 4.4 - Amplitude des oscillations ($\frac{\Delta X}{X_m}$) stables en fonction de h et de $\frac{T_0}{T}$.

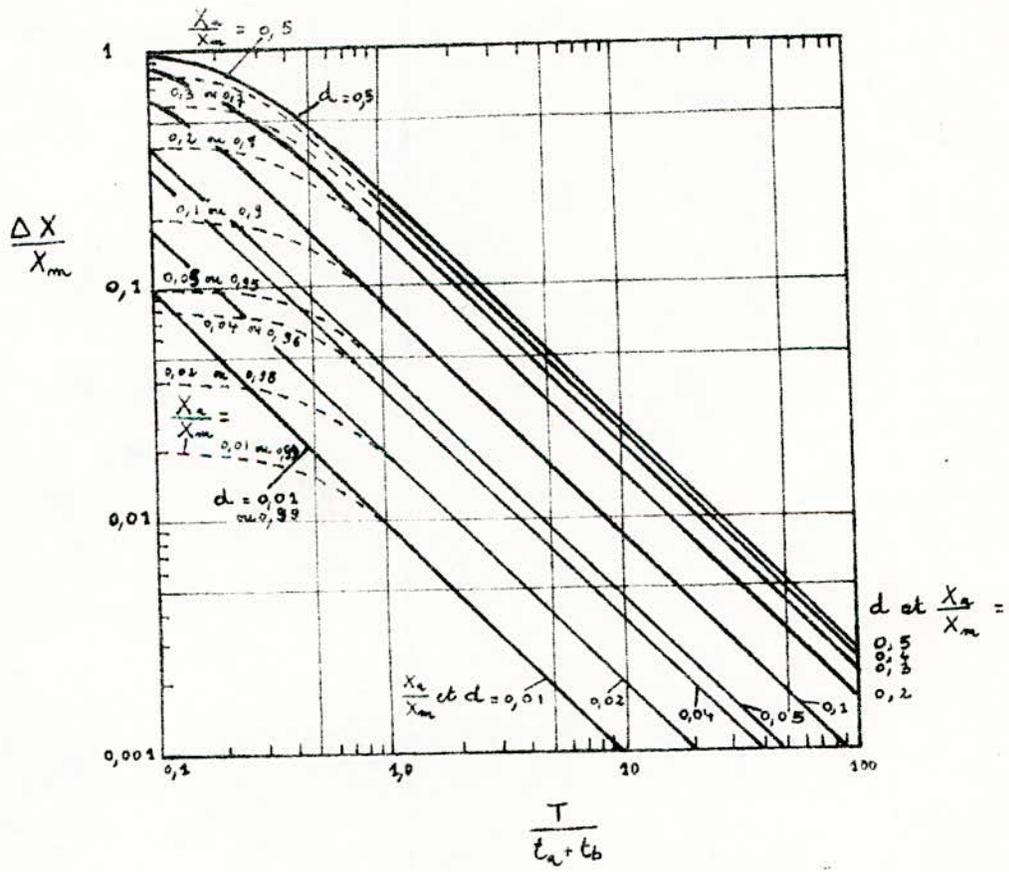


Fig 4.5 - Courbes en pointillée : $\frac{\Delta X}{X_m}$ en fonction de $\frac{T}{t_a + t_b}$ pour $\frac{X_0}{X_m} = cte$
 Courbes continues : $\frac{\Delta X}{X_m}$ en fonction de $\frac{T}{t_a + t_b}$ pour $d = cte$

$$t_a = T. \text{Log} \frac{2X_m - 2X_a + \Delta X}{2X_m - 2X_a - \Delta X}$$

$$t_a = T. \text{Log} \frac{1 + \frac{\Delta X}{2(X_m - X_a)}}{1 - \frac{\Delta X}{2(X_m - X_a)}}$$

$$* X_1 = X_2 e^{-\frac{t_b}{T}}$$

$$t_b = T. \text{Log} \frac{X_2}{X_1} = T. \text{Log} \frac{(X_2 + X_1) + (X_2 - X_1)}{(X_2 + X_1) - (X_2 - X_1)}$$

$$t_b = T. \text{Log} \frac{2X_a + \Delta X}{2X_a - \Delta X}$$

$$t_b = T. \text{Log} \frac{1 + \frac{\Delta X}{2X_a}}{1 - \frac{\Delta X}{2X_a}}$$

$$1 + \frac{\Delta X}{2(X_m - X_a)}$$

Log

$$1 - \frac{\Delta X}{2(X_m - X_a)}$$

d =

$$\text{Log} \frac{1 + \frac{\Delta X}{2(X_m - X_a)}}{1 - \frac{\Delta X}{2(X_m - X_a)}} + \text{Log} \frac{1 + \frac{\Delta X}{2X_a}}{1 - \frac{\Delta X}{2X_a}}$$

En utilisant le résultat mathématique $\text{argth} y = \frac{1}{2} \text{Log} \frac{1+y}{1-y}$

avec $-1 < y < 1$ on aboutit à l'expression :

$$d = \frac{\text{argth} \left\{ \frac{\Delta X}{2(X_m - X_a)} \right\}}{\text{argth} \left\{ \frac{\Delta X}{2(X_m - X_a)} \right\}} = \text{argth} \left\{ \frac{\Delta X}{2X_a} \right\} \quad (4.6)$$

$$\text{avec } 0 < \frac{\Delta X}{2(X_m - X_a)} < 1 \quad \text{et} \quad 0 < \frac{\Delta X}{2X_a} < 1$$

$$t_a + t_b = T \cdot \left[\text{Log} \frac{1 + \frac{\Delta X}{2(X_m - X_a)}}{1 - \frac{\Delta X}{2(X_m - X_a)}} + \text{Log} \frac{1 + \frac{\Delta X}{2 X_a}}{1 - \frac{\Delta X}{2 X_a}} \right]$$

$$t_a + t_b = T \cdot \text{Log} \frac{\left\{ 1 + \frac{\Delta X}{2(X_m - X_a)} \right\} \cdot \left\{ 1 + \frac{\Delta X}{2 X_a} \right\}}{\left\{ 1 - \frac{\Delta X}{2(X_m - X_a)} \right\} \cdot \left\{ 1 - \frac{\Delta X}{2 X_a} \right\}}$$

$$t_a + t_b = T \cdot \text{Log} \frac{1 + \frac{(\Delta X)^2}{4 X_a (X_m - X_a)} + \frac{2 X_m \Delta X}{4 X_a (X_m - X_a)}}{1 + \frac{(\Delta X)^2}{4 X_a (X_m - X_a)} - \frac{2 X_m \Delta X}{4 X_a (X_m - X_a)}}$$

$$t_a + t_b = T \cdot \text{Log} \frac{4 X_a (X_m - X_a) + (\Delta X)^2 \left\{ 1 + \frac{2 X_m \Delta X}{4 X_a (X_m - X_a) + (\Delta X)^2} \right\}}{4 X_a (X_m - X_a) + (\Delta X)^2 \left\{ 1 - \frac{2 X_m \Delta X}{4 X_a (X_m - X_a) + (\Delta X)^2} \right\}}$$

$$t_a + t_b = T \cdot \text{Log} \frac{1 + \frac{\frac{\Delta X}{X_m}}{\frac{2 X_a}{X_m} \left(1 - \frac{X_a}{X_m} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta X}{X_m} \right)^2}}{1 - \frac{\frac{\Delta X}{X_m}}{\frac{2 X_a}{X_m} \left(1 - \frac{X_a}{X_m} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta X}{X_m} \right)^2}} \quad (4.7)$$

Les expressions (4.6) et (4.7) donnent la valeur moyenne d et la période d'oscillation en fonction de $\frac{\Delta X}{X_m}$ et $\frac{X_a}{X_m}$

Calcul de la fréquence d'oscillation :

Pour déterminer la fréquence maximale d'oscillation, on dérive l'expression 4.7. par rapport à X_a .

$$\frac{t_a + t_b}{T} = 2 \operatorname{argth} \frac{\frac{\Delta X}{X_m}}{\frac{2 X_a}{X_m} \left(1 - \frac{X_a}{X_m} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta X}{X_m} \right)^2}$$

Posons $u = \frac{\frac{\Delta X}{X_m}}{\frac{2 X_a}{X_m} \left(1 - \frac{X_a}{X_m}\right) + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta X}{X_m}\right)^2}$

$$\frac{\partial}{\partial X_a} \operatorname{argth} u = \frac{1}{1-u^2} \cdot \frac{\left(\frac{4 X_a}{X_m^2} - \frac{2}{X_m}\right) \frac{\Delta X}{X_m}}{\left[\frac{2 X_a}{X_m} \left(1 - \frac{X_a}{X_m}\right) + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta X}{X_m}\right)^2\right]^2}$$

Condition nécessaire : $\frac{\partial}{\partial X_a} (\operatorname{argth} u) = 0 = \frac{4 X_a}{X_m^2} = \frac{1}{2}$

Condition suffisante : $\frac{\partial^2}{\partial X_a^2} (\operatorname{argth} u) = \frac{4}{X_m^2} \left(\frac{u^2}{1-u^2}\right) + \frac{2u}{1-u^2} \left(\frac{4 X_a}{X_m} - \frac{2}{X_m}\right) \frac{1}{\frac{\Delta X}{X_m}}$

- Au point $X_a = \frac{1}{2} X_m$

$$\frac{\partial^2}{\partial X_a^2} (\operatorname{argth} u) = \frac{4}{X_m^2} \left(\frac{u^2}{1-u^2}\right) \cdot \frac{1}{\frac{\Delta X}{X_m}}$$

$$u^2 = \frac{4 \left(\frac{\Delta X}{X_m}\right)^2}{\left[1 + \left(\frac{\Delta X}{X_m}\right)^2\right]^2} < 1$$

$$\Rightarrow \frac{u^2}{1-u^2} < 1$$

La dérivée seconde est positive donc on a un minimum pour

$$X_a = \frac{1}{2} X_m$$

$$\left(\frac{t_a + t_b}{T} \right)_{\min.} = \text{Log} \frac{1 + 2 \frac{\Delta X}{X_m}}{1 - 2 \frac{\Delta X}{X_m}}$$

$$\frac{X}{X_m} \ll 1 \Rightarrow \left(1 + \frac{\Delta X}{X_m} \right)^2 \approx 1 + 2 \frac{\Delta X}{X_m}$$

$$\left(1 - \frac{\Delta X}{X_m} \right)^2 \approx 1 - 2 \frac{\Delta X}{X_m}$$

$$\left(\frac{t_a + t_b}{T} \right)_{\min} \approx \text{Log} \left(\frac{1 + \frac{\Delta X}{X_m}}{1 - \frac{\Delta X}{X_m}} \right)^2 = 2 \text{Log} \frac{1 + \frac{\Delta X}{X_m}}{1 - \frac{\Delta X}{X_m}}$$

$$\Rightarrow \left(\frac{T}{t_a + t_b} \right)_{\max} = \frac{1}{2 \text{Log} \frac{1 + \frac{\Delta X}{X_m}}{1 - \frac{\Delta X}{X_m}}} = \frac{1}{4 \text{argth} \frac{\Delta X}{X_m}} \quad (4.8)$$

Pour $X_a = \frac{1}{2} X_m$ $d = \frac{1}{2}$

- Dans le cas où $\frac{\Delta X}{X_m} \leq 0,1$ et $0,1 \leq \frac{t_a}{t_a + t_b} \leq 0,99$

On peut déterminer la fréquence d'oscillation à partir de l'expression

$$\frac{T}{t_a + t_b} \approx \frac{d(1-d)}{\frac{\Delta X}{X_m}} = \frac{d(1-d)}{h + \frac{T_0}{T}} \quad (4.9)$$

Les formules (4.8) et (4.9) montrent que la diminution de la valeur $\frac{\Delta X}{X_m}$ correspond à l'augmentation de la fréquence d'oscillation.

Pour déterminer la qualité du système à l'état stable, il faut déterminer la valeur moyenne du signal de sortie \bar{X} et l'écart $\bar{E} = X_0 - \bar{X}$.

En principe la valeur moyenne n'est pas confondue avec X_a (fig 4.3) et on doit la déterminer à partir de la formule (4.6). Dans le cas où $\frac{X_a}{X_m}$ n'est pas trop proche des valeurs limites $\frac{\Delta X}{2 X_m}$ ou $\left(\frac{1 - \frac{\Delta X}{X_m}}{2} \right)$

alors on peut écrire que $\bar{X} \approx X_a$

$$\frac{\bar{E}}{X_m} = \frac{X_0}{X_m} - \frac{\bar{X}}{X_m} \approx \frac{X_0}{X_m} - \frac{X_a}{X_m} = \frac{X_0}{X_m} - \frac{X_0}{M_m} e^{-\frac{T_0}{T}} - \frac{1}{2} \left(1 - e^{-\frac{T_0}{T}} \right)$$

$$\frac{\bar{E}}{X_m} \approx \left(\frac{X_0}{X_m} - \frac{1}{2} \right) \left(1 - e^{-\frac{T_0}{T}} \right) \quad (4.10)$$

La relation (4.10) montre que l'écart moyen ne dépend que de $\frac{T_0}{T}$ du processus.

Le facteur le plus important est la pente q de $\bar{E} = f(X_0)$

$$\bar{E} = \left(X_0 - \frac{1}{2} X_m \right) \left(1 - e^{-\frac{T_0}{T}} \right)$$

$$q = 1 - e^{-\frac{T_0}{T}}$$

La grandeur q caractérise l'influence des perturbations sur les valeurs moyennes \bar{X} et \bar{E}

L'indice de régulation q ne dépend que de $\frac{T_0}{T}$ du processus.

CHAPITRE 5. -

CHOIX ET MISE AU POINT DES REGULATEURS

5.1. - REGULATEUR ELECTRONIQUE AUTO ADAPTATIF A 2 POSITIONS
AVEC VARIATION DES COEFFICIENTS D'AMPLIFICATION EN
ESCALIER EN FONCTION DES PERTURBATIONS /

En régulation "tout ou rien" on ne peut avoir la propriété P.I. à cause de l'action I qui donne une commande quasi-continue. On aura donc que des régulateurs "tout ou rien" P, P.D et P.I.D. Pour la régulation de processus du type :

$$Kobj \frac{e^{-Tos}}{1 + TS}$$
, l'action I est nécessaire, alors on optera pour la propriété P.I.D.

On proposera dans ce chapitre le schéma de principe d'un régulateur électronique à 2 positions et ferons son analyse.

5.1.1. - Principe de fonctionnement :

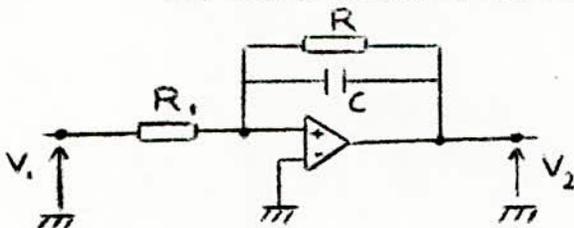
Le régulateur dont le schéma de principe est celui de la fig(5.1) se compose des parties suivantes :

- un circuit de mesure : c'est un pont de wheastone qui sert à former l'écart (E) entre la consigne et la grandeur réglée (température de l'air recyclé). R1 et R2 sont des résistances fixes; R3 est une résistance variable pour l'affichage de la consigne et R4 est une résistance variable avec la température et représente la grandeur réglée (elle est placée dans la gaine d'air recyclé). On montre que

$$E = \frac{R4 - R3}{R4 + R3} \cdot \frac{Vcc}{2} \quad (\text{avec } R1 = R2)$$

- un amplificateur de faibles niveaux.
- un relais à 3 contacts (avec en parallèle une diode de "décharge" pour éviter les arcs et ménager les contacts).
- un circuit d'asservissement (compensation):cet asservissement est constitué de 2 branches qui comprennent chacune :

* une contre-réaction inertielle :



$$\frac{V2}{V1} = - \frac{R}{R1} \left(\frac{1}{1 + RCS} \right) = \frac{A}{1 + T.S}$$

* une première série de résistances d'intégration Rp1,... Rpn mises en court-circuit par lesrelais des thermostats extérieurs et une deuxième serie de résistances Rs1, Rs10 mises en court-circuit par les thermostats des compartiments. En plus de leur rôle de sommateur d'impulsions, ces résistances jouent le rôle de coefficients d'amplification; en effet plus le nombre de ces résistances court-circuitées augmente, plus la tension du signal de correction (V1 ou V2) augmente. Il est à remarquer que dans ce cas, les 2 coefficients d'mplification Kz (θintérieur) et Kw (θextérieur) varient en escalier.

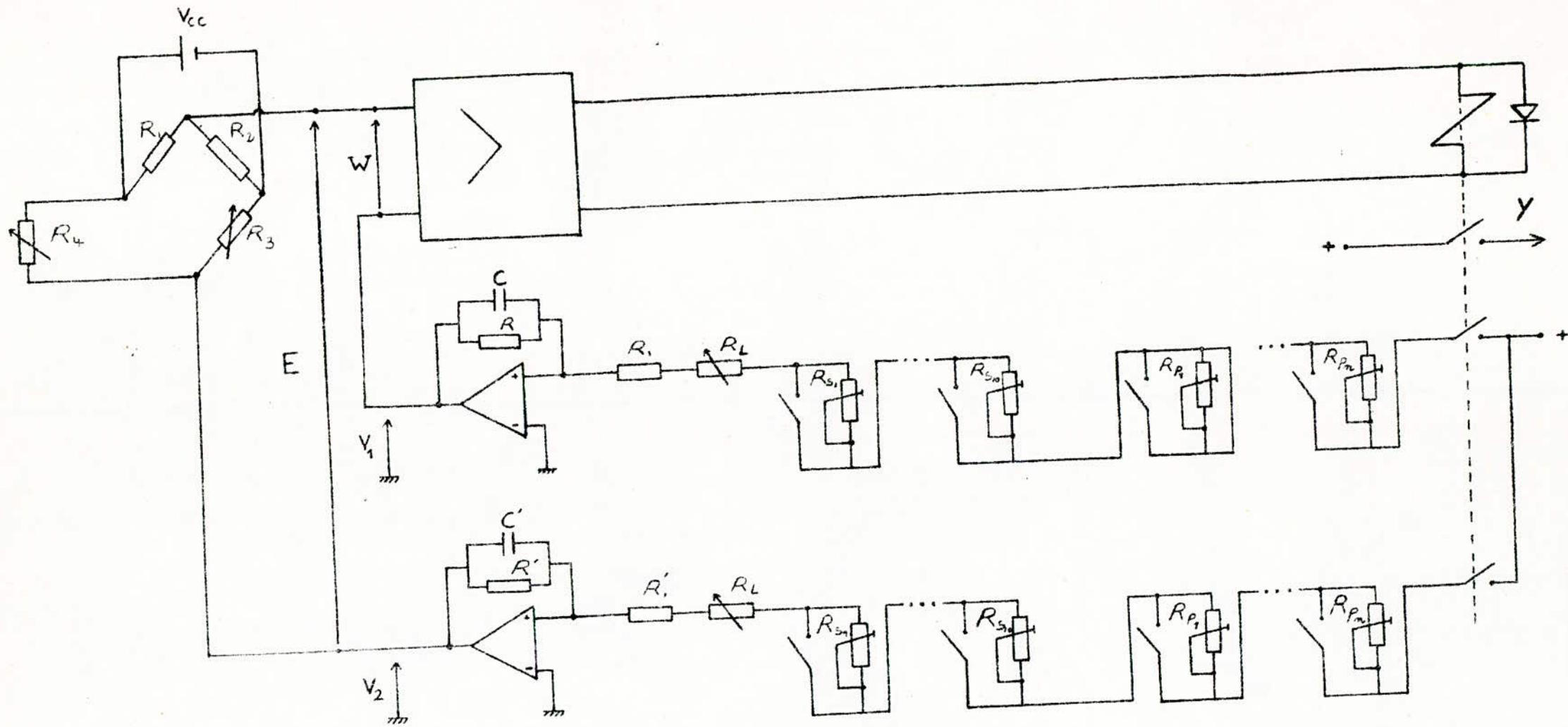


Fig 5.1 - Schéma de principe du régulateur électronique auto-adaptatif à 2 positions avec variation en escalier des coefficients d'amplification $K_w(\theta_e)$ et $K_z(\theta_i)$ en fonction des perturbations extérieures et intérieures.

5.1.2. - Analyse du système de régulation :

Le schéma fonctionnel est représenté sur la fig. (5.2)

Dans ce système de régulation, les oscillations des signaux V1, V2 et V peuvent être considérées comme indépendantes du processus, et elles apparaissent si le signal d'entrée (E) varie lentement, et si sa valeur est suffisamment petite pour que le signal de compensation V puisse la corriger. (fig. 5.3)

En outre, grâce à une grande fréquence d'oscillation, la grandeur réglée dépend de la valeur moyenne du signal de commande

$$Y \left(\bar{Y} = \frac{t_a}{t_a + t_b} \right)$$

. Ecrivons y sous la forme suivante :

$$Y = \begin{cases} Y_a = 1 & \text{pendant le temps d'enclenchement } t_a \\ Y_b = 0 & \text{pendant le temps de déclenchement } t_b \end{cases}$$

. Faisons les hypothèses suivantes :(pour tout ce qui suivra).

1. - E et $\frac{dE}{dt}$ varie de manière négligeable pendant une période d'oscillation.
2. - $K_w (\theta_e)$ est constant pendant une période d'oscillation ($t_a + t_b = 2 \div 4$ mn), et K_w varie en escalier tous les $\Delta \theta_e = 3 \div 5^\circ C$.
3. - La largeur d'hysteresis (h) est beaucoup plus petite que la zone de variation de l'écart E, qui lui-même est beaucoup plus petit que la valeur maximale du signal de contre-réaction ($KY_a = K$, $Y_a = 1$)
4. - Supposons $T_2 > T_1$, le signal d'entrée du relais W doit être compris entre $(-\frac{h}{2})$ et $(\frac{h}{2})$. Les variations de W étant petites, on peut écrire pendant une période d'oscillation $\bar{W} = \bar{W}_a$ et $\bar{W} = \bar{W}_b$

Aussi on a toujours $\bar{W}_a = t_a \bar{W}_a$ et $\bar{W}_b = t_b \bar{W}_b$

De plus $\bar{W} = h$; ce qui nous permet de calculer t_a et t_b

* pendant l'intervalle de temps d'enclenchement t_a ,

$$\begin{aligned} \text{on a } h &= t_a (\bar{W})_a \\ &= t_a = \frac{h}{(\bar{W})_a} \end{aligned}$$

* pendant l'intervalle de temps de déclenchement t_b ,

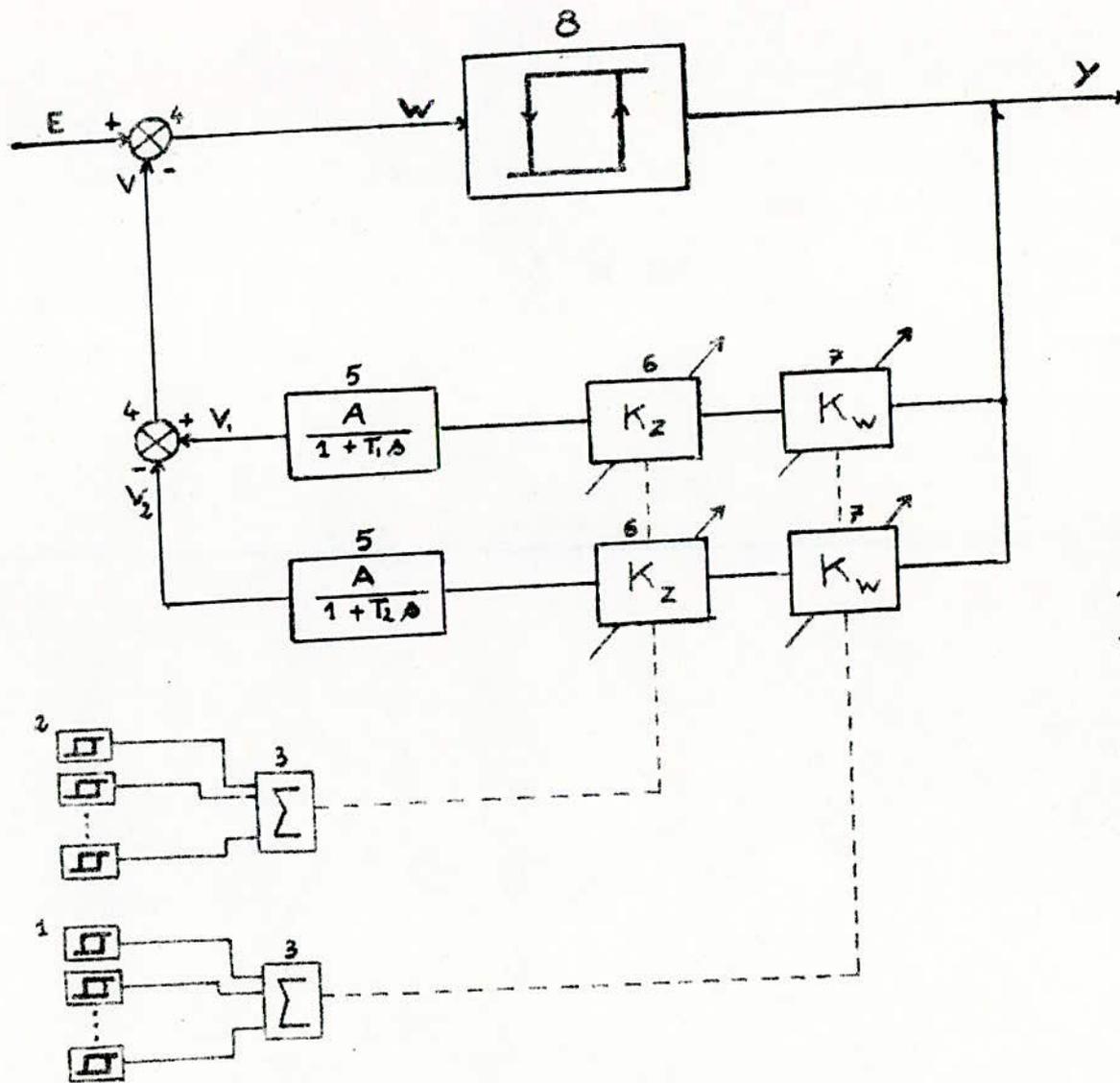
$$\begin{aligned} \text{on a } h &= - t_b (\bar{W})_b \left(\frac{dW}{dt} < 0 \right) \\ &= t_b = \frac{h}{-(\bar{W})_b} \end{aligned}$$

L'analyse du parcours de la fig (5.3) donne :

* pendant le temps d'enclenchement t_a :

$$V1a = X1 + (K - X1) \left(1 - e^{-\frac{t}{T1}} \right) = K - (K - X1) \left(1 - e^{-\frac{t}{T1}} \right)$$

$$\dot{V}1a = \frac{1}{T1} (K - X1) \left(1 - e^{-\frac{t}{T1}} \right)$$



- 1 : thermostat à contact extérieur
- 2 : thermostat à contact intérieur
- 3 : système de résistances d'intégration
- 4 : comparateur
- 5 : contre réaction inertielle
- 6 : contre réaction dont le coefficient d'amplification varie en escalier en fonction des perturbations intérieures.
- 7 : contre réaction dont le coefficient d'amplification varie en escalier en fonction des perturbations extérieures.
- 8 : relais

Fig 5.2 - Schéma fonctionnel du système de régulation

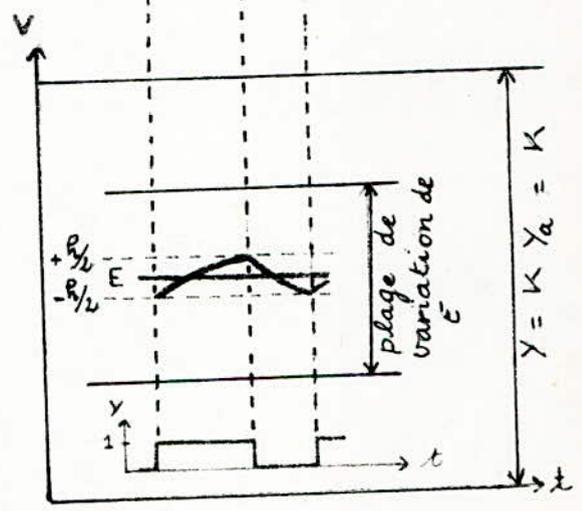
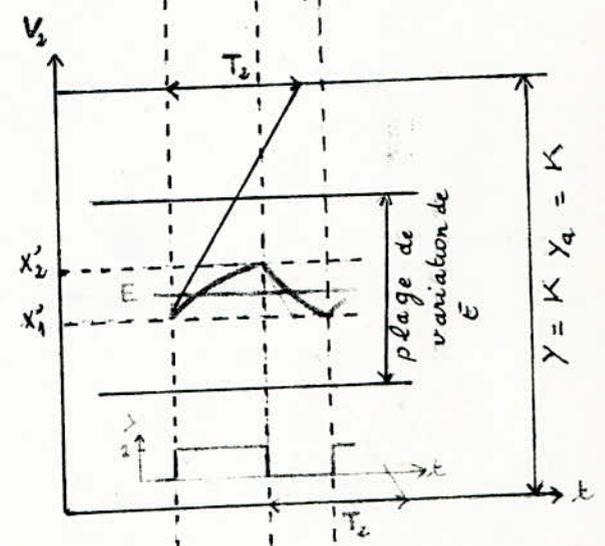
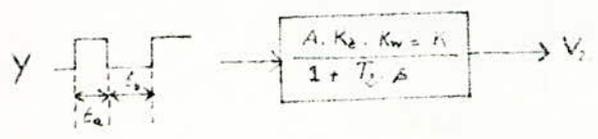
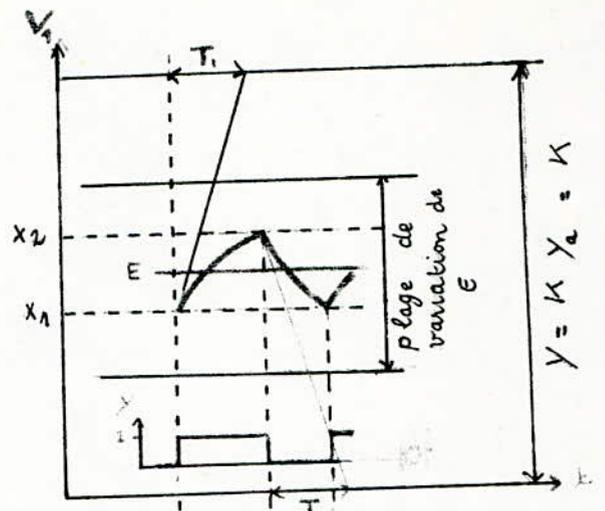
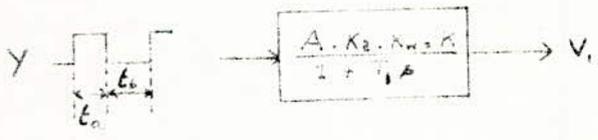
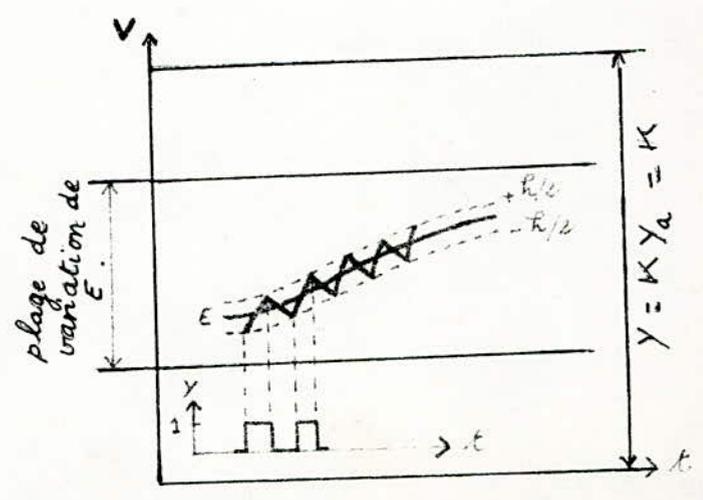


Fig 5.3. Parcours de V_1 , V_2 et V



$$\text{donc } \dot{V}1a = \frac{K - V1a}{T1}$$

* pendant le temps de déclenchement t_b :

$$V1b = X2 e^{-\frac{t}{T1}}$$

$$\dot{V}1b = -\frac{1}{T1} X2 e^{-\frac{t}{T1}}$$

$$\text{donc } \dot{V}1b = -\frac{V1b}{T1}$$

Les variations de $V1$ étant petites, on peut écrire, pendant une période d'oscillation, les relations suivantes :

$$\bar{V}1a = \bar{V}1 \quad \text{et} \quad \bar{V}1b = \bar{V}1$$

$$\dot{\bar{V}}1a = \frac{K - \bar{V}1}{T1} \quad \text{et} \quad \dot{\bar{V}}1b = -\frac{\bar{V}1}{T1}$$

En procédant de la même manière pour $V2$, on obtient finalement le système d'équation suivant :

$$\begin{aligned} \dot{\bar{V}}1a &= \frac{K - \bar{V}1}{T1} & \dot{\bar{V}}1b &= -\frac{\bar{V}1}{T1} \\ \dot{\bar{V}}2a &= \frac{K - \bar{V}2}{T2} & \dot{\bar{V}}2b &= -\frac{\bar{V}2}{T2} \end{aligned} \quad (5.1)$$

$$\text{on a } W = E - V = E - (V1 - V2) = E + V2 - V1$$

$$\text{alors : } \dot{\bar{W}}a = \dot{E} + \dot{\bar{V}}2a - \dot{\bar{V}}1a$$

$$\dot{\bar{W}}a = \dot{E} + \frac{K - \bar{V}2}{T2} - \frac{K - \bar{V}1}{T1} \quad (5.2)$$

$$\text{de même : } \dot{\bar{W}}b = \dot{E} + \frac{\bar{V}1}{T1} - \frac{\bar{V}2}{T2} \quad (5.3)$$

On détermine alors t_a et t_b :

$$t_a = \frac{h}{-K \frac{T2 - T1}{T1 T2} + \frac{T2 \bar{V}1 - T1 \bar{V}2}{T1 T2} + \dot{E}}$$

$$t_a = \frac{h}{-K \frac{T2 - T1}{T1 T2} + \frac{T1 + T2}{T1 T2} (\bar{V}1 - \bar{V}2) + \frac{T2 \bar{V}2 - T1 \bar{V}1}{T1 T2} + \dot{E}} \quad (5.4)$$

$$t_b = -\frac{h}{\frac{T2 \bar{V}1 - T1 \bar{V}2}{T1 T2} + \dot{E}} = -\frac{h}{\frac{T1 + T2}{T1 T2} (\bar{V}1 - \bar{V}2) + \frac{T2 \bar{V}2 - T1 \bar{V}1}{T1 T2} + \dot{E}} \quad (5.5)$$

On a alors : $\bar{Y} = \frac{ta}{ta + tb}$

$$\bar{Y} = \frac{1}{K} \frac{T1 T2}{T2 - T1} \left(\dot{E} + \frac{T2 \bar{V}1 - T1 \bar{V}2}{T1 T2} \right)$$

$$\bar{Y} = \frac{1}{K} \frac{T1 + T2}{T2 - T1} \left(\frac{T1 T2}{T1 + T2} \dot{E} + \bar{V}1 - \bar{V}2 + \frac{T2 \bar{V}2 - T1 \bar{V}1}{T1 + T2} \right) \quad (5.6)$$

Selon Botchera (2) et Wierbickiego (7), on peut supposer que :

$$\bar{V} = \bar{V}1 - \bar{V}2$$

et $T2 \bar{V}2 - T1 \bar{V}1 = \int \bar{V} dt$

De plus :

$$\begin{aligned} \bar{V} &= \bar{E} \text{ (d'après l'hypothèse 3)} \\ \text{et } \bar{V} &= E \text{ (d'après l'hypothèse 1)} \end{aligned}$$

Dans ce cas, on a :

$$ta = \frac{h}{K \frac{T2 - T1}{T1 T2} - \left(\frac{dE}{dt} + \frac{T1 + T2}{T1 T2} E + \frac{1}{T1 T2} \int E dt \right)} \quad (5.7)$$

$$tb = \frac{h}{\frac{dE}{dt} + \frac{T1 + T2}{T1 T2} E + \frac{1}{T1 T2} \int E dt} \quad (5.8)$$

enfin : $\bar{Y} = \frac{1}{K} \frac{T1 + T2}{T2 - T1} \left(E + \frac{1}{T1 + T2} \int E dt + \frac{T1 T2}{T1 + T2} \frac{dE}{dt} \right)$

$$\bar{Y} = Kp \left(E + \frac{1}{Ti} \int E dt + Td \frac{dE}{dt} \right) \quad (5.9)$$

Conclusion :

Par rapport aux valeurs moyennes et pour les hypothèses faites, le régulateur a une action P.I.D

On remarque que Kp, Ti et Td dépendent de T1 et T2. Si K était constant, un choix de 2 paramètres dynamiques imposerait le troisième. Pour notre cas, on choisira Ti et Td, et Kp variera entre deux limites grâce à Kz (θ_i) et Kw (θ_e).

Des formules (5.7); (5.8) et (5.9) on peut déduire la fréquence d'oscillation :

$$F_{osc} = \frac{1}{ta + tb} = \frac{\bar{Y} (1 - \bar{Y})}{h Kp Td}$$

La fréquence d'oscillation dépend de l'hysteresis (h), de la mise au point du régulateur et de la valeur moyenne (\bar{Y}).

La fréquence maximale est obtenue par $\bar{Y} = \frac{1}{2}$

$$\left(\frac{1}{ta + tb} \right)_{max} = \frac{1}{4 h Kp Td}$$

On pourra aussi augmenter la fréquence d'oscillation, en diminuant la largeur d'hysteresis, mais une fréquence trop grande accélère le degré d'usure des contacts; de même qu'une fréquence trop petite donne de grandes amplitudes pour les oscillations de la grandeur réglée.

5.1.3. - Mise au point du régulateur :

Pour qu'un régulateur corrige la grandeur à régler et la porte d'une valeur θ_0 , à une valeur θ_1 , il lui faut un certain temps appelé temps de régulateur (t_r). un régulateur a soit :

- une réponse apériodique.
- ou une réponse transitoire.

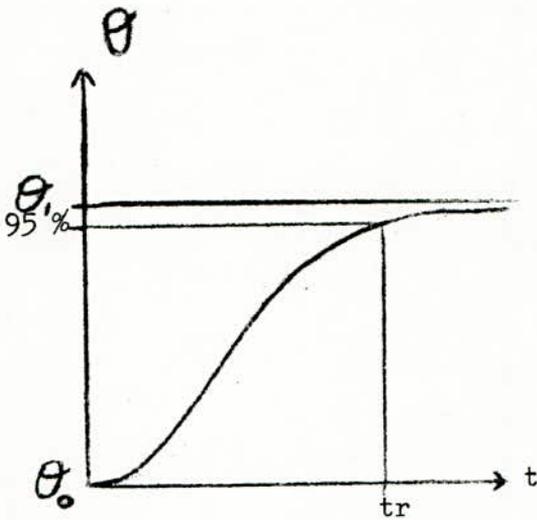


Fig. 5.4 a - Réponse apériodique

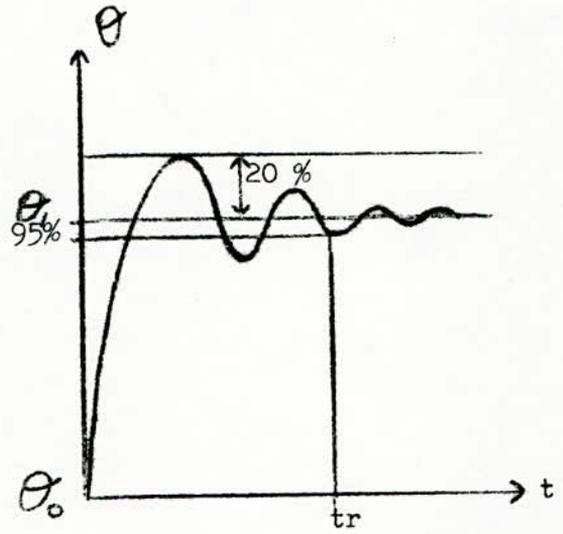


Fig 5.4 b Réponse transitoire avec 20 % d'amplitude maximale.

On choisira un régulateur à réponse transitoire avec 20 % d'amplitude maximale, qui répond aux 2 critères d'optimisation:

- minimisation du temps de réponse.
- minimisation du coefficient d'amortissement.

Pour une mise au point optimale du régulateur, on utilisera la caractéristique de la fig (5.5) (obtenue par ordinateur), relative au processus du type :

$$\frac{K_{obj.} e^{-Tos}}{1 + Ts}$$

Selon certaines revues spécialisées, le quotient $\frac{T_o}{T}$ de notre processus variait de 0,24 à 0,11 quand la température extérieure variait de + 2°C à 18°C et les paramètres du processus sont les suivants :

- $T_o = 80s$
- (K_{obj}) max. = 1,08 °C/KW
- (K_{obj}) min. = 0,8°C/KW

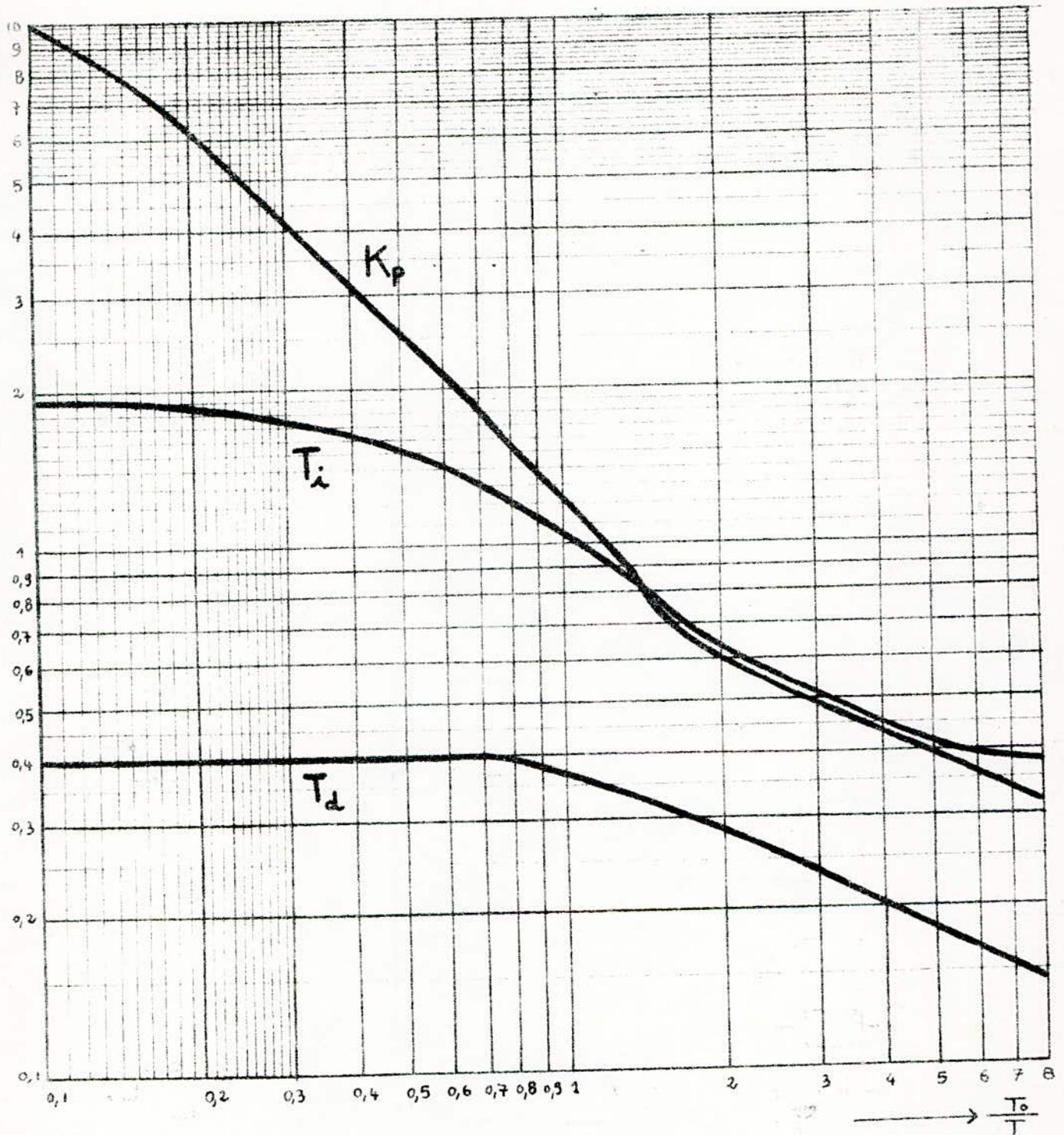


Fig 5.5 - Mise au point optimale du régulateur PID avec 20% d'amplitude maximale.

* Pour $\frac{T_o}{T} = 0,11$ on a = $K_p = 9,4$
 $T_i = 152 \text{ s}$
 $T_d = 32 \text{ s}$

* Pour $\frac{T_o}{T} = 0,24$: $K_p = 5,2$
 $T_i = 144 \text{ s}$
 $T_d = 32 \text{ s}$

On aurait pu prévoir dans le système une variation auto adaptative de T_i , mais puisque K_p suit déjà les variations des perturbations, cette action ne s'avère pas indispensable et compliquerait le système, on prendra alors la valeur moyenne de $T_i = 148 \text{ s}$.

Donc la mise au point du régulateur est caractérisée par les valeurs suivantes des paramètres dynamiques K_p , T_i , et T_d .

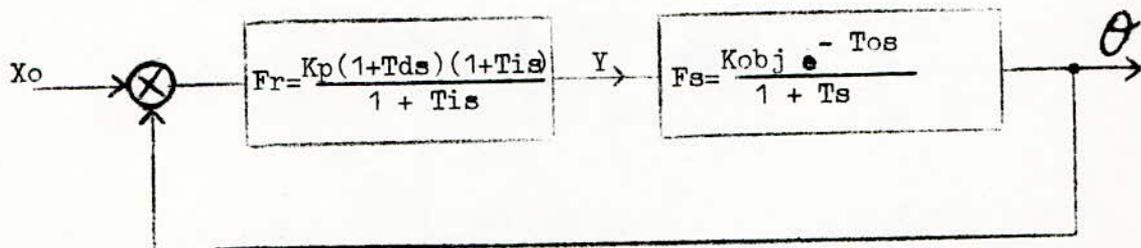
$$5,2 \leq K_p \leq 9,4$$

$$T_d = 32 \text{ s}$$

$$T_i = 148 \text{ s}$$

5.1.4. - Etude de la stabilité :

. Le fait d'avoir déterminé une action P.I.D; vis à vis des signaux moyens, notre système peut être approximé à un système linéaire:



Système avec régulateur P.I.D

On vérifiera la stabilité de notre système par la méthode de Nyquist.

Le gain en boucle ouverte : $\frac{To.S}{1 + T.S}$

$$Fr Fs = \frac{(1 + Td.S)(1 + Ti.S)}{1 + Ti.S} K_{obj} \frac{e^{-To.S}}{1 + T.S}$$

$$|Fr Fs| = K_p K_{obj} \frac{\sqrt{1 + (Ti.W)^2} \cdot \sqrt{1 + (Td.W)^2}}{Ti.W \sqrt{1 + (T.W)^2}}$$

$$= -W.To + \arctg(Ti.W) + \arctg(Td.W) - \arctg(T.W) - \frac{\pi}{2}$$

On prendra $K_{obj} = (K_{obj})_{max}$ (cas le plus défavorable).

- pour $K_p = 9,4$ Fig. (5.6)

on a - une marge de gain = 29 %
 - une marge de phase = 24°

- pour $K_p = 5,2$ Fig. (5.7)

on a - une marge de gain = 15 %
 - une marge de phase = 18°

Conclusion :

Du fait que tous les calculs de la stabilité ont été faits pour $(K_{obj})_{max}$ qui représente le cas le plus défavorable ; en général les marges de gain et de phase seront plus importantes. Donc la stabilité de notre système est assurée.

$$\frac{T_0}{T} = 0,11$$

$$K_p = 9,4$$

WT	WTd	WTi	$\sqrt{1+(WTd)^2}$	$\sqrt{1+(WTi)^2}$	$\sqrt{1+(WT)^2}$	Kp.Kobj	Fr.Fs
0	0	0	1	1	1	10.15	
8	0,35	1,64	1.06	1.92	8.06	"	1.56
10	0,44	2.05	1.09	2.28	10.05	"	1.22
12	0.53	2.45	1.13	2.65	12.04	"	1.03
16	0.70	3.27	1.22	3.4	16.03	"	0.81
18	0.76	3.68	1.25	3.81	18.02	"	0.72
19	0.84	3.88	1.3	4	19.02	"	0.71
20	0.88	4.09	1.33	4.21	20.02	"	0.68
25	1.1	5.07	1.48	5.16	25.02	"	0.61
30	1.33	6.13	1.66	6.21	30.02	"	0.57
40	1.77	8.18	2.03	8.24	40	"	0.52
50	2.2	10.15	2.41	10.20	50	"	0.49
60	2.65	12.17	2.87	12.31	60	"	0.49
70	3.09	14.32	3.25	14.35	70	"	0.47
80	3.53	16.37	3.67	16.40	80	"	0.46
90	3.93	18.27	4.05	18.30	90	"	0.45
100	4.43	20.30	4.53	20.32	100	"	0.45
110	4.84	22.33	4.94	22.35	110	"	0.45
120	5.28	24.36	5.37	24.38	120	"	0.45
130	5.72	26.39	5.81	26.41	130	"	0.45
140	6.16	28.42	6.24	28.44	140	"	0.45
150	6.6	30.45	6.75	30.46	150	"	0.45

$$\frac{T_o}{T} = 0,11$$

$$K_p = 9,4$$

WT	- WTo	arctg WTd	arctg WTi	arctg WT	- $\frac{\Pi}{2}$	φ
0	0	0	0	0	- 90°	- 90°
8	- 50.42	19.29	58.56	- 82.87	"	-145.43
10	- 63.02	23.75	63.99	- 84.29	"	-149.16
12	- 75.63	27.92	67.79	- 85.24	"	-155.16
16	-100.84	35	73	- 86.4	"	-169.24
18	-113.44	37.23	74.79	- 86.82	"	-178.24
19	-119,74	40	75.54	- 86.98	"	-181.12
20	- 126	41.4	76.26	-87.13	"	-185.5
25	-157.56	47.72	78.84	-87.71	"	-208.71
30	-189.08	53.06	80.73	-88.09	"	-233.38
40	-252.10	60.53	83.03	-88.57	"	-287.11
50	-315.13	65.56	84.37	-88.75	"	-15°95
60	- 18.15	69.32	85.34	-89.04	"	-42.53
70	- 81.18	72.06	86.00	-89.18	"	-102.3
80	- 144	74.18	86.50	-89.28	"	-162.6
90	-207.23	75.73	86.87	-89.36	"	-223.99
100	-270.25	77.19	87.18	-89.43	"	-285.06
110	-333.29	78.33	87.43	-89.50	"	-347.03
120	- 36.3	79.25	87.49	-89.52	"	-22°08
130	- 99.33	80.08	87.83	-89.56	"	-110.98
140	-162.35	80.78	87.96	-89.58	"	-173.19
150	-225.38	81.38	88.12	-89.62	"	-235.5°

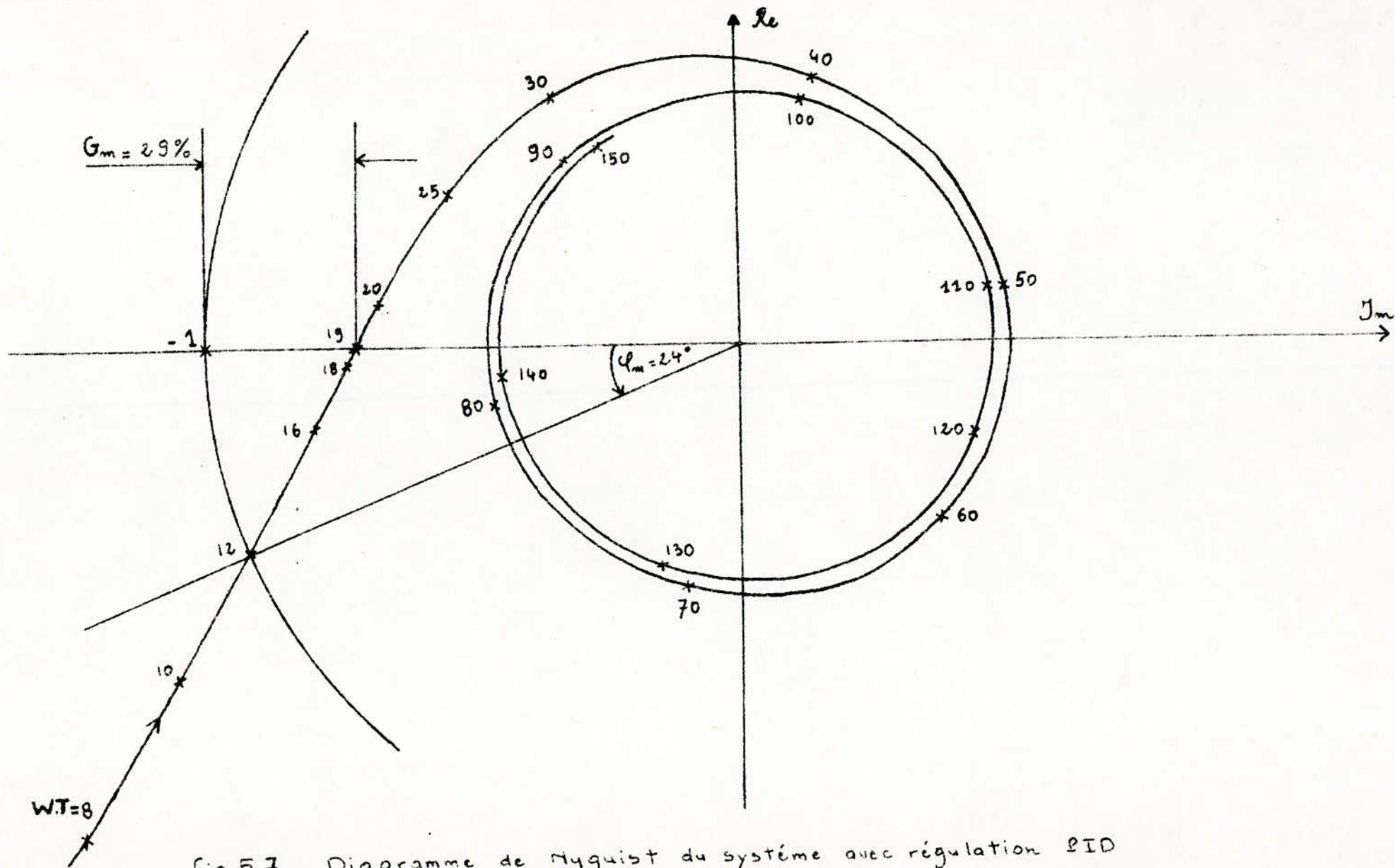


Fig 5.7 - Diagramme de Nyquist du système avec régulation PID
 pour : $\frac{T_0}{T} = 0,11$ ($K_F = 9,4$) .

$$\frac{I_0}{T} = 0,24$$

$$K_p = 5.2$$

WT	WTd	WTi	$\sqrt{1+(WTd)^2}$	$\sqrt{1+(WTi)^2}$	$\sqrt{1+(WT)^2}$	Kp.Kobj	Fr.Fs
0	0	0	1	1	1	5.6	00
4	0.38	1.77	1.07	2.03	4.12	"	1.67
6	0.57	2.66	1.15	2.84	6.08	"	1.13
7	0.67	3.10	1.20	3.26	7.07	"	1
8	0.76	3.55	1.26	3.69	8.06	"	0.91
8,5	0.82	3.77	1.29	3.90	8.56	"	0.87
8,7	0.83	3.86	1.30	3.99	8.76	"	0.86
8,9	0.85	3.95	1.31	4.07	8.95	"	0.85
8,95	0.86	3.97	1.32	4.09	9	"	0.84
10	0.96	4.44	1.38	4.55	10.05	"	0.79
13	1.25	5.77	1.60	5.85	13.04	"	0.69
16	1.53	7.10	1.83	7.17	16	"	0.63
20	1.92	8.88	2.16	8.93	20	"	0.60
23	2.21	10.21	2.42	10.26	23.02	"	0.59
27	2.59	11.99	2.77	12.03	27.02	"	0.57
30	2.88	13.32	3.04	13.36	30.00	"	0.56
38	3.65	16.87	3.78	16.90	38	"	0.56
40	3.84	17.76	3.97	17.79	40	"	0.56
45	4.32	19.98	4.43	20.00	45	"	0.53
50	4.80	22.20	4.90	22.22	50	"	0.55
55	5.28	24.42	5.37	24.44	55	"	0.55
60	5.76	26.64	5.84	26.66	60	"	0.55
70	6.72	31.08	6.79	31.10	70	"	0.54

$$\frac{T_0}{T} = 0,24$$

$$K_p = 5.2$$

WT	-WT ₀	arctg WT _d	arctg WT _i	arctg WT	- $\frac{\pi}{2}$	φ
0	0	0	0	0	- 90°	- 90°
4	- 55	21	60.53	- 75.96	"	- 139.43
6	-82.50	29.68	69.40	- 80.54	"	- 153.96
7	-96.26	33.82	72.12	- 81.87	"	- 162.19
8	-110	37.23	74.26	- 82.87	"	- 171.31
8.5	-116.26	39.21	75.14	- 83.23	"	- 175.76
8.7	-119.63	39.69	75.47	- 83.44	"	- 177.91
8.9	-122.07	40.51	75.64	- 83.58	"	- 179.81
8.95	-123.07	40.66	75.86	- 83.62	"	- 180.17
10	-137.51	43.83	77.31	- 84.29	"	- 190.66
13	-178.76	51.34	80.16	- 85.60	"	- 221.87
16	-200.00	56.83	81.98	- 86.42	"	- 257.00
20	-275.01	62.48	83.57	- 87.14	"	- 306.1
23	-316.27	65.65	84.41	- 87.51	"	- 343.72
27	-371.27	68.89	85.23	- 87.88	"	- 35.03
30	- 52.52	70.85	85.71	88.09	"	- 77.05
38	-162.54	74.68	86.61	- 88.49	"	- 179.74
40	-190.04	75.4	86.78	- 88.56	"	- 206.42
45	-258.79	76.96	87.13	- 88.72	"	- 273.42
50	-327.59	78.23	87.42	- 88.85	"	- 340.75
55	- 36.30	79.27	87.65	- 88.96	"	- 48.34
60	-105.06	80.15	87.85	- 89.04	"	- 116.10
70	-242.56	81.53	88.16	- 89.16	"	- 252.06

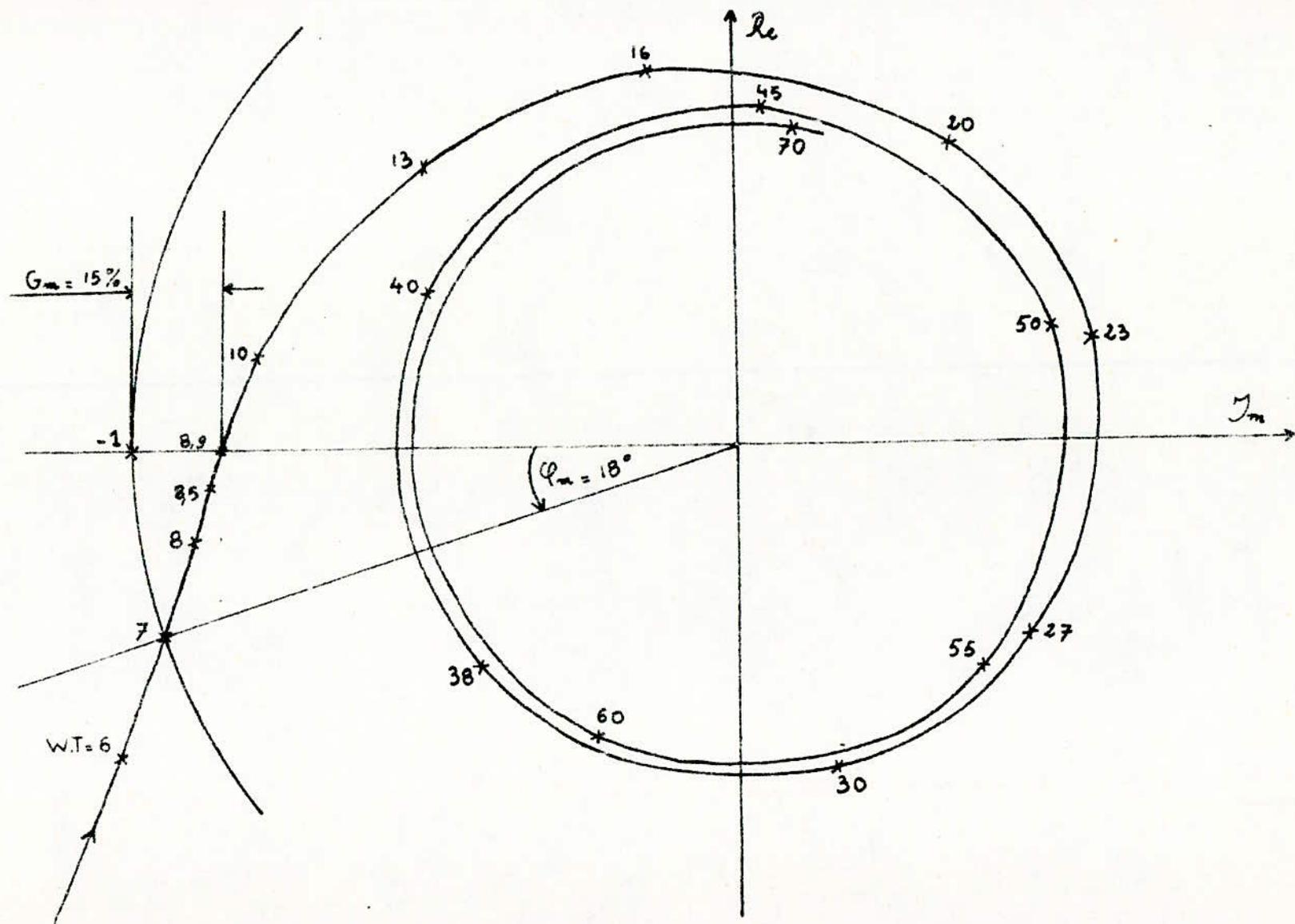


Fig 5.6 = Diagramme de Nyquist du système avec régulation PID
 pour $\frac{T_0}{T} = 0,24$ ($K_E = 5,4$)

5.2. - REGULATEUR ELECTRIQUE AUTO-ADAPTATIF AVEC VARIATION CONTINUE
DU COEFFICIENT D'AMPLIFICATION EN FONCTION DE LA TEMPERATURE
EXTERIEURE /

5.2.1. - Principe de fonctionnement :

Le relais contient le bimetal de service (13) avec la résistance de chauffe (14), isolée du bimetal par des lamelles de micanite. Une petite butée fixée à l'extrémité du bimetal de service appuie sur le poussoir du micro-connecteur (6) au moment de l'écartement du bimetal. Le micro-connecteur (6) est solidaire de l'extrémité du bimetal de compensation (5), qui rend le fonctionnement du régulateur indépendant de la température ambiante. Le bimetal (5) repose sur un palier rotatif et est solidaire du levier, à l'extrémité duquel est fixé le ressort de tension. La tension de ce ressort peut être modifiée en agissant sur le bouton de la vis de tension (4). La vis de tension, ainsi que l'écrou sont montés sur le bati du régulateur. Le levier du bimetal de compensation est actionné, outre le ressort de tension, par le poussoir à aiguilles à longueur variable. La 2^e extrémité du poussoir est logée dans le siège du segment, qui est solidaire de l'extrémité du ressort spiral (3), qui termine le capillaire du palpeur du thermomètre manométrique (1).

Le palpeur du thermomètre manométrique (1) est placé partiellement à l'intérieur du canal par lequel passe le mélange d'air (extérieur et circuit) et partiellement à l'extérieur du canal dans le coffret (2), comportant une fente et une membrane réglable permettant de modifier l'influence des conditions extérieures (vitesse de traction et température de l'air extérieur) sur le fonctionnement du régulateur.

Le circuit électrique peut être alimenté par une source de courant continu ou alternatif (17 - 26 V).

Le circuit d'alimentation comporte deux varistances (7) connectées en parallèle et rendant la valeur du courant dans le circuit indépendante des variations de la tension d'alimentation et de la résistance du circuit.

Le circuit électrique comporte deux dérivations parallèles : la résistance de chauffe (14) et la résistance auxiliaire (9), court-circuitée par les contacts (8) du relais du régulateur, sont connectées dans la première dérivation, alors que dans la deuxième dérivation sont connectées : la résistance de réglage (10) et une série de résistances (12) montées en parallèle avec cette dernière; les résistances (12) sont insérées dans le circuit par les contacts des relais (11) des thermomètres à contact des compartiments. La valeur totale du courant dans le circuit est approximativement constante, alors que la répartition de ce courant est variable et

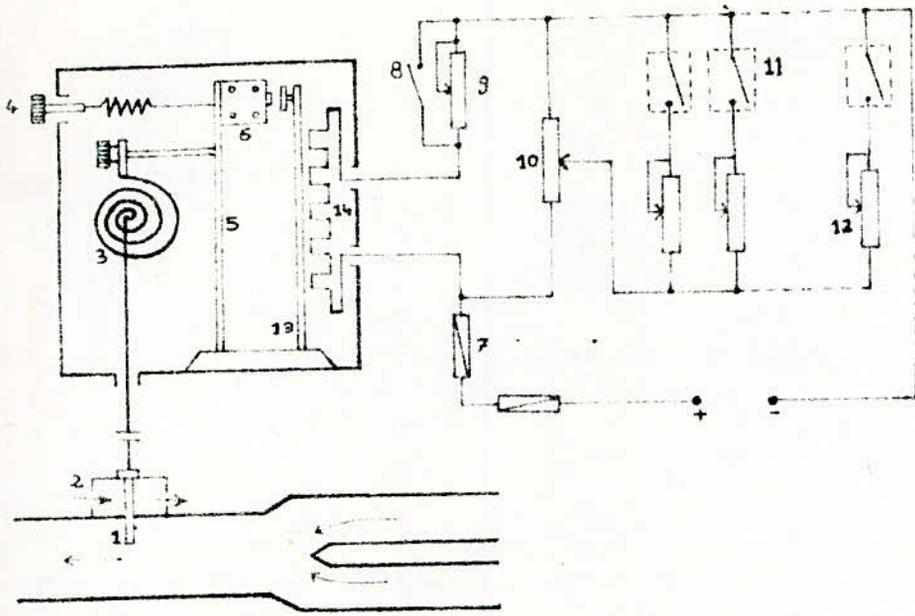
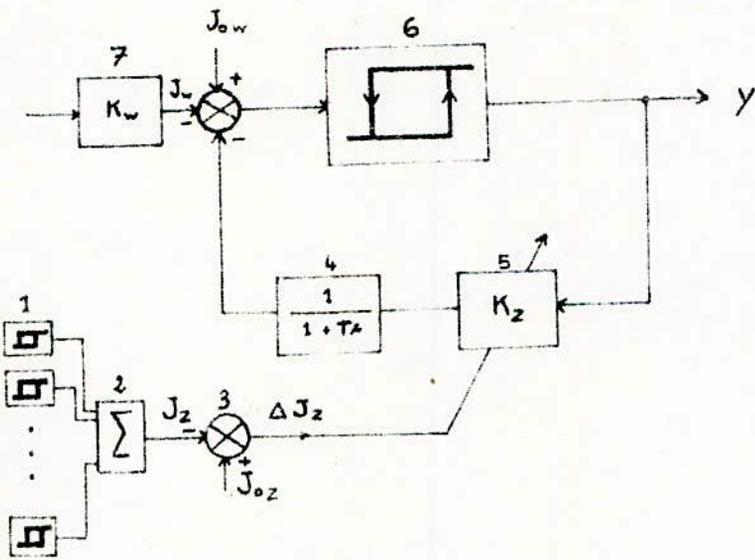


Fig 5.8 - Regulateur électrique auto-adaptatif à 2 positions avec variation continue du coefficient d'amplification $K_w(\theta_e)$ en fonction des perturbations extérieures.



- 1 : thermostats à contact intérieur
- 2 : système de résistances d'intégration
- 3 : Noeud de sommation
- 4 : Contre-réaction inertielle
- 5 : élément de contre-réaction, dont le coefficient d'amplification est variable.
- 6 : Micro-commutateur
- 7 : élément pour adaptation de la mise au point du régulateur aux conditions extérieures.

Fig 5.9. Schéma fonctionnel du système de régulation

dépend du réglage de la résistance (10) et du nombre de résistances (12) mises en circuit par les contacts des thermomètres à compartiments. Plus le nombre de ces résistances mises en circuit est grand, plus la valeur du courant passant par la résistance de chauffe est petite. La réduction de la valeur de la résistance (10), court circuitée par la résistance (12), entraîne également une réduction de la valeur du courant de la résistance (14).

La commutation des contacts du microcommutateur (6) et l'ouverture des contacts (8) du relais du régulateur se font dans un temps déterminé et pour une valeur donnée du courant de l'élément de chauffe du régulateur. Ceci entraîne la variation par à coups du courant passant par la résistance (14), dont la valeur dépend de celle de la résistance (9).

Après un certain temps, qui dépend de la valeur de la résistance (9), les contacts du microcommutateur (6) sont de nouveau commutés. Ce circuit constitue un couplage inerte par réaction, qui corrige les propriétés dynamiques du régulateur. Si le régulateur travaille dans des installations à paramètres dynamiques à variations lentes (par exemple le chauffage par convection à la vapeur ou électrique) et à perturbations à variations lentes (par exemple variations naturelles des paramètres de l'air entourant les bâtiments, lentes variations des besoins en chaleur à l'intérieur des compartiments etc...), il est possible d'adapter le régulateur au travail demandé de la façon suivante : la résistance (9) est réglée à une valeur faible, et elle sert uniquement à compenser l'hystérésis mécanique dans le fonctionnement du microcommutateur (6). Si par exemple, dans 6 compartiments sur 9, la température est plus élevée que la température à laquelle ont été réglés les thermomètres à contact des compartiments, le microcommutateur (6) coupe le circuit de chauffage, ne réduisant que de très peu le courant de l'élément de chauffe (14).

Le bimetal de service s'écarte de nouveau et se trouve à la limite de la mise au travail. Le circuit de chauffage s'enclenche de nouveau quand la température, dans un ou deux compartiments, baisse au dessous de celle qui a été réglée. Dans ce circuit, le régulateur suit les variations signalées par les thermomètres à contacts des compartiments, par conséquent les périodes des oscillations sont plus longues, l'usure de l'appareillage de commande plus réduit, mais les écarts instantanés de températures par rapport aux valeurs moyennes, sont plus grandes.

5.2.2. - Analyse simplifiée du système de régulation :

Une analyse poussée de ce régulateur peut donner des propriétés intéressantes : P.D. ou P.I.D. Mais on se limitera à l'action P qui est la plus importante du point de vue de la stabilité du système de commande.

Le signal moyen du régulateur peut être présenté sous la forme suivante :

$$\bar{y} = \frac{T_a}{T_a + T_b} \quad \text{où} \quad \begin{array}{l} T_a : \text{temps d'enclenchement/} \\ T_b : \text{temps de déclenchement.} \end{array} \quad (5.1)$$

D'autre part, on aura la relation

$$\bar{y} = K_p W \quad \text{où} \quad \begin{array}{l} W = \theta - \theta_0 : \text{signal d'erreur} \\ \theta : \text{température mesurée} \\ \theta_0 : \text{consigne.} \end{array} \quad (5.2)$$

Pour généraliser l'analyse, on peut utiliser les valeurs relatives de K_p , W et y en les désignant comme suit :

$$\bar{y}^* = \frac{T_a}{T_a + T_b} \quad 100 \% \quad W^* = \frac{\theta - \theta_0}{\theta} \quad 100 \% \quad h(t) = \theta - \theta_0$$

$$K_p^* = \frac{1}{W^*} \quad \bar{y}^* = \frac{T_a}{T_a + T_b} \quad \frac{\theta}{\theta - \theta_0} = \frac{T_a}{T_a + T_b} \cdot \frac{\theta}{h(t)}$$

Selon Z. Barski (1), les temps T_a et T_b sont fonction de la température extérieure O_e et des propriétés physiques du bimétal.

$$T_a = \frac{Q \cdot C}{q \cdot S} \quad \text{Log} \frac{K J a^2 R_g}{K J a^2 R_g (\alpha_2 - \alpha_1) l^2 - 4 K q_s Y m z - 4 h q_s \frac{K t}{k_r + k_s} \Delta \theta_e} \quad (5.3)$$

$$T_b = \frac{Q \cdot C}{q \cdot S} \quad \text{Log} \frac{1}{K J b^2 R_g (\alpha_2 - \alpha_1) l^2 - 4 K q_s (Y m z - y) + 4 h q_s \frac{k t}{k_r + k_s} \Delta \theta_e} \quad (5.4)$$

où O_e : température extérieure
 k : coefficient du proportionnalité.

Q (g) : masse du bimetal

C ($\frac{\text{kcal}}{\text{kg deg}}$) : chaleur spécifique du bimetal.

q ($\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \text{ h deg}}$) : coefficient de conductibilité du bimetal.

S (m^2) : surface du bimetal.

J_a (A) : courant d'enclenchement.

J_b (A) : courant de déclenchement.

R_g (Ω) ; résistance de chauffe.

h (mm) : épaisseur du bimetal.

Y_{mz} (mm) : déviation du bimetal en presence du courant J_a

Y (mm) : déviation du bimetal en présence du courant J_b

l (mm) : longueur du bimetal.

α_2, α_1 (-) : coefficient de dilatation du bimetal.

k_r ($\frac{E}{mm}$) : coefficient d'élasticité du spiral.

k_s ($\frac{E}{mm}$) : coefficient d'élasticité du ressort.

k_t ($\frac{E}{mm}$) : coefficient de température du spiral.

Pour simplifier les relations on pose :

$$K J_a^2 R_g = A$$

$$K J_b^2 R_g = B$$

$$3 K J_a^2 R_g (\alpha_2 - \alpha_1) l^2 - 4 K q_s (Y_{mz} - y) = C$$

$$3 K J_b^2 R_g (\alpha_2 - \alpha_1) l^2 - 4 K q_s (Y_{mz}) = D$$

$$4 h q_s \frac{k_t}{k_r + k_s} = E$$

$$K^* p \text{ s'écrira } K^* p = \frac{\text{Log } A - \text{Log } (D - E \Delta \theta_e)}{W^* (\text{Log } A - \text{Log } (D - E \Delta \theta_e) - \text{Log } (C + E \Delta \theta_e))}$$

$$\text{Posons : Log } A = C_1$$

$$\text{Log } A + \text{Log } B = C_2$$

$$E \Delta \theta_e = X$$

$$C = D = C_3$$

Ce qui donnera à $K^* p$, l'expression suivante

$$K^* p = \frac{C_1 - \text{Log } (C_3 - X)}{W^* (C_1 - \text{Log } (C_3 - X) - \text{Log } (C_3 + X))} \quad (5.6)$$

En utilisant les courbes de mise au point du régulateur P (Fig. 5.12) on déterminera la plage de variation de k_p quand la température extérieure varie de 2° à $18^\circ C$.

$$O_e = 2^\circ \left(\frac{T_0}{T} = 0,24 \right) \quad \begin{cases} K_{o1} = 6,5 \\ K_{o2} = 1,2 \end{cases}$$

$$O_e = 18^\circ C \left\{ \frac{T_0}{T} = 0,11 \right\} \quad \begin{cases} K'_{o1} = 17,1 \\ K'_{o2} = 3,1 \end{cases}$$

$$\text{On évalue } \Delta k_p \% = \frac{K_p (18) - K_p (2)}{K_p (18)}$$

$$\Delta k_p \% = \frac{17,1 - 6,5}{17,1} = 62 \%$$

$$\Delta k_p \% = \frac{3,1 - 1,2}{3,1} = 62 \%$$

Le facteur K_p du régulateur auto-adaptatif doit varier automatiquement de 62 % quand la température extérieure varie de 2° à 18°C

$$K_p \cdot (K_{obj})_{\max} = K_0 \qquad (K_{obj})_{\max} = 1,08$$

$$\left\{ \begin{array}{l} K_{p1} = \frac{6,5}{1,08} = 6 \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} K'_{p1} = \frac{1,2}{1,08} = 1,1 \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} K_{p2} = \frac{17,1}{1,08} = 15,8 \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} K'_{p2} = \frac{3,1}{1,08} = 2,8 \end{array} \right.$$

$$\text{Pour } \frac{T_0}{T} = 0,24 \qquad 1,1 \leq K_p \leq 6,01$$

$$\frac{T_0}{T} = 0,11 \qquad 2,8 \leq K_p \leq 15,8$$

donc

$$\boxed{2,8 \leq K_p \leq 15,8}$$

On proposera des conditions qui satisfairont au changement automatique de 62 % de K_p quand θ_e varie de 2° à 18°C (Fig.5.13)

$$C1 = 0,9$$

$$C2 = 2,4$$

$$C3 = 2$$

$E = 0,05$, $X = 0,1 - 0,9$ qui correspondent à un changement de température extérieure de 2°C à 18°C .

5.3. - REGULATEUR ELECTRIQUE AUTO-ADAPTATIF A DEUX POSITIONS AVEC VARIATION EN ESCALIER DES COEFFICIENTS D'AMPLI- FICATION EN FONCTION DES PERTURBATIONS

5.3.1. - Principe de fonctionnement :

Le régulateur dont le schéma est représenté sur la fig (5.10) se compose d'un circuit électrique qui comporte deux branches parallèles : la résistance de chauffe g et les résistances auxiliaires Rs_1, \dots, Rs_{10} , mises en circuit par les contacts des thermostats des compartiments, sont connectées dans la première dérivation; alors que dans la deuxième dérivation sont connectées les résistances Rp_1, \dots, Rp_4 , court circuitées par les contacts des thermostats extérieurs, représentant les perturbations extérieures. La valeur totale du courant dans le circuit du régulateur est à peu près constante (elle est stabilisée par l'élément Br).

La répartition du courant entre la résistance g et les résistances supplémentaires est variable et dépend du nombre de résistances Rs_1, \dots, Rs_{10} mises en circuit par les contacts des thermostats des compartiments. Plus le nombre de ces résistances mises en circuit est grand, plus la valeur du courant passant par la résistance de chauffe est petite. La commutation des contacts du microcommutateur M , et l'ouverture des contacts des relais Pp , se font dans un temps déterminé et pour une valeur donnée du courant de chauffe du régulateur.

Après un certain temps qui dépend de la valeur Rp_1, \dots, Rp_4 les contacts du microcommutateur sont de nouveau commutés. Ce circuit constitue une boucle de contre réaction thermique inertielle (couplage inerte par réaction) qui corrige les propriétés dynamiques du régulateur

Après chaque déclenchement du circuit de chauffage par microcommutateur M , le courant dans l'élément de chauffage s'abaisse à la valeur à laquelle le microcommutateur M est de nouveau commuté; après un certain temps qui dépend de la température extérieure et par l'intermédiaire des thermostats extérieurs court-circuitant les résistances Rp_1, \dots, Rp_4 , il se forme dans le circuit du régulateur une boucle fermée de la contre-réaction inertielle qui entraîne la formation d'oscillations internes du circuit; en conséquence l'influence de l'enclenchement et du déclenchement des thermostats à contact des compartiments ainsi que la variation des conditions extérieures ($\theta_{\text{extérieure}}$) sont exprimées par la variation du temps d'enclenchement T_a et du temps de déclenchement T_b du relais et du système de conditionnement d'air tout en maintenant le principe fondamental des impulsions continues.

Il faut mentionner que l'influence des thermostats des compartiments sur le travail du régulateur est progressivement croissante. Par exemple l'enclenchement du dernier thermostat agit avec un effet six fois plus grand que celui du premier thermostat. Cet état de chose est aussi favorable pour autant que le circuit tend à éliminer le plus rapidement possible l'influence des grandes perturbations.

5.3.2. - Analyse simplifiée du système de régulation :

Le schéma fonctionnel est représenté sur la fig. (5.11)

Le système est équivalent au système présenté dans le paragraphe 5.2.

En se limitant à la propriété P , les résultats obtenus restent valables, et comme K_z (β_i) est constant pendant une période d'oscillation et que K_w (θ_e) varie en escalier (résistances court-circuitées par les thermostats à contacts extérieurs), alors K_p variera en escalier (comme l'indique la fig. (5.14)).

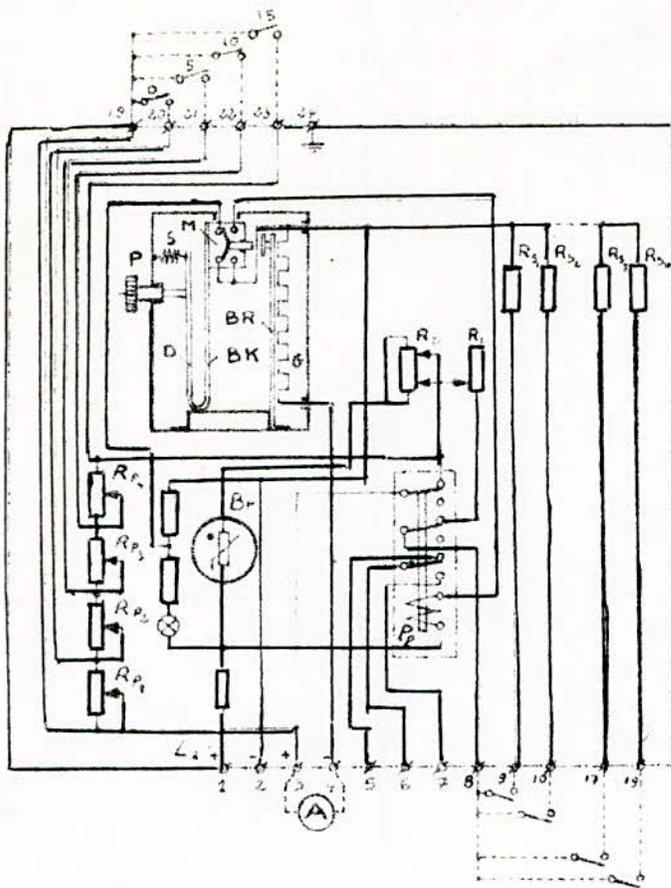
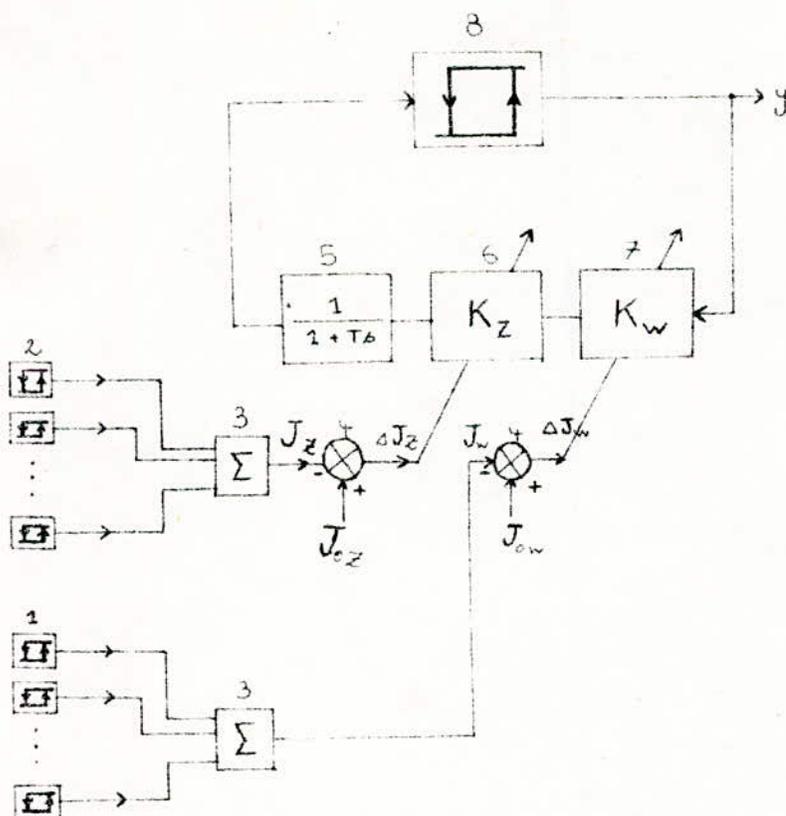


Fig 5.10. Regulateur électrique auto-adaptatif avec variation des coefficients d'amplification K_z et K_w en escalier en fonction des perturbations extérieures et intérieures.



- 1: thermostat à contact extérieur
- 2: thermostat à contact intérieur
- 3: Système de résistances d'intégration
- 4: Noeud de sommation.
- 5: Contre réaction inertielle.
- 6: Élément de contre réaction dont le coefficient d'amplification varie en escalier en fonction des perturbations intérieures.
- 7: Élément de contre réaction dont le coefficient d'amplification varie en escalier en fonction des perturbations extérieures
- 8: Micro commutateur.

Fig 5.11. Schéma fonctionnel du système de Régulation.

On remarque que plus $\Delta \theta_e$ est faible, plus l'approximation linéaire de K_p est meilleure. Mais $\Delta \theta_e$ est fonction du nombre de thermostats extérieur. Un grand nombre assurerait une bonne précision, mais le coût sera plus élevé et la fiabilité réduite; tandis qu'un faible nombre donnerait une précision trop faible, et une grande consommation d'énergie.

En général $\Delta \theta_e = 3^\circ \div 5^\circ\text{C}$, et seuls les essais expérimentaux déciderait du nombre exact de thermostats extérieurs.

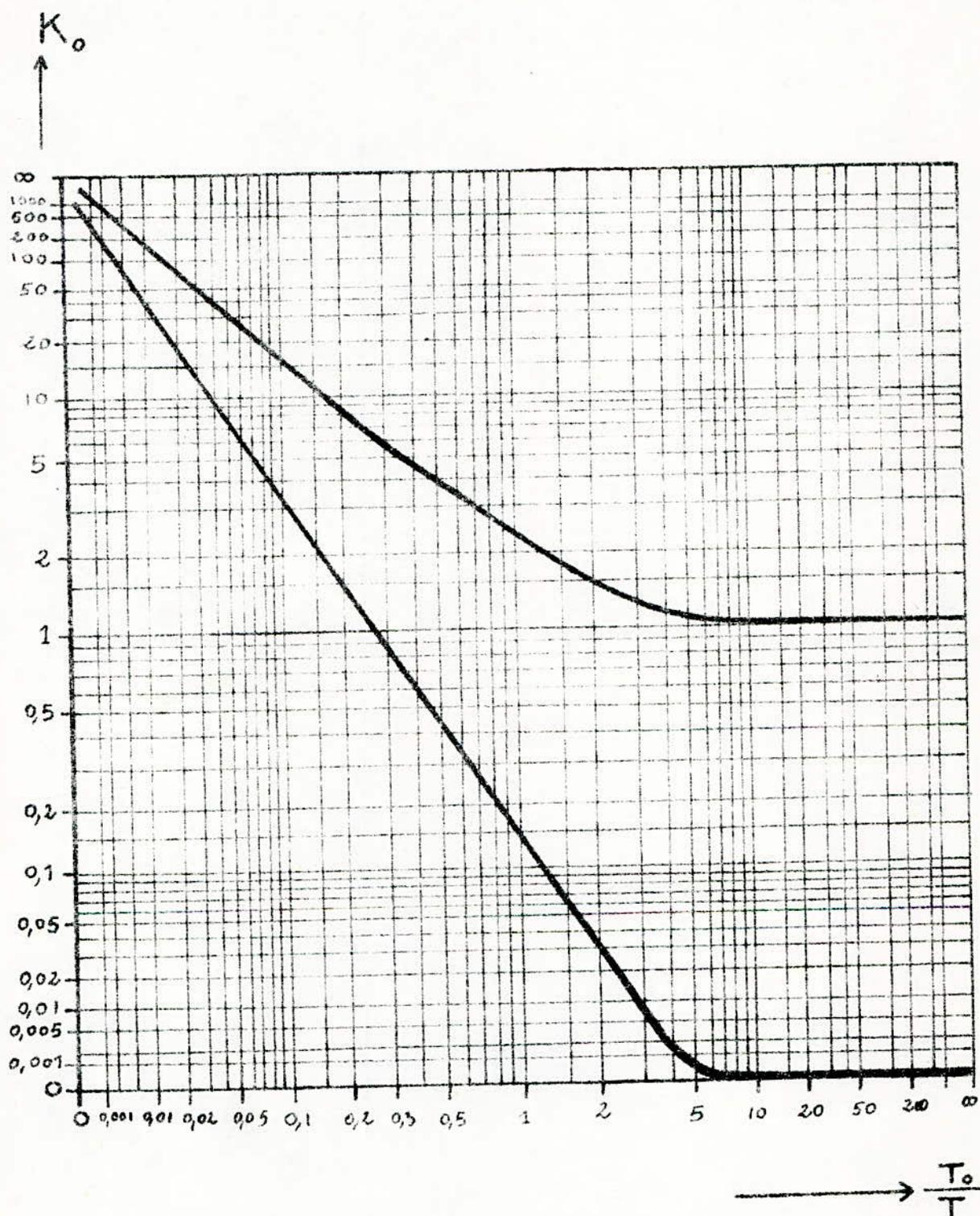


Fig 5.12 - Mise au point du régulateur P

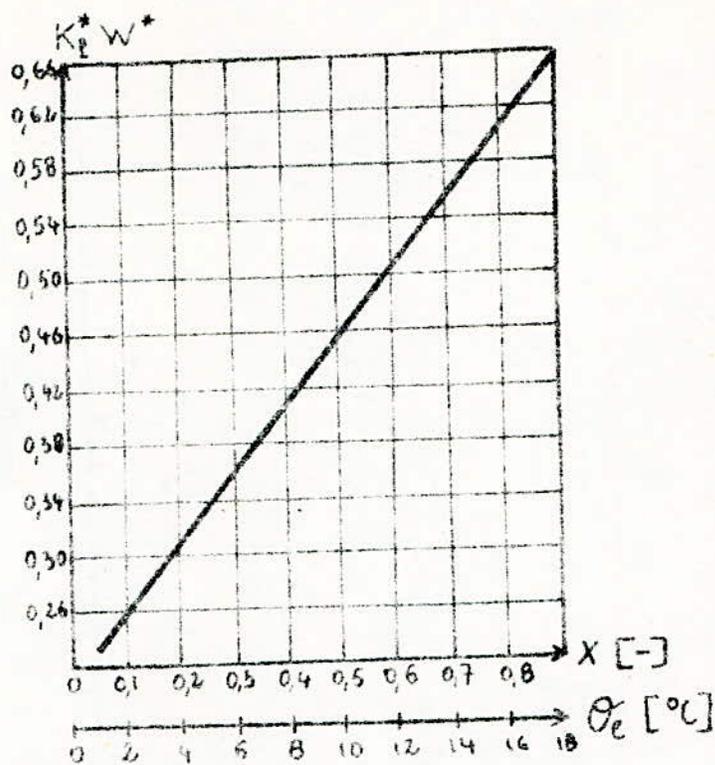


Fig 5.13 - Variation continue de K_p en fonction de la température extérieure.

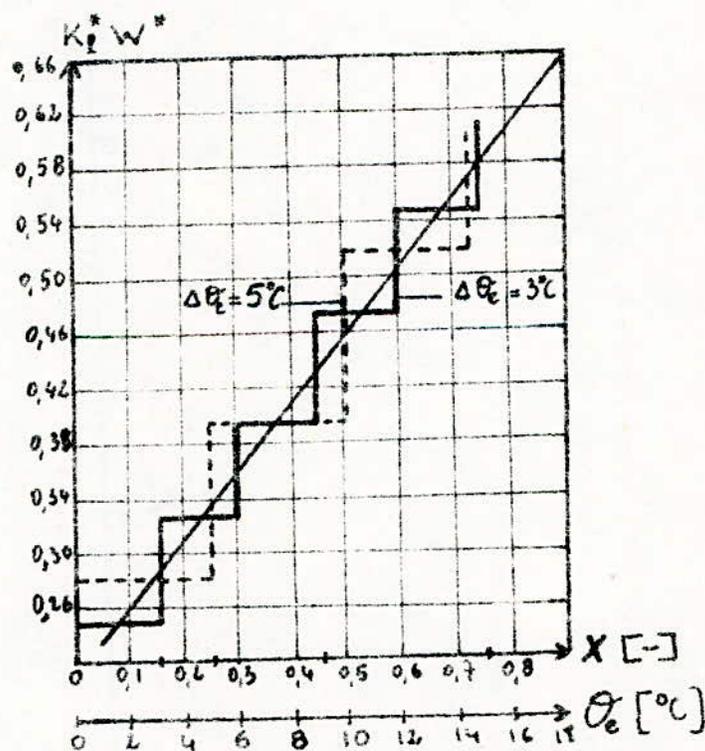


Fig 5.14 - Variation en escalier de K_p en fonction de la température extérieure

CONCLUSION



CONCLUSION

Indépendamment de la complexité théorique présentée par les systèmes de régulation à 2 positions non linéaires et de l'analyse ~~des propriétés~~ dynamique et statique dans les voitures, on a essayé de mettre en évidence au delà des formules mathématiques les conséquences pratiques qu'elles impliquent.

En premier lieu, on a mis en évidence l'importance des températures limites pour l'obtention de la température de confort désirée.

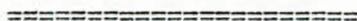
Deuxièmement, plutôt que de modéliser notre système de régulation, qui aurait abouti à une formulation mathématique complexe, on a décrit moyennant certaines approximations son comportement dynamique à partir de formules quantitatives, en utilisant les signaux moyens qui sont les plus importants du point de vue industriel.

Toutefois, on ne doit pas perdre de vue que cette méthode est approximative.

On souhaite que cette étude pourra servir après amélioration de document utile pour équiper les voitures de la S.N.T.F. d'installation de climatisation.

En effet, avec le développement croissant des transports, il est nécessaire d'orienter des études dans ce domaine.

A N N E X E S



A N N E X E I

U I C - O R E ANNEE 81

CONDITIONS GENERALES DE CONFORT

I. - TEMPERATURE ET DEGRE HYGROMETRIQUE /

1.1. - En général, la température T_i à l'intérieur des locaux réservés aux voyageurs sera de + 22°C, l'organe correcteur étant en position de milieu.

1.2. - Pour des voitures dotées d'installation de climatisation, cette valeur est valable pour une gamme de température extérieure T_e comprise entre -20°C et + 19°C.

En cas de température extérieure T_e supérieure à + 19°C, les températures intérieures T_i doivent être calculées selon la formule suivante, l'organe correcteur étant en position de milieu, il peut être admis de faibles tolérances vers le bas.

$$T_i = 22 + 0,5 (T_e - 19) \text{ (°C)}$$

1.3. - Les voitures équipées d'installations de chauffage doivent satisfaire aux conditions visées au point 1.2. seulement dans la mesure où la température extérieure de l'air suffit, sans réfrigération additionnelle pour maintenir cette température intérieure.

1.4. - Aucune exigence relative à l'apport d'humidité n'est demandée.

1.5. - Les variations admissibles de la température à l'intérieur des locaux réservés aux voyageurs, par rapport aux valeurs théoriques, ne doivent pas être supérieures à + 1 k dans l'espace occupé par les voyageurs assis et compris entre 50 et 150 cm au dessus du plancher. Les températures devraient décroître du bas vers le haut.

1.6. - Dans l'espace au dessous de 50 cm au dessus du plancher, dans la zone des jambes des voyageurs, la température ne doit pas dépasser + 35°C, si la chaleur est amenée dans cette zone.

1.7. - Les variations maximales des températures ambiantes doivent être de + 1 k sous l'influence de la régulation, la décroissance de 1 k ne devant se produire que dans un délais supérieur ou égal à 10 minutes.

1.8. - La moyenne pondérée des températures de surface de parois des locaux réservés aux voyageurs, à l'exception des fenêtres, ne doit pas être inférieure de 4 à 5 k à la température intérieure.

Aucune des parois des locaux, à l'exception des fenêtres ne doit avoir une température superficielle inférieure à 15°C.

1.9. - En cas de chauffage, la température du couloir latéral ne doit pas être inférieure de plus de 7 k à celle des compartiments mais elle ne doit en aucun cas, dépasser la température des compartiments. La température aux accès et dans les W C ne doit pas être inférieure à + 10°C.

1.10. - En cas de réfrigération, la température du couloir latéral et des plateformes d'accès doit être supérieure à celle des locaux réservés aux voyageurs, formant ainsi un espace de transition vers l'extérieur. Il est recommandé d'inclure les W.C. dans la climatisation.

II. - APPORT D'AIR FRAIS ET PURETE DE L'AIR /

2.1. Les valeurs minimales de l'air frais apporté par la ventilation forcée dans les locaux réservés aux voyageurs doivent atteindre celles indiquées au tableau 1. Ces valeurs s'entendent par place réservable et par heure.

TABLEAU 1

Température extérieure en °C	Apport d'air frais minimal en m ³ /h par personne
Inférieure à - 20°C	8
De - 20 à - 5°C	10
De - 5 à + 26°C	20
Supérieure à + 26°C	25

2.2. L'air renvoyé dans les compartiments et l'air de recyclage doit être épuré par des filtres, de sorte qu'il ne comporte pas plus de 0,5 mg de poussière par m².

2.3. Il est recommandé de prévoir un système de recyclage d'air qui assure le fonctionnement du chauffage en cas d'obstruction des dispositifs extérieurs.

III. - VITESSE DE L'AIR /

En vue d'éviter les courants d'air désagréables, la vitesse de l'air dans les lieux où peuvent séjourner des personnes ne doit pas dépasser les valeurs maximales définies à la planche 2 en fonction de la température ambiante.

A N N E X E 2

=====

NORMES U I C - O R E ANNEE 81

=====

CHAUFFAGE, VENTILATION ET CLIMATISATION DES VOITURES

=====

n 0.1. - La présente fiche est valable pour toutes les voitures à places assises et voitures-couchettes, affectées en banalité au trafic international, exception faite pour les véhicules appelés à ne circuler que sur des courtes distances en dehors de leur réseau propriétaire.

0.2. - Pour les autres véhicules affectés au trafic international, tel que par ex. les voitures lits, la présente fiche devrait être applicable d'une façon analogue et servir d'orientation, notamment en ce qui concerne les conditions de confort.

0.3. - La présente fiche comporte :

- * Des dispositions générales auxquelles doivent répondre les installations respectives, quelque soit leur conception.
- * Des définitions particulières pour les éléments dont la normalisation est recherchée.

0.4. - La présente fiche fait une distinction entre voitures "à petits compartiments" et les voitures "à grands compartiments".

La désignation "local réservé aux voyageurs" embrasse ces 2 notions, hormis les locaux annexés.

I. - EQUIPEMENT DES VEHICULES /

1.1. - Les voitures à places assises, les voitures couchettes et les locaux réservés au personnel dans les fourgons doivent être équipés d'installations de chauffage pouvant fonctionner :

- * soit avec l'énergie électrique,
- * soit avec la vapeur,

selon les systèmes de chauffage prescrits pour chaque service E.W.P.

1.2. - Les voitures à places assises et voitures couchettes doivent être équipées d'une ventilation forcée.

1.3. - Il est recommandé d'équiper les voitures couchettes d'une installation de climatisation.

II. - REGULATION DES INSTALLATIONS DE CHAUFFAGE PAR VAPEUR ET DE CLIMATISATION /

2.1. - Chaque voiture doit être dotée d'un système de régulation qui permet de respecter les conditions de confort générales mentionnées sur l'annexe 1.

2.2. - La température à l'intérieur de chaque local réservé aux voyageurs doit être modifiée par un organe correcteur donnant une latitude de réglage minimale de + 2 k autour des températures précisées sur l'annexe 1. Les voitures à couloir central comportant 2 grands compartiments peuvent être considérées comme étant une seule unité du point de vue régulation.

2.3. - Il est recommandé de permettre une variation continue de la température dans les locaux réservés aux voyageurs.

2.4. - Lorsqu'un organe correcteur est prévu pour donner une variation par gradins de la température à l'intérieur des locaux réservés aux voyageurs, la variation donnée par le passage d'une position à la suivante ne doit pas être supérieure à 1 k.

2.5. - La manoeuvre de l'organe correcteur dans un compartiment quelconque ne doit pas avoir de répercussion sensible sur la température dans les autres compartiments.

III. - ORGANE DE COMMANDE DESTINE A LA VARIATION DE LA TEMPERATURE A L'INTERIEUR DES LOCAUX RESERVES AUX VOYAGEURS /

3.1. - A l'intérieur des voitures à compartiments, l'organe de régulation de la température est à la disposition des voyageurs cet organe est à placer au dessous de la baie vitrée ou au dessus de la porte.

3.2. - Organe de régulation dans les voitures à grands compartiments.

3.2.1. - Pour les voitures à grands compartiments il est recommandé de réserver la manoeuvre de l'organe de régulation de la température aux seuls agents de trains.

3.2.2. - Dans ce cas, les dispositifs de commande sont à placer sur le tableau de commande/

3.2.3. - Si les voyageurs doivent également pouvoir manipuler l'organe de régulation de la température, celui-ci est à installer dans la zone de la porte d'entrée.

3.3. - Les organes de régulation de la température doivent être repérés par le pietogramme (flèches indicatrices ou panneaux).

IV. - DISPOSITIFS CENTRALISES DE MANOEUVRE, DE COMMANDE ET DE CONTROLE /

4.1. - Il doit être possible de mettre la marche et d'arrêter l'installation de chauffage ou l'installation de climatisation d'une voiture moyennant un interrupteur placé sur le tableau de commande.

4.2. - L'installation doit être conçue de manière que sa mise en marche se fasse automatiquement en cas de présence d'énergie et lorsque l'interrupteur visé au point 4.1. est en position "marche".

De même elle doit s'arrêter automatiquement en cas d'absence d'énergie, lors de cette dernière manoeuvre, les appareils consommateurs branchés sur la batterie doivent être également arrêtés afin que l'épuisement de la batterie soit rendu impossible.

4.3. - Il est recommandé de prévoir un interrupteur sur le tableau de commande permettant le chauffage des eaux des cabinets et des toilettes à l'aide de cannes chauffantes.

4.4. - Les organes du dispositif de commande et de régulation alimenté par la tension de la batterie sont à grouper, dans la mesure du possible, sur un tableau d'appareillage placé à l'intérieur de l'armoire de distribution.

V. - CAPACITE DES INSTALLATIONS DE CHAUFFAGE ET DE CLIMATISATION /

5.1. - L'installation de chauffage doit être étudiée de manière que lors du préchauffage d'une voiture en stationnement à une température extérieure de 0°C, la température de + 18°C à l'intérieur des locaux réservés aux voyageurs doit être atteinte dans un délais de 60 minutes.

5.2. - Les températures mentionnées sur la planche 1 doivent être respectées en considération de l'apport des quantités d'air frais exigée par le tableau 1, lorsque la voiture roule à sa vitesse maximale admissible.

5.3. - Compte tenu des différentes conditions climatiques en Europe, les puissances en chauffage et en réfrigération doivent permettre de satisfaire aux conditions de la présente fiche dans la gamme - 20°C extérieur à + 32°C extérieur et 60 % d'humidité.

VI. - CONCEPTION DE LA PARTIE CONSTRUCTIVE /

6.1. - La conception des parois des locaux réservés aux voyageurs doit être étudiée de façon à répondre aux conditions de confort indiquées sur l'annexe 1.

6.2. - Lors de la marche à la vitesse maximale, la valeur K de la partie de la voiture réservée aux voyageurs doit être de 2 W/m²/K environ.

VII. - DISPOSITIONS SUPPLEMENTAIRES POUR LES VOITURES DU TYPE Z /

7.1. - La puissance destinée au chauffage et à la réfrigération comme indiquée au point 6 et sur l'annexe 1, sera suffisante dans les conditions suivantes :

- Chauffage : voiture à vide sans insolation.
- Réfrigération : voiture occupée avec insolation (journée).

7.2. - Le système à utiliser pour l'insufflation d'air dans les compartiments climatisés est le système ejecto - convecteur.

Avec ce système, l'air soufflé s'échappe au dessous du bord inférieur du châssis de la voiture vitrée.

7.3. - Tout équipement destiné à rechauffer doit être doté d'une puissance d'environ 750 W. Dans le cas où l'alimentation en énergie est assurée uniquement par la lique de train, La tension d'alimentation est de 220 V. Pour les voitures équipées de génératrices d'essieu , il est admis que ces dernières fournissent pendant la marche des voitures seulement, l'énergie nécessaire au rechauffage de l'eau et que la tension peut être inférieure à 220 V.

VIII. - DISPOSITIONS SUPPLEMENTAIRES POUR LES VOITURES COUCHETTES /

8.1. - L'organe correcteur doit permettre de baisser jusqu'à + 18°C la température des compartiments. Cette définition ne s'applique aux voitures équipées d'une installation de chauffage que dans la mesure où la température de l'air extérieur sera suffisante pour maintenir cette température.

8.2. - Il est recommandé de doter chaque couchette de buses d'air qui permettent le réglage individuel de la quantité d'air et de la direction d'arrivée et qui, en même temps, balayent l'intérieur des compartiments au dessus des couchettes.

$\theta_{int} [^{\circ}C]$

31

24

22

20

19

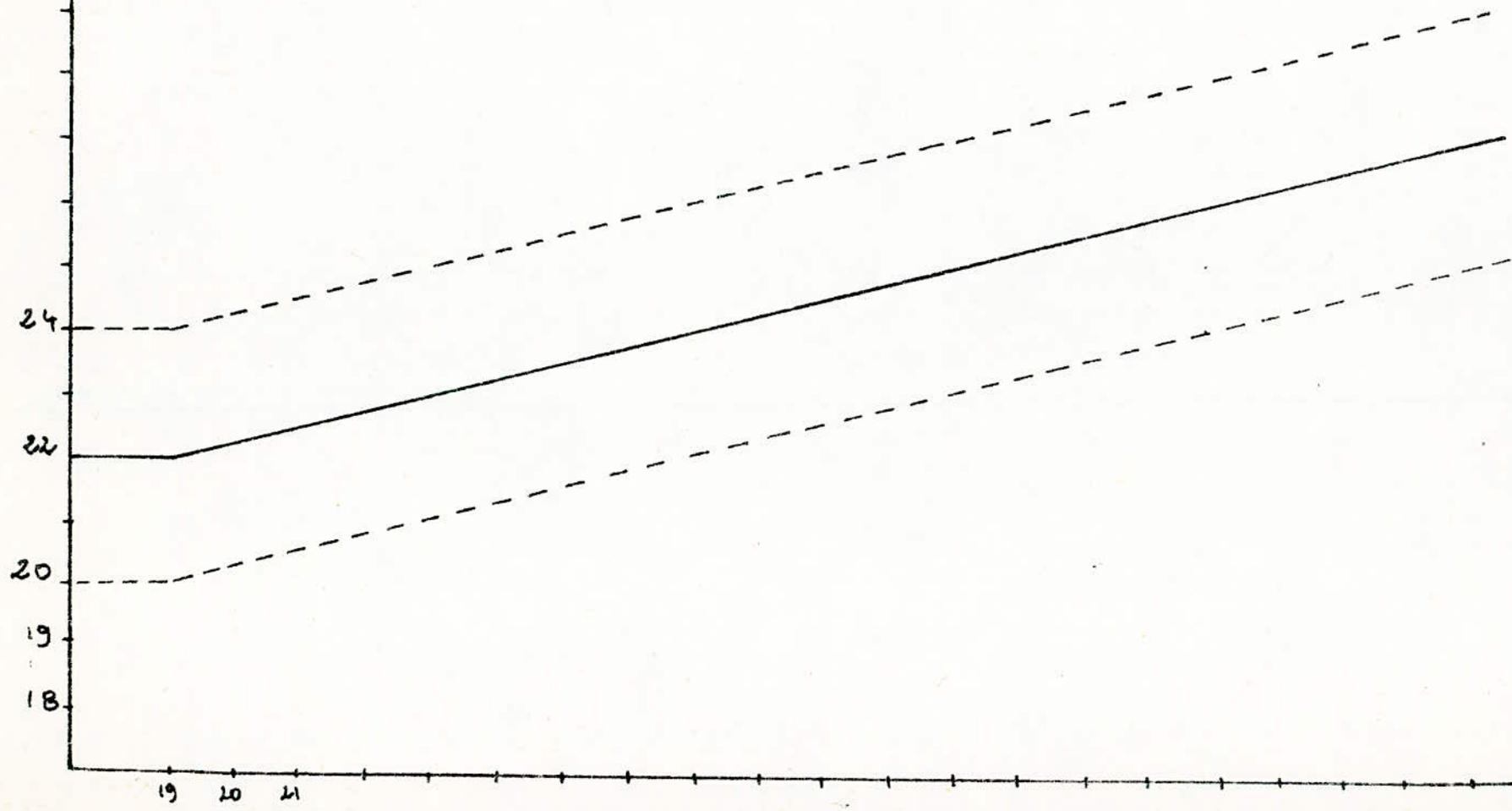
18

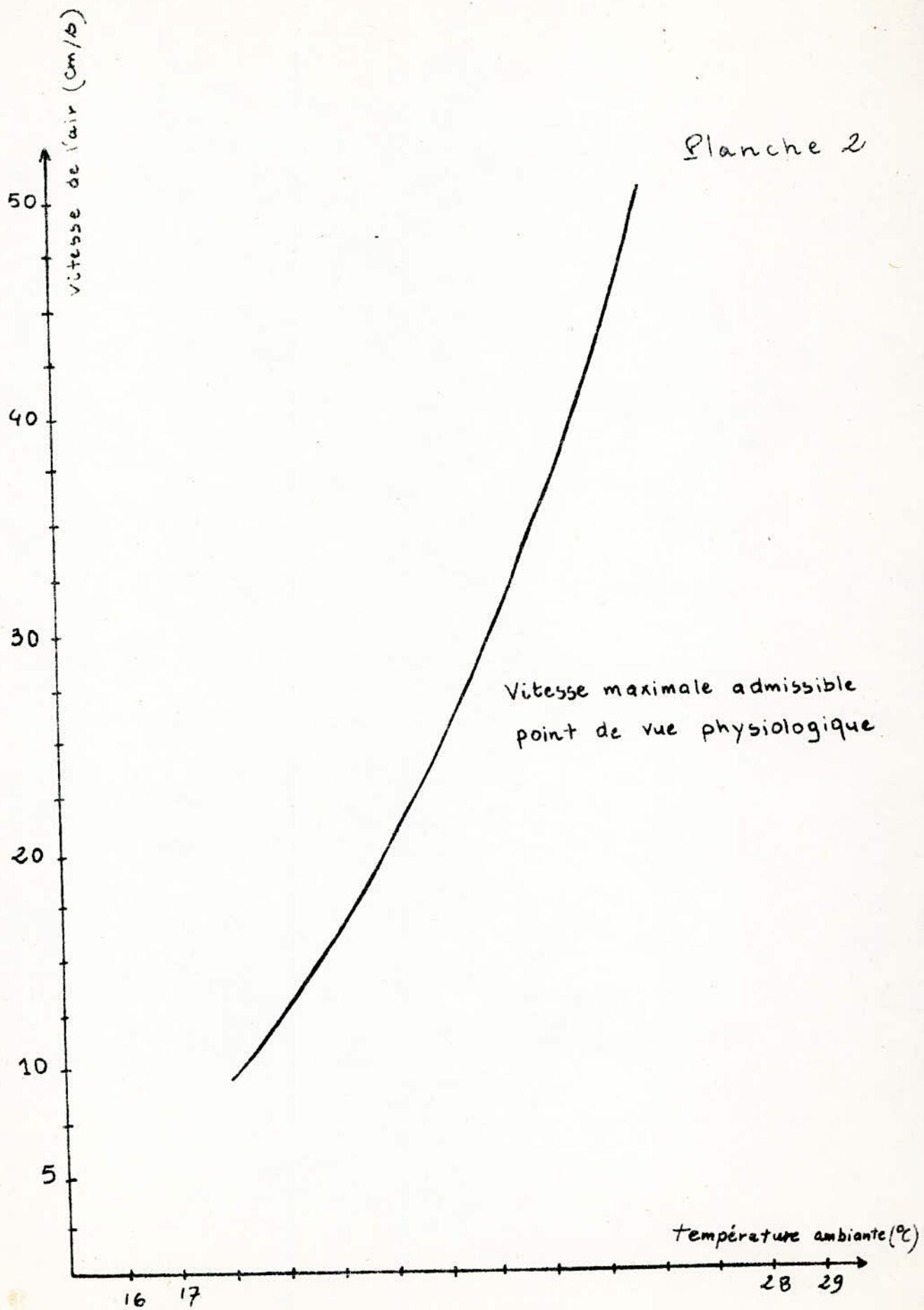
Planche 1

$\theta_{ext} [^{\circ}C]$

40

19 20 21





BIBLIOGRAPHIE

1. Z. BARSKI : "ANALYSE DES PROPRIETES DYNAMIQUES ET DE LA COMMANDE AUTO-ADAPTATIVE D'OBJETS DE CLIMATISATION".
PRACA DOKTORSKA; LODZ 1968
2. W. BOTCHERA : "VERGLEICH VON DREIPUNKTREGLERN MIT EINEN LINEAREN KONTINUIERLICHEN PI-REGLER" , REGELUNGSTECHNIK, 1962
3. AUGUSTO H. BRUCIAPAGLIA : "COMMANDE PAR MODULATION DE DUREE, APPLICATION A UN PROCEDE THERMIQUE".
THESE de DOCTEUR-INGENIEUR;
GRENOBLE 1979
4. D. DINDELEUX : "TECHNIQUE DE LA REGULATION INDUSTRIELLE".
EYROLLES; 1978
5. W. FINDISEN : "TECHNIQUE DE LA REGULATION AUTOMATIQUE".
1965
6. P. NASLIN : "TECHNOLOGIE ET CALCUL PRATIQUE DES SYSTEMES ASSERVIS".
DUNOD; 1968.
7. WIERBICKIEGO : "PROBLEMES DYNAMIQUES DE LA REGULATION PAS A PAS".

* REVUES :

- Z. BARSKI : ARTICLE (MESURE, REGULATION ET AUTOMATISME).
JANVIER 1971
FEVRIER 1971
- BROWN BOVERY : DECEMBRE 1974
DECEMBRE 1978
DECEMBRE 1979
JANVIER 1981
- RAIL INTERNATIONAL 1972
- R.G. CF 1977
- U.I.C ORE 1981