

**PREMIER MINISTRE
COMMISSARIAT A
L'ÉNERGIE ATOMIQUE**

**ETUDE SUR SIMULATEUR
DES REGIMES TRANSITOIRES DES CONCENTRATIONS
DANS UNE INSTALLATION DE DIFFUSION GAZEUSE**

par

P. DELAROUSSE, C. TROUVE, R. JACQUES

Rapport CEA N° 2010

**CENTRE D'ETUDES
NUCLÉAIRES DE SACLAY**

CEA 2010 - DELAROUSSE P. , TROUVE C. , JACQUES R.

ETUDE SUR SIMULATEUR DES REGIMES TRANSITOIRES DES CONCENTRATIONS DANS UNE INSTALLATION DE DIFFUSION GAZEUSE (1961).

Sommaire. - Le comportement transitoire d'une cascade de diffusion gazeuse est représenté de façon approchée par un système différentiel aux différences. On décrit le matériel analogique original qui a permis de simuler ce système. Une série d'exemples illustre les différents problèmes qui ont été résolus au moyen de cet appareil.

CEA 2010 - DELAROUSSE P. , TROUVE C. , JACQUES R.

ANALOG SIMULATION OF CONCENTRATION TRANSIENTS IN A GASEOUS DIFFUSION PLANT (1961).

Summary. - A finite difference system is used to describe concentration transients in a gaseous diffusion plant for uranium isotope separation.

The equipment used in this study is described and examples are given to illustrate the problems which have been solved with it.

- Rapport C.E.A. n° 2010 -

Service des Etudes sur la Séparation
des Isotopes de l'Uranium

ETUDE SUR SIMULATEUR DES REGIMES TRANSITOIRES
DES CONCENTRATIONS DANS UNE INSTALLATION
DE DIFFUSION GAZEUSE

par

P. DELAROUSSE, C. TROUVE et R. JACQUES

ETUDE SUR SIMULATEUR DES REGIMES TRANSITOIRES DES CONCENTRATIONS DANS UNE INSTALLATION DE DIFFUSION GAZEUSE

I - INTRODUCTION -

Les installations de séparation isotopique sont caractérisées par des temps d'équilibre longs et des frais d'exploitation élevés. Il est donc intéressant de pouvoir déterminer à l'avance l'évolution des concentrations et d'en déduire des procédures optima tant pour le démarrage que pour l'exploitation de l'usine.

Il est possible de résoudre sur machine arithmétique les équations qui définissent les régimes transitoires des concentrations. L'emploi d'un simulateur permet une plus grande souplesse obtenue toutefois au détriment de la précision.

Le système d'équations différentielles aux différences qui décrit de façon exacte l'évolution des concentrations est d'un maniement difficile. Le procédé de calcul utilisé consiste à grouper plusieurs équations pour aboutir à un système différentiel d'ordre raisonnable.

Le simulateur utilisé permet de traiter trente cinq équations différentielles linéaires. Les organes de calcul sont issus des calculateurs de tir de la Compagnie de Télégraphie sans Fil (C S F).

La précision de l'appareil est de l'ordre de 2 % sur

les régimes permanents et va de 2 % à 10 % sur les temps de montée à l'équilibre, suivant la disposition de l'installation simulée.

Le simulateur est conçu comme un outil très souple permettant de représenter les divers types de montages que l'on rencontre dans le procédé de diffusion gazeuse.

- cascades de séparation avec une ou plusieurs tailles d'appareillages avec alimentation en un point fixe.

- cascade à une ou plusieurs tailles connectée à un réservoir infini.

- chaîne de cascades réunies par des boucles portant sur un petit nombre d'étages de séparation ou sur une demi-cascade.

- chaînes de cascades réunies par des boucles portant sur un petit nombre d'étages de séparation ou sur une demi-cascade.

- chaînes de cascades réunies par des jonctions comportant des réservoirs et des purges.

- chaînes de cascades à alimentations multiples.

Sur chacun de ces montages le simulateur permet en particulier d'examiner les problèmes suivants :

1° Effet d'une perturbation sur les concentrations et compensation de cette perturbation.

2° Réalisation d'une transition suivant un processus optimum déterminé à l'avance.

3° Démarrage d'une cascade et marche en perfusion. Calcul d'un planning de démarrage.

Des simulateurs construits sur les mêmes bases peuvent être utiles pour des études de mise en route d'installations chimiques, dans le cas où ces études paraîtraient justifiées par les risques de perte de temps de production.

II - DESCRIPTION DU SIMULATEUR.-

A - Equations de la cascade de diffusion gazeuse.-

Les équations représentant le régime transitoire des concentrations dans une cascade de diffusion gazeuse sont décrites par COHEN (1) et MONTROLL et NEWELL (2).

La structure interne d'un étage de séparation est indiquée sur la Fig. 1. Un ensemble d'étages de même type et de même taille constitue une cascade constante. Une usine de diffusion gazeuse est formée de plusieurs cascades constantes (Fig.2). Les interconnexions et les extrémités des cascades sont représentées de façon schématique sur la Fig. 3. Les notations utilisées sont les suivantes :

| | |
|----------------------|--|
| L | Débit massique diffusé |
| H | Capacité massique d'un étage |
| N_n N'_n N''_n | Concentration en isotope léger pour les débits entrant, enrichi, et appauvri à l'étage n |
| P, W | Débits massiques aux soutirages |
| N_p , N_w | Concentration des soutirages riche et pauvre. |
| F, N_F | Débit massique et concentration de l'alimentation |
| U_n | Transport en isotope léger à l'étage n |

La formule d'enrichissement pour un étage s'écrit :

$$\frac{N'_n}{1 - N'_n} = (1 + \epsilon) \frac{N_n}{1 - N_n} \quad (1)$$

soit pour les faibles concentrations

$$N'_n = (1 + \epsilon) N_n \quad (2)$$

Le comportement des concentrations est décrit par :

$$\frac{H}{2L} \frac{d N_n}{dt} = \varphi_{n-1} - \varphi_n \quad (3)$$

$$\varphi_n = \varepsilon N_n (1 - N_n) - \frac{1}{2}(N_{n+1} - N_n) + \varepsilon \psi N_n \quad (4)$$

Avec les notations :

$$\varphi_n = U_n / 2L \quad (5)$$

$$\psi = P / 2L \quad (\text{section de cascade enrichissante}) \quad (6)$$

$$= -W / 2L \quad (\text{section de cascade appauvrissante}) \quad (7)$$

Les conditions aux limites varient selon les types de jonctions et de terminaisons utilisées (Fig. 3). Aux extrémités riche et pauvre on a :

$$\varphi = \psi N \quad (8)$$

B.- Equations de simulation.-

Pour réduire le nombre d'équations à manipuler on introduit l'approximation suivante. La cascade est divisée en tronçons de σ étages et les équations des étages de ce tronçon sont additionnées membre à membre.

$$\frac{H}{2L} \frac{d}{dt} \sum_{n=j}^{n=j+\sigma} N_n = \varphi_{j-1} - \varphi_{j+\sigma} \quad (9)$$

Cette équation est celle d'un réservoir fictif de concentration moyenne N_i .

$$N_i = \frac{1}{\sigma} \sum_{n=j}^{n=j+\sigma} N_n \quad (10)$$

Si on appelle φ_{i-1} et φ_i les transports normalisés en isotope léger de part et d'autre de ce réservoir, l'équation devient :

$$\frac{\sigma H}{2L} \frac{d N_i}{dt} = \varphi_{i-1} - \varphi_i \quad (11)$$

Le transport en isotope léger entre deux réservoirs fictifs séparés par Σ étages s'obtient à partir de l'équation différentielle des cascades (Réf. 1) :

$$\varphi = \frac{1}{4} \varepsilon (1 + \psi)^2 (1 - r^2) \quad (12)$$

La variable r étant définie de façon implicite par :

$$\frac{N_{i+1} - N_2^*}{N_{i+1} - N_1^*} = e^{2 \varepsilon (1 + \psi) r \Sigma} \frac{N_i - N_2^*}{N_i - N_1^*} \quad (13)$$

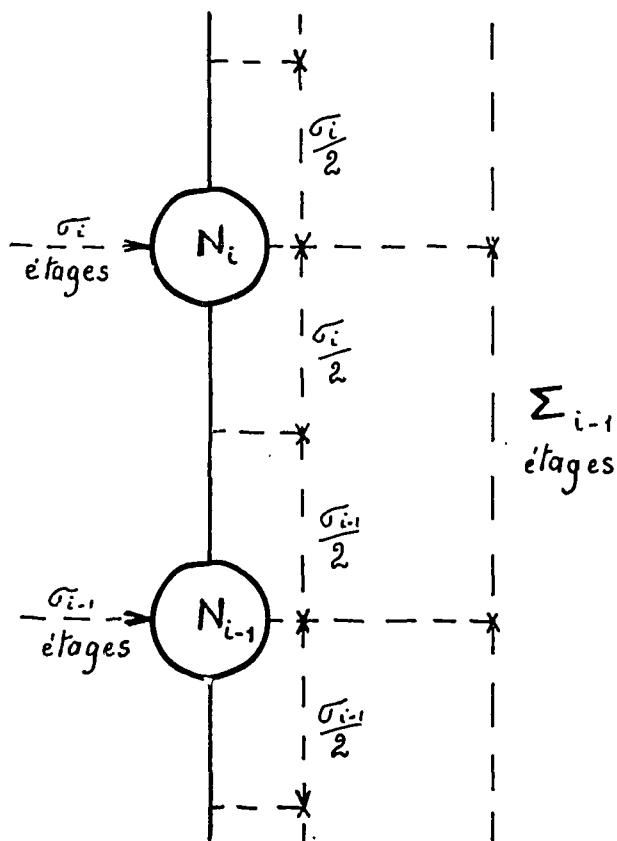
Avec les notations :

$$N_1^* \text{ ou } 2 = \frac{1}{2} (1 + \psi) (1 \pm r) \quad (14)$$

Ce système tient compte des nonlinéarités du problème. Une expression approchée est donnée ci-dessous :

$$\varphi = \frac{1}{2\varepsilon} (N_i - N_{i+1}) + \frac{1}{2} \varepsilon (1 + \psi) (N_{i+1} + N_i) - \varepsilon N_{i+1} N_i \quad (15)$$

Le terme $N_{i+1} N_i$ peut être négligé dans la région des faibles concentrations.



Ainsi, une cascade de séparation isotopique est simulée par un système de sections séparatives sans rétention de Σ étages et des réservoirs fictifs groupant σ étages.

L'approximation sur les régimes permanents vient du passage de l'équation (14) à l'équation (15) et l'approximation sur le régime transitoire tient essentiellement à l'utilisation de la formule (10).

Un choix judicieux des emplacements de réservoirs et des découpages en tronçons fictifs permet d'améliorer la précision.

Le tableau (1) donne à titre d'exemple les équations de simulation d'une cascade de 100 étages, alimentée au 15e étage et avec réservoir en tête de cascade.

Les réservoirs 1, 2, 3, i, ..., 10 correspondent aux niveaux 5, 15, 25, $(10(i - 1) + 5)$, 95. Le réservoir de tête a une capacité massique R et on utilise les notations :

$$r = R/L, \quad h = H/L, \quad \psi = P/2 \mathcal{E} L, \quad \psi' = W/2 \mathcal{E} L$$

avec $\sigma = 10$

TABLEAU I

- Equations de simulation d'une cascade constante de 100 étages munie d'un réservoir haut et alimentée au 15ème étage.

$$\frac{2}{2} \frac{dN_p}{dt} = \varphi_{10} - \varphi_p$$

$$5h \frac{dN_{10}}{dt} = \varphi_9 - \varphi_{10}$$

$$5h \frac{dN_3}{dt} = \varphi_2 - \varphi_3$$

$$5h \frac{dN_2}{dt} = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon (\psi + \psi') N_F$$

$$5h \frac{dN_1}{dt} = \varphi_0 - \varphi_1$$

avec

$$\varphi_p = \varepsilon \psi N_p$$

$$\varphi_{10} = \frac{N_{10} - N_p}{10} + \frac{\varepsilon (1 + \psi) (N_{10} + N_p)}{2}$$

$$\varphi_i = \frac{N_i - N_{i+1}}{20} + \frac{\varepsilon (1 + \psi) (N_{i+1} + N_i)}{2} \quad \text{de } i=9 \text{ à } 2 \text{ inclus}$$

$$\varphi_1 = \frac{N_1 - N_2}{20} + \frac{\varepsilon (1 - \psi') (N_1 + N_2)}{2}$$

$$\varphi_0 = \frac{N_w - N_1}{10} + \frac{\varepsilon (1 - \psi') (N_1 + N_w)}{2}$$

$$\varphi_0 = - \varepsilon \psi' N_w$$

C.- Equations - Machine.-

Comme dans tout calcul sur matériel analogique un certain nombre de changements de variable sont nécessaires pour faire cadrer les domaines de variation des variables du problème avec ceux permis aux grandeurs représentatives générées par le calculateur. Ces changements de variable ne seront pas décrits en détail dans ce rapport.

D.- Appareillage.-

Principe du simulateur.

Le procédé de calcul est électromécanique. Les grandeurs sur lesquelles sont effectués les calculs sont représentées par des tensions électriques ou des angles de rotation mécanique (par exemple dans l'entraînement des condensateurs variables des circuits multiplicateurs).

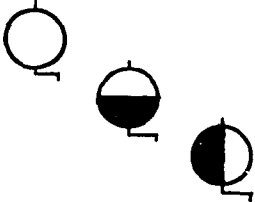
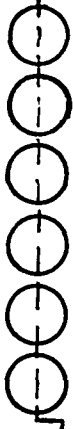
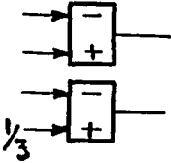
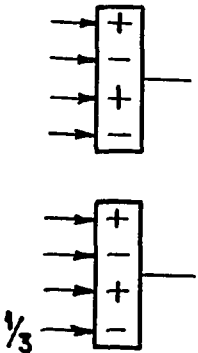

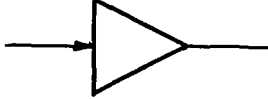
Les chaînes de calcul travaillent sous la fréquence 472 Kc/sec et se composent de capacités fixes ou variables, d'inductances et de feeders. Les intégrateurs utilisés nécessitent une transformation des courants HF en courants continus. On retrouve ensuite le schéma classique d'un amplificateur intégrateur de calcul. Une fois intégré, le courant continu génère une tension HF proportionnelle par l'intermédiaire d'une impédance variable liée à un moteur asservi par l'amplificateur intégrateur. Une étude détaillée de ce procédé de calcul par courants de haute fréquence a été faite par UFFLER (3). Quelques exemples de circuits sont donnés sur la Fig. 4 (a et b).

Composition du simulateur.-

Chaque équation machine est réalisée au moyen de blocs fonctionnels qui sont disposés suivant les lignes horizontales des cinq racks qui composent la machine.

BLOCS FONCTIONNELS DE SIMULATION

TABLEAU 2

| NOM du BLOC | SYMBOLE | CARACTERISTIQUES |
|---|---|--|
| Cellule de multiplication |  | Rapport variable de 0,16 à 0,2 Rapport variable de 0 à -0,1 Rapport variable de -1/8 à 1 |
| 6 cellules de multiplication accouplées |  | Rapport variable de 0,16 à 0,66 |
| Cellules d'addition à 2 entrées |  | Rapports - 1 + 1 Rapports - 1 + 1/3 |
| Cellules d'addition à 4 entrées |  | Rapports - 1 + 1 - 1 + 1 Rapports - 1 + 1 - 1 + 1/3 |
| Intégrateur |  | Gain 10 |
| Répéteur |  | Rapport 6 |

Le tableau 2 donne les représentations des divers blocs de calcul. Ces blocs sont réunis entre eux par des jonctions autocompensées comportant un point de test permettant la mesure de la tension correspondante au moyen d'un bloc de réglage. Un pupitre de commande permet les positions affichage, marche ou gel. L'ensemble de l'appareil est représenté Fig.5 (a et b).

Un exemple de schéma de montage, pour la cascade décrite sur le Tableau 1, est représenté sur la Fig. 6.

III - PRECISION.-

Diverses comparaisons ont été effectuées entre les résultats machine et des calculs numériques, tirés soit de la réf. (1) soit exécutés spécialement sur machine arithmétique. Les valeurs numériques relatives à chaque exemple sont données avec les figures correspondantes.

A - Comparaison par le calcul.-

Régime permanent -

Une cascade de 512 étages a été simulée avec 4 réservoirs fictifs groupant chacun 128 capacités d'étage et disposés de façon régulière. Les valeurs numériques sont :

| | |
|----------------------------|--------------------------|
| Soutirage riche normalisé | $\psi = 0,38$ |
| Soutirage pauvre normalisé | $\psi' = 2,50$ |
| Coefficient de séparation | $\mathcal{E} = 0,002146$ |
| Etages d'enrichissement | 379 |
| Etages d'appauvrissement | 133 |

Les résultats pour les concentrations remarquables sont donnés ci-dessous. L'erreur relative ne dépasse pas 1%.

| | Calcul arithmétique | Simulation |
|-----------|---------------------|------------|
| N_p | 2,00 % | 1,98 % |
| N_{133} | 0,71 % = N_F | 0,99 N_F |
| N_W | 0,51 % | 0,51 % |

Comme deuxième exemple, on a examiné l'importance de l'approximation faite sur le transport en isotope léger dans une section d'usine à forte concentration. Le terme $\sum N_i N_{i+1}$ de l'équation (15) n'est plus négligeable.

La section comporte 250 étages entre deux réservoirs fictifs, avec les valeurs numériques.

$$2 \sum \varepsilon = 1 \quad \psi = 1 \quad N_i = 0,30 \quad N_{i+1} = 0,40$$

Le calcul exact fait avec l'expression (12) conduit à $\varphi = 0,93 \cdot 10^{-3}$. L'approximation (15) conduisant à $\varphi = 0,96 \cdot 10^{-3}$ l'erreur atteint donc 4 % dans ce cas.

Régime transitoire.-

La cascade étudiée comporte 160 étages. Une première simulation a été faite avec 4 réservoirs fictifs, une deuxième avec 2 réservoirs fictifs et ces résultats ont été comparés avec le calcul direct de la montée à l'équilibre d'après la Réf (1). La Fig 7 (a et b) donne les résultats de cette comparaison. En gros, la simulation est satisfaisante lorsqu'on ne groupe pas plus de 40 capacités par réservoir fictif. Le coefficient correctif pour le temps de montée à l'équilibre est alors voisin de 0,90.

B - Examen de résultats donnés par la machine.-

Cascade constante longue à alimentation centrale.

(examen du régime permanent).

La Fig. 8 donne les profils de concentration calculés et simulés et une table de valeurs des concentrations en régime permanent, à titre de comparaison. La cascade constante comporte 1400 étages.

L'alimentation est placée à l'étage 700 et la simulation se fait avec 35 réservoirs fictifs répartis régulièrement.

Un soutirage assez important a été imposé pour se placer dans un cas peu favorable. L'erreur relative ne dépasse pas 2 %.

Cascade constante montée sur réservoir infini.

La Fig. 9 donne la comparaison avec le calcul pour la montée en régime en reflux total d'une cascade constante de 100 étages. L'erreur relative est voisine de 2,5 %.

Usine schématique à deux tailles d'appareillage.-

Les Fig. 10 (a et b) décrivent le comportement d'une installation groupant deux cascades de tailles différentes, pour des perturbations de diverses origines.

La réponse de la concentration de sortie riche N_2 est de la forme :

$$\Delta N_2 = A(\Delta N_F) + B(\Delta \sigma)$$

perturbation sur la concentration d'alimentation. par mise hors circuit de $\Delta \sigma$ étages.

On a examiné la réponse de la concentration N_2 , à un échelon unitaire sur la concentration d'alimentation N_F (Fig 10a) et également l'effet d'une mise hors circuit de 30 étages dans

la partie de l'installation travaillant à basse concentration et de 60 étages dans l'autre partie (Fig 10 b). L'approximation est satisfaisante dans cet exemple.

Jonction longue entre deux cascades constantes.

Outre les montages correspondant à une cascade constante munie d'une section enrichissante et d'une section appauvrissante ou à une cascade constante montée sur réservoir infini il est possible de représenter sur le simulateur des chaînes de cascades constantes réunies entre elles par des boucles portant soit sur un petit nombre d'étages de séparation, soit sur une demi-cascade.

La Fig. 11 (a et b) décrit le cas d'un ensemble de deux cascades constantes montées sur réservoir infini et réunies par une boucle portant sur une demi-cascade. L'évolution du profil des concentrations a été déterminée en fonction du flux de boucle pour un soutirage riche constant. Le calcul rigoureux a d'autre part été fait pour la concentration de tête.

En conclusion, la précision, bien que différente pour chaque cas particulier, peut être estimée comme suit :

- supérieure à 2 % sur les régimes permanents, pour des sections groupant jusqu'à 200 étages.

- de l'ordre de 2 % à 10 % sur les régimes transitoires avec des réservoirs fictifs représentant jusqu'à 50 capacités.

Si la simulation nécessite des réservoirs fictifs plus importants, il faut introduire un coefficient correctif sur le temps, la simulation non corrigée conduisant à des temps d'équilibre trop longs.

IV - TYPES DE PROBLEMES POUVANT ETRE RESOLUS SUR LE SIMULATEUR.-

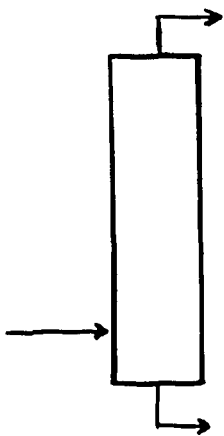
Le chapitre précédent a décrit des exemples de problèmes

simples résolus sur le simulateur :

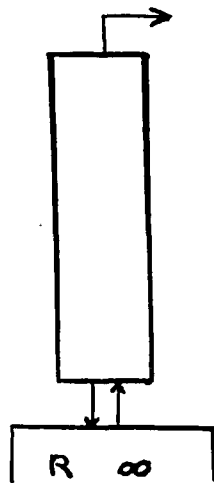
- montée à l'équilibre d'installations préalablement remplies de gaz à teneur isotopique naturelle dans divers modes d'opération, reflux total, soutirage ou perfusion.

- Régime transitoire des concentrations provoqué par une perturbation d'un soutirage, de l'alimentation ou d'un changement de structure de l'installation dû par exemple à la mise hors circuit d'un groupe d'étages.

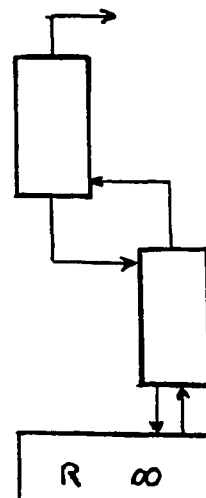
Tous ces problèmes peuvent être traités pour les montages suivants auxquels on peut adjoindre des réservoirs extrêmes ou intermédiaires.



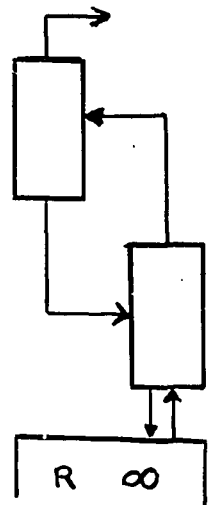
Cascade longue à une ou plusieurs tailles avec une section enrichissante et une section appauvrissante.



Cascade longue à une ou plusieurs tailles montée sur réservoir infini.



Chaînes de cascades réunies par une boucle courte ou longue.



Grâce à la position "gel" du sélecteur de commande, il est possible de faire varier divers coefficients en cours du problème en particulier on peut faire décrire aux soutirages des courbes en escalier.

Ceci permet d'aborder des problèmes compliqués tels que :

- compensation d'une perturbation.
- réalisation d'une transition prédéterminée.
- optimisation d'un démarrage.

On donne ci-dessous un exemple de la technique employée dans chacun des cas précédents.

A - Compensation d'une perturbation.-

La Fig.12(a) décrit la recherche de la courbe de soutirage riche permettant d'absorber une perturbation due à la mise hors circuit de 60 étages dans la partie moyenne de l'installation schématique à deux tailles déjà utilisée pour la Fig. 10. Pour cette opération on se fixe une bande de tolérance autour du régime permanent initial et on essaye, par modification du soutirage riche, de maintenir la concentration de sortie à l'intérieur de cette bande.

On obtient ainsi une courbe en escalier pour le soutirage riche d'autant plus proche de la courbe théorique que la bande de tolérance initiale est plus étroite. En effectuant plusieurs essais du même type on arrive à diminuer de plus en plus la bande de tolérance et à obtenir une bonne approximation de la courbe théorique de variation du soutirage.

B - Réalisation d'une transition prédéterminée.-

Avec la même technique que pour l'absorption d'une perturbation, on peut déterminer l'évolution du soutirage réalisant le passage d'un régime permanent de concentration à un autre suivant un transitoire calculé à l'avance et satisfaisant à certains critères d'optimisation.

La transition décrite sur la Fig. 12 (b et c) concerne l'installation schématique à deux tailles d'appareillages déjà

utilisée pour la Fig. 10. Elle réalise le passage d'un niveau de concentration à un autre en cherchant à se rapprocher le plus possible de la forme échelon, tout en se limitant à des variations acceptables du soutirage.

Cet objectif correspond à un critère de la forme.

$$\int_0^{\infty} \left[(N - N^*)^2 + \lambda (\Delta\psi)^2 \right] dt \text{ minimum.}$$

Ce cas a été également calculé sur machine arithmétique, ce qui a fourni les courbes théoriques données sur la Fig. 12 (a b et c).

Sur ces figures, on porte en abscisse le temps normalisé $T' = 10^{-5}T$

où $T = t/h$ h étant le temps d'étage : $h=H/L$

C - Optimisation d'un démarrage.-

Une usine de diffusion gazeuse comporte un très grand nombre d'étages, si bien que son montage ne peut s'effectuer que par tronçons au fur et à mesure de la livraison des appareils.

Le temps de montage total est long devant les temps d'équilibre des concentrations.

On dispose ainsi avant que l'usine entière ne soit construite, de sections plus ou moins importantes prêtes à la production.

Le problème de la conduite du démarrage consiste à déterminer les temps partiels de montée en régime des tronçons, leur utilisation optimum, les stocks de produits à teneur naturelle nécessaires et les stocks de produits partiellement enrichis qui vont s'accumuler pendant cette période ainsi que leur réutilisation optimum. Cette détermination est basée sur un objectif final, par exemple la production la plus rapide possible d'une certaine quantité de produit hautement enrichi.

Une telle optimisation met en jeu une série de problèmes des types déjà décrits précédemment. Sur le simulateur, toutes ces opérations peuvent être réalisées rapidement avec une visualisation immédiate des résultats.

La Fig. 13 donne un exemple de recherche de temps d'équilibre en régime de perfusion pour un tronçon de cascade rempli au départ de produit à teneur naturelle. La façon la plus rapide de passer d'un niveau de concentration à un autre est un démarrage en perfusion, jusqu'au moment où le niveau désiré est atteint, suivi de l'établissement progressif du soutirage pour maintenir ce niveau constant. De plus le simulateur permet de déterminer le régime de perfusion réalisant le minimum d'un critère. Ce critère peut par exemple relier le temps de mise en équilibre et la quantité de produit naturel dépensé de sorte que le régime calculé réalisera un compromis entre ces deux postes.

V - REALISATION D'UN PLANNING DE DEMARRAGE -

Nous considérons une cascade constante de 640 étages assimilable à l'usine basse d'un ensemble de diffusion gazeuse.

Nous supposons que cette usine est livrée en 4 sous-cascades de 160 étages, chacune d'elles comportant une purge et un réservoir haut. Les sous-cascades ont été simulées au moyen de 4 réservoirs fictifs, la purge et le réservoir ont été simulés par un réservoir fictif équivalent à 160 étages. Le temps de livraison de chaque sous-cascade est de trois mois.

L'objectif est de produire le plus rapidement possible du gaz enrichi à la concentration N_p telle que $\frac{N_p}{N_F} = 2,857$

D'autre part, pour le rejet appauvri de concentration N_w , on s'impose les conditions suivantes :

$$\text{Soutirer} \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{soit à } \frac{N_w}{N_F} \geq 0,95 - \text{ ce qui permet une} \\ \text{réutilisation du rejet} \\ \text{soit à } \frac{N_w}{N_F} \leq 0,70 - \text{ ce qui constitue un} \\ \text{rejet de valeur nulle} \end{array} \right.$$

La réalisation de l'objectif nécessite la livraison de l'usine basse en commençant par la sous-cascade du haut.

En effet, supposons, par exemple, qu'on arrive à produire du gaz à la concentration N_p telle que $\frac{N_p}{N_F} = 2,857$ avec

deux sous-cascades seulement, il serait maladroit, ayant élevé le profil des concentrations de ces 2 sous-cascades, de le faire retomber en leur adjoignant, une sous-cascade supérieure. Il est plus logique de prévoir, par des politiques d'auto-alimentation par exemple, la production de gaz enrichi à $\frac{N_p}{N_F} = 2,857$ avec 1 ou 2 sous-cascades auxquelles on adjoint, petit à petit les sous-cascades inférieures sans modifier les profils établis et en maintenant la production à une concentration constante.

Outre cette politique de livraison nous avons fait les hypothèses d'exploitation suivantes :

- Dès sa livraison chaque sous-cascade est mise en observation en reflux total pendant une durée non précisée mais qui est la même pour toutes.
- A chaque étape du montage l'alimentation peut être

déplacée. Il existe des postes d'alimentation tous les 40 étages.

Une politique d'auto-alimentation permet de produire du gaz enrichi à $\frac{N_P}{N_F} = 2,857$ avec la première sous-cascade.

On a déterminé pour cette sous-cascade, la concentration optima du premier palier de soutirage, l'optimum correspondant à un maximum de production à $\frac{N_P}{N_F} = 2,857$. Les différents rejets appauvris par cette $\frac{N_P}{N_F}$ sous-cascade constituent un stock important à $\frac{N_w}{N_F} = 0,98$ parfaitement utilisable, dans une phase ultérieure. Une fois le profil des concentrations établi pour la première sous-cascade, le simulateur montre que l'on peut immédiatement raccorder la deuxième, préalablement mise en reflux total, et commencer les soutirages aux valeurs choisies sans perte appréciable sur la concentration de tête, de même pour les troisième et quatrième sous-cascades. Les soutirages ont été choisis de façon à donner un rejet appauvri tel que $\frac{N_w}{N_F} = 0,7$ c'est-à-dire inutilisable.

Sur le planning 14a figure l'évolution des concentrations de tête et de queue de chaque sous-cascade au cours de ce démarrage. Sur la figure 14 b on a schématisé la politique de montage et dressé le bilan des stocks disponibles et du gaz naturel dépensé en fin de démarrage.

Sur les figures 14 a et b, les quantités de gaz Q et les soutirages ψ et ψ' ont été normalisés suivant la

méthode habituelle, par rapport à $2 \mathcal{E}L$. Ce coefficient de normalisation n'est pas donné dans le rapport. Nous avons simplement voulu montrer en détail une des applications possibles du simulateur.

VII - CONCLUSION -

Nous avons exposé, dans ce rapport, une technique de représentation du comportement transitoire d'une cascade de diffusion gazeuse par des équations simples et en nombre limité. Nous avons décrit le matériel analogique qui a permis le traitement de ces équations et déterminé à partir d'exemples numériques la validité des approximations nécessaires.

En particulier, la comparaison avec le calcul arithmétique s'est avérée très satisfaisante et fait apparaître le simulateur comme un appareil précieux pour la mise au point de plannings de fonctionnement, de démarrages ou de procédés de régulation.

Les équations employées donnent un régime permanent et un régime transitoire approchés et ne sont valables que pour de faibles concentrations. Mais nous avons donné aussi, pour les hautes concentrations, des équations qui seraient faciles à programmer avec quelques éléments analogiques non linéaires. Un matériel plus compliqué susceptible de représenter les équations de base que nous avons établies permettrait même de s'affranchir de toute approximation sur le régime permanent. Les sections enrichissantes dont le comportement est régi par le système (12) seraient alors simulées par des générateurs de fonction ou des circuits de résolution. De tels circuits ont atteint maintenant un haut degré de précision à cause de leur utilisation dans les calculateurs de tir.

Le petit nombre d'intégrateurs nécessaires pour repré-

senter les réservoirs fictifs rendrait alors moins important le problème de la dérive qui constitue une des difficultés de la solution analogique des systèmes transitoires à grand nombre d'équations.

Des appareils du même type peuvent être construits pour tous les procédés comportant un grand nombre d'éléments identiques associés en cascade, comme on en trouve dans la plupart des dispositifs de séparation isotopique.

Ils peuvent être envisagés également comme auxiliaires dans la conduite de colonnes de distillation ou d'unités productrices diverses.

Manuscrit reçu le 26 janvier 1962.

LISTE DES FIGURES

- Figure 1 - Agencement interne d'étages de séparation
- 2 - Montage possible d'une usine de diffusion gazeuse
- 3 - Notations
- 4 a et b Circuits de calcul par courants de haute fréquence
- 5 a et b Photographies du simulateur
- 6 - Schéma du montage de simulation pour une cascade constante de 100 étages
- 7 a et b Cascade constante de 160 étages
Courbes et table de comparaison des temps d'équilibre en reflux total obtenus au moyen de plusieurs modèles de simulation
- 8 - Cascade constante de 1400 étages à alimentation centrale - Profil des concentrations
- 9 - Cascade constante de 100 étages montée sur réservoir infini
- 10 a et b Perturbations dans une usine schématique à deux tailles
- 11 a et b Jonction longue entre deux cascades constantes
- 12 a,b & c Régulation des concentrations dans une usine schématique à deux tailles
- 13 - Marche en perfusion d'une cascade constante de 280 étages
- 14 a et b Réalisation d'un planning de démarrage

- REFERENCES -

- (1) K. COHEN
The theory of isotope separation as applied to the
large-scale production of U_{235}

Mac Graw Hill Book Co, Inc. (1951)

- (2) E.W. MONTROLL and G.F. NEWELL
Unsteady-state separation performance of cascades

Journal of Applied Physics 23, 184-194, (Feb 1952)

- (3) H.J. UFFLER
Sur un nouveau procédé de calcul par courants de
haute fréquence

Annales de Radio-électricité
XI n° 45 (Juillet 1956)

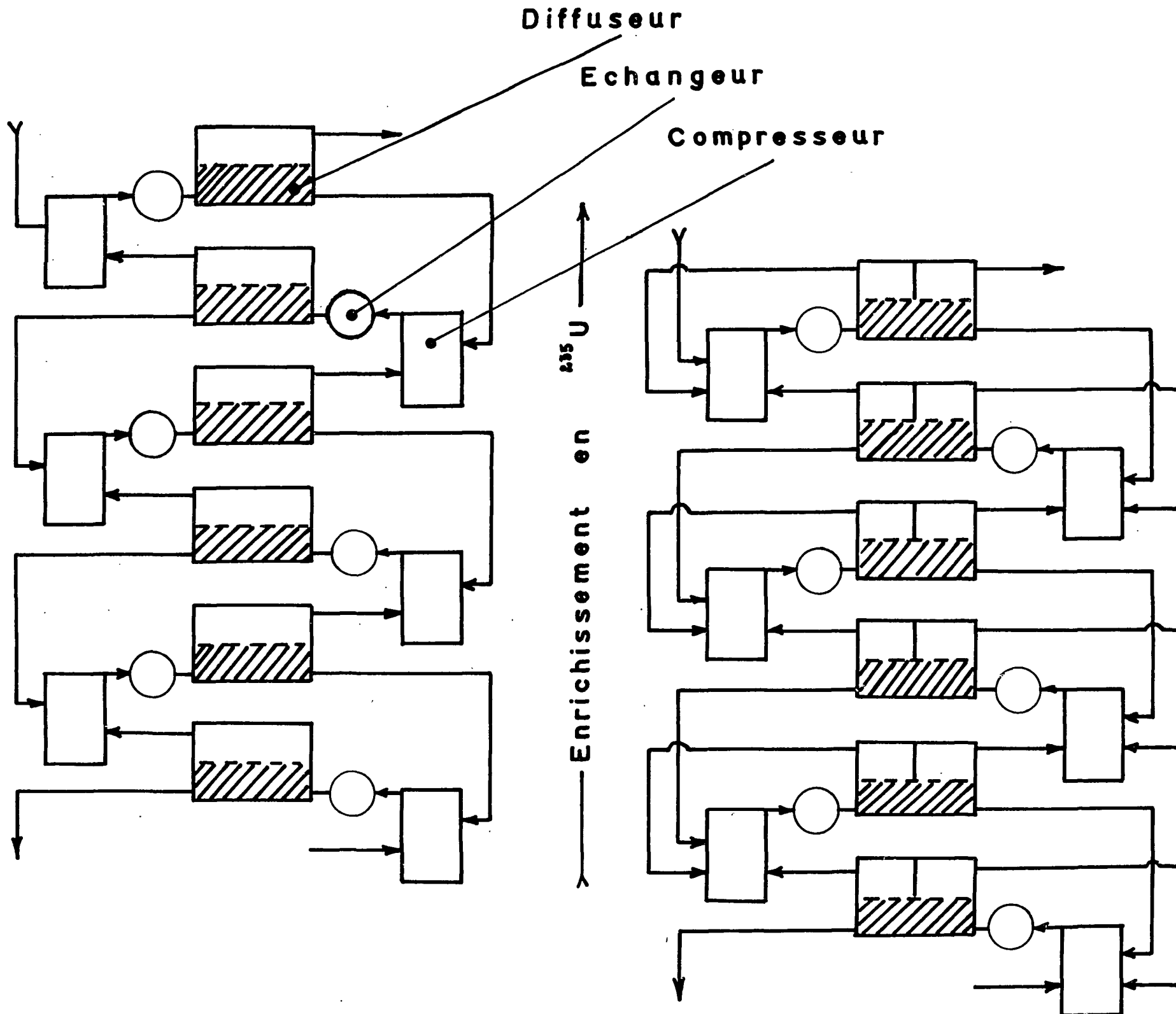


Fig. 1 - Agencement interne d'étages de séparation

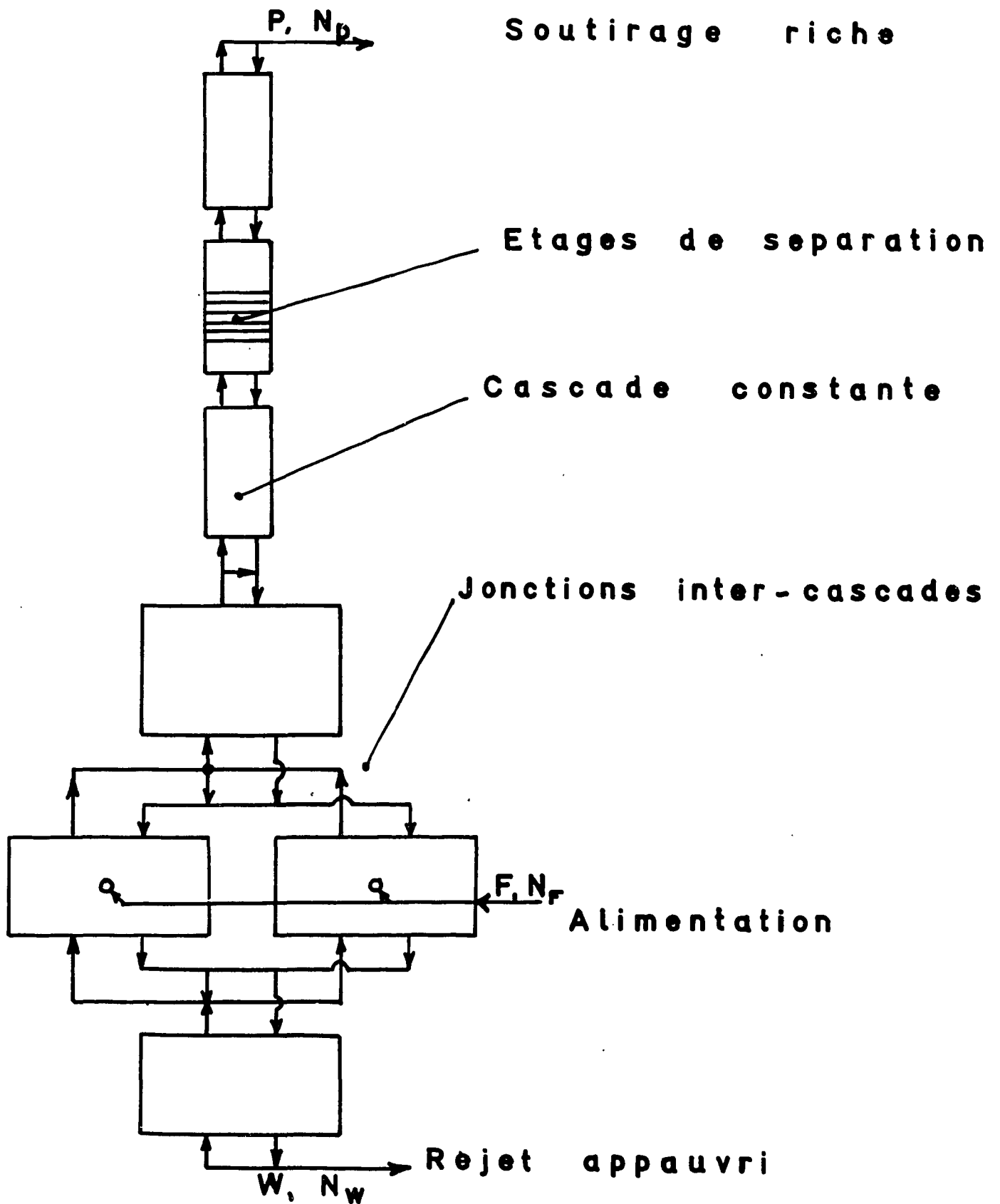


Fig. 2 - Montage possible d'une usine de diffusion gazeuse

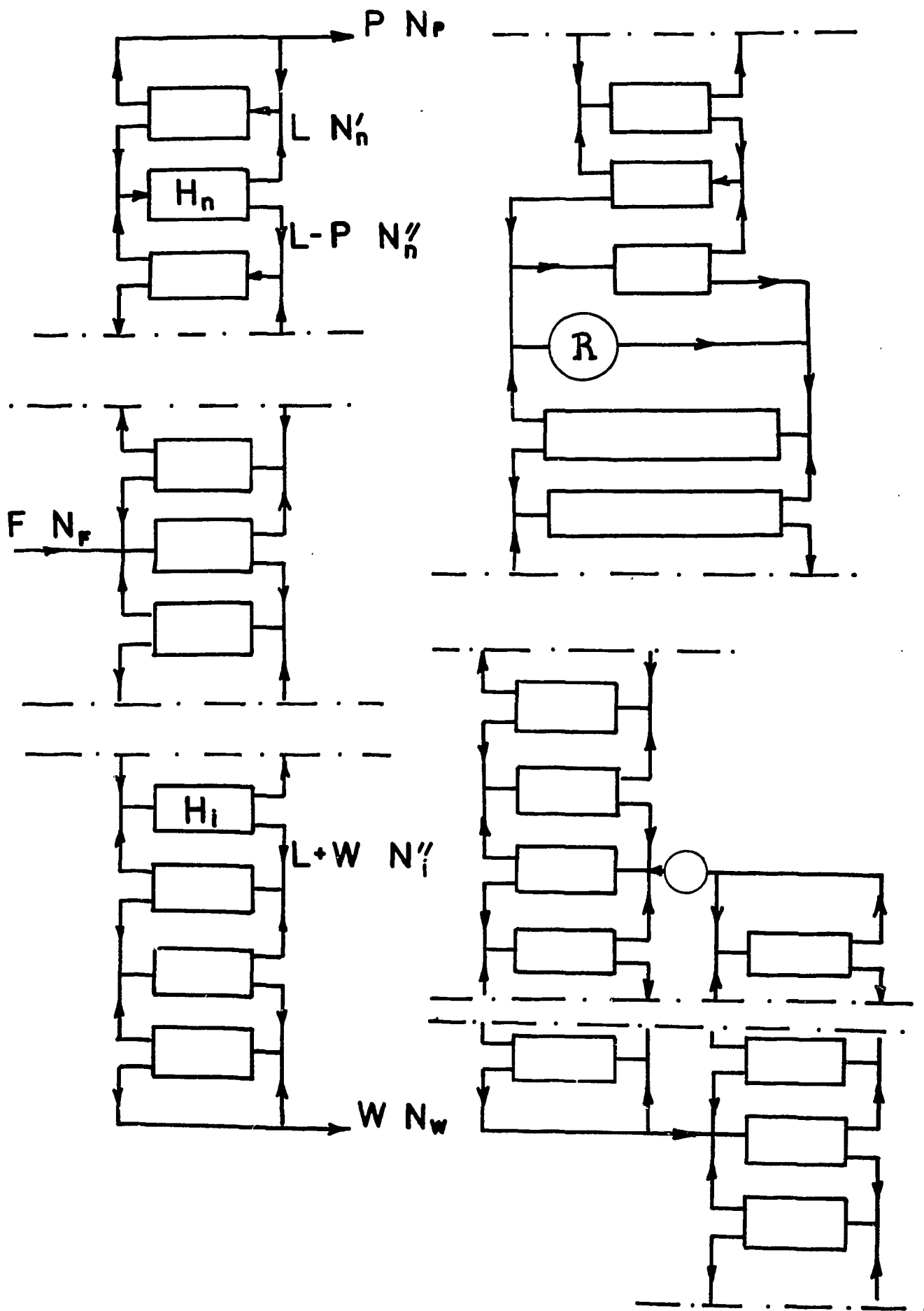
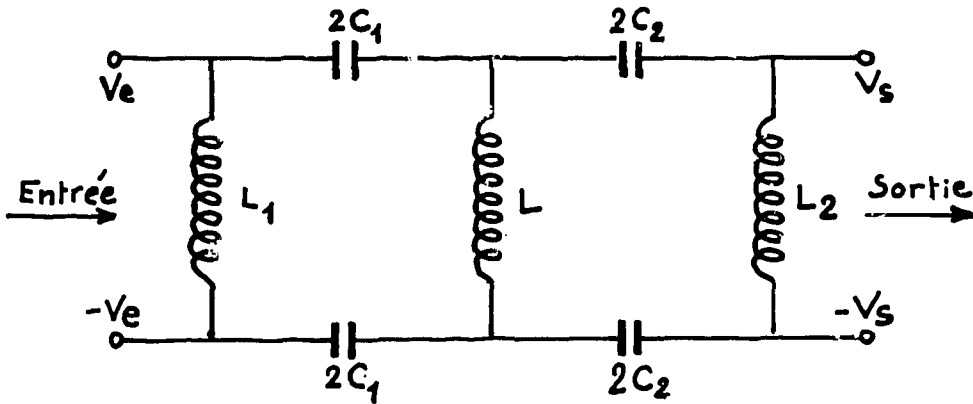


Fig. 3 - Notations

Multiplications

a) par un facteur fixe



Les inductances étant définies

par :

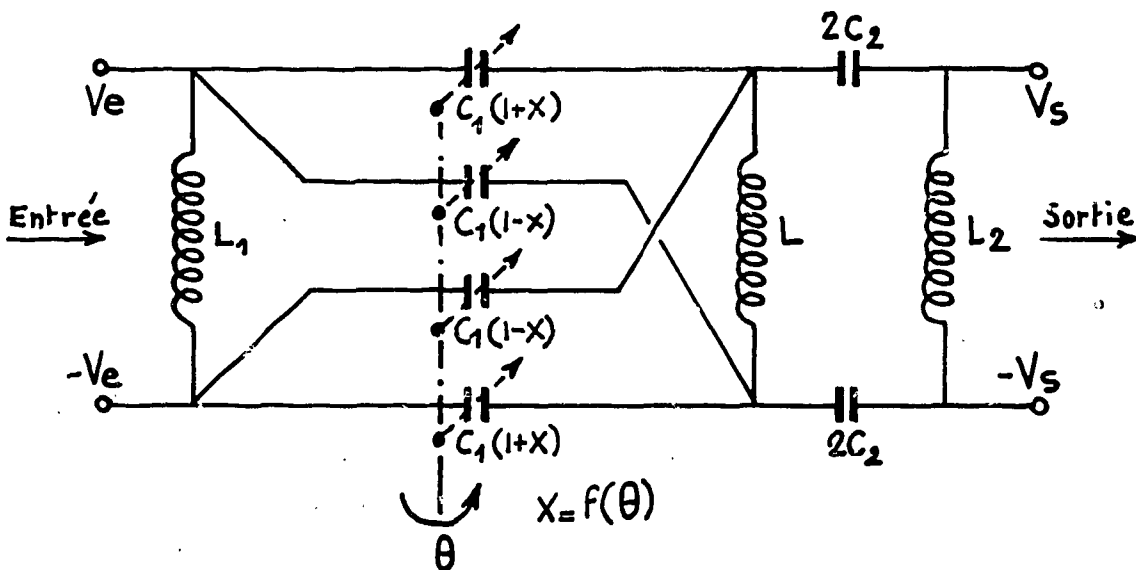
$$L_1 C_1 \omega^2 = 1$$

$$L(C_1 + C_2) \omega^2 = 1$$

$$L_2 C_2 \omega^2 = 1$$

$$V_s = - \frac{C_1}{C_2} \cdot V_e$$

b) par un facteur variable

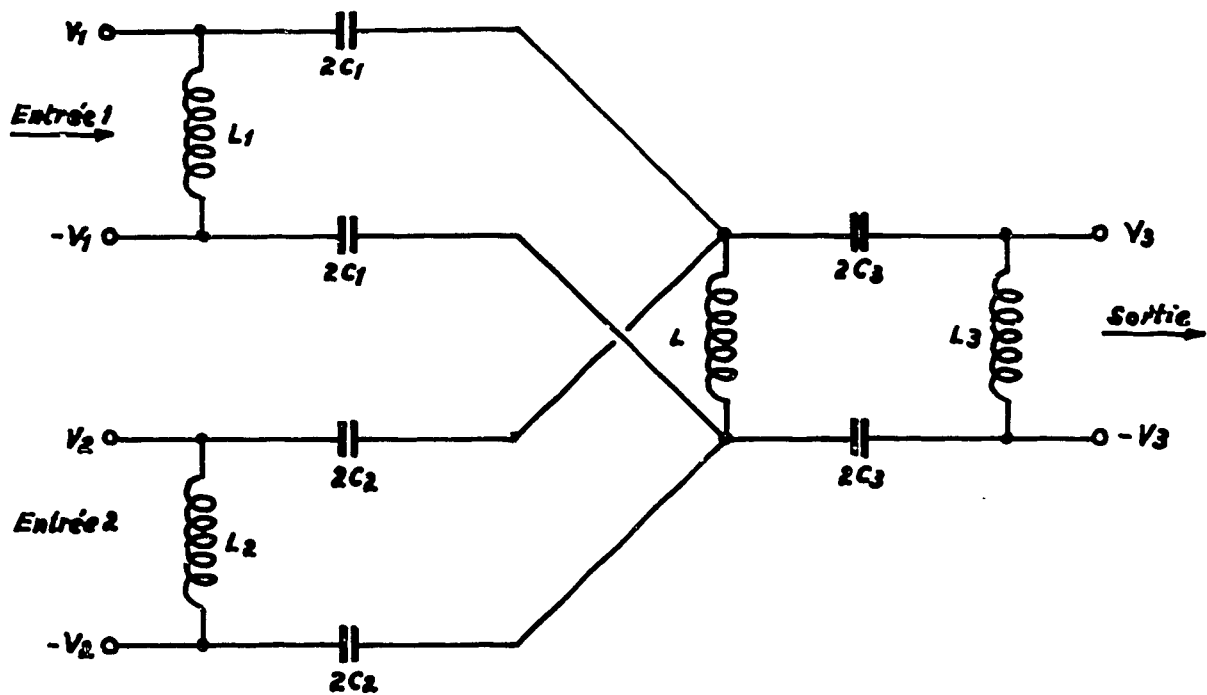


$$V_s = - \frac{K_1}{K_2} x \cdot V_e$$

$x = f(\theta)$ $f(\theta)$ = fonction linéaire, sinusoidale ou quelconque (mathématique ou empirique).

Fig. 4a - Circuits de calcul par courants de haute fréquence

Addition pondérée



$$V_3 = - \frac{C_1 V_1 + C_2 V_2}{C_2}$$

Intégration

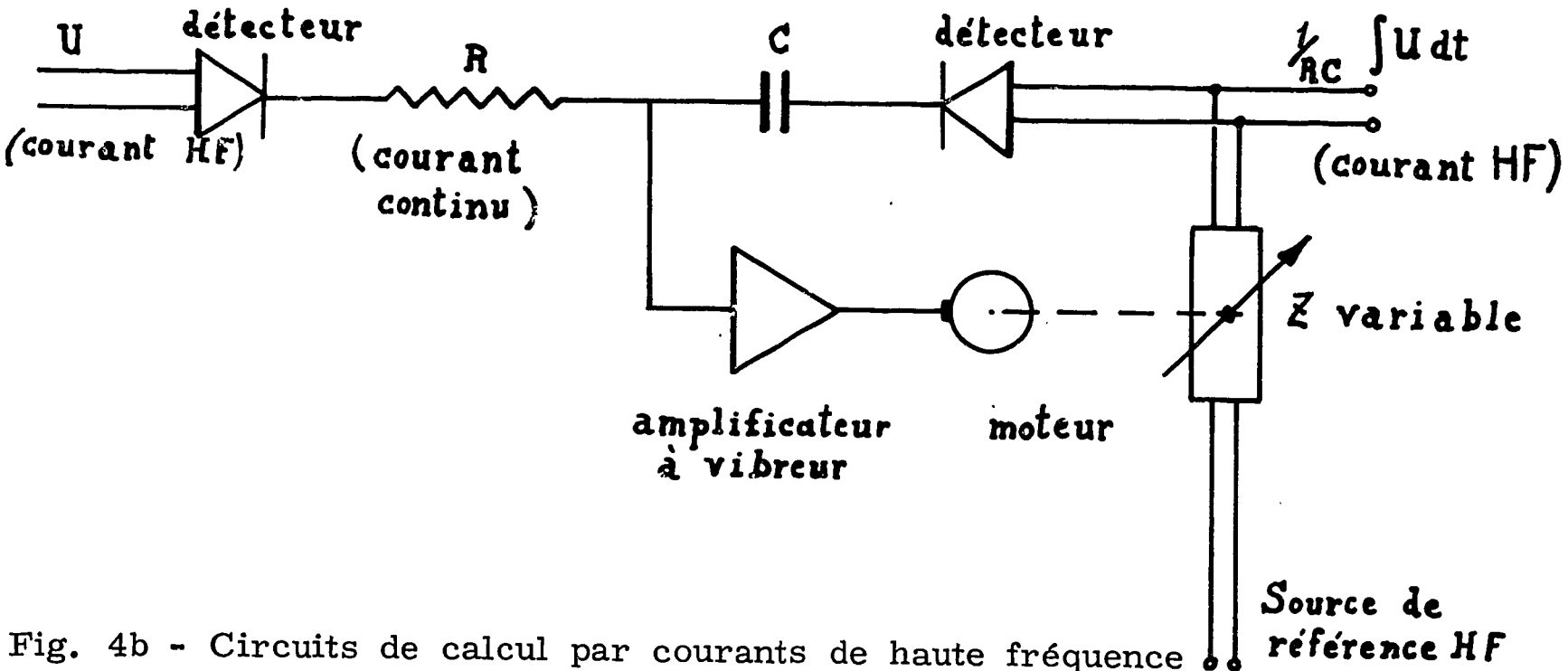


Fig. 4b - Circuits de calcul par courants de haute fréquence

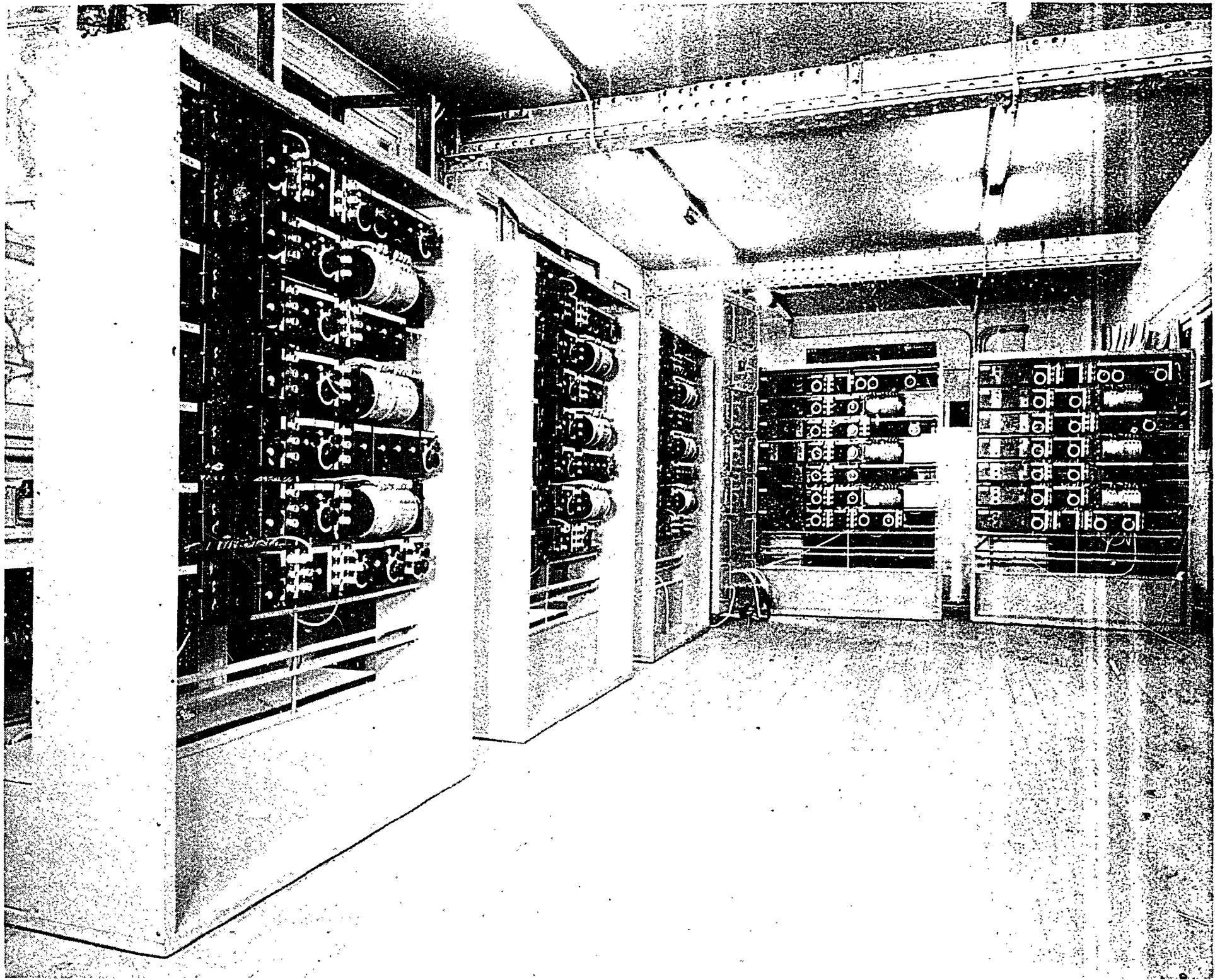


Fig. 5a - Vue générale du simulateur

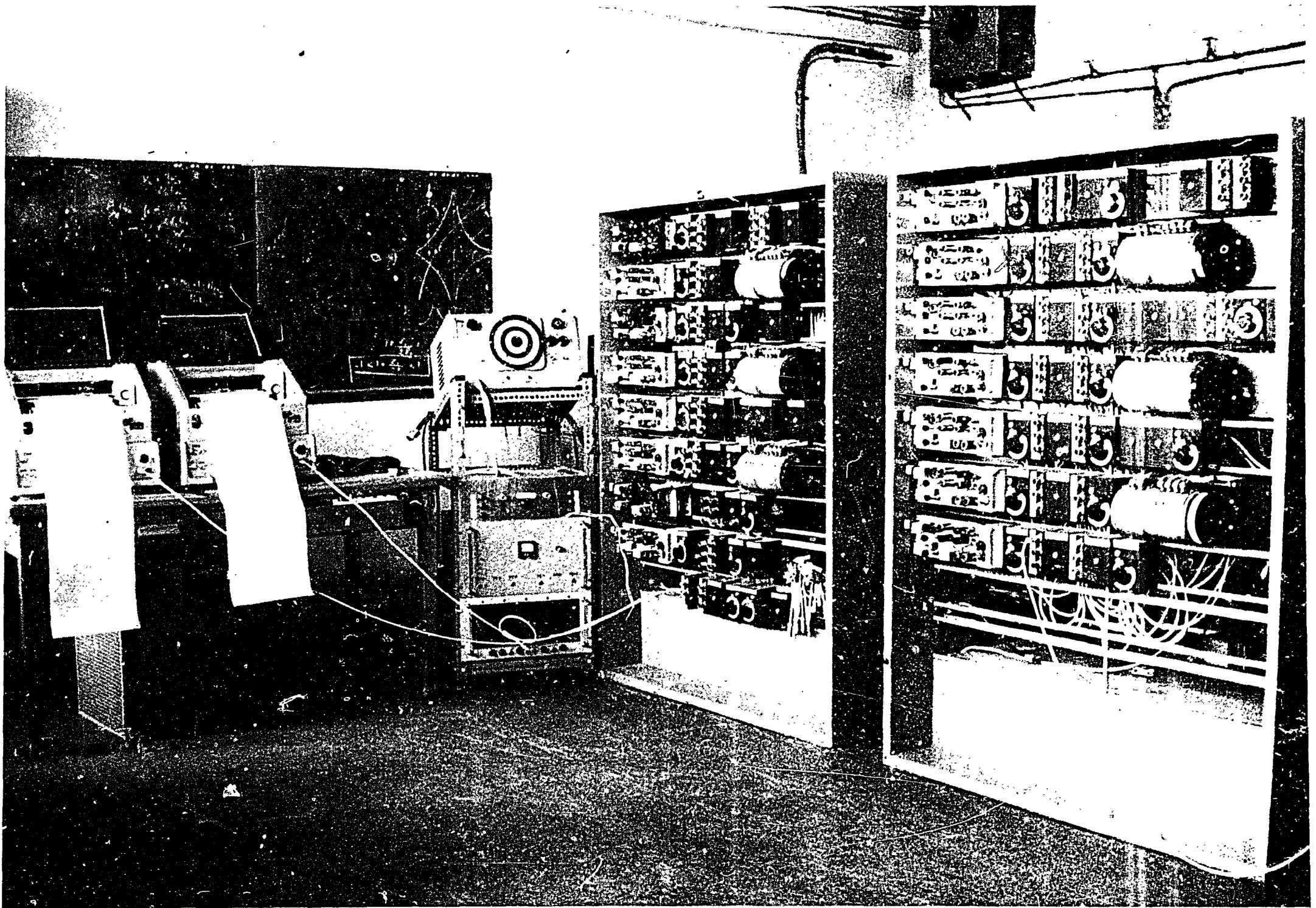


Fig. 5b - Simulateur - Bloc de réglage - Enregistreurs

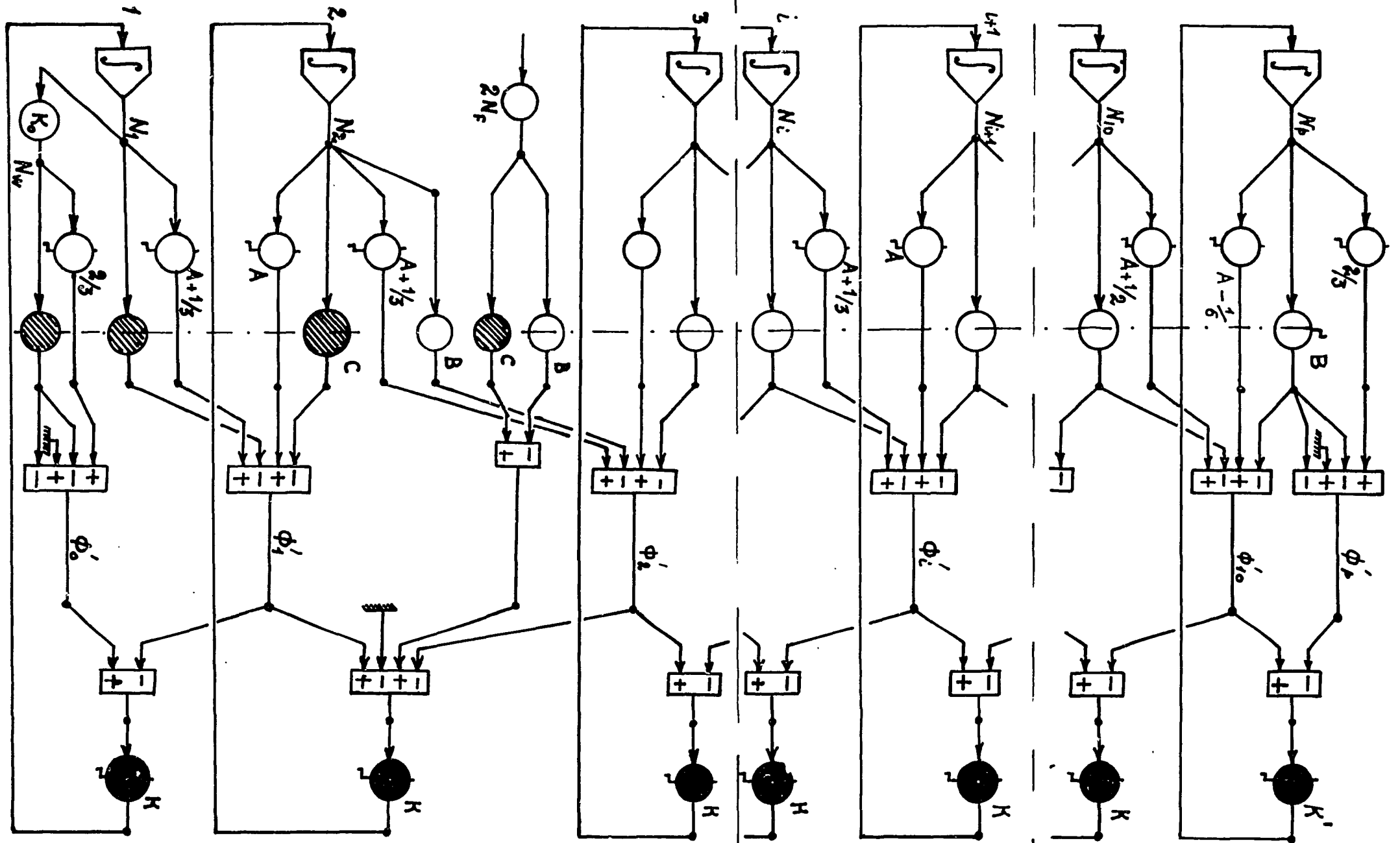


Fig. 6 - Schéma du montage de simulation pour une cascade constante de 100 étages

montée à l'équilibre en reflux total

$h = 5 \text{ sec}$

$\epsilon = 0,002$

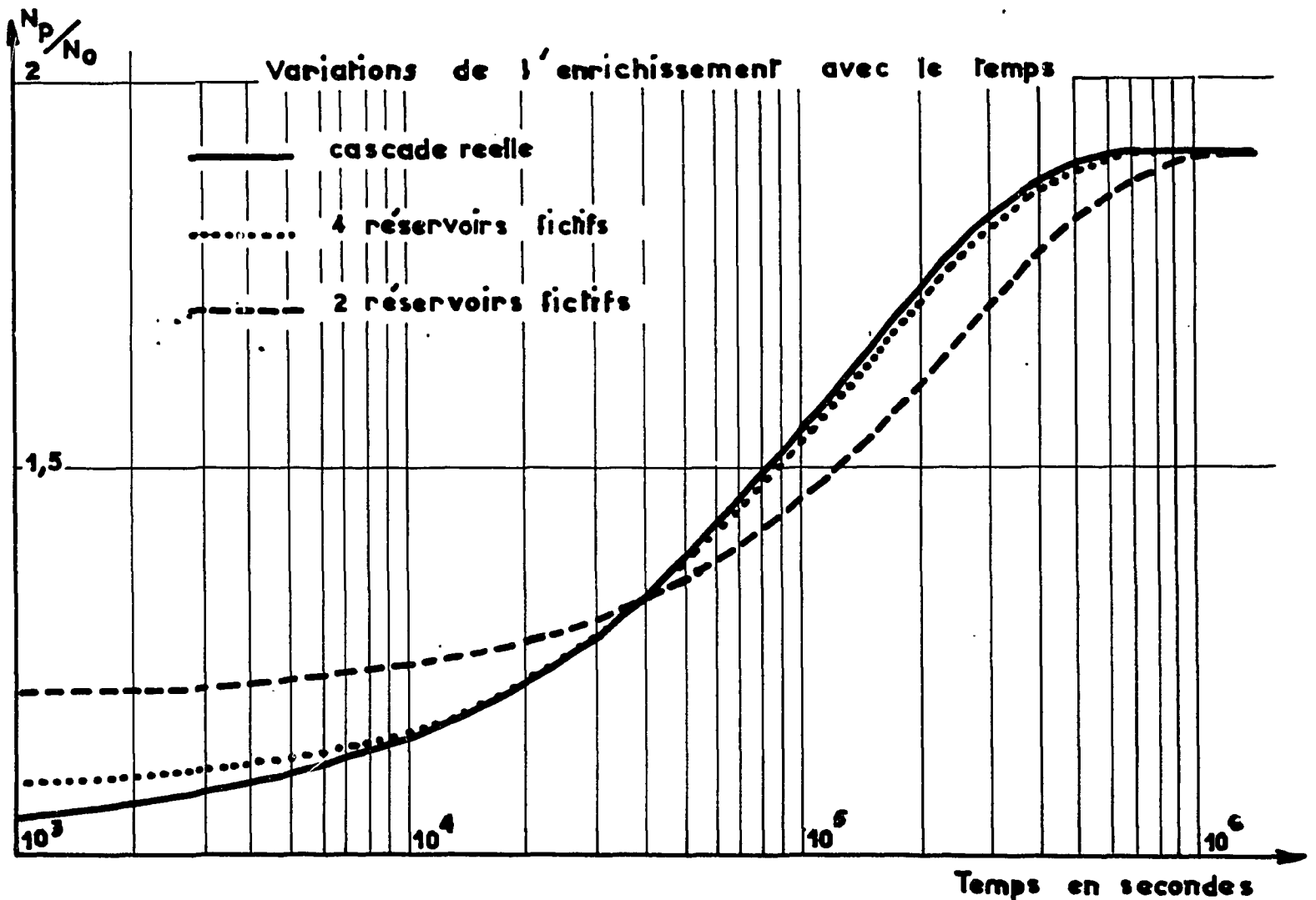
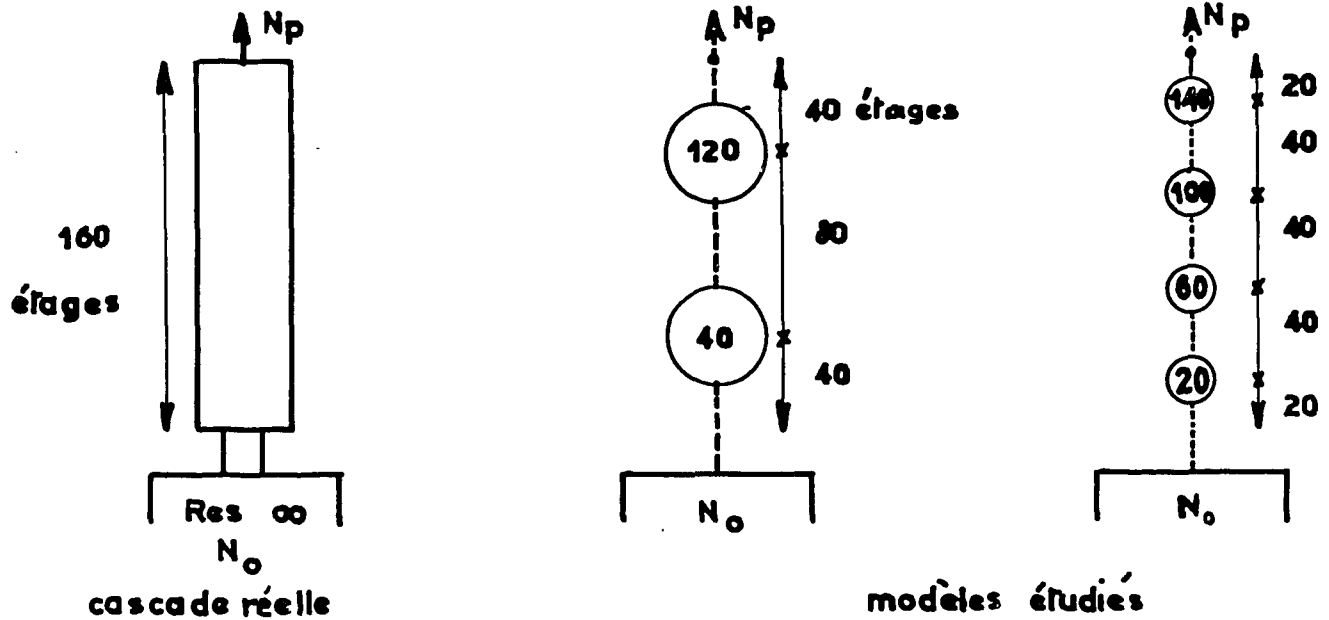


Fig. 7a - Cascade constante de 160 étages, comparaison des temps d'équilibre. En reflux total.

| Temps en heures | | 1 | 10 | 50 | 100 | 120 | 200 | |
|-------------------|--------------------------------|-----------|------|------|------|------|------|------|
| $\frac{N_p}{N_0}$ | Valeur calculée solution Cohen | 1,09 | 1,30 | 1,69 | 1,84 | 1,86 | 1,90 | |
| | Simulation par: | 4 réserv. | 1,12 | 1,30 | 1,64 | 1,80 | 1,84 | 1,89 |
| | | 2 réserv. | 1,17 | 1,29 | 1,59 | 1,76 | 1,79 | 1,87 |

ajustement

η . facteur correctif pour ajuster les temps d'équilibre à 50% de la valeur de régime permanent

| Importance du réservoir fictif | 40 étages | 80 étages |
|--------------------------------|-----------|-----------|
| η | 0,90 | 0,75 |

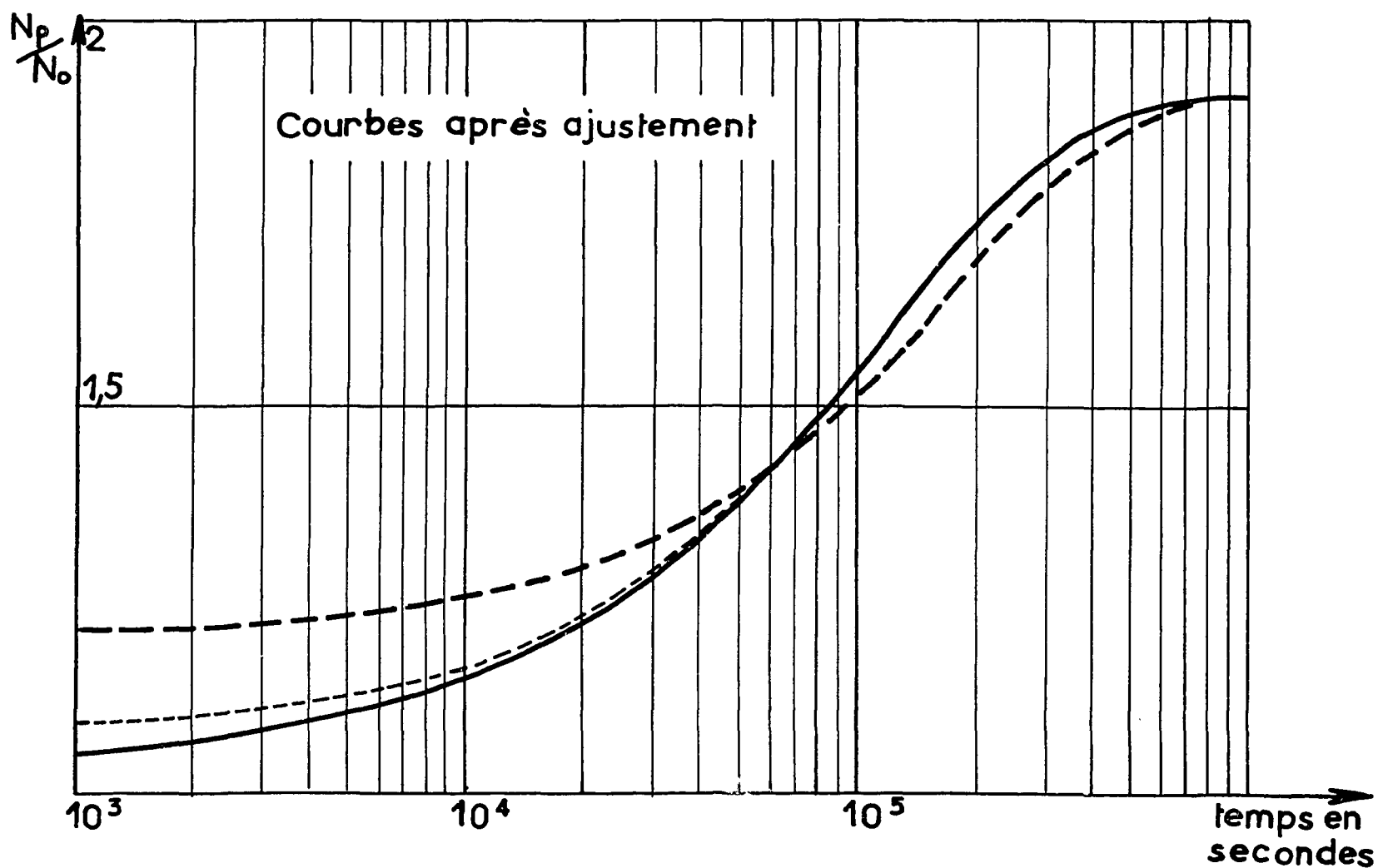


Fig. 7b - Cascade constante de 160 étages. Ajustement des temps d'équilibre.

$$\varepsilon = 0,002 \quad L = 2 \text{ kg/sec} \quad P = 252,3 \text{ t/an} \quad W = 674,5 \text{ t/an}$$

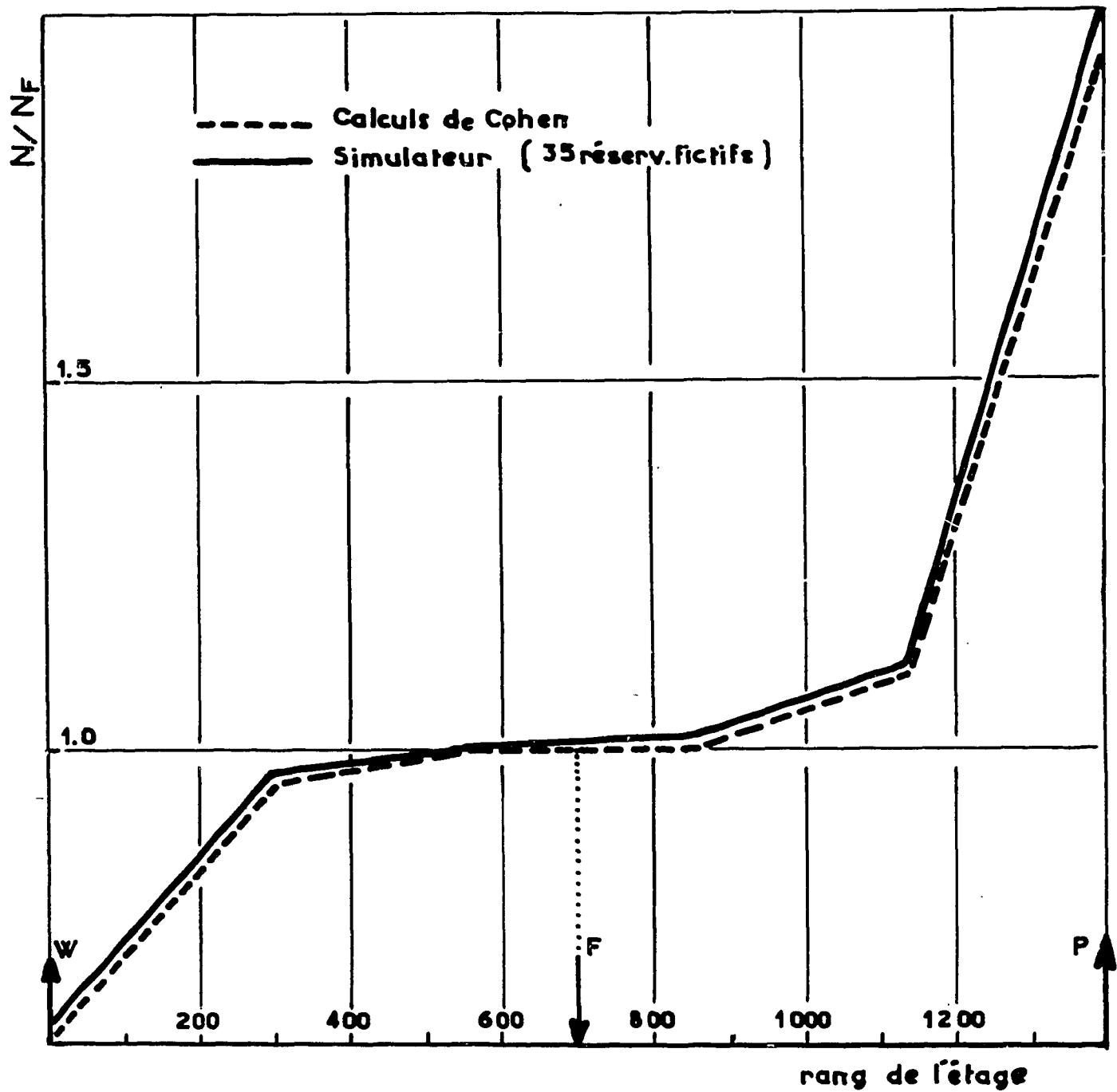
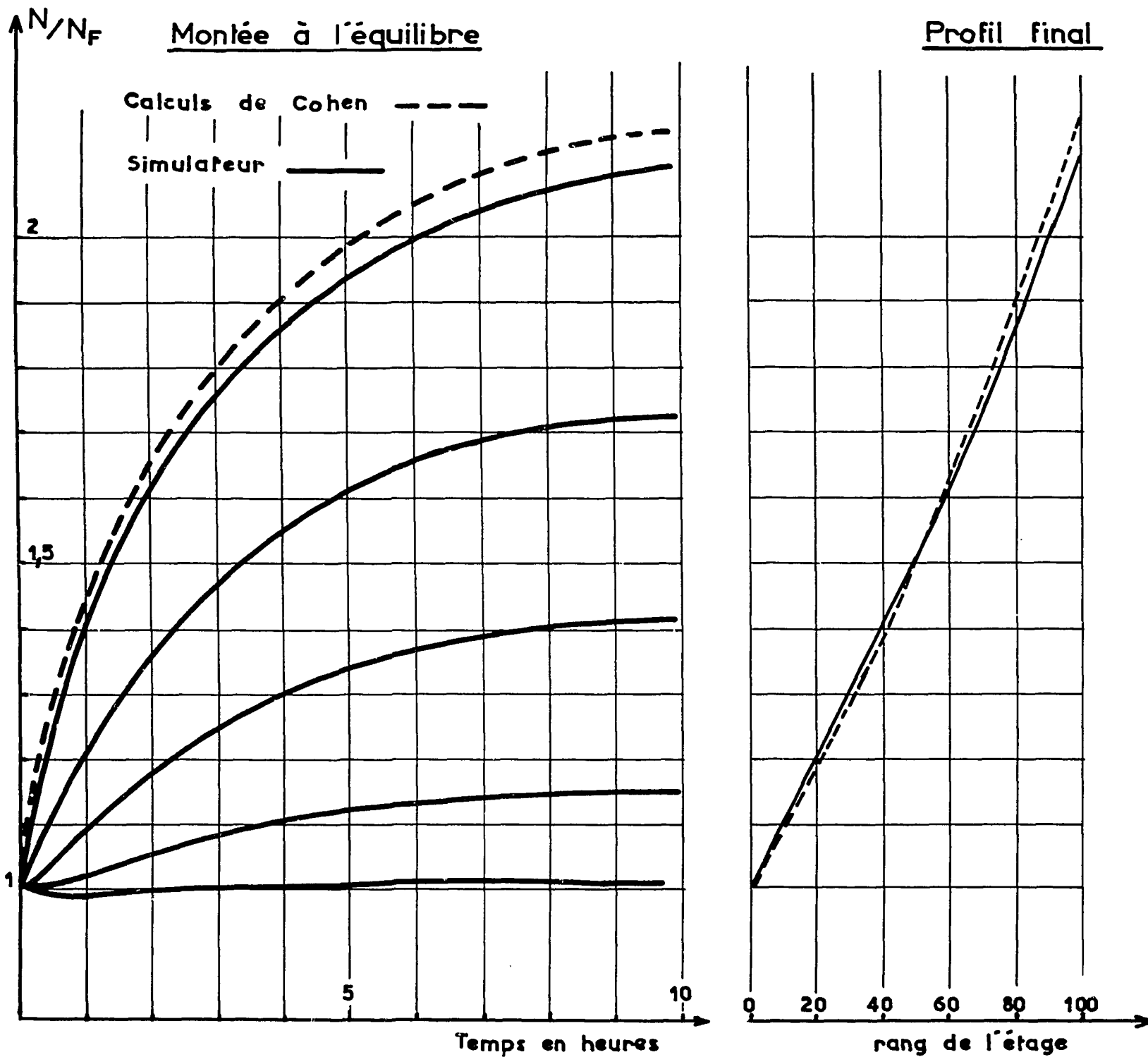


Table de comparaison

| rang de l'étage | valeurs calculées par les formules de Cohen | valeurs obtenues au simulateur | erreurs relatives |
|-----------------|---|--------------------------------|-------------------|
| N_p | 1,9935 | 2,0150 | + 1,1 % |
| 1140 | 1,1211 | 1,1172 | - 0,4 % |
| 860 | 1,0100 | 1,0130 | + 0,3 % |
| 700 | 1,0004 | 1,0040 | + 0,4 % |
| 580 | 0,9961 | 1,0030 | + 0,7 % |
| 300 | 0,9534 | 0,9560 | + 0,3 % |
| 20 | 0,6750 | 0,6610 | - 2,0 % |

Fig. 8 - Cascade constante de 1400 étages à alimentation centrale.
Profil des concentrations.



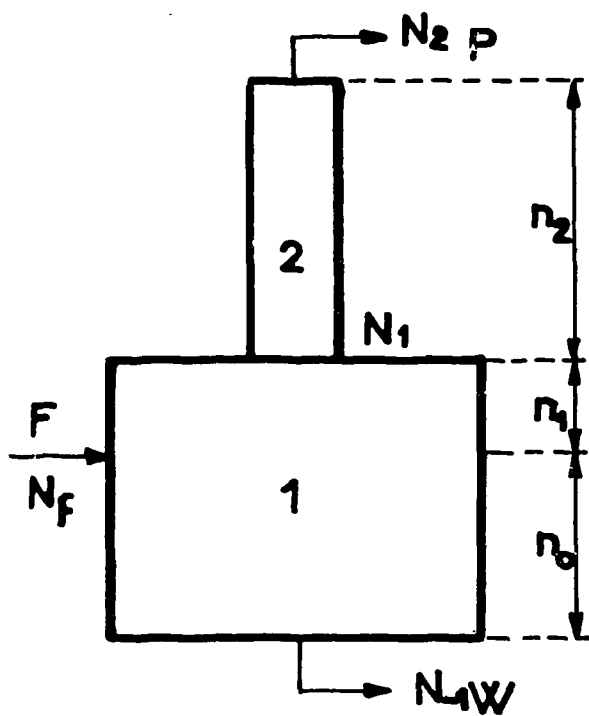
$$\epsilon = 0,004$$

$$h = 2 \text{ sec}$$

| Niveau atteint en % de la valeur d'équilibre | 30% | 50% | 70% | 80% | 90% |
|--|------|------|-------|-------|-------|
| Temps d'après Cohen secondes | 2600 | 6150 | 12000 | 16100 | 24100 |
| Temps avec le Simulateur | 2600 | 6300 | 12300 | 16500 | 24700 |
| Erreur relative | 0 | 2,5% | 2,5% | 2,5% | 2,5% |

Fig. 9 - Cascade constante de 100 étages montée sur réservoir infini.
Reflux total.

Usine réelle



Valeurs numériques

$$\varepsilon = 0,0055$$

$$\frac{L_2}{L_1} = 0,3636$$

$$h_1 = h_2 = \frac{t}{T}$$

$$n_2 = 180$$

$$n_1 = 60$$

$$n_0 = 120$$

Echelon unitaire de N_F

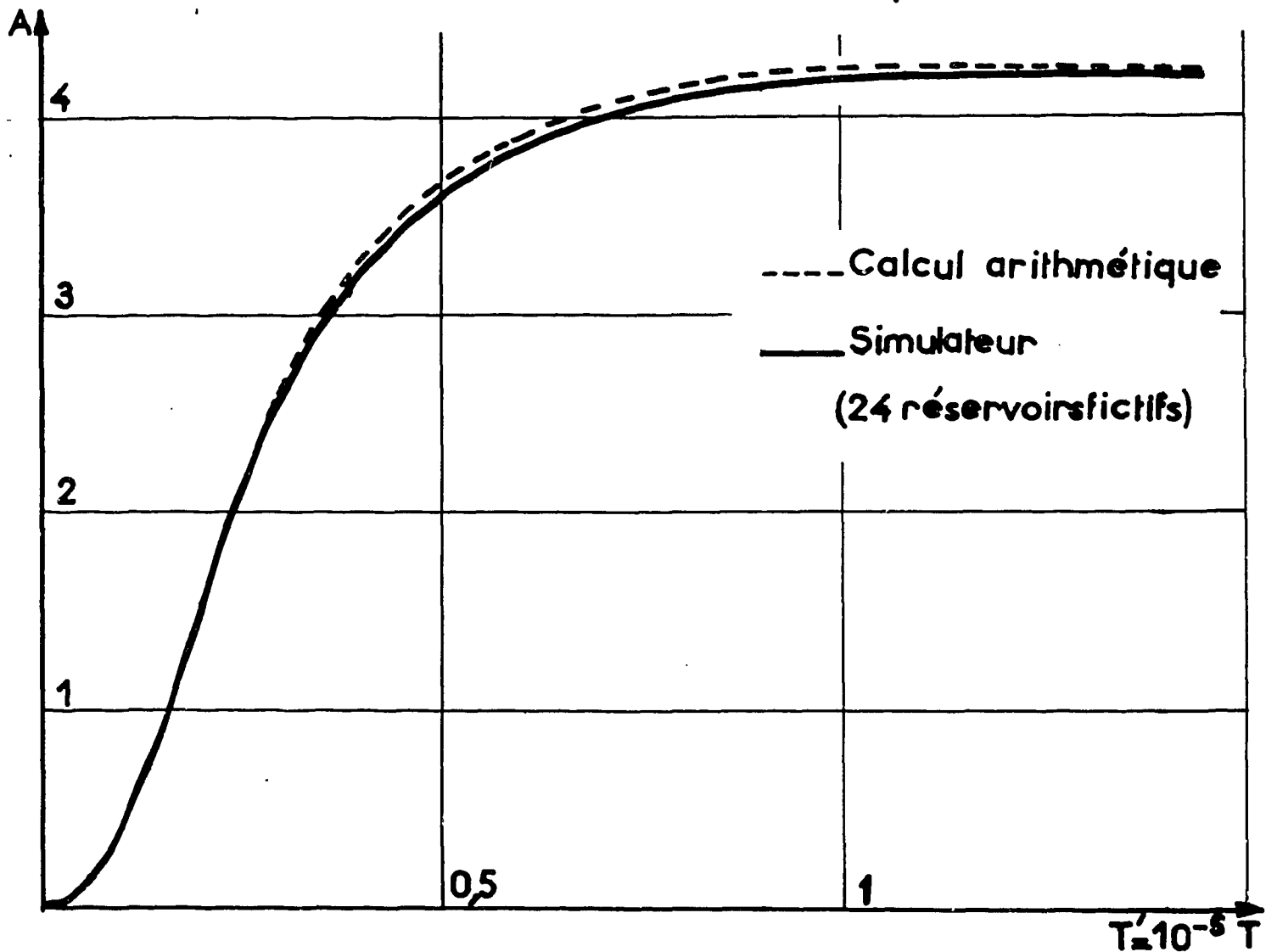


Fig. 10a - Perturbations dans une usine schématique à deux tailles.

shuntage d'étages

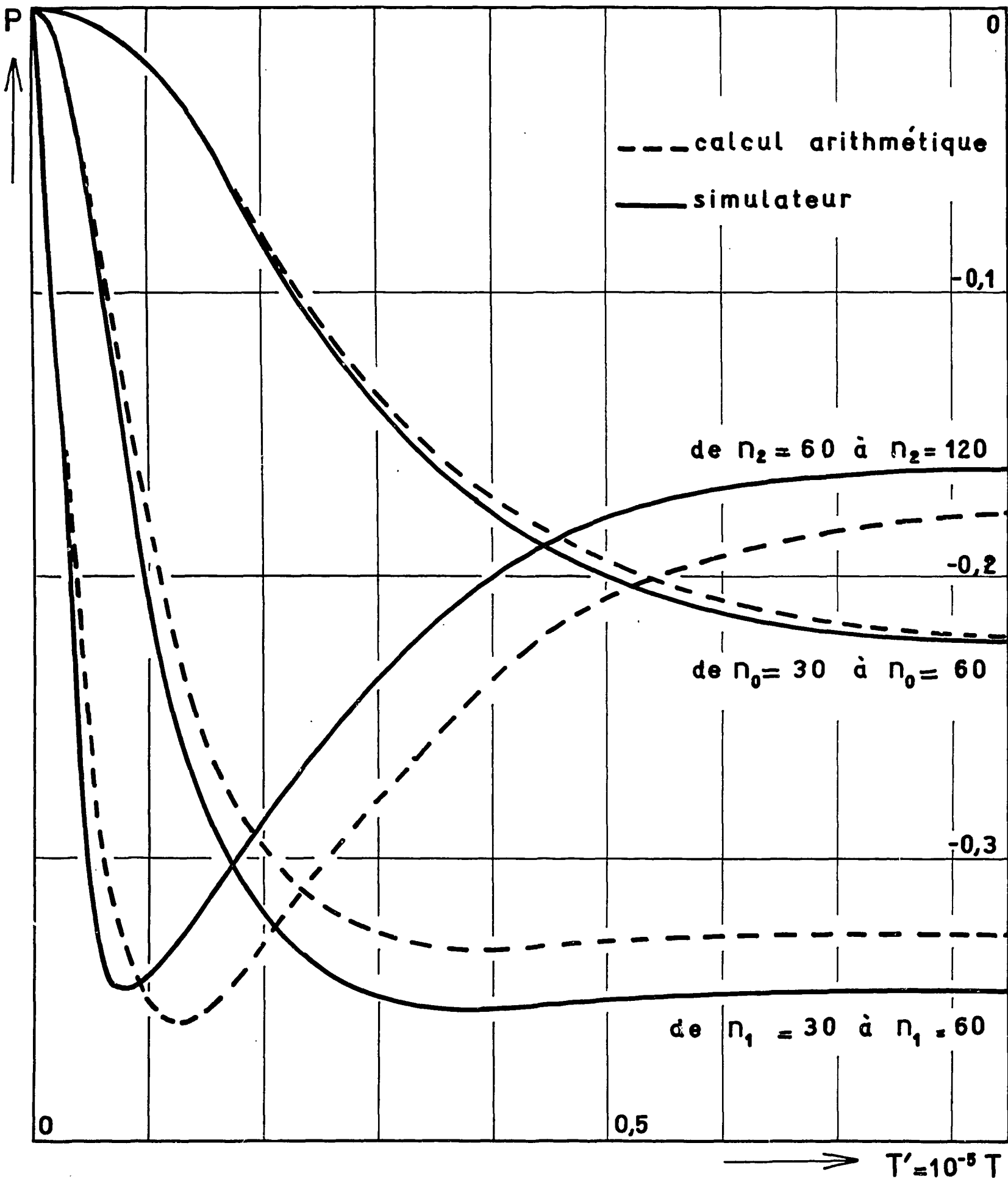


Fig. 10b - Perturbations dans une usine schématique à deux tailles.

influence du flux de boucle

$$\Psi_2 = P_2 / 2\epsilon L = 0,5$$

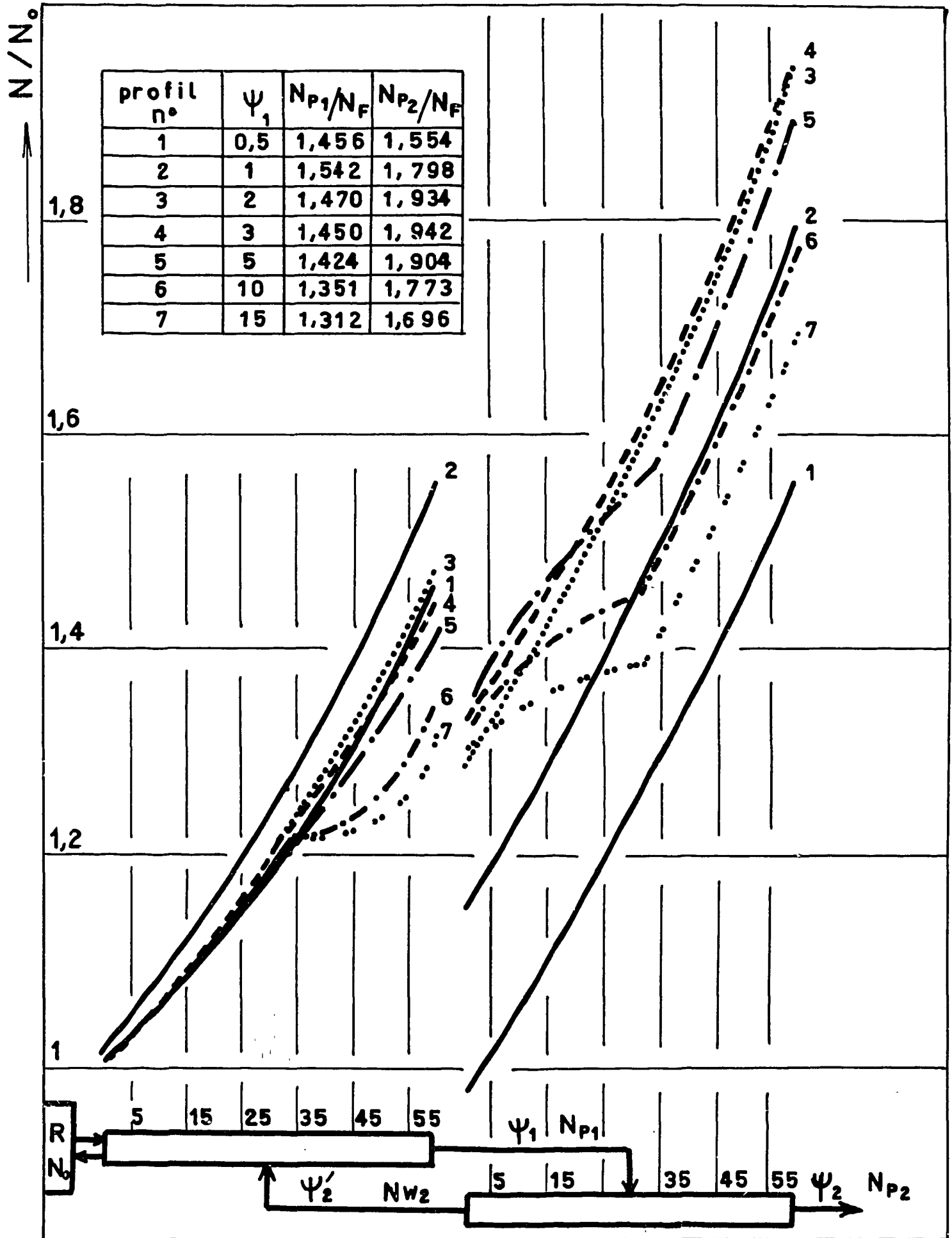


Fig. 11a - Jonction longue entre deux cascades constantes.

évolution des concentrations remarquables
en fonction du flux de boucle.

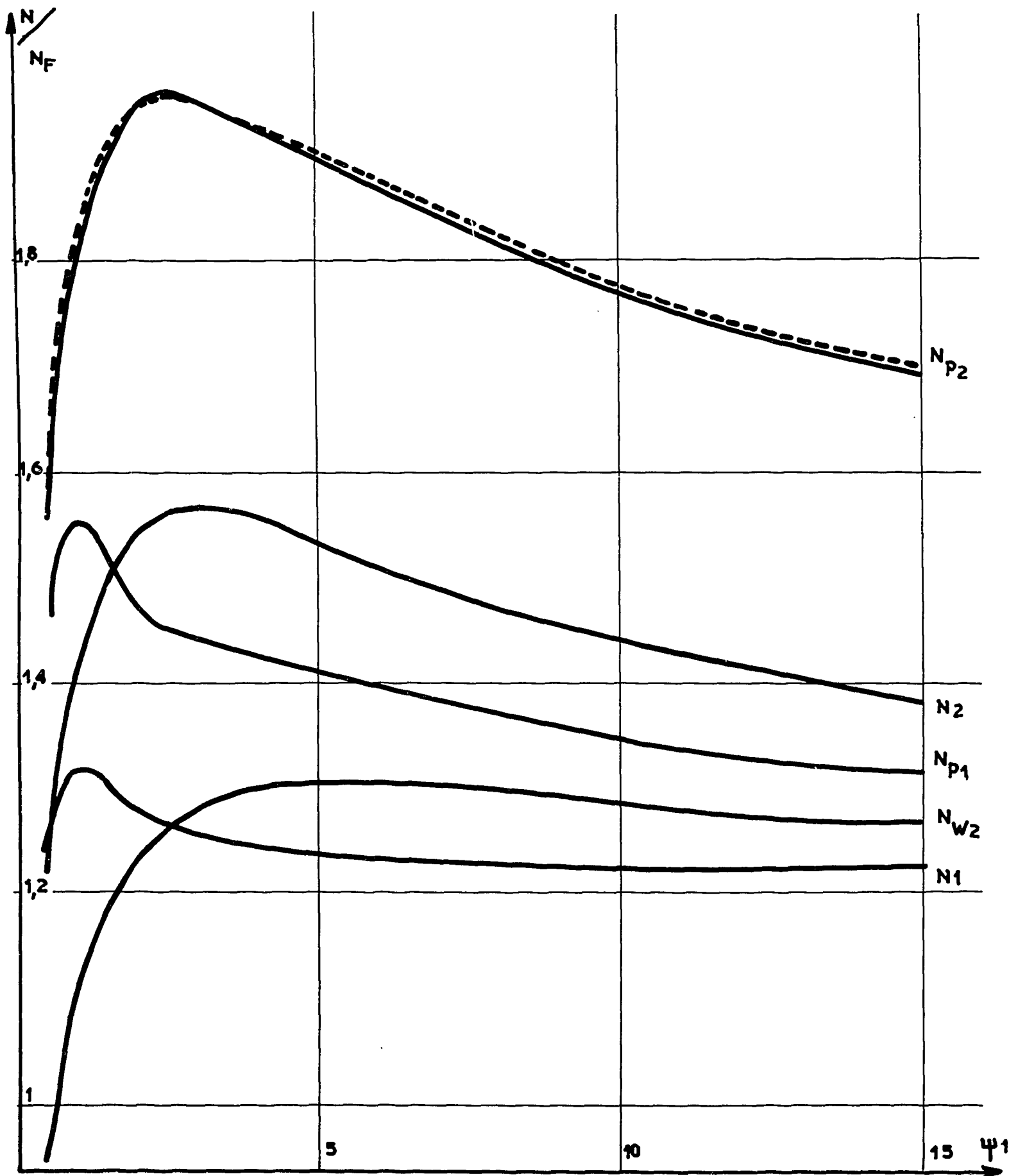


Fig. 11b - Jonction longue entre deux cascades constantes

régulation d'un shuntage d'étages

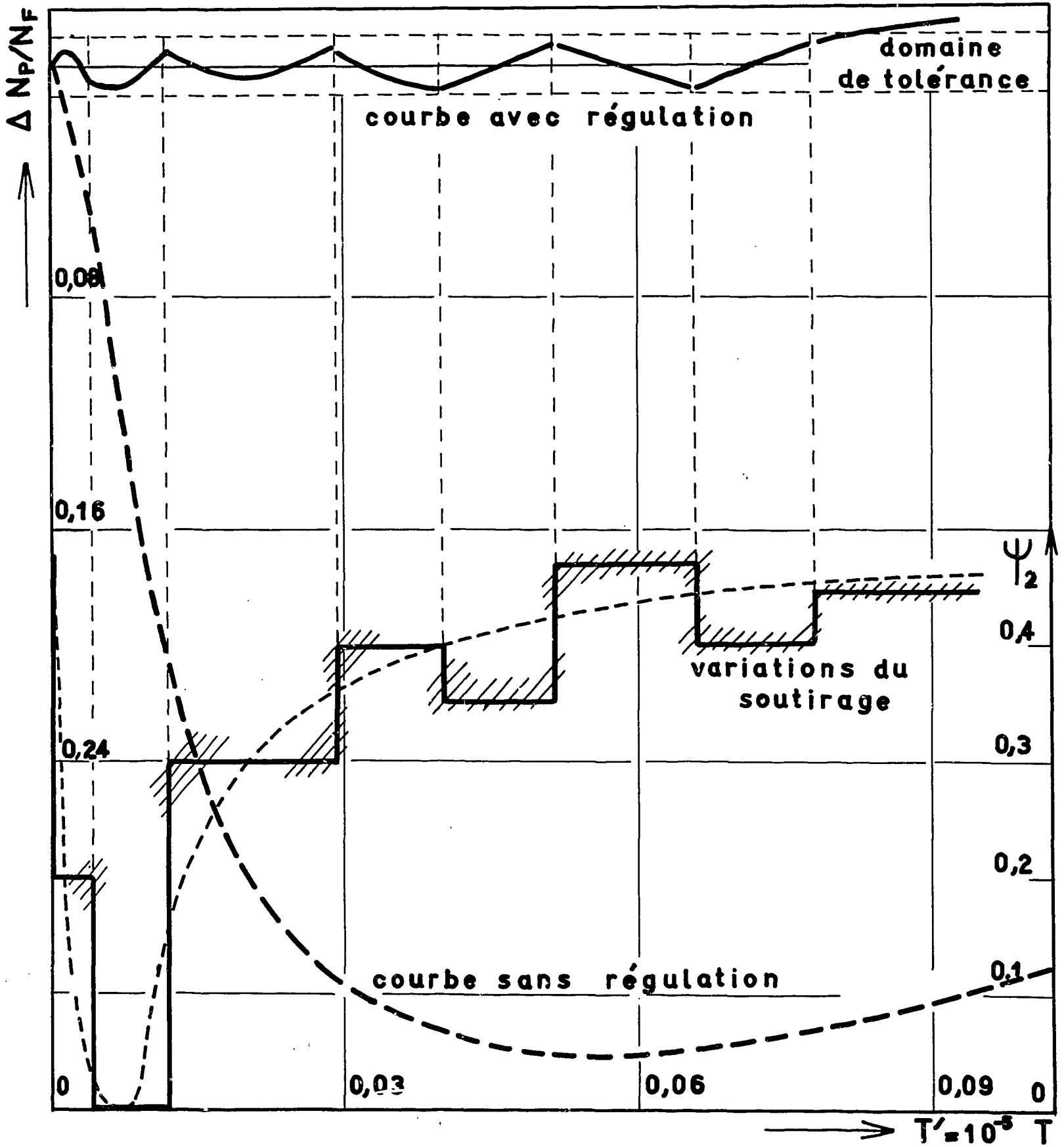


Fig. 12a - Régulation des concentrations dans une usine schématique à deux tailles.

réalisation d'une transition prédéterminée

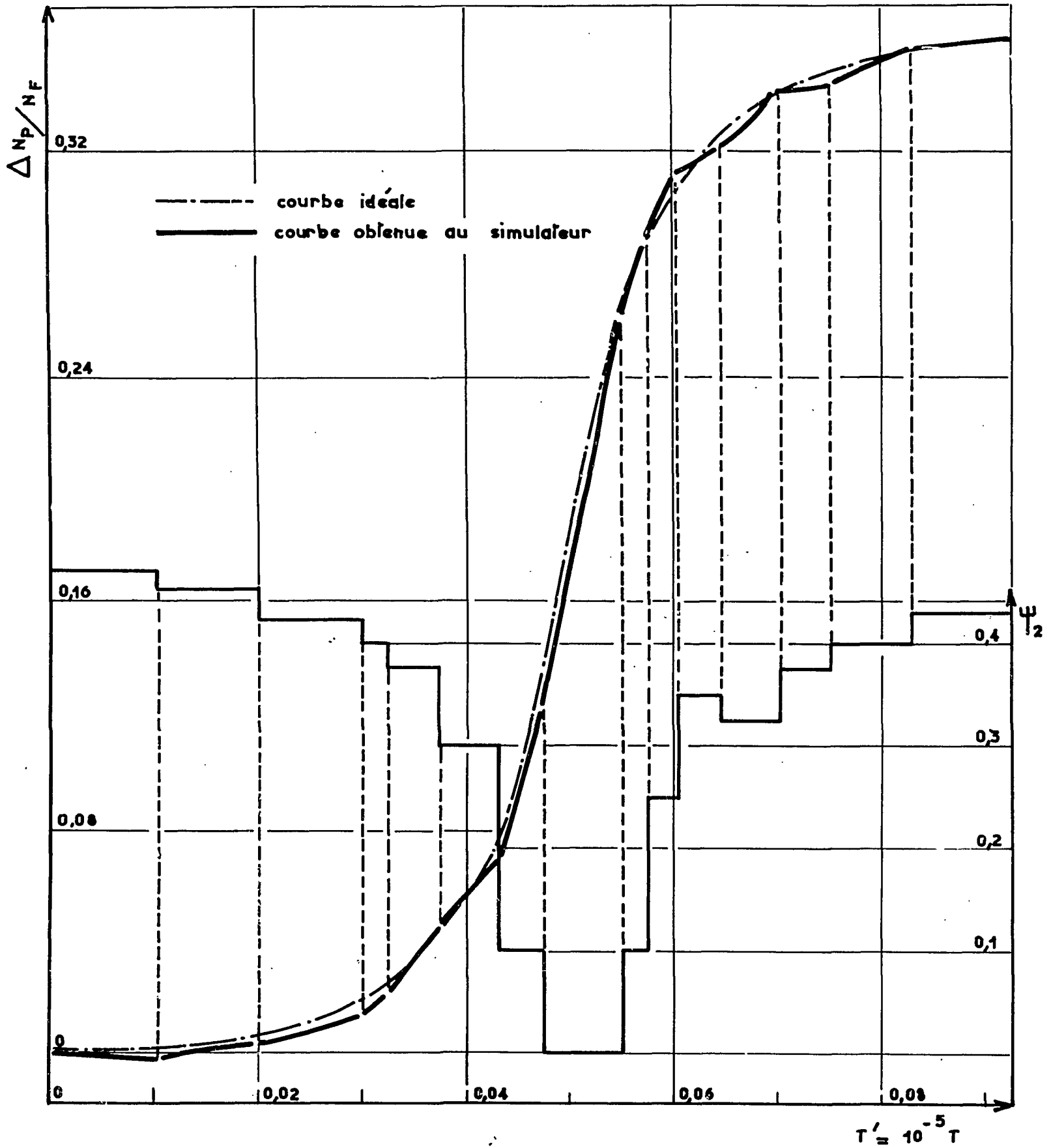


Fig. 12b - Régulation des concentrations dans une usine schématique à deux tailles.

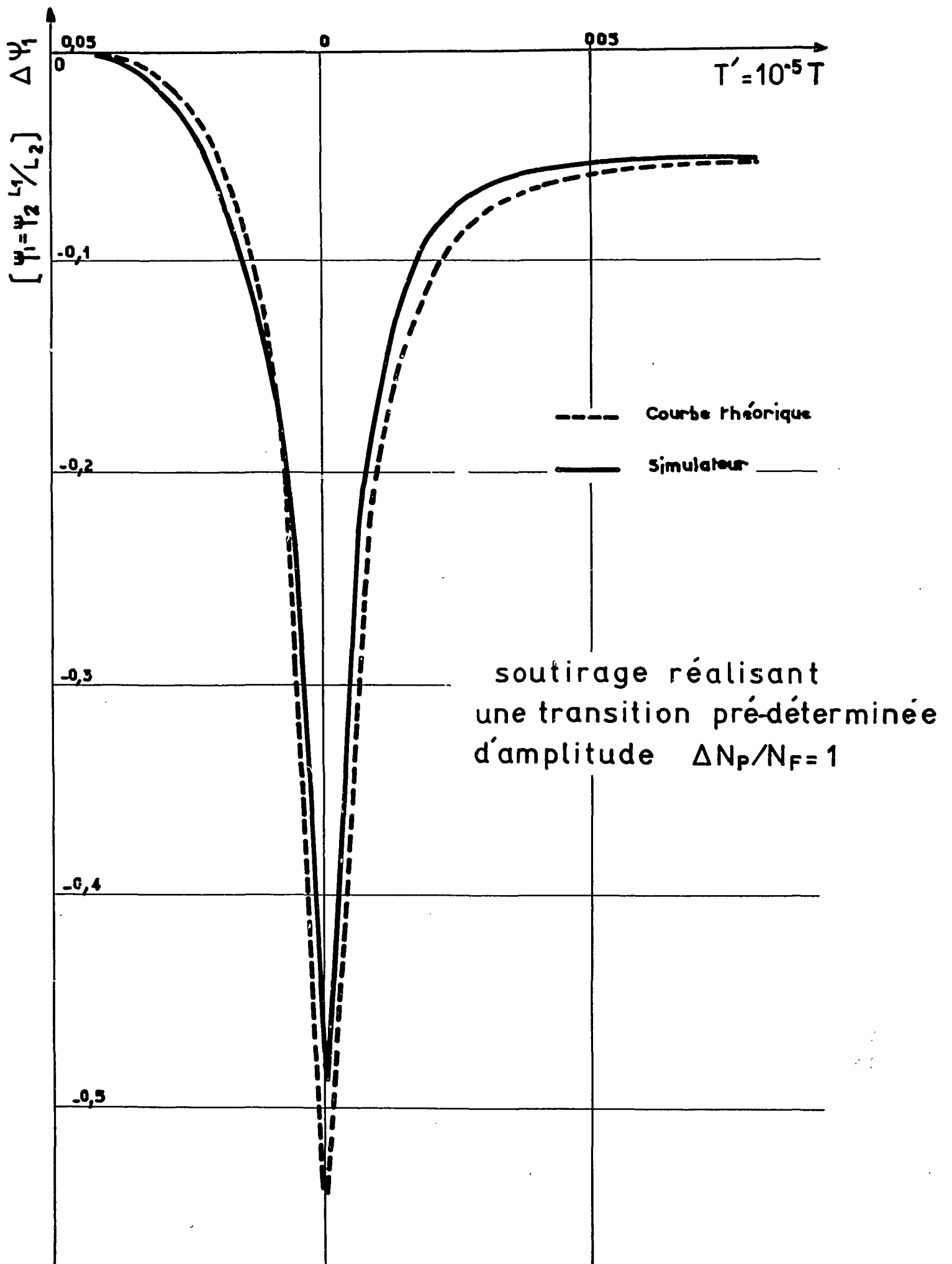


Fig. 12c - Régulation des concentrations dans une usine schématique à deux tailles.

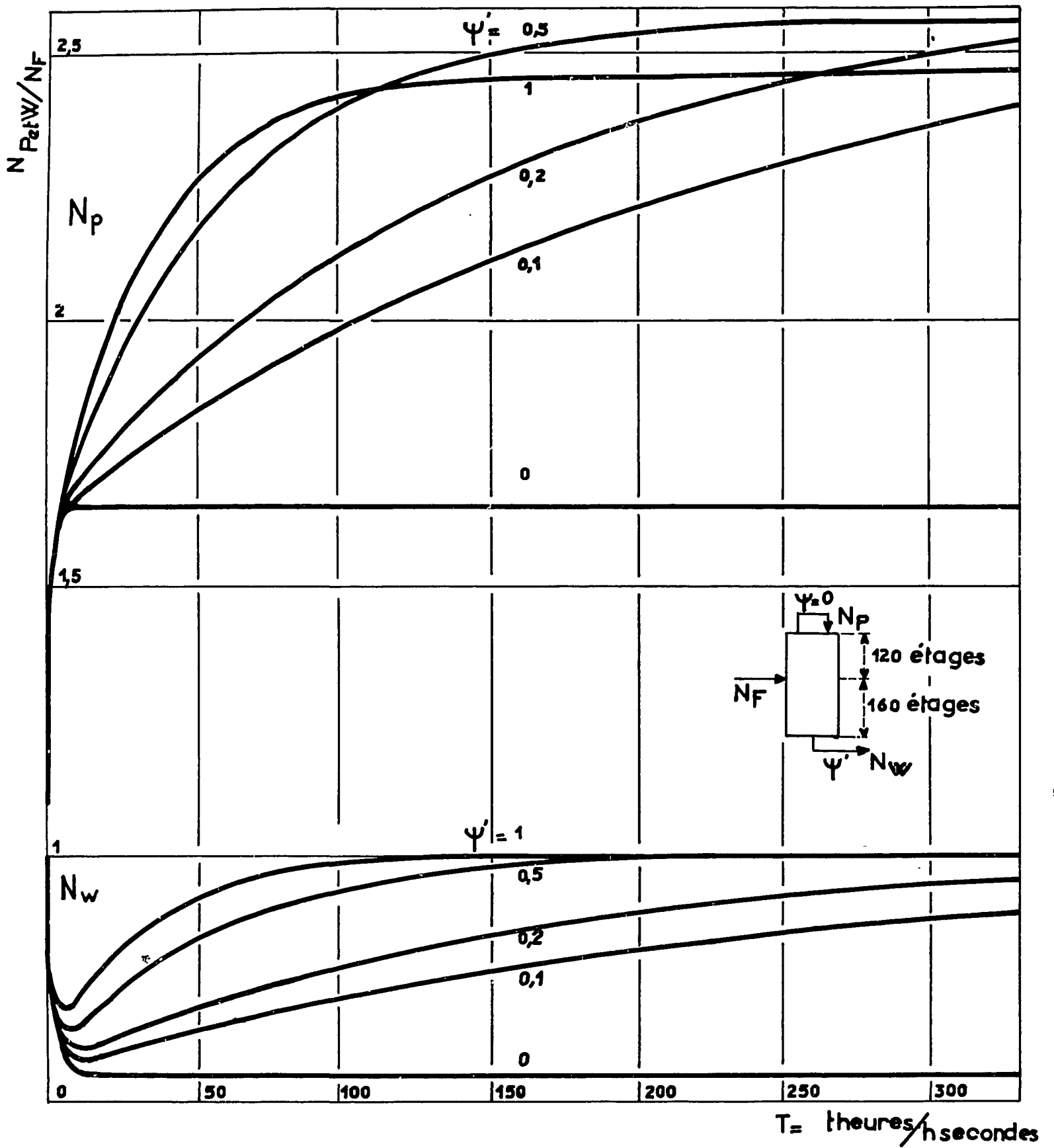


Fig. 13 - Marche en perfusion d'une cascade constante de 280 étages

évolution des concentrations h = 5 sec

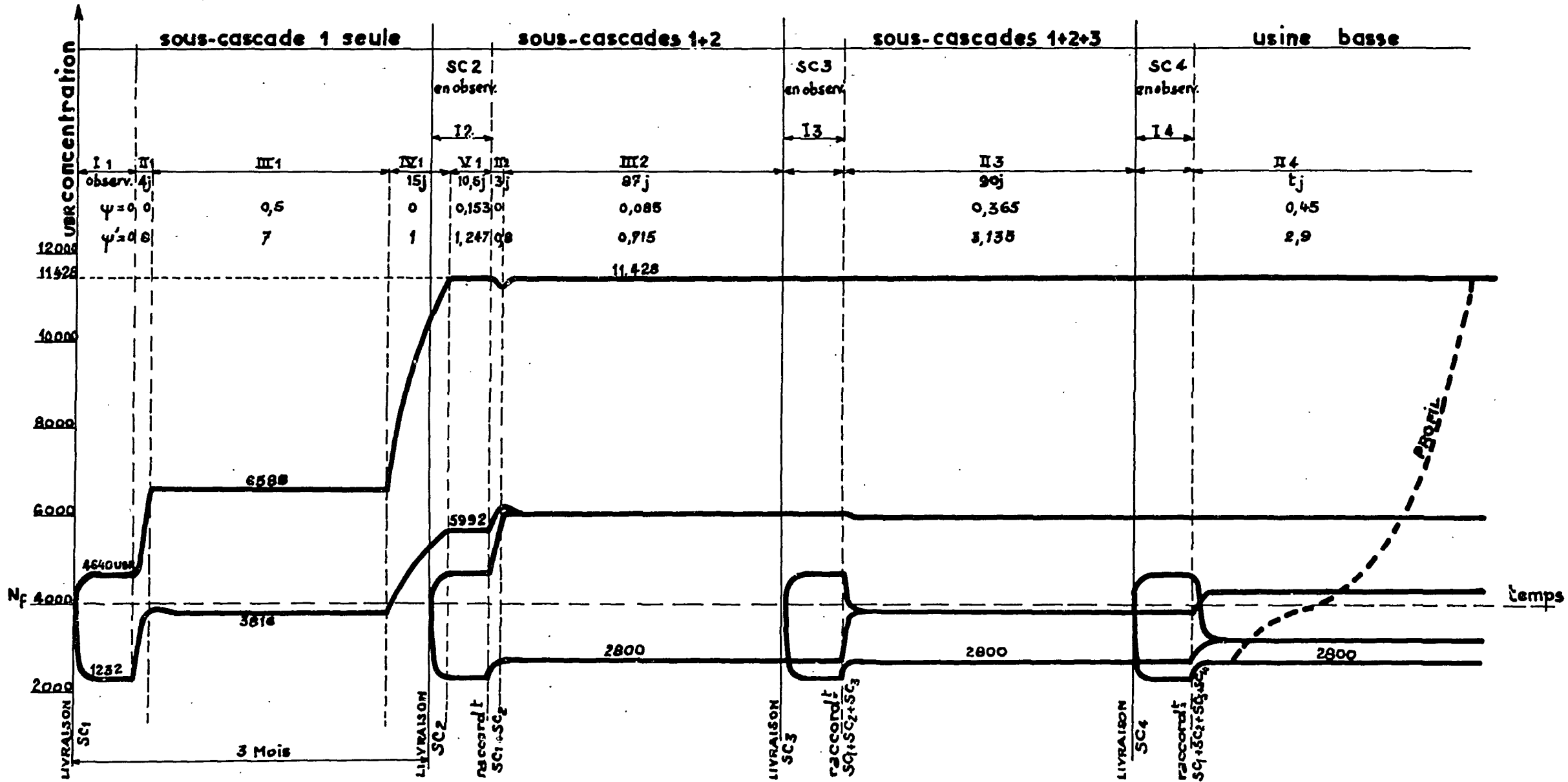


Fig. 14a - Réalisation d'un planning de démarrage.

politique de montage et bilan des stocks

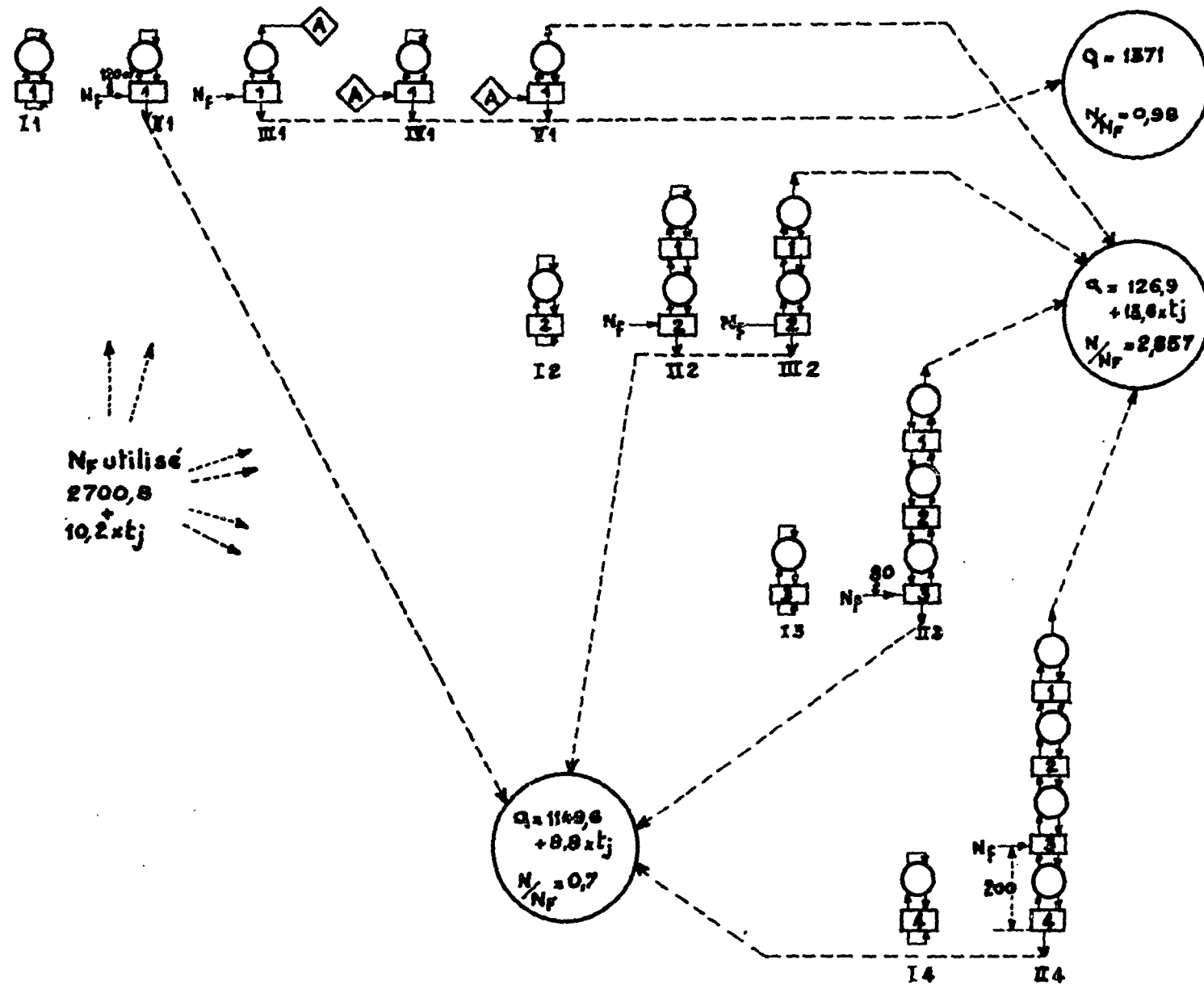


Fig. 14b - Réalisation d'un planning de démarrage.

FIN