

# MELISSA

TECHNICAL NOTE 18.2



C. BINOIS

**REGISTRE DES ÉDITIONS**  
**(DOCUMENT CHANGE LOG)**

<b>ÉDITION</b> <i>(ISSUE)</i>	<b>Date</b>	<b>Observations</b>
00	04/93	ORIGINAL EDITION

## RÉPERTOIRE DES PAGES (PAGE ISSUE RECORD)

Ce document comprend les pages suivantes à l'édition indiquée  
(Issue of this document comprises the following pages at the issue shown)

Document	Pages	EDITION (ISSUE)
TECHNICAL NOTE 18.2	ALL	00

# TABLE DES MATIÈRES

## (TABLE OF CONTENTS)

	PAGE
I INTRODUCTION .....	1
I.1. LA SPIRULINE .....	1
II. LA LUMIÈRE.....	3
II.1. CAPTEUR DE LUMIÈRE .....	4
III. CALIBRATION DE L'ÉLECTRONIQUE ET DU CAPTEUR.....	6
III.1. ADAPTATION DU MODÈLE MATHÉMATIQUE A L'AIR LIFT.....	8
III.2. DESCRIPTION DU MODÈLE.....	8
III.3. MESURES EFFECTUÉES .....	10
III.4. GRANDEUR MESURÉE PAR LE CAPTEUR.....	11
III.5. PREMIERS TESTS AVEC LE MODÈLE.....	12
III.6. PRISE EN COMPTE DE LA STRUCTURE DU RÉACTEUR.....	12
III.6.1 VOLUME ÉCLAIRE .....	14
III.6.2 INFLUENCE DE LA POSITION VERTICALE DE LA SPHÈRE.....	15
III.7. CORRECTION ET RE-CALIBRATION DU CAPTEUR.....	16
III.8. RÉSULTATS APRÈS CORRECTION DU MODÈLE .....	18
IV. ÉTUDE DYNAMIQUE.....	19
IV.1. ÉCHELON DE LUMIÈRE POSITIF.....	20
IV.2. ÉCHELON DE LUMIÈRE NÉGATIF.....	24
IV.3. ÉCHELON DE TEMPÉRATURE .....	28
V. STRATÉGIE DE CONTRÔLE.....	29
V.1 MESURE DE LA VITESSE DE CROISSANCE .....	29
V.2 UTILISATION DU MODÈLE.....	29
V.3 CONTRÔLE DE LA VITESSE.....	30
V.4 INSERTION DU COMPARTIMENT DANS LA BOUCLE MELISSA.....	30

## I INTRODUCTION

**MELISSA** (Microbial Ecological Life Support System Alternative) est conçu comme étant le prototype d'un écosystème clos à base de micro-organismes, destiné à assurer le support vie des futures missions spatiales habitées. Le succès de telles missions implique que le système de support vie soit robuste, fiable, et facilement contrôlable. C'est dans cette optique que l'utilisation de modèles physiques est envisagée pour la compréhension puis la gestion de l'écosystème. Une maquette de faisabilité est en cours de réalisation à l'ESTEC (centre technique de l'Agence Spatiale Européenne).

J.F. CORNET a établi un modèle bio-chimiquement structuré décrivant le comportement des spirulines pour différentes conditions de culture. Le problème posé est de déterminer comment ce modèle peut être utilisé pour contrôler le compartiment photosynthétique de MELISSA. La première phase de l'utilisation du modèle est le calage de ce modèle sur le réacteur utilisé à l'ESTEC, en effet, le modèle ne décrit que le cas général d'une culture sans tenir compte de la structure et des limitations du réacteur. Or pour que le contrôle puisse se faire de façon prédictive il est nécessaire de connaître à l'avance l'état dans lequel il faut mettre le réacteur (valeur des différents set-point) pour obtenir le but visé.

Cette note décrit les adaptations du modèle aux conditions de culture de l'ESTEC, ainsi que les résultats préliminaires à la mise en oeuvre d'un modèle de contrôle global du compartiment photosynthétique. Les différents problèmes rencontrés sont détaillés afin de permettre la conception ultérieure d'un réacteur de plus grande capacité (environ 50 litres) destiné à alimenter deux rats. La structure cylindrique semble être la plus optimale pour ce type de culture, et les résultats décrit ci-après sont réutilisables pour le dimensionnement des éléments d'un réacteur, avec un maximum de précision.

### I.1. LA SPIRULINE

Parmi les différents organismes photosynthétiques, la spiruline fut choisie en raison de ses qualités nutritives et pour sa résistance aux organismes pathogènes (MERGEAY et al.) en raison du pH élevé du milieu de culture. La spiruline est une cyanobactérie (ou algue bleue ou cyanophycée) filamenteuse, dotée d'un appareil photosynthétique similaire à celui des végétaux (N. TANDEAU de MARSAC 1993), lui permettant d'assimiler le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) et de dégager de l'oxygène. Ce micro-organisme a fait l'objet de nombreuses études, et est abondamment utilisé dans l'industrie agro-alimentaire pour ses pigments entre autres.

La souche utilisée est la souche *SPIRULINA PLATENSIS* provenant de l'algothèque de l'institut PASTEUR.

Le milieu de culture utilisé est celui décrit par ZARROUK (1966) dont la composition est donnée dans le tableau page suivante. La concentration en nitrate ( $\text{NaNO}_3$ ) peut être ajustée en fonction du point de repos choisi pour la culture.

Solution de macroéléments :

Éléments	Poids moléculaire	mmol/l	g/l
NaNO <sub>3</sub>	84.99	29.410	2.50
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	174.26	5.730	1.00
NaCl	58.44	17.110	1.00
MgSO <sub>4</sub> 7H <sub>2</sub> O	246.47	0.810	0.20
CaCl <sub>2</sub> 2H <sub>2</sub> O	147.02	0.270	0.04
FeSO <sub>4</sub> 7H <sub>2</sub> O	278.00	0.036	0.01
EDTA Na <sub>2</sub> 2H <sub>2</sub> O	372.30	0.214	0.08
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	174.18	2.870	0.50
NaHCO <sub>3</sub>	84.01	128.60	10.80
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	106.00	71.700	7.60

Solutions d'oligo-éléments (1ml par litre de milieu) :

A5 :

H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	61.83	46.250	2.860
MnCl <sub>2</sub> 4H <sub>2</sub> O	197.91	9.100	1.810
ZnSO <sub>4</sub> 7H <sub>2</sub> O	287.54	0.770	0.222
CuSO <sub>4</sub> 5H <sub>2</sub> O	249.54	0.316	0.079
MoO <sub>3</sub>	143.94	0.104	0.015

B6 :

NH <sub>4</sub> VO <sub>3</sub>	116.98	0.190	0.023
KCr(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> 12H <sub>2</sub> O	499.41	0.192	0.096
NiSO <sub>4</sub> 7H <sub>2</sub> O	280.88	0.170	0.048
(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> Co 6H <sub>2</sub> O	291.04	0.168	0.049
Na <sub>2</sub> WO <sub>4</sub> 2H <sub>2</sub> O	329.86	0.054	0.018
Ti(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> + TiOSO <sub>4</sub>	232.00	0.206	0.048

## II. LA LUMIÈRE

La lumière est l'élément indispensable pour la croissance des organismes photosynthétiques tels que *Spirulina Platensis*. La figure 1 schématise l'utilisation de la lumière comme source d'énergie pour la production d'une source carbonée assimilable par le micro-organisme pour sa croissance.

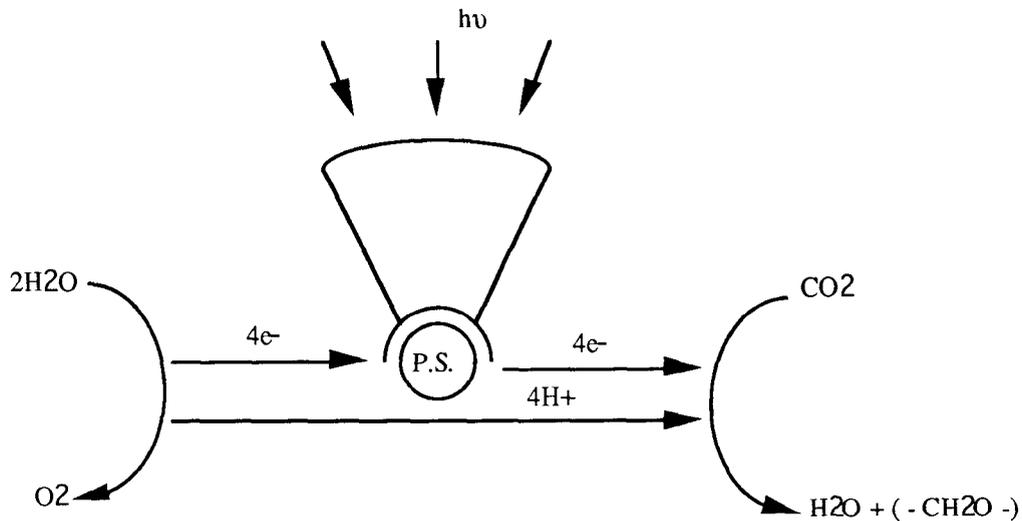


Figure 1 - Principe général de la photosynthèse.

L'énergie lumineuse arrivant sur le photo-système (P.S.) libère des électrons. Le déficit créé est comblé par des électrons pris à la molécule  $H_2O$ . Les électrons et les protons  $H^+$  ainsi libérés interviennent dans la réaction de transformation du  $CO_2$  en hydrates de carbone ( $-CH_2O-$ ). La quantité de photons fournie au photo-système, conditionne l'activité du micro-organisme. On peut donc en tirer une relation quantitative :

**QUANTITÉ DE PHOTONS FOURNIE**      ----->      **VITESSE DE CROISSANCE DU MICRO-ORGANISME**

D'où la nécessité de connaître la quantité de lumière fournie à un photo-bioréacteur pour connaître son activité et envisager de maîtriser la vitesse de croissance de *Spirulina platensis*. Dans ce but un capteur de lumière est mis en place dans le réacteur.

## II.1. CAPTEUR DE LUMIÈRE

Le capteur choisit (Photo 1) est le LI 190 SB de la marque LI-COR, c'est un "Quantum sensor" dont la réponse spectrale est reproduite figure 2.

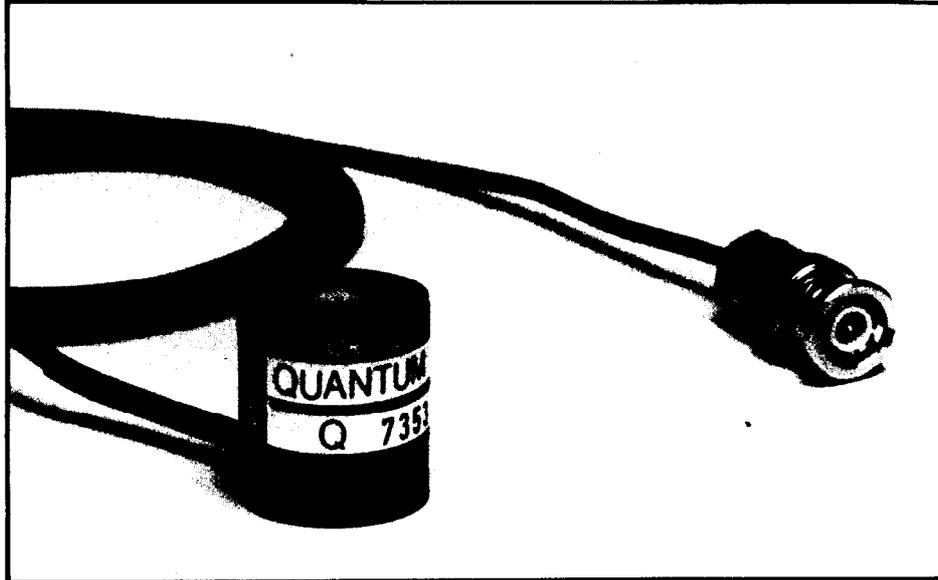


Photo 1 - Capteur de lumière.

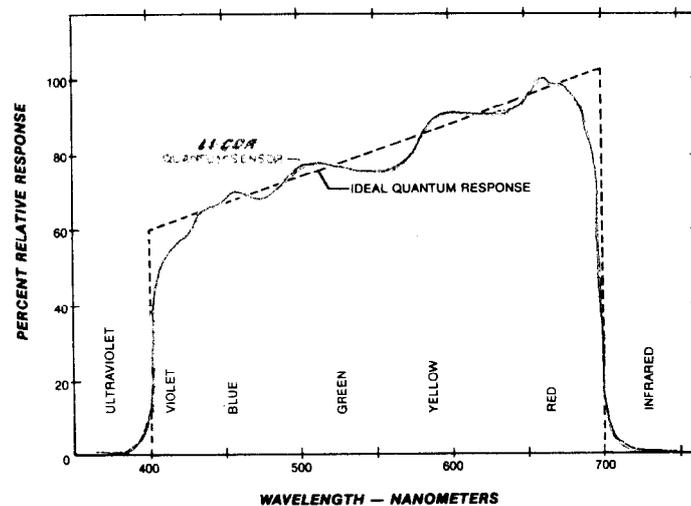


Figure 2 - Réponse spectrale du capteur de lumière.

Ce spectre correspond à la bande utilisée par le photo-système, l'unité de calibration du capteur est la  $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$  ( $1\text{mol} = 6.02 \cdot 10^{23}$  photons), on a donc une unité qui donne la quantité de photons par unité de temps et par unité de surface.

L'emplacement du capteur dans le réacteur a été choisit au centre de celui-ci en raison de la structure cylindrique. Le capteur ne supportant pas l'opération de stérilisation (20mn à  $120^{\circ}\text{C}$ ), et n'étant pas multidirectionnel, il a été complété par une sphère d'intégration reliée à une fibre optique pour conduire la lumière jusqu'au capteur. L'ensemble est mis en place dans un tube de verre plongeant au centre de réacteur (Figure 3)

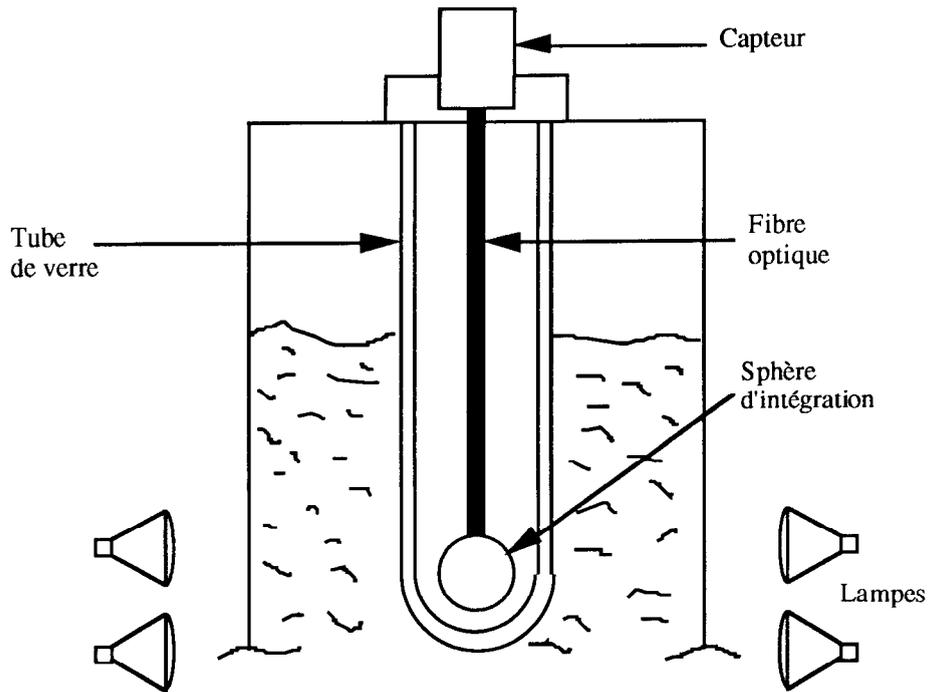


Figure 3 - Montage du capteur de lumière dans le réacteur.

L'électronique d'amplification et de conditionnement du signal issu du capteur (Figure 4), a été conçue en fonction des mesures effectuées dans les conditions suivantes :

- Récipient de diamètre identique au réacteur.
- Système d'éclairage répartis sur la périphérie du récipient.
- Différentes concentrations en biomasse.

L'accent a été mis sur le besoin de mesurer une valeur significative au centre pour des concentrations en biomasse élevées, de l'ordre de 2g/l et plus. Il a été décidé de réaliser quatre gammes auto-commutables de façon à couvrir une grande dynamique (4 décades) sans surcharger les entrées et la gestion du contrôleur chargé de la lumière.

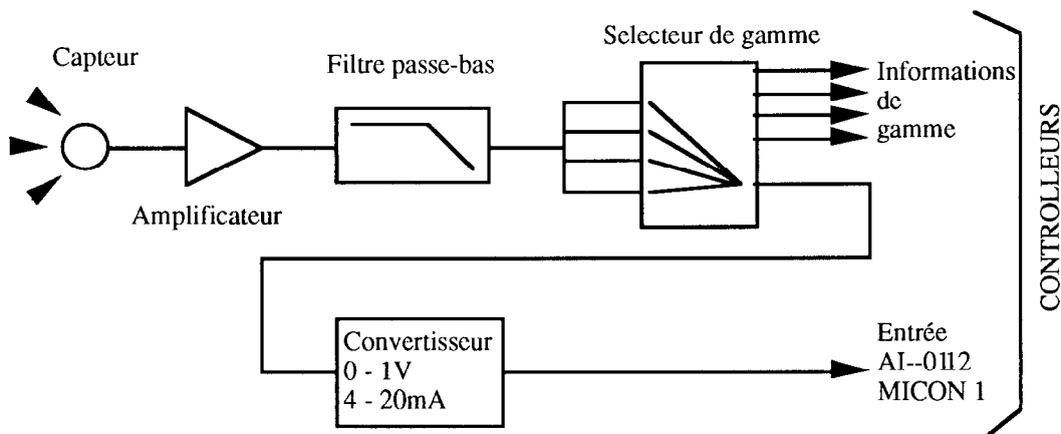


Figure 4 - Synoptique de l'électronique de mesure de la lumière.

### III. CALIBRATION DE L'ÉLECTRONIQUE ET DU CAPTEUR.

Bien que les caractéristiques du capteur soit connues, la conversion de  $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$  en  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$  n'est qu'approximative et dépend de la nature de la source de lumière, de plus la sphère d'intégration apporte sa propre atténuation. Il a donc été nécessaire de calibrer l'ensemble de l'électronique. Ceci fut réalisé (ainsi qu'un relevé spectral de la lumière émise par les lampes) au sein du département XAO de l'ESTEC avec l'aide de Dominic DOYLE. Le montage de calibration (figure 4) tente de reproduire les mêmes conditions d'éclairage qu'à l'intérieur du réacteur (distance et type de lampe).

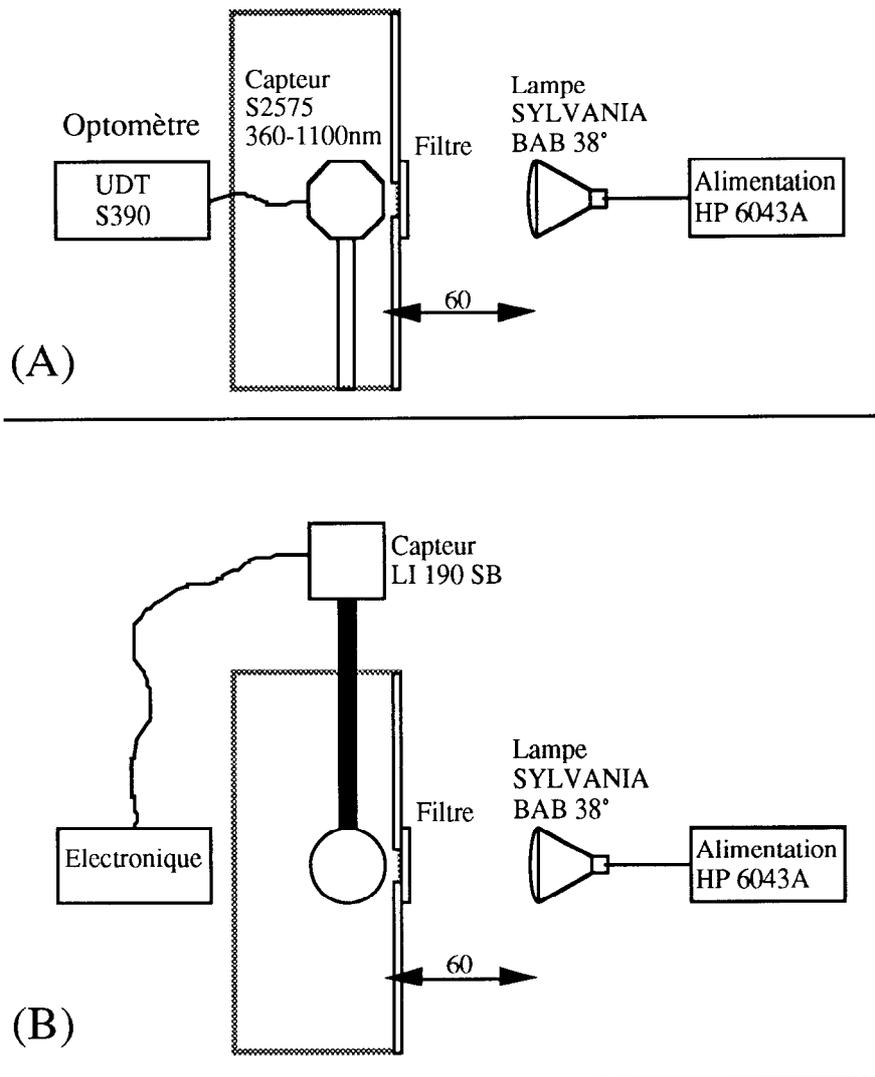


Figure 5 - montage de calibration de l'électronique et du capteur de lumière.

Les valeurs mesurées par le capteur de référence (S2575) ont été relevées (A) pour différentes tensions d'alimentation de la lampe et avec plusieurs filtres atténuateurs. Puis le capteur à calibrer a été mis en place (B), on obtient le tableau 2.

Puissance mesurée $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	Courant de sortie du convertisseur 4 - 20mA	Gamme	Niveau normalisé (20mA gamme IV =1)
17500	12.00	IV	0.50000
1540	10.17	IV	0.38562
1500	8.38	IV	0.27375
1130	8.50	IV	0.28125
790	7.07	IV	0.19187
252	11.35	III	0.04594
202	9.53	III	0.03456
170	7.65	III	0.02281
156	8.13	III	0.02581
118	6.94	III	0.01838
85	6.00	III	0.01250
20	7.65	II	0.00228
11.6	8.60	II	0.00287
9.4	8.00	II	0.00250
7.4	7.70	II	0.00231
5.6	7.30	II	0.00206
4	7.10	II	0.00194
1	6.80	II	0.00175

Tableau 2 - Calibration du système de mesure de la lumière.

La correspondance entre le niveau d'entrée du contrôleur et la valeur mesurée par le capteur, est de  $400\text{W}/\text{m}^2$  pour 20mA lorsque la gamme IV est utilisée. L'entrée AI--0112 est donc définie comme recevant une grandeur variant de 0 à  $400\text{W}/\text{m}^2$ . La boucle de contrôle de la lumière prend en compte la gamme en divisant la valeur lue sur l'entrée par :

- 1 pour la gamme IV,
- 10 pour la gamme III,
- 100 pour la gamme II,
- 1000 pour la gamme I.

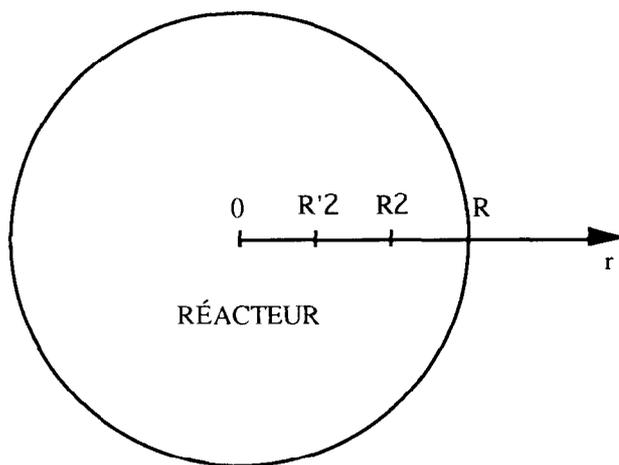
Le contrôleur utilise cette valeur corrigée pour effectuer la régulation de l'intensité lumineuse dans le réacteur.

### III.1. ADAPTATION DU MODÈLE MATHÉMATIQUE A L'AIR LIFT

Le modèle décrit par JF.CORNET a été établi à partir d'un réacteur rectangulaire. Afin d'être utilisable dans les conditions de culture de l'ESTEC, JF.CORNET a effectué une adaptation de ce modèle pour satisfaire à la géométrie cylindrique du photo-bioréacteur "Air-Lift". Cette adaptation a été faite à partir des mêmes hypothèses que pour la structure rectangulaire et a été vérifiée avec les résultats obtenus sur les cultures en réacteur rectangulaire. D'autre part des mesure complémentaires avec le capteur LI 190 SB et la sphère d'intégration ont permis de vérifier les profils de flux dans le réacteur.

### III.2. DESCRIPTION DU MODÈLE

L'expression du modèle tient compte de la structure cylindrique avec les conventions ci-dessous:



On pose :

$$Z = \frac{r}{R}$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{z_a E_a}{z_a E_a + (1 + z_g) E_s}}$$

$$\delta = [z_a E_a + (1 + z_g) E_s] C_{xa} \alpha R$$

avec

$$E_a = 871 \text{ m}^2 \text{kg}^{-1}$$

$$E_s = 167 \text{ m}^2 \text{kg}^{-1}$$

Figure 6 - Conventions utilisées pour l'expression du modèle

$E_a$  et  $E_s$  sont les coefficients massique d'absorption et de dispersion spécifiques de la spiruline,  $C_{xa}$  concentration en biomasse,  $z_a$  et  $z_g$  sont les fractions en biomasse active et en glycogène et  $\alpha$  et  $\delta$  sont les coefficients d'absorption et de dispersion.

on a alors:

$$\frac{4\pi J_r}{F_R} = \frac{1}{Z} \frac{2 \operatorname{ch} \delta Z}{\operatorname{ch} \delta + \alpha \operatorname{sh} \delta} \quad (1)$$

$4\pi J_r$  ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) énergie totale disponible au point d'abscisse  $r$ .

$F_R$  ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) Flux incidente externe au réacteur.

Le volume utile se compose de deux parties :

- une partie principale  $[R/2 - R]$ ,
- une partie quelquefois négligeable  $[0 - R/2]$ .

La croissance de *S. Platensis* a lieu pour  $4\pi J_r > 1\text{W/m}^2$  ainsi les deux valeur  $R_2$  et  $R'_2$  s'obtiennent en résolvant l'équation (1) avec  $4\pi J_r=1\text{W/m}^2$  soit :

$$\frac{1}{Z_2} \frac{2 \operatorname{ch} \delta Z_2}{\operatorname{ch} \delta + \alpha \operatorname{sh} \delta} - \frac{1}{F_R} = 0$$

Pour les faibles concentrations en biomasse ou les  $F_r$  très grands, il n'existe pas de solutions à cette équation entre 0 et R. Dans ce cas , le volume utile  $V_2$  est le volume total du réacteur V.

Le taux de croissance moyen  $\langle \mu' \rangle$  dans le cas où  $R_2$  et  $R'_2$  existent, est donné par la moyenne de l'énergie absorbée dans le réacteur et par le taux de croissance maximum :

$$\langle \mu' \rangle = \frac{\mu_M}{\pi [R'^2_2 + (R-R_2)^2]} \left[ \int_0^{R'_2} \frac{4\pi J_r}{K_J + 4\pi J_r} 2\pi r \, dr + \int_{R_2}^R \frac{4\pi J_r}{K_J + 4\pi J_r} 2\pi r \, dr \right]$$

avec :

$$- \mu'_M = 0.54 \text{ h}^{-1} \text{ et } K_J = 20.0 \text{ W/m}^2,$$

sinon on effectue l'intégration de 0 à R.

La figure 7 présente le profil de la grandeur normalisée  $4\pi J_r/F_R$  pour différentes valeurs de  $\delta$ , de haut en bas 0.25, 1, 2.25, 4, 6.25, 9, 12.25, 16, 20.25, et 25.

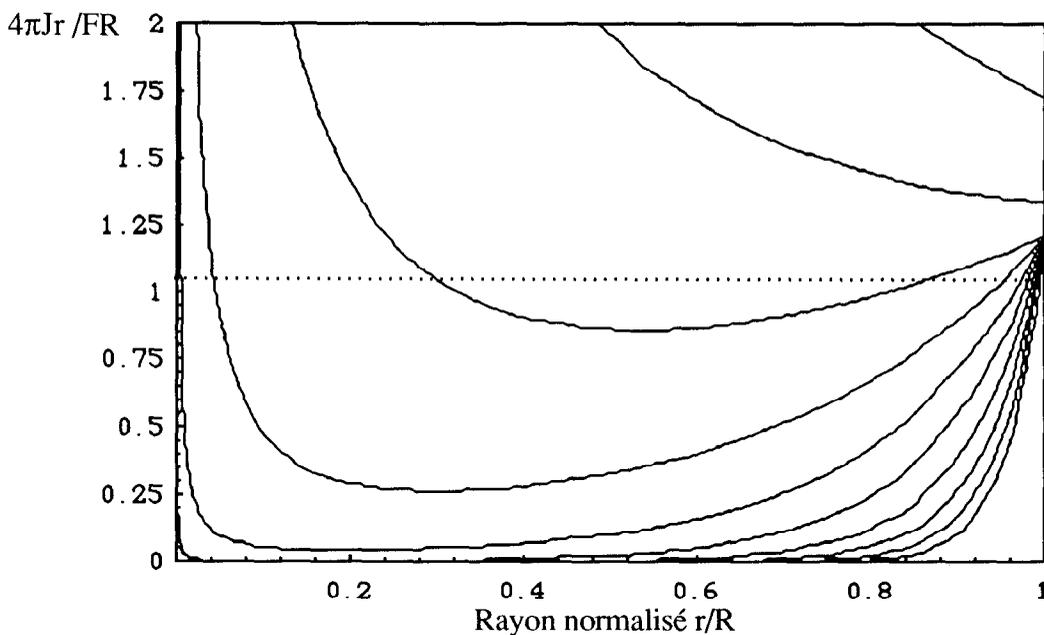
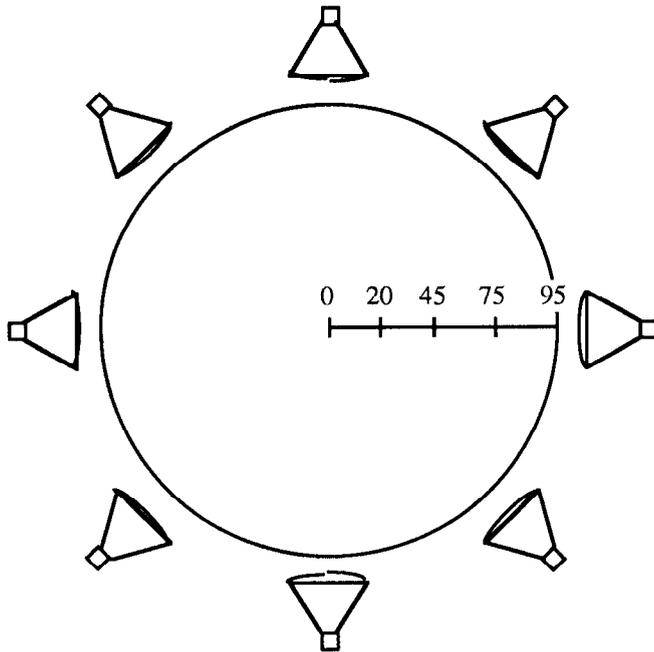


Figure 7 - Tracé de  $4\pi J_r/F_R$  pour différentes valeurs de  $\delta$ .

### III.3. MESURES EFFECTUÉES



Les mesures ont été effectuées dans un cristalliseur de Ø 190mm éclairé avec 8 lampes réparties sur le pourtour comme indiqué sur la figure 8. Les valeurs ont été relevées en différents points afin d'obtenir une valeur moyenne pour chacun des rayons. Une première courbe (figure 9) a été obtenue avec des concentrations élevées, puis une deuxième (figure 10) avec des concentrations faibles pour vérifier les résultats théoriques.

Figure 8 - Montage de mesure du niveau dans un réacteur cylindrique.

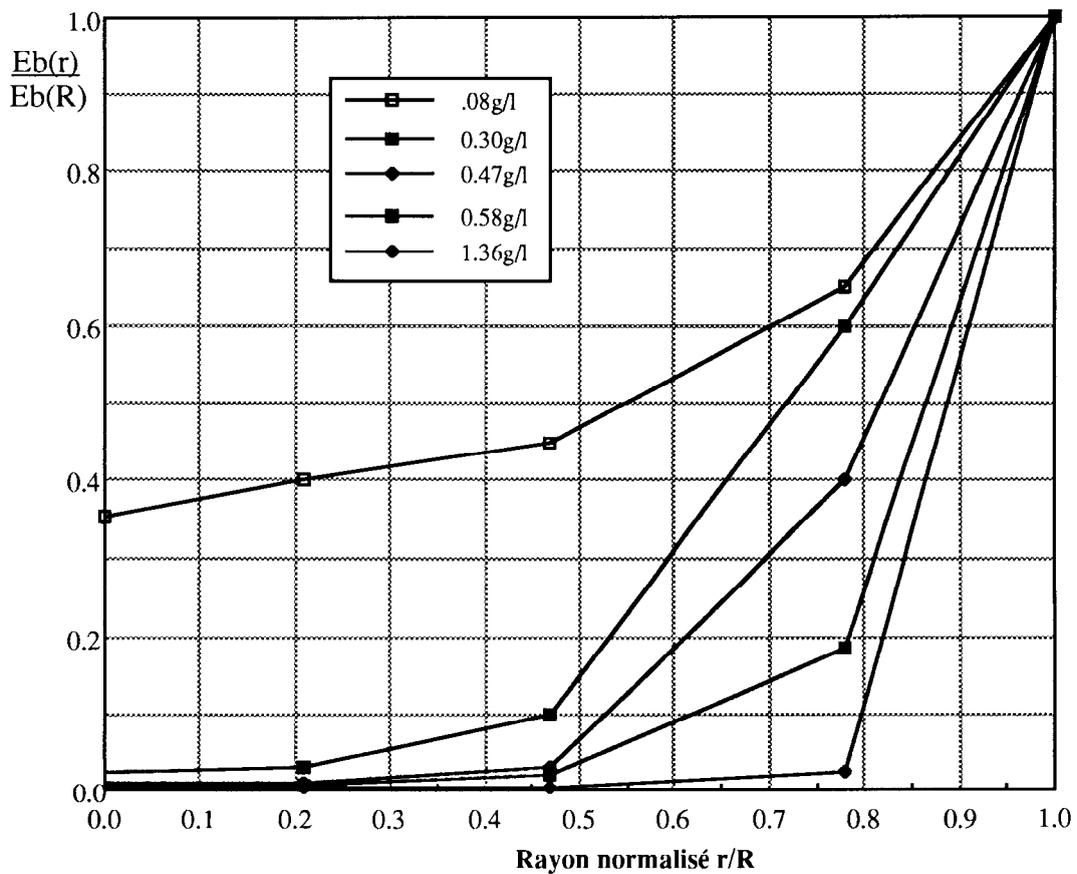


Figure 9 - Niveau mesuré par le capteur pour des concentrations en biomasse élevées.

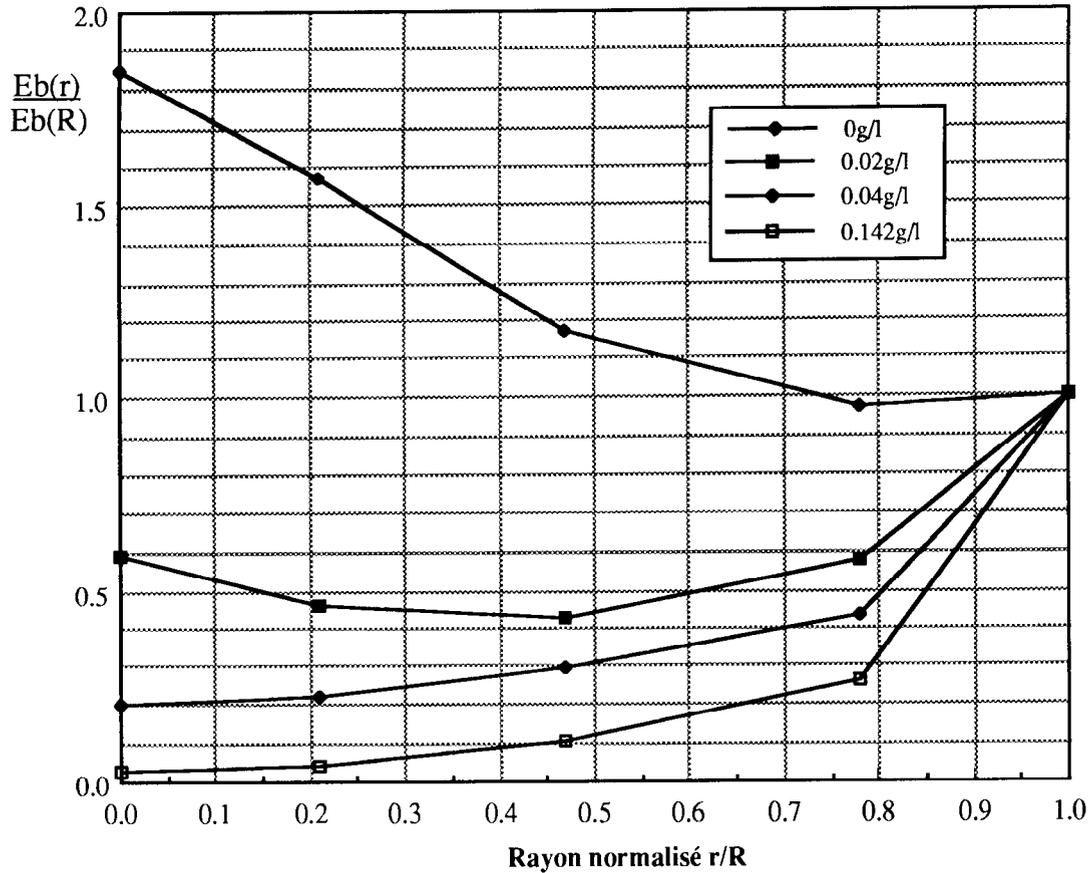


Figure 10 - Niveaux mesurés par le capteur pour des concentrations en biomasse faibles.

Une fois les nouvelles relations obtenues, se pose le problème de relier le flux incident  $F_R$  (permettant le calcul de la vitesse moyenne de croissance  $\mu'$ ) à la grandeur mesurée par le capteur au centre du réacteur.

### III.4. GRANDEUR MESURÉE PAR LE CAPTEUR

L'énergie  $E_b$  mesurée par la sphère de rayon  $R_b$ , s'exprime :

$$\frac{E_b}{F_R} = \frac{1}{Z_b} \frac{1}{(\cosh \delta + \alpha \sinh \delta)} \int_0^\pi \cosh(\delta Z_b \sin \theta) d\theta$$

avec  $\int_0^\pi \cosh(\delta Z_b \sin \theta) d\theta = \pi I_0(\delta Z_b)$ ,  $I_0$  fonctions de Bessel modifiée de première espèce d'ordre 0.

on a  $\lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{E_b}{F_R} = \frac{\pi}{Z_b}$ , c'est à dire sans biomasse dans le réacteur.

### III.5. PREMIERS TESTS AVEC LE MODÈLE.

Les premiers résultats obtenus avec le modèle adapté étaient peu précis. Il s'avéra alors nécessaire d'identifier les paramètres pouvant être pris en compte pour corriger le modèle :

-Le volume total n'est pas le volume éclairé, il existe un volume mort non négligeable (environ 3 litres) dans la partie haute du réacteur.

-La présence du tube intérieur (Draft tube) et du tube contenant le capteur, nécessite de décomposer la relation  $E_b/FR$  pour chaque partie interne afin d'avoir une meilleure précision.

-Les lampes utilisées étaient de deux types différents SYLVANIA BAB 36° et BAB 38° produisant respectivement 460cd et 790cd d'où un éclairage non uniforme fournit au réacteur. Le type BAB 38° a été retenu pour la suite en raison de son intensité plus élevée, de l'angle d'éclairage plus grand, et par-ce-que la seule disponible sur le marché.

-Le niveau mesuré par le capteur dépend de la position verticale de la sphère dans le réacteur, selon que celle-ci se trouve dans l'axe d'une lampe ou bien entre deux lampes.

-Remise en cause de la calibration du capteur et correction de l'électronique d'amplification associée.

### III.6. PRISE EN COMPTE DE LA STRUCTURE DU RÉACTEUR.

Afin de pouvoir calculer  $FR$  connaissant  $E_b$ , on décompose le réacteur en plusieurs parties homogènes imbriquées, de telle façon que de l'extérieur vers l'intérieur on puisse relier le flux sortant au flux entrant par une relation dépendant de la nature de la partie concernée. La relation entre le flux  $FR$  et un flux intérieur à un rayon  $r$  est :

$$\left| \frac{F_r}{F_R} \right| = \frac{2\alpha}{Z} \frac{\text{sh } \delta Z}{\text{ch } \delta + \alpha \text{ sh } \delta} \quad \text{avec } Z = \frac{r}{R}$$

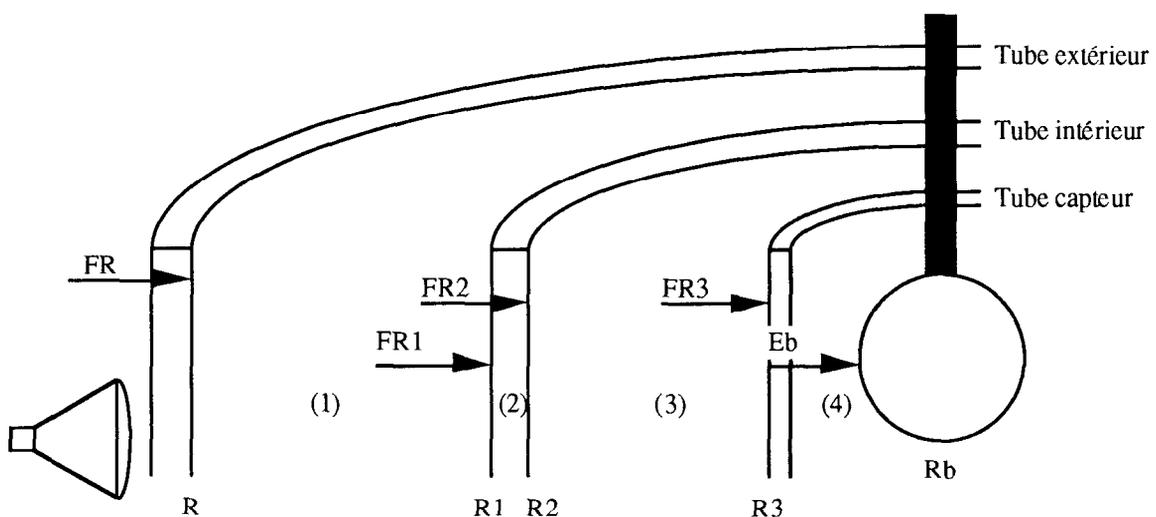


Figure 11 - Décomposition interne du réacteur.

Valeurs des rayons

Milieux

$$R = 48\text{mm}$$

(1) - Spiruline

$$R_1 = 30.2\text{mm}$$

(2) - Verre

$$R_2 = 25.85\text{mm}$$

(3) - spiruline

$$R_3 = 11.5\text{mm}$$

(4) - Verre + air

$$R_b = 9.5\text{mm}$$

La décomposition du réacteur effectuée selon la figure 11 permet d'écrire les relations suivantes:

$\alpha$  est invariant et  $\delta$  est défini précédemment.

pour la zone (4),

$$F_{R3} = \frac{E_b R_b}{\pi R_3}$$

pour la zone (3),

$$\delta_3 = \delta \frac{R_2}{R} \quad Z_3 = \frac{R_3}{R_2}$$

$$F_{R2} = \frac{F_{R3} \operatorname{ch} \delta_3 + \alpha \operatorname{sh} \delta_3}{2\alpha \operatorname{sh} \delta_3} Z_3$$

pour la zone (2),

$$F_{R1} = F_{R2} \frac{R_2}{R_1}$$

pour la zone (1),

$$Z_1 = \frac{R_1}{R}$$

$$F_R = \frac{F_{R1} \operatorname{ch} \delta + \alpha \operatorname{sh} \delta}{2\alpha \operatorname{sh} \delta} Z_1$$

Ainsi en appliquant successivement ces relations, il est possible de calculer  $F_R$  à partir de  $E_b$ .

### III.6.1 VOLUME ÉCLAIRE

La figure 12 représente les volumes principaux du réacteur. Le tube principal a les caractéristiques suivantes :

- Ø 96 mm, H = 510 mm (partie éclairée uniquement), V = 4.11 l.

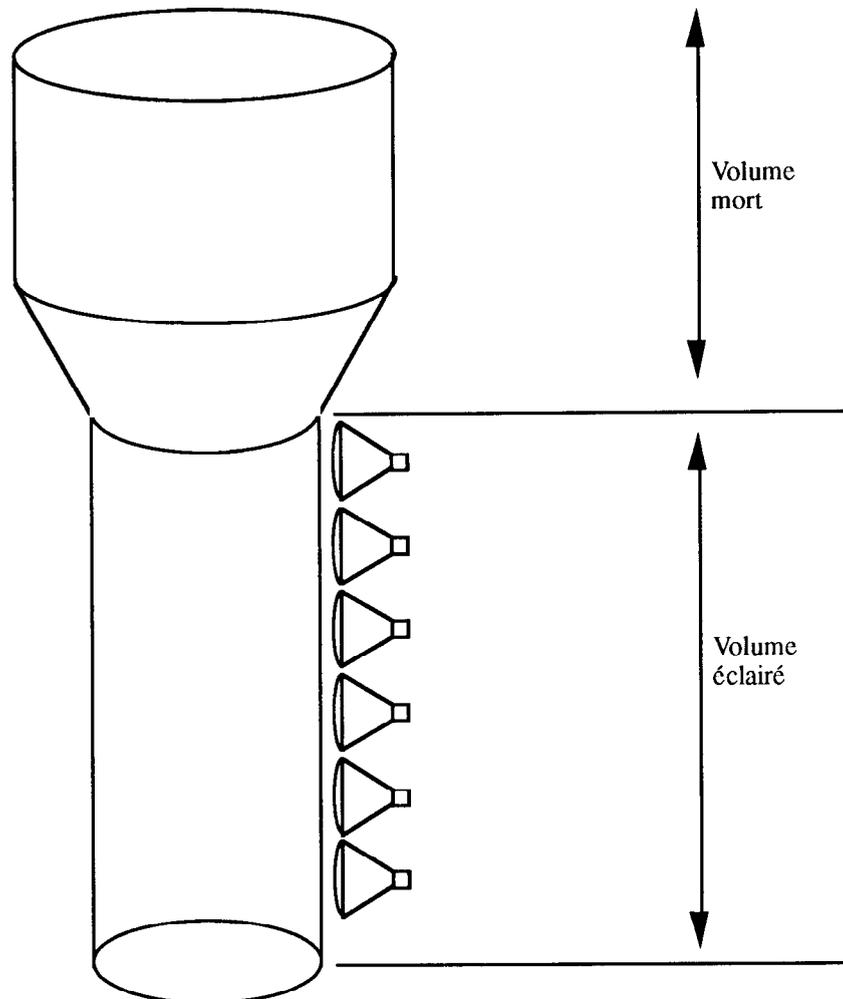


Figure 12 - Répartition des volumes dans le réacteur.

$$\text{Volume éclairé} = \pi \cdot 0.48^2 \times 5.1 = 3.69 \text{ l}$$

Ceci suppose qu'il existe une limite franche entre les deux volumes, en réalité lorsque la concentration en biomasse est faible, la partie basse du volume mort est légèrement éclairée alors qu'elle ne l'est pas pour une forte concentration. Le volume du tube principal est donné à 4.11l. Il est possible que le volume éclairé passe de 4.11l à 3.69l lorsque la concentration varie de 0 à plusieurs grammes par litre. L'erreur d'appréciation de la fraction éclairée du réacteur est de 6%, ce qui est acceptable. Pour la suite on choisit de travailler avec un volume éclairé supposé de 3.9l. Il sera néanmoins possible de prendre en compte l'influence de la concentration en biomasse sur le volume éclairé si cela s'avère nécessaire avec une loi simple.

### III.6.2 INFLUENCE DE LA POSITION VERTICALE DE LA SPHÈRE.

La valeur mesurée par le capteur a été relevée pour plusieurs niveaux d'éclairage, en déplaçant verticalement la sphère plongée dans la culture sans le tube de protection. La concentration en biomasse était de 270mg/l. La courbe figure 13 représente les profils de niveaux en fonction de la position verticale, la plage de variation pour la position de la sphère étant faible, une extrapolation a été effectuée en tenant compte de la position des lampes à l'extérieur du réacteur et de leur dimension. L'abscisse 0 correspond à l'axe de la première lampe, la deuxième se trouve en 60. Le centre de la sphère se trouve à l'abscisse -15.

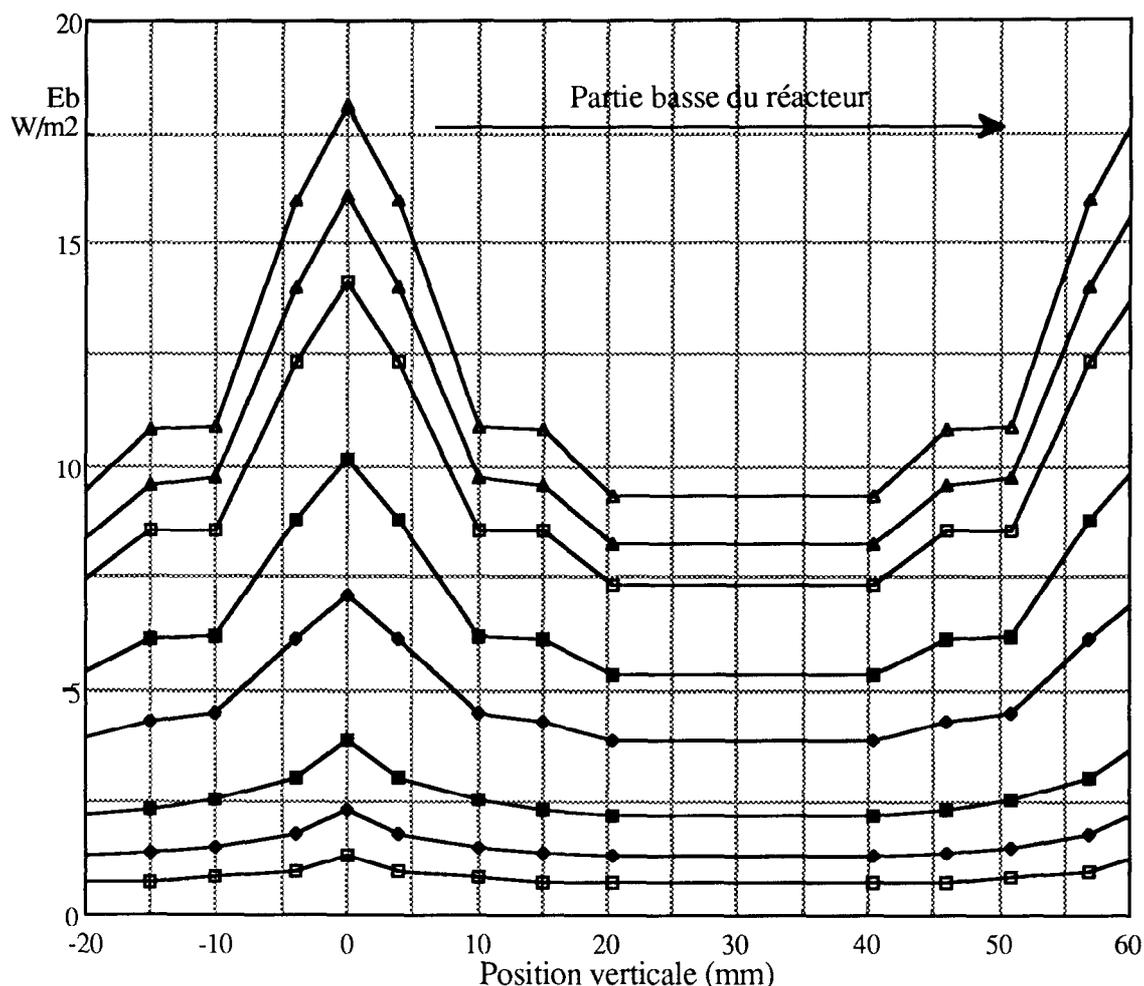


Figure 13 - Profils de niveaux lumineux mesurés en fonction de la position verticale de la sphère.

La moyenne de la courbe supérieure est de 11.66 W/m<sup>2</sup> pour une valeur mesurée de 8.7 W/m<sup>2</sup> lorsque le capteur est en place dans le tube de verre. Le flux (FR3) arrivant sur la surface délimitée par le rayon extérieur du tube capteur a été calculé dans les deux cas :

- 1 - La sphère plongeant dans la culture, on utilise la relation (2) pour calculer FR3

$$FR3 = 2.3W/m^2$$

- 2 - On utilise la décomposition du réacteur pour calculer FR3

$$FR3 = 2.28 \text{ W/m}^2$$

Les deux valeurs étant très proches, on considère qu'il n'y a pas de correction à effectuer sur la position verticale de la sphère.

### III.7. CORRECTION ET RE-CALIBRATION DU CAPTEUR

L'hypothèse de départ supposant de mesurer au centre un niveau lumineux significatif pour des concentrations en biomasse élevées serait justifié si l'on travaillait au delà de 2g/l. Or pour avoir une efficacité lumineuse proche de l'optimum il faut se situer en deçà de 1g/l. Dans ce cas la mesure de lumière au centre du réacteur est limitée par le maximum mesurable par l'électronique plutôt que par le minimum. Celle-ci a été modifiée de façon à augmenter d'un facteur dix le maximum de chaque gamme. Ceci permet d'utiliser toute la dynamique de commande des lampes pour des concentrations en biomasse variant de 100mg/l à 1g/l.

En raison de la modification apportée à la mesure de la lumière, une recalibration de l'ensemble a été effectuée. Le montage utilisé la première fois n'étant pas disponible, c'est le montage décrit figure 14 qui a permis de calibrer l'ensemble Capteur, électronique et contrôleur associé à la régulation de la lumière. Le capteur de référence est un optomètre (ANRITSU modèle NA 9422A) qui indique la puissance optique reçue (W) à 630 nm par sa surface active (diamètre 9.5 mm). L'éclairement est calculé en divisant la puissance reçue par la surface du capteur CF. tableau 3.

puissance optique	Éclairement W/m <sup>2</sup>	Capteur LI 190 Sb W/m <sup>2</sup>	puissance optique	Éclairement W/m <sup>2</sup>	Capteur LI 190 Sb W/m <sup>2</sup>
36.4μW	0	0	8mW	125.75	48.3
399μW	6.27	0.5	9mW	141.47	56.3
521μW	8.19	0.98	10mW	157.19	64.67
1mW	15.719	3.17	11mW	172.9	72.5
1.5mW	23.57	5.72	12mW	188.62	78.6
2mW	31.438	8.55	15mW	235.78	86
3mW	47.157	14.72	20mW	314.38	124
4mW	62.876	21.38	25mW	392.97	164.3
5mW	78.595	28.40	30mW	471.57	205.6
6mW	94.31	35.7	35mW	550.165	248
7mW	110	40.6	40mW	628.76	291.4

tableau 3 - Re-calibration de l'électronique de mesure de la lumière.

Les valeurs ainsi obtenues permettent de tracer la courbe de correspondance (figure 15) entre le niveau vu par l'entrée analogique du contrôleur et la valeur réelle mesurée.

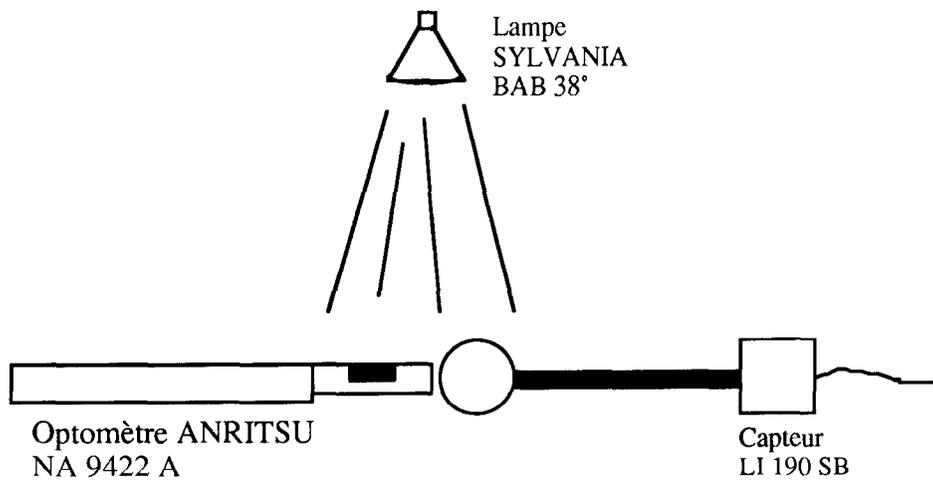


Figure 14 - Montage de calibration.

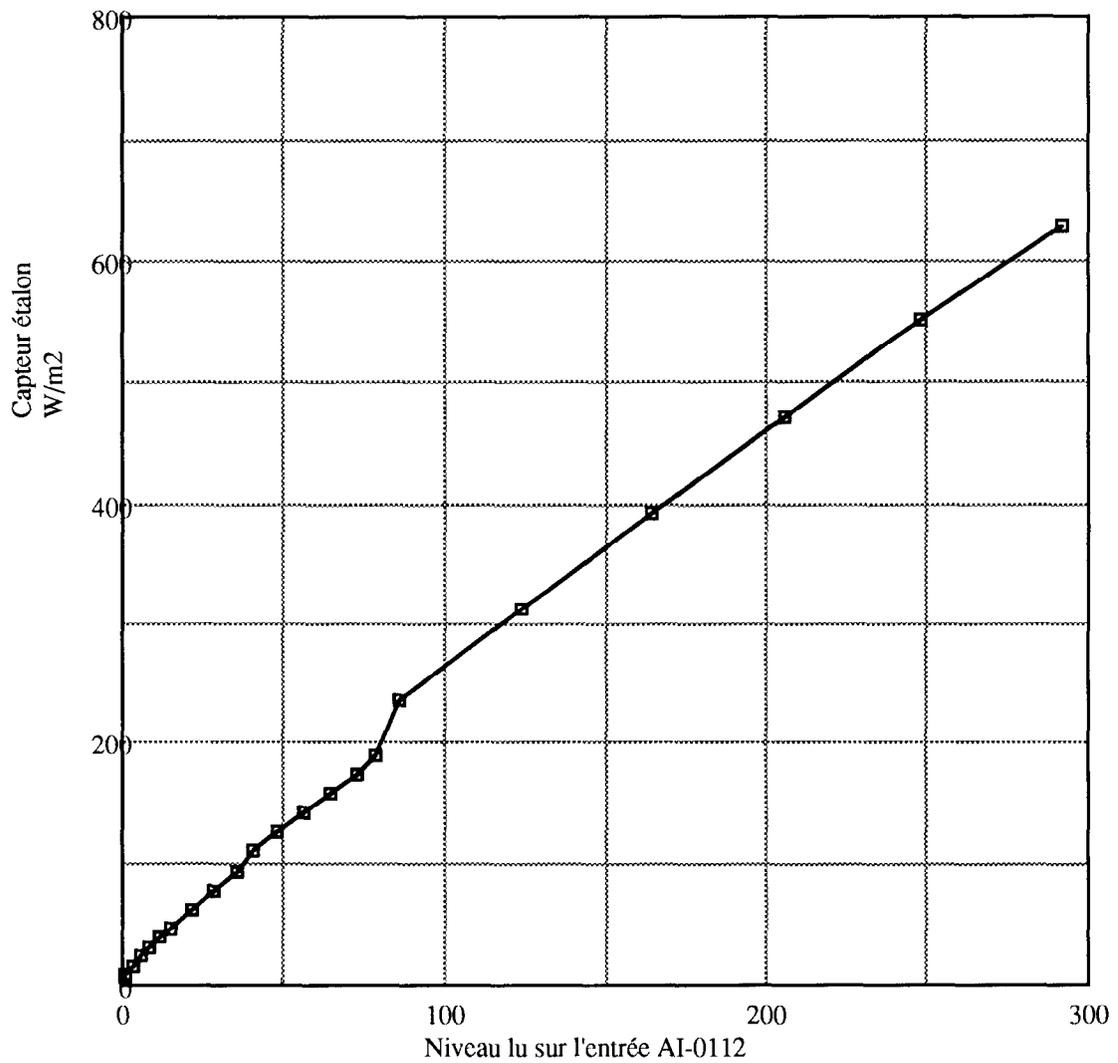


Figure 15 - Courbe de correspondance entre le niveau lu par la boucle de régulation en lumière et le niveau réel après modification.

## CORRECTION A APPORTER A LA MESURE DE LUMIÈRE

Le signal de lumière (x) reste défini comme auparavant, les corrections pour obtenir la valeur réelle (y) sont:

- gamme I  $y = 9.19971 x$

-gamme II et III  $y = 0.00175 x^3 - 0.0962 x^2 + 4.12549x + 2.56055$

-gamme IV  $y = 2.07288 x + 24.7813$

### III.8. RÉSULTATS APRÈS CORRECTION DU MODÈLE

Le tableau ci-après reprend les différentes mesures effectués au cours de la culture ( Octobre, Novembre et Décembre 1992) en tenant compte des corrections décrites auparavant.

Cxa mg/l	FR W/m <sup>2</sup>	Rx calculée	Rx mesurée	erreur relative %
770	193.00	20.97	18.92	<b>9,78</b>
473	22.95	7.62	8.47	<b>1,04</b>
470	68.00	12.68	12.5	<b>1,44</b>
460	45.18	10.69	10.20	<b>4,80</b>
460	21.32	7.24	6.50	<b>11,38</b>
238	25.53	5.95	6.58	<b>9,57</b>
155	22.93	4.20	5.00	16,00
137	23.71	3.87	2.76	40,22
90	31.49	2.95	2.54	16,14

Tableau 4 - Bilan modèle mesure de vitesse pour différentes concentrations et niveau d'éclairement.

Le modèle permet de calculer la vitesse de croissance à long terme pour des conditions stables, cependant pour les faibles concentrations en biomasse, l'erreur d'appréciation est élevée. Ceci est dû aux faibles variations du compteur de régulation de biomasse et à l'imprécision élevée de la mesure de biomasse pour les faibles concentrations. Cette imprécision provient du fait que la calibration ait été réalisée avec des échantillons à 1.8g/l, 1,35g/l, 0.9g/l et 450mg/l.

NOTA : Une partie de ces mesures ont été effectuées avec la détermination de la concentration en biomasse hors service. La régulation de biomasse était alors réalisée en utilisant l'action réglante en lumière comme variable à maintenir constante par la boucle de régulation de biomasse.

#### IV. ÉTUDE DYNAMIQUE

Le modèle mathématique permet de calculer la vitesse de croissance pour un éclairage donné, lorsque la culture est en état stable. Le but du système de contrôle est de fixer les points de repos des boucles de régulation pour satisfaire aux objectifs donnés par l'utilisateur ( production de biomasse et consommation des nitrates produits par le compartiment précédent). Lors d'un changement d'état du réacteur, le modèle permet de déterminer la vitesse de croissance à long terme, mais n'apporte aucune information sur la façon dont s'effectue le changement d'état. La connaissance de cette phase transitoire, incluant le comportement de la spiruline ainsi que celui des boucles de contrôle est indispensable pour effectuer le contrôle de la culture.

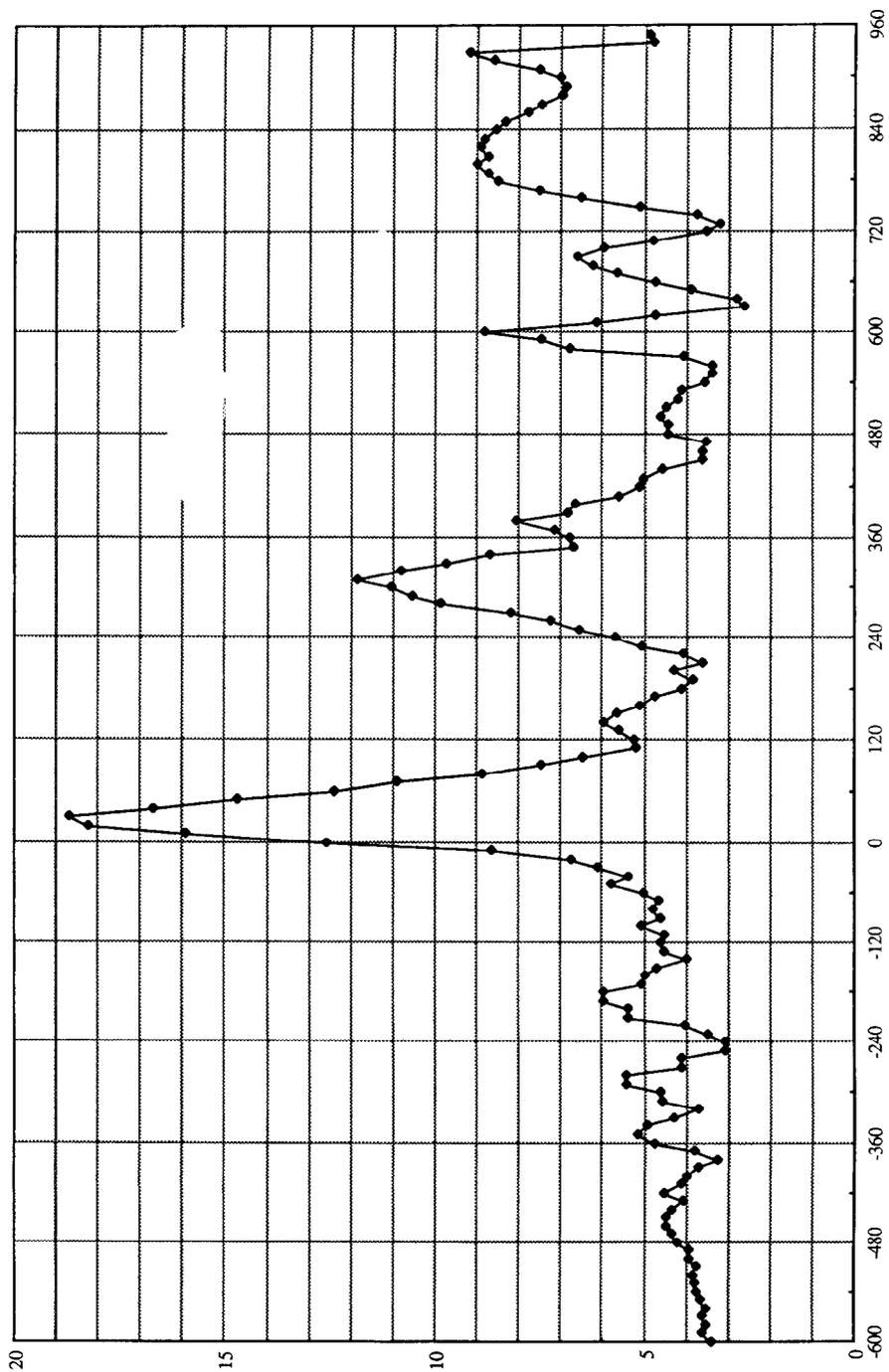
Il devient alors utile et nécessaire de compléter le modèle mathématique par un modèle dynamique rendant compte de l'influence des variations de chacun des paramètres sur le comportement de la culture. Dans le but de simplifier ce modèle ainsi que les tests, deux paramètres essentiels seront étudiés, il s'agit de la lumière considérée comme le plus important, et de la température considérée comme complémentaire. Les autres paramètres sont alors considérés comme ayant une valeur mettant la culture hors de danger, de plus leurs variations dans ce cas n'ont pas d'effet sur les résultats. L'étude dynamique ne peut cependant pas être réalisée sur le pH (stabilisé à 9.5) ou sur certaines concentrations minérales difficile à mesurer et à faire varier facilement en temps réel.

Dans un premier temps l'étude dynamique consiste à observer la réponse indiciaire de la vitesse de croissance par rapport à la lumière. Dans ce but la culture a été soumise à des variations de lumière brusques et maintenues dont les niveaux stables étaient  $15\text{W/m}^2$  et  $22\text{W/m}^2$  (mesuré au centre par le capteur). Cette réponse donne des informations sur le régime permanent et le régime transitoire en même temps.

Les courbes pages suivantes donnent la réponse pour une variation positive puis pour une variation négative. Le dépouillement a été réalisé manuellement, pour améliorer la qualité, un moyennage de plusieurs courbes a été effectué (5 maximum). Les courbes sont présentées en  $\text{mg/l.h}$ , en fonction du temps en minutes, l'abscisse 0 correspond à l'instant où a eu lieu la variation. Un essai d'approximation par un système du deuxième ordre est présenté sur la dernière courbe de chaque variation.

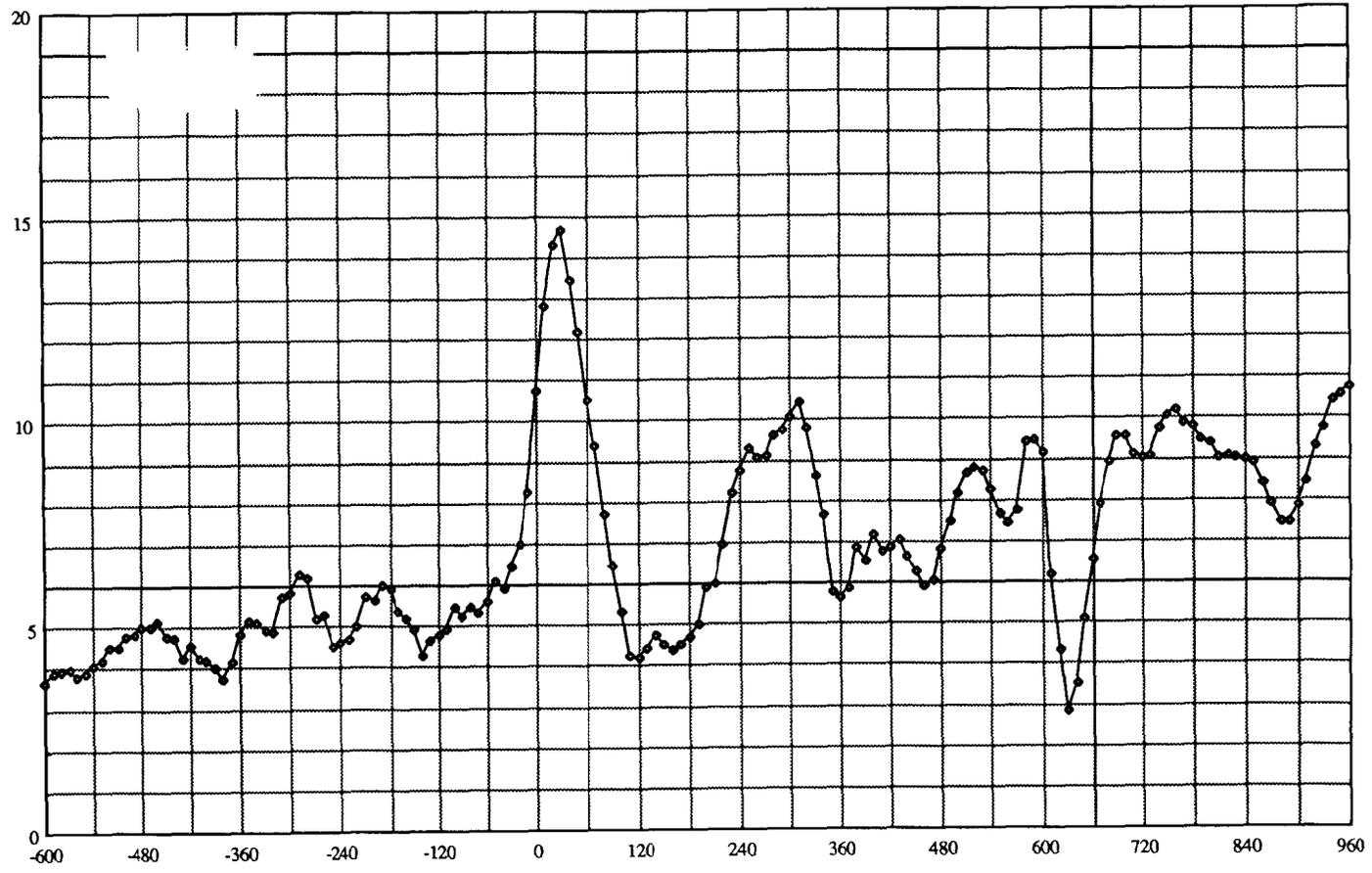
Dans un deuxième temps un essai d'obtention de la réponse indiciaire en fonction de la température a été effectué et est décrit au § IV.3.

## IV.1. ÉCHELON DE LUMIÈRE POSITIF

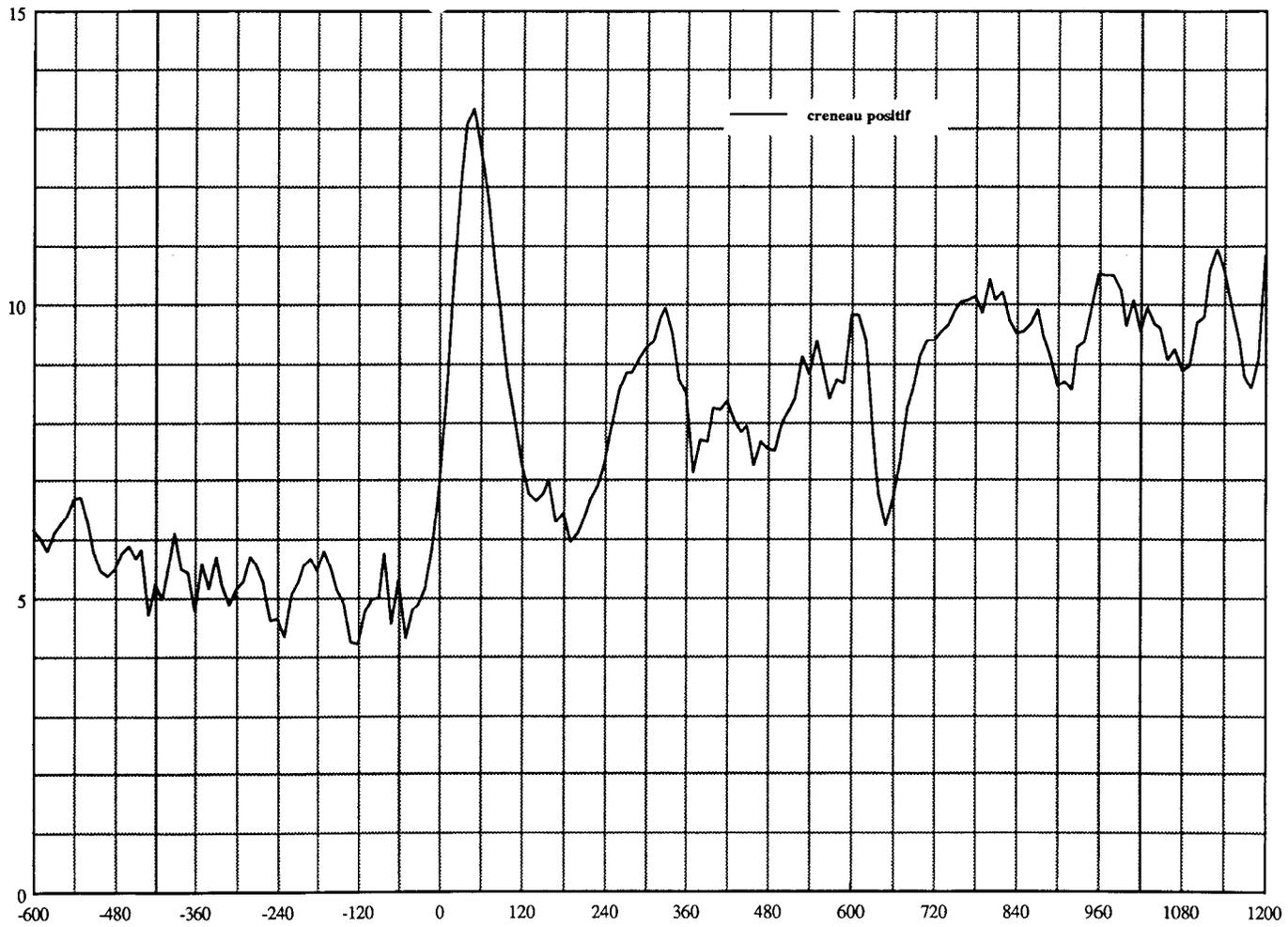


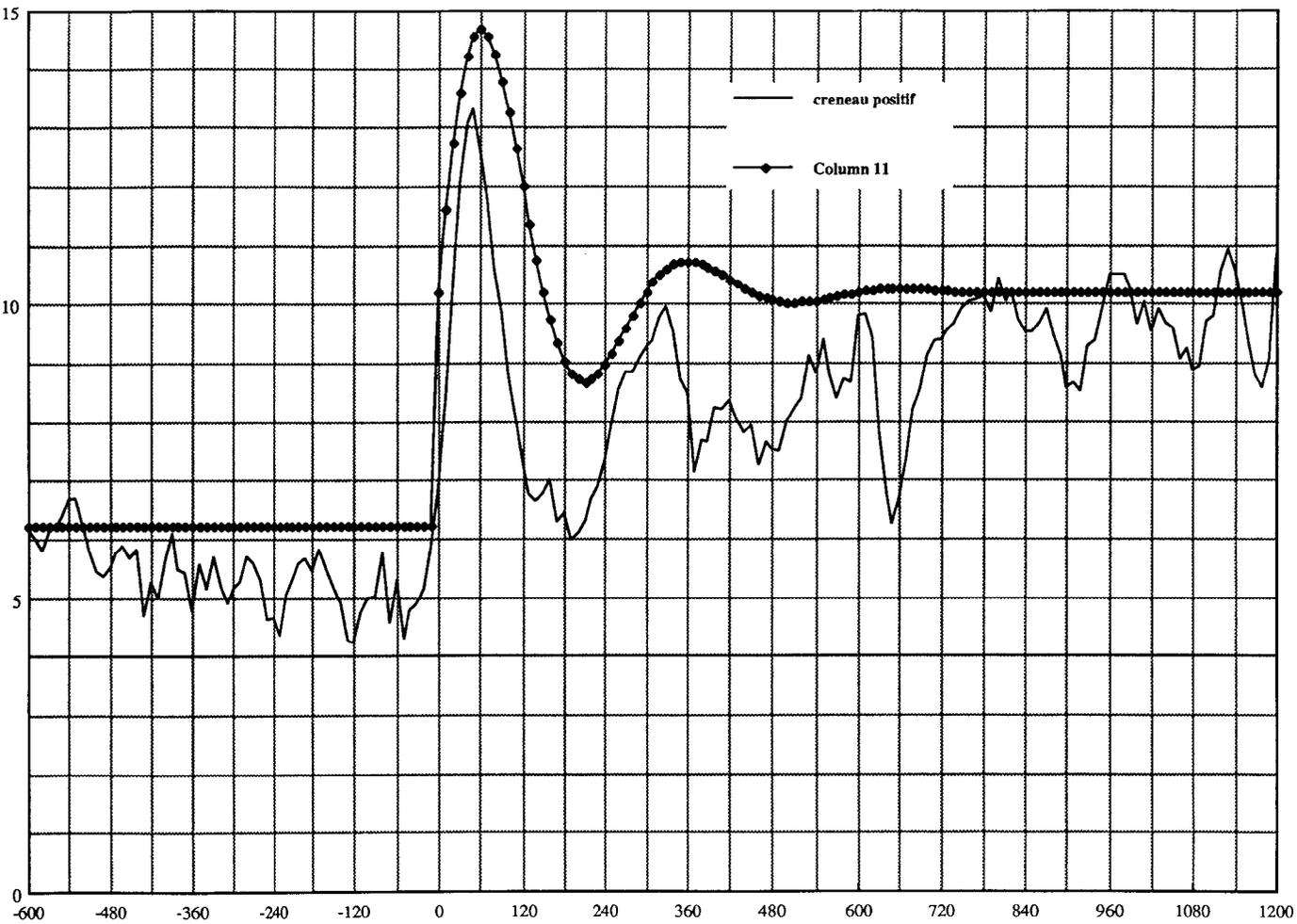
Courbe 1 - Échelon no 1

Courbe 2 - Échelon no 1 + 2



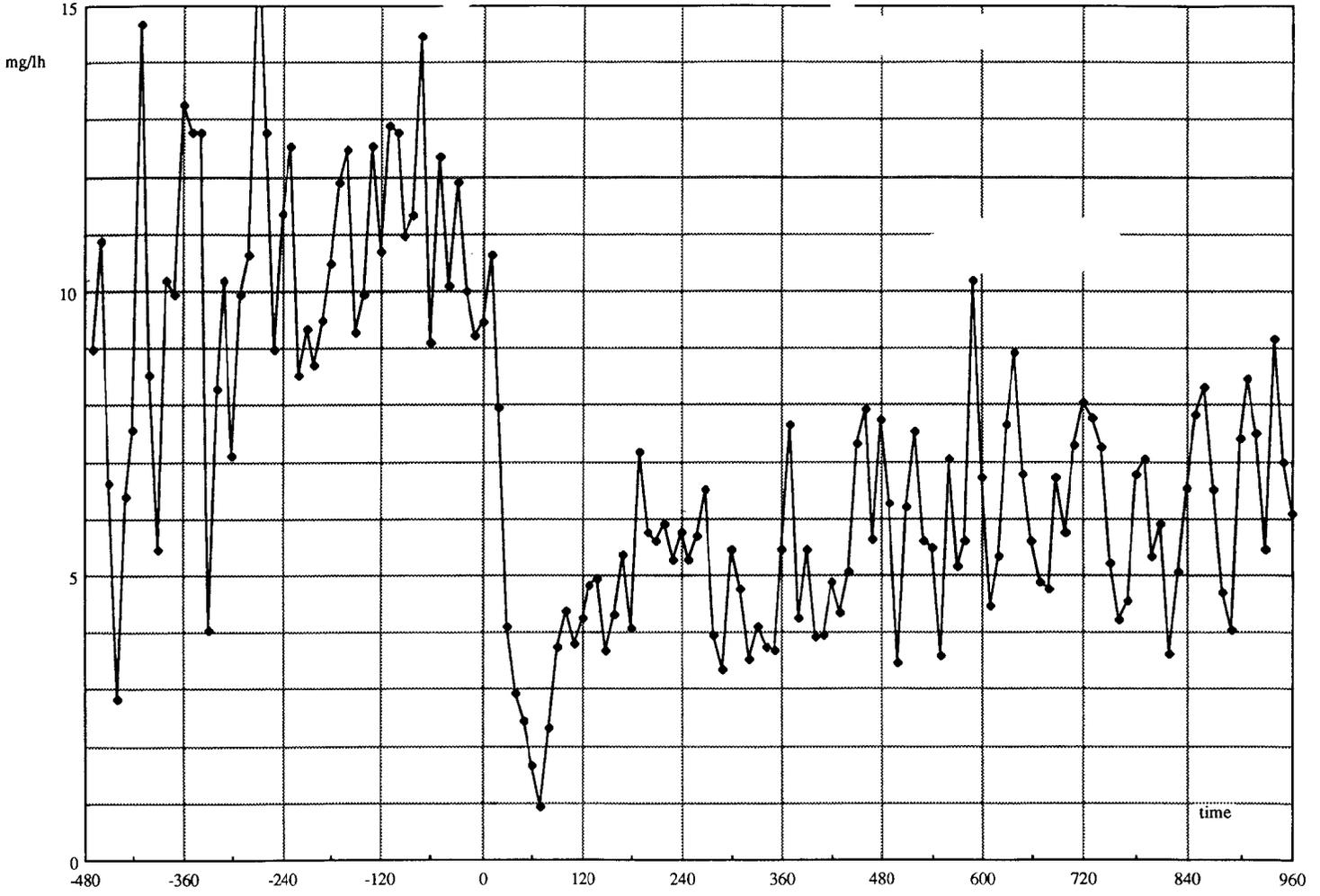
Courbe 3 - Échelon no 1 + 2 + 4 + 5





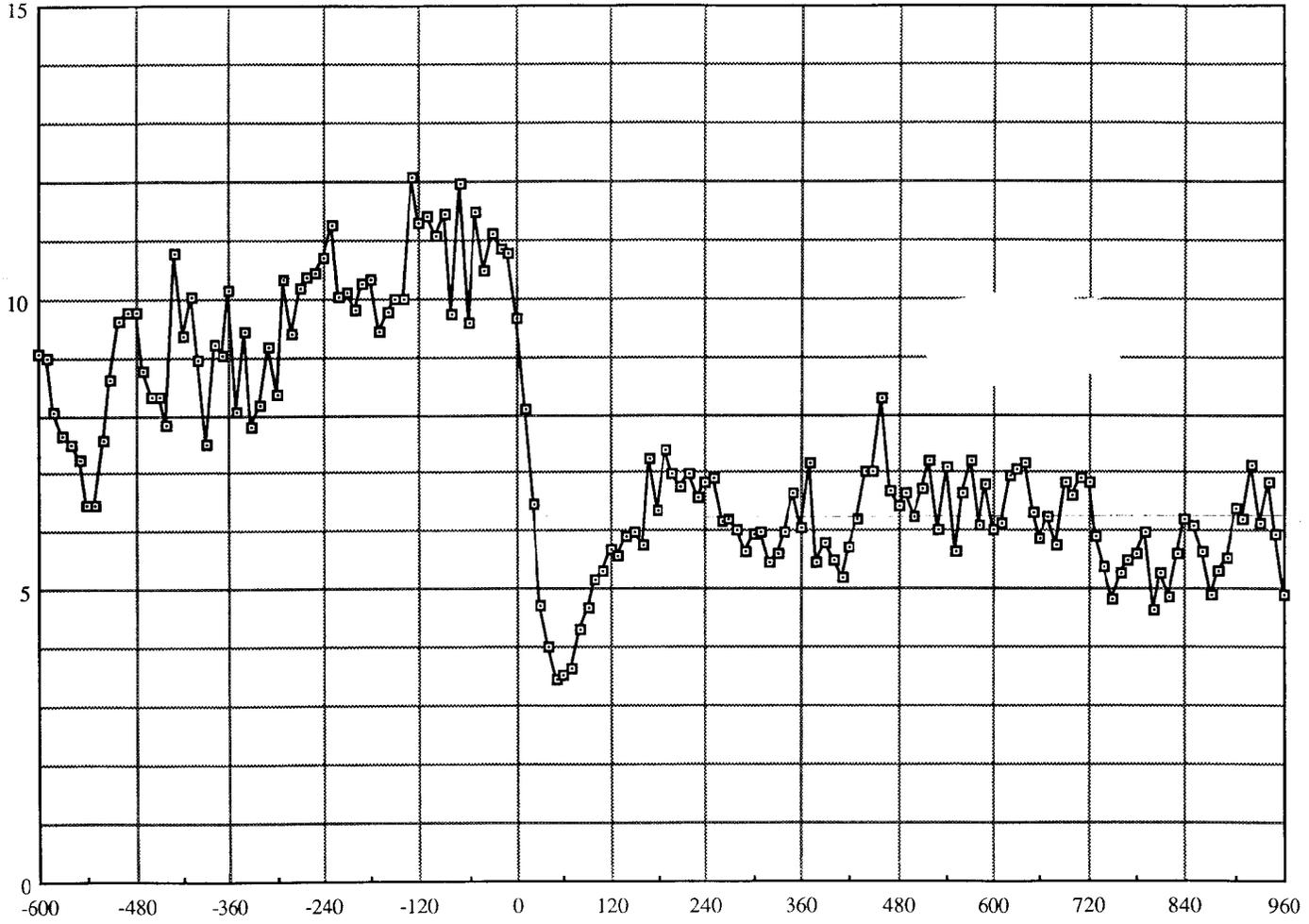
Courbe 4 - Modélisation de l'échelon positif par un système du deuxième ordre

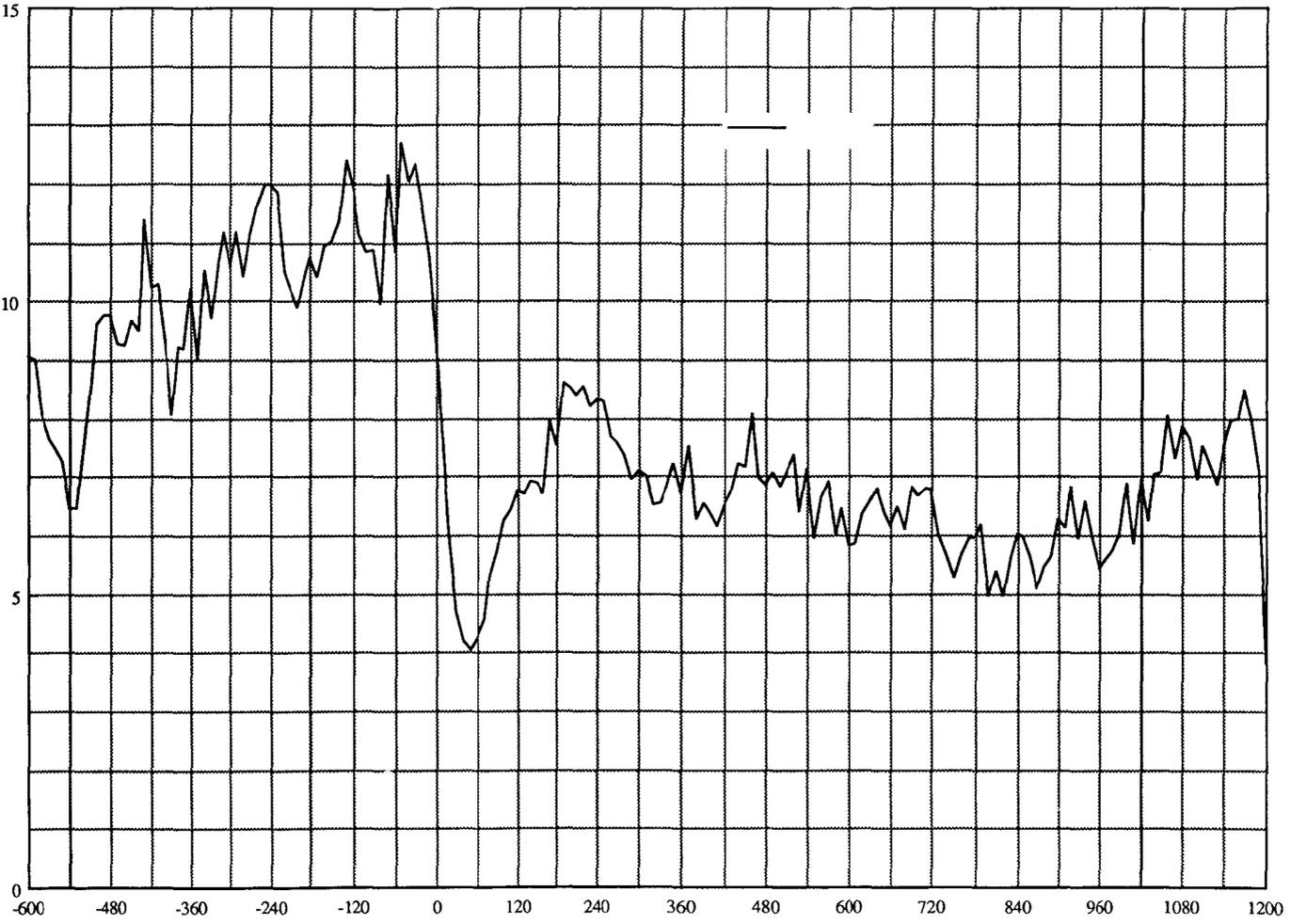
IV.2. ÉCHELON DE LUMIÈRE NÉGATIVE



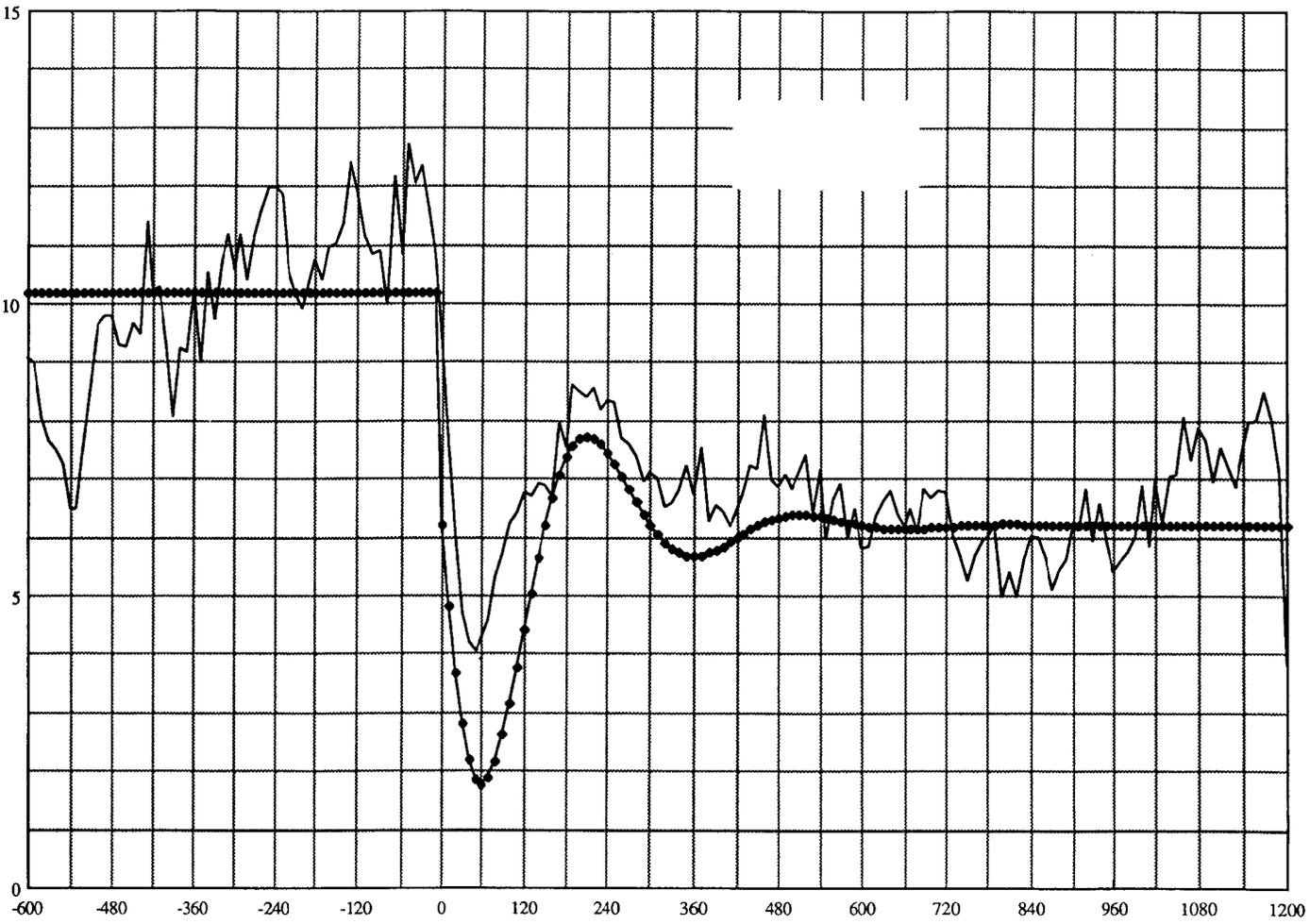
Courbe 5 - Échelon no 1

Courbe 6 - Échelon no 1 + 2 + 3





Courbe 7 - Échelon no 1 + 2 + 3 + 4 + 5



Courbe 8 - Modélisation de l'échelon négatif par un système du deuxième ordre

### IV.3. ÉCHELON DE TEMPÉRATURE

Ce test a deux objectifs, premièrement valider sur l'Air-lift les valeurs obtenues par JF.CORNET, deuxièmement déterminer l'influence des variations "rapides" de température sur la vitesse de croissance.

Durant le test il est apparu que les fronts montant ( 10 mn ) et descendant ( 1 heure ) sont inégaux, en raison de limitations dues au système de refroidissement.

Les faibles variations de vitesse observées durant le test ne permettent pas d'envisager l'établissement d'un modèle dynamique pour la température. Néanmoins ce paramètre est utilisable comme moyen de ralentir la croissance dans le réacteur en cas de besoin, ceci permet de maintenir un niveau lumineux empêchant la respiration tout en ayant une vitesse de croissance faible.

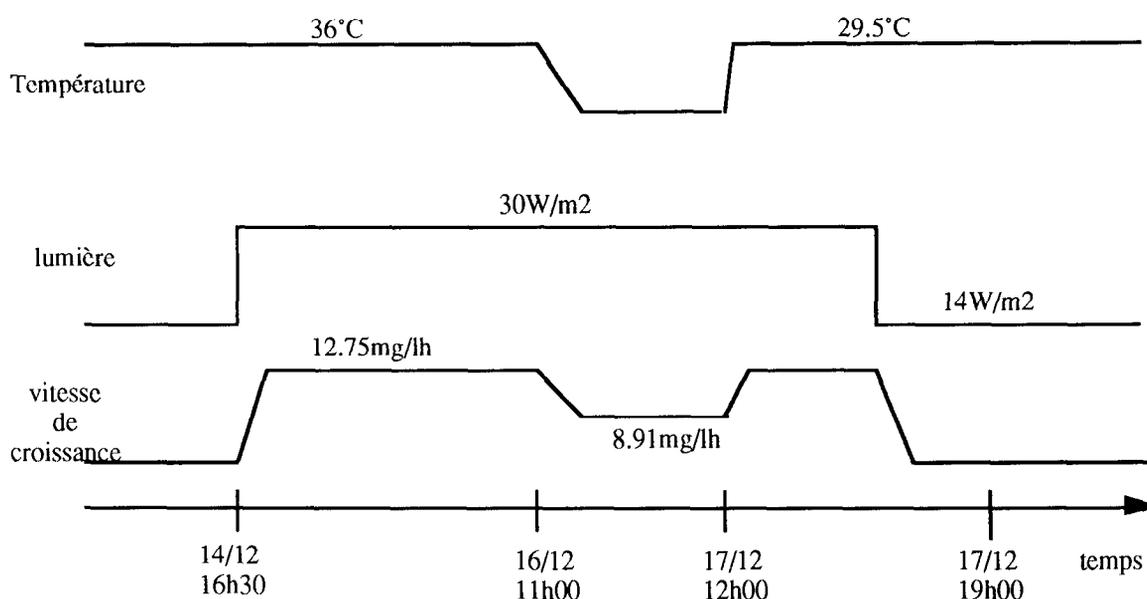


Figure 16 - Résultats du test indiciel en température.

Afin d'observer une variation de vitesse significative l'intensité mesurée au centre a été augmentée à 30 W/m<sup>2</sup>, après deux jours de stabilisation, la température a chute de 36 à 29.5°C en environ une heure. La limite de 29.5°C n'a pu être dépassée en raison des limites du système de refroidissement. Cette température a été maintenue durant 24 heures puis ramenée a 36°C. Les vitesse ont été mesurées avec les écart du compteur de régulation biomasse sur plusieurs heures et sont :

- 12,75 mg/lh à 36°C pour 30W/m<sup>2</sup> au centre et une concentration de 460mg/l.
- 8,91 mg/lh dans les mêmes conditions et une temperature de 29,5°C.

Le rapport de vitesse expérimental est de 0.69 alors que le modèle donne un rapport théorique de 0.70, ce résultat permet de dire que la correction de vitesse en fonction de la température est applicable a l'AIR-LIFT.

## V. STRATÉGIE DE CONTRÔLE

Le paramètre caractérisant le mieux l'activité du réacteur est la vitesse de croissance volumétrique (mg/lh). De plus cette vitesse permet d'obtenir directement les quantités de biomasse et oxygène produit, ainsi que les nitrates consommés.

### V.1 MESURE DE LA VITESSE DE CROISSANCE

La première étape du contrôle consiste à mesurer cette vitesse à l'aide de l'équation décrivant un réacteur en culture à dilution continue. Pour un composé  $i$  dont la concentration est  $C_i$  et la vitesse de production (ou de consommation) est  $R_i$ , on a :

$$D (C_{i0} - C_i) + R_i = \frac{dC_i}{dt}$$

$C_{i0}$  : Concentration dans le milieu de dilution, zéro dans le cas de la biomasse.

$D$  : Taux de dilution  $h^{-1}$ , rapport de la quantité de liquide renouvelé dans le réacteur par le volume total durant une heure.

pour la mesure de la vitesse de croissance de la biomasse cette équation s'écrit:

$$R_{xa} = D C_i + \frac{dC_i}{dt}$$

### V.2 UTILISATION DU MODÈLE

Le modèle permet de déterminer  $R_{xa}$  pour des conditions d'éclairement données, or on cherche à contrôler l'activité du bio-réacteur, ce qui revient à fixer  $R_{xa}$ . Il faut compléter le modèle par un solveur (figure 17) capable de déterminer l'éclairement à fournir au réacteur pour obtenir la vitesse de croissance désirée.



Figure 17 - Utilisation du modèle pour déterminer l'éclairement du réacteur.

### V.3 CONTRÔLE DE LA VITESSE

Le réacteur est soumis à des perturbations, et le modèle n'est pas parfait, en conséquence le fait de fonctionner en boucle ouverte (figure 17) avec le modèle ne peut aboutir à de bons résultats. L'étape suivante consiste à mettre en place un contrôleur dont le seul paramètre accessible sera la vitesse (figure 18)

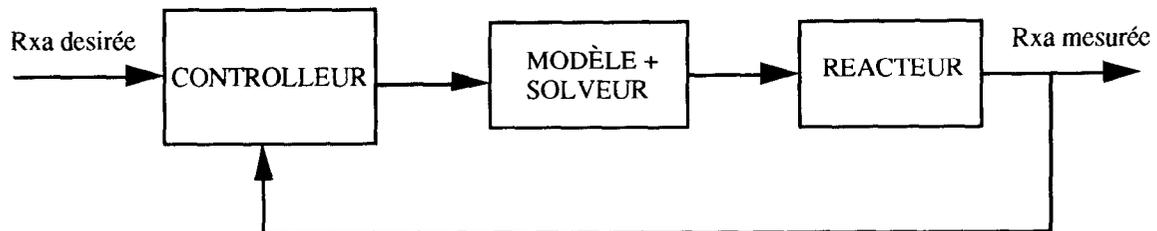


Figure 18 - Contrôle de la vitesse de croissance.

### V.4 INSERTION DU COMPARTIMENT DANS LA BOUCLE MELISSA

Le compartiment photosynthétique s'insère dans une boucle, son activité doit être fixée en fonction de :

- besoins en nourriture de l'équipage,
- production en nitrate du compartiment nitrifiant.

Il est nécessaire de se doter d'un superviseur capable de fixer les directives pour chacun des compartiments de la boucle. Dans un premier temps la présence du compartiment nitrifiant peut être simulée avec différentes vitesses de production de nitrates, puis lorsque celui-ci sera opérationnel un test de connexion pourra être effectué.

## BIBLIOGRAPHIE

- CORNET J.F.** - Thèse : Étude cinétique et énergétique d'un photobioréacteur : Établissement d'un modèle structuré, Application à un écosystème clos artificiel. Université PARIS SUD N° 1989.
- CORNET J.F. DUSSAP C.G. and DUBERTRET G.** - A structured model for simulation of cultures of the cyanobacterium : I coupling between light transfert and growth kinetics. *Biotechnologies & Bioengineering* 1992 Vol. 40 Pp. 817 - 825.
- CORNET J.F. DUSSAP C.G. CLUZEL P. and DUBERTRET G.** - A structured model for simulation of cultures of the cyanobacterium : II Identification of kinetic parameters under light and mineral limitations. *Biotechnologies & Bioengineering* 1992 Vol. 40 Pp. 826 - 834.
- CORNET J.F. DUSSAP C.G. DUBERTRET G. and GROS J.B.** - Modelling light transfert inside photo-biofermentors. Application to the photosynthetic compartement of C.E.L.S.S. Proceedings of the 4th European symposium on space environmental and control systems. Florence, Italy 21-24 october 1991 (ESA.SP 324 December 1991) Pp. xxx - xxx.
- CORNET J.F. DUSSAP C.G. and GROS J.B.** - Modelling of physical limitations in photo-bioreactors. Applications to simulation and control of the Spirulina compartement of the MELISSA artificial ecosystem. Technical note 19.1 ESA contract PRF 130820 1993.
- LASSEUR C. BINOT R.A. TAMPONNET C. CORNET J.F.** - MELISSA : Physical link of compartments Nitrobacter / Spirulina. Proceedings of the 4th European symposium on space environmental and control systems. Florence, Italy 21-24 october 1991 (ESA.SP 324 December 1991) Pp. 823 - 829.
- LASSEUR C. BINOT R.A.** - Control system for artificial ecosystems. Application to MELISSA. 21st International Conference on Environmental Systems july 15 - 18 1991 San Francisco.
- MERGEAY M. VERSTRAETE W. DUBERTRET G. LEFORT-TRAN C. CHIPAUX C. and BINOT R.A.** - "MELISSA" : A micro-organisms-based model for "CELSS" development. Proceedings of the 3rd symposium on space thermal control and life support systems. Noordwijk, the Netherlands 3 - 6 october 1988 (ESA.SP 288 December 1988) Pp 65-68.
- SEBORG D.E. EDGAR T.F. and SHAH S.L.** - Adaptative control strtegies for process control : A survey. *AIChE journal* june 1986 Vol.32, N° 6, Pp. 881 - 913.
- SHINNERS S.M.** - Modern control system theory and design. 1992 John Wiley & son.
- TAMPONNET C. BINOT R.A. LASSEUR C. and SAVAGE C.** - Man in space - A European challenge in biological life support. *ESA Bulletin* august 1991 Pp. 38 - 49.
- TANDEAU de MARSAC N.** - Les algues bleues d'autrefois *BIOFUTUR* mars 1993 Pp. 46 - 50