

COMMISSARIAT A L'ÉNERGIE ATOMIQUE

*Centre d'Études Nucléaires de Saclay*

Département d'Electronique Générale

Service d'Electronique des Réacteurs

2019/SER/1279

ANALYSE DES RESULTATS OBTENUS PAR SIMULATION SUR  
CALCULATEUR ANALOGIQUE DU FONCTIONNEMENT  
DE LA BATTERIE D'EXTRACTION N° 1  
DE L'USINE DE LA HAGUE

par

M. DEGRYSE

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE GENERALE  
Service d'Electronique des Réacteurs

Saclay, le 23 Septembre 1966

-----  
2019/SER/1279

-----  
MD/MD

2019/SER/1279

ANALYSE DES RESULTATS OBTENUS PAR SIMULATION SUR  
CALCULATEUR ANALOGIQUE DU FONCTIONNEMENT  
DE LA BATTERIE D'EXTRACTION N° 1  
DE L'USINE DE LA HAGUE

par

M. DEGRYSE

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE GENERALE

Service d'Electronique des Réacteurs

Saclay, le 23 Septembre 1966

-----  
2019/SER/1279

-----  
MD/MD

ANALYSE DES RESULTATS OBTENUS PAR SIMULATION SUR  
CALCULATEUR ANALOGIQUE DU FONCTIONNEMENT  
DE LA BATTERIE D'EXTRACTION N° 1  
DE L'USINE DE LA HAGUE

par  
M. DEGRYSE

Nous indiquons ci-après les tableaux de résultats obtenus pour diverses perturbations des paramètres d'entrée.

Nous avons étudié les régimes transitoires en Uranium, correspondants à des variations en échelon de la concentration en Uranium de la phase aqueuse d'alimentation, pour trois équilibres nominaux définissant des états de saturation croissants du solvant.

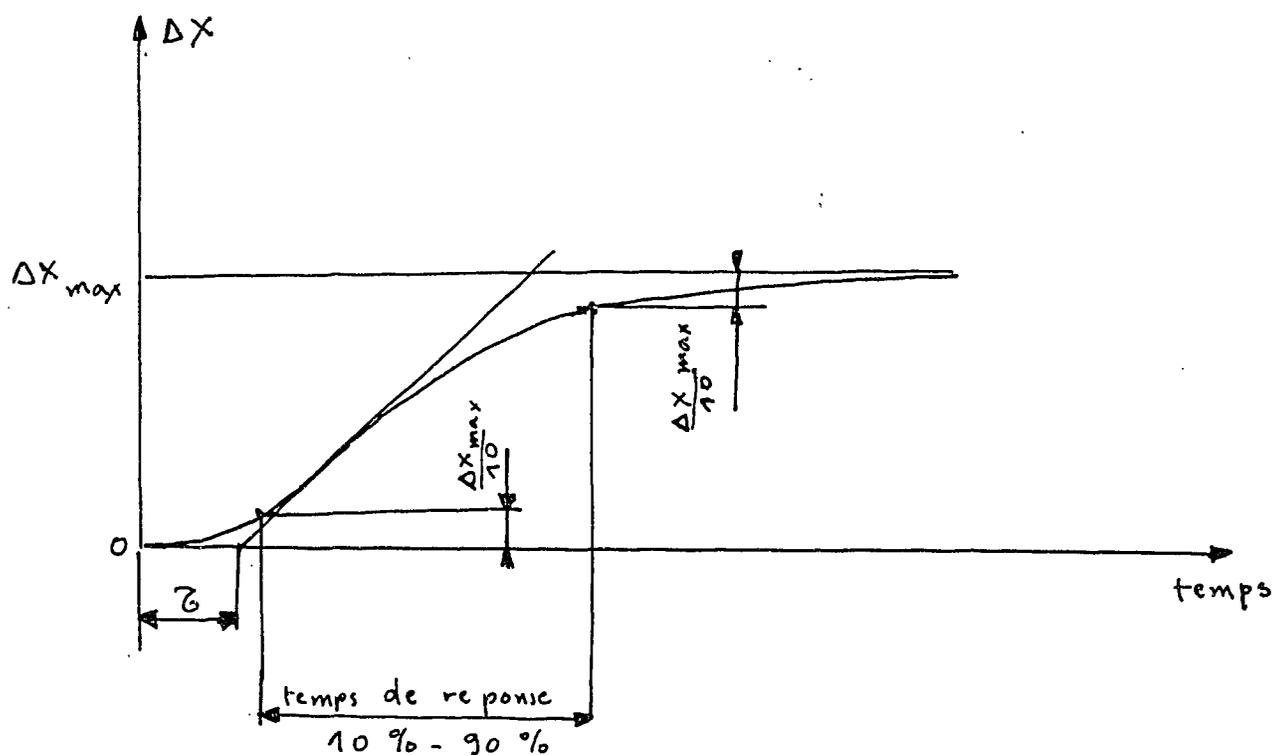
Nous avons ensuite étudié, pour l'équilibre nominal moyen, les régimes transitoires correspondants à une impulsion de concentration de la phase aqueuse, et à des variations échelon du titre en T B P, de l'acidité libre en phase aqueuse d'alimentation et de lavage, et du débit de lavage.

.../...

Nous avons repris ces mêmes essais, avec régulation de la phase aqueuse d'alimentation à partir de la densité en phase aqueuse à l'étage 9, et régulation du débit de solvant complémentaire à partir de la densité en phase aqueuse à l'étage 12.

Dans chaque cas nous avons réglé les paramètres du régulateur suivant les conditions observées en usine, puis nous avons déterminé les conditions optimum de réglage.

Les réponses transitoires dans chaque étage sont caractérisées par les variations absolues et relatives des concentrations, par un retard pur  $\tau$ , et par la durée comprise entre les valeurs 10 % et 90 % de l'écart maximum.



Le temps de réponse entre 0 et 90 % est sensiblement égal à la somme du temps de réponse 10 % - 90 %, et du retard pur.

.../...

1 - REGIMES TRANSITOIRES POUR DES VARIATIONS ECHELON DE LA CONCENTRATION D'ALIMENTATION POUR DIVERS EQUILIBRE NOMINAUX

Nous étudions trois régimes nominaux et donnons les tableaux de résultats correspondants.

Solvant peu saturé

Débit de phase aqueuse :  $A = 547 \text{ l/h}$ ,  $H \pm 3 \text{ N}$ ,  $(X)_A = 150 \text{ g/l}$   
d'alimentation

Débit de solvant principal :  $S_p = 789 \text{ l/h}$

Débit de lavage :  $L = 194 \text{ l/h}$   $H \pm 3 \text{ N}$

Débit de solvant complémentaire :  $S_c = 194 \text{ l/h}$

Température moyenne de fonctionnement :  $25 \text{ }^\circ\text{C}$

Titre en T B P du solvant :  $30 \%$

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
$X_{n(o)}$	$\varepsilon$	$\varepsilon$	$\varepsilon$	$\varepsilon$	$\varepsilon$	$<0,1$	0,9	27	$\varepsilon$	$<0,1$	1,2	28,4	24,4	13,2	13	13	12,8	11,6
$Y_{n(o)}$	$\varepsilon$	$\varepsilon$	$\varepsilon$	$\varepsilon$	$<0,1$	1	24	98,5	$<0,1$	0,6	28	97,6	95	82	82	82	81,7	79,6

$X_{n(o)}$  : concentration nominale en phase aqueuse à l'étage n en g/l

$Y_{n(o)}$  : concentration nominale en phase solvant à l'étage n en g/l

.../...

VARIATION DE + 2 % SUR  $X_A$ , SOIT 3 g/l - SOLVANT PEU SATURE

n	$\tau$	Temps de réponse 10%-90%	$X_n(o)$ g/l	$\Delta X$ g/l	$\frac{\Delta X}{X_n(o)}$	$\frac{\frac{\Delta X}{X_n(o)} / 1}{\frac{\Delta X_A}{X_A}}$	
6	15'	93'	$7,52 \cdot 10^{-4}$	$1,10 \cdot 10^{-4}$	0,13	6,5	extraction principale
8	3'	84'	0,967	0,12	0,13	6,5	
9	0	1 h 20'	27,26	2,92	0,11	5,5	
10	40'	3 h 7'	$11,57 \cdot 10^{-4}$	$1,49 \cdot 10^{-4}$	0,12	6	extraction complémentaire
12	15'	2 h 7'	1,22	0,16	0,13	6,5	
13	5'	1 h 56'	28,77	2,7	0,094	4,7	lavage partiel
15	26'	2 h 15'	13,53	1,030	0,076	3,8	
19	68'	2 h 33'	11,53	0,81	0,070	3,5	lavage total

Solvant moyennement saturé (conditions usine)

Débit de phase aqueuse :  $A = 547 \text{ l/h}$   $H \pm 3 \text{ N}$   $X_A = 150 \text{ g/l}$   
d'alimentation

Débit de solvant principal :  $S = 719 \text{ l/h}$

Débit de lavage :  $L = 172 \text{ l/h}$   $H \pm 3 \text{ N}$

Débit de solvant complémentaire :  $S_c = 132 \text{ l/h}$

Température moyenne de fonctionnement :  $25 \text{ }^\circ\text{C}$

Titre en T B P du solvant :  $30 \%$

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
$X_{n(o)}$	$\epsilon$	$\epsilon$	$\epsilon$	$\epsilon$	$\epsilon$	0,15	4	59	0,01	0,27	5,2	50,4	41,4	28,3	28,1	27,8	26,4	21,4
$Y_{n(o)}$	$\epsilon$	$\epsilon$	$\epsilon$	$\epsilon$	0,14	3,6	56,6	109,5	0,34	6,6	63,2	107,5	104,7	98,5	98,4	98,2	97,2	92,5

$X_{n(o)}$  concentration nominale en phase aqueuse à l'étage n en g/l

$Y_{n(o)}$  concentration nominale en phase solvant à l'étage n en g/l

.../...

VARIATION DE + 2 % SUR  $X_A$ , SOIT 3 g/l - SOLVANT MOYENNEMENT SATURE

n	$\zeta$	Temps de réponse 10%-90%	$X_{n(o)}$ g/l	$\Delta X$ g/l	$\frac{\Delta X}{X_{n(o)}}$	$\frac{\frac{\Delta X}{X_{n(o)}}}{\frac{X_A}{X_A}}$	
6	20'	4 h 45'	0,006	0,003	0,5	25	extraction principal
8	6'	4 h 50'	4	1,7	0,42	21	
9	0	4 h 24'	59	10,5	0,18	9	
10	1 h 15'	6 h 15'	0,014	0,005	0,36	18	extraction complémentaire
12	35'	6 h 15'	5,2	1,9	0,36	18	
13	10'	5 h 30'	50,4	6,3	0,12	6	lavage partiel
15	1 h	6 h 15'	28,3	3,8	0,13	6,5	lavage total
19	2 h 15'	6 h 45'	21,4	2 g/l	0,09	4,5	

Solvant très saturé

Débit de phase aqueuse :  $A = 547 \text{ l/h}$   $H \pm 3 \text{ N}$   $X_A = 150 \text{ g/l}$   
d'alimentation

Débit de solvant principal :  $S_p = 667 \text{ l/h}$

Débit de lavage :  $L = 78 \text{ l/h}$   $H \pm 3 \text{ N}$

Débit de solvant complémentaire :  $S_c = 78 \text{ l/h}$

Température moyenne de fonctionnement :  $25 \text{ }^\circ\text{C}$

Titre en T B P du solvant :  $30 \%$

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
$X_{n(o)}$	$\epsilon$	$\epsilon$	$\epsilon$	$\epsilon$	0,2	2,5	50	121,8	$\epsilon$	1	24,8	96	80,6	63	61,2	58,4	52,8	40,4
$Y_{n(o)}$	$\epsilon$	$\epsilon$	$\epsilon$	0,2	3	44	108	116	1	25	96	115	113	110	109,8	109,8	108	104

$X_{n(o)}$  : concentration nominale en phase aqueuse à l'étage n en g/l

$Y_{n(o)}$  : concentration nominale en phase solvant à l'étage n en g/l

.../...

VARIATION DE + 0,1 % SUR  $X_A$ , SOIT 0,15 g/l - SOLVANT TRES SATURE

n	$\tau$	Temps de réponse 10%-90%	$X_{n(0)}$	$\Delta X$	$\frac{\Delta X}{X_{n(0)}}$	$\frac{\Delta X}{X_A}$	
6	40'	120 h	0,07	0,04	0,57	570	extraction principal
8	10'	125 h	52,28	1,7	0,33	330	
9	0'	120 h	123,4	4,3	0,035	35	
10	8 h	150 h	0,024	0,0015	0,06	60	extraction complémentaire
12	3 h 30'	150 h	20,58	1,5	0,07	70	
13	10'	125 h	92,78	1	0,01	10	lavage partiel
15	4 h	125 h	68,58	1,1	0,016	16	lavage total
19	8 h	125 h	41,86	0,30	0,037	7	

.../...

Nous observons que les étages 9 et 13 sont les plus sensibles aux variations de concentration d'entrée, et que les amplitudes des variations et les temps de réponse varient beaucoup avec l'état de saturation du solvant.

L'augmentation des temps de réponse avec la saturation du solvant est due à la variation croissante des concentrations dans chaque étage.

Nous donnons une bonne image de la variation des temps de réponse en comparant le rapport des variations relatives des concentrations dans chaque étage, à la variation relative de concentration d'entrée

$$\frac{\frac{\Delta X}{X_n(o)}}{\frac{\Delta X_A}{X_A}}$$

Dans le cas du solvant très saturé, les temps de réponse s'expriment en centaines d'heure, pour de très petites variations de concentration d'entrée.

Pratiquement un tel état est instable, et conduit à un engorgement rapide, dans le cas d'une augmentation de concentration d'entrée, ou de débit d'alimentation, ou évolue vers un état moins saturé, par variation de débit solvant, ou augmentation de titre en T B P, par exemple.

C'est pourquoi, en usine, il est impossible de mettre en évidence des temps de réponse aussi élevés, pour un équilibre aussi saturé, un tel équilibre n'existant pratiquement jamais.

..../...

Nous pensons devoir souligner que les temps de réponse caractérisent la durée de transitoire pour atteindre un nouvel état d'équilibre ; ils ne caractérisent pas les vitesses de variation instantanée des concentrations, qui, pour une même perturbation d'entrée, sont d'autant plus grandes, en phase aqueuse, que le solvant est plus saturé.

Ainsi, pour une variation de 3 g/l de concentration d'entrée, l'engorgement horaire initial en phase aqueuse à l'étage 9 est de 6,5 g/l/h, pour un solvant à 98,5 g/l dans ce même étage, alors que l'engorgement horaire initial est de 10 g/l/h, pour un solvant à 109,5 g/l.

Nous avons également étudié les régimes transitoires, dans le cas du solvant peu saturé, pour des variations en échelon des débits de solvant principal et complémentaire, et des débits d'alimentation et de lavage.

Nous indiquons ci-après les tableaux de résultats correspondants aux essais effectués.

Nous observons que les temps de réponse sont très voisins de ceux observés pour la variation de concentration d'entrée, sauf en ce qui concerne la variation de débit de lavage, dont les temps de réponse sont plus courts.

En particulier, nous remarquons qu'une même variation relative de  $A$  et  $S_p$  ont des effets quasiment identiques ; nous remarquons également que l'étage 12 est le plus sensible aux variations de  $L$  et  $S_p$ .

Nous avons vérifié, dans un domaine de concentrations restreint autour du point d'équilibre nominal, que les temps de réponses sont quasiment indépendants du sens et de l'amplitude des variations.

.../...

VARIATION DE + 2 % SUR A - SOLVANT PEU SATURE

n	$\zeta$	Temps de réponse 10%-90%	$X_{n(0)}$	$\Delta X$	$\frac{\Delta X}{X_{n(0)}}$	
6	3'	1 h 35'	$7,52 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	0,19	extraction principale
8	0'	1 h 25'	0,967	0,144	0,15	
9	0'	1 h 32'	27,26	2,92	0,11	
10	42'	2 h 19'	$11,57 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	0,13	extraction complémentaire
12	16'	2 h 6'	1,22	0,16	0,13	
13	5'	2 h	28,77	2,7	0,09	lavage partiel
15	29'	2 h 13'	13,53	1,02	0,08	lavage total
19	78'	2 h 34'	11,53	0,81	0,07	

.../...

VARIATION DE - 2 % SUR  $S_p$  - SOLVANT PEU SATURE

n	$\tau$	Temps de réponse 10%-90%	$X_{n(0)}$	$\Delta X$	$\frac{\Delta X}{X_{n(0)}}$	
6	0'	1 h 35'	$7,52 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	0,2	extraction principale
8	0'	1 h 30'	0,967	0,15	0,15	
9	0'	1 h 22'	27,26	2,84	0,10	
10	43'	2 h 20'	$11,57 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	0,12	extraction complémentaire
12	18'	2 h 10'	1,222	0,15	0,12	
13	6'	2 h	28,77	2,56	0,09	lavage partiel
15	46'	2 h 10'	13,53	0,83	0,06	lavage total
19	1 h 35'	2 h 20'	11,53	0,63	0,06	

...../.....

VARIATION DE - 20 % SUR LE SOLVANT COMPLEMENTAIRE

n	$\tau$	Temps de réponse 10%-90%	$X_n(o)$	$\Delta X$	$\frac{\Delta X}{X_n(o)}$	
6						extraction principale
8						
9						
10	0'	1 h 30'	$11,57 \cdot 10^{-4}$	$13,4 \cdot 10^{-4}$	1,16	extraction complémentaire
12	0'	58'	1,222	0,425	0,35	
13	9'	1 h 56'	28,77	0,1625	0,006	lavage partiel
15	0'	1 h 7'	13,53	2,05	0,15	lavage total
19	33'	1 h 44'	11,53	1,56	0,14	

.../...

VARIATION DE + 5 % SUR LE LAVAGE - SOLVANT PEU SATURE

Retard pur nul pour tous les étages

n	Temps de réponse 10%-90%	$X_n(o)$	$\Delta X$	
6	60'	$7,52 \cdot 10^{-4}$	$0,35 \cdot 10^{-4}$	extraction principale
8	65'	0,967	0,017	
9	6'	27,26	0	
10	71'	$11,57 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$	extraction complémentaire
12	45'	1,222	0,082	
13	29'	28,77	- 0,1	lavage partiel
15	67'	13,53	0,09	lavage total
19	21'	11,53	0	

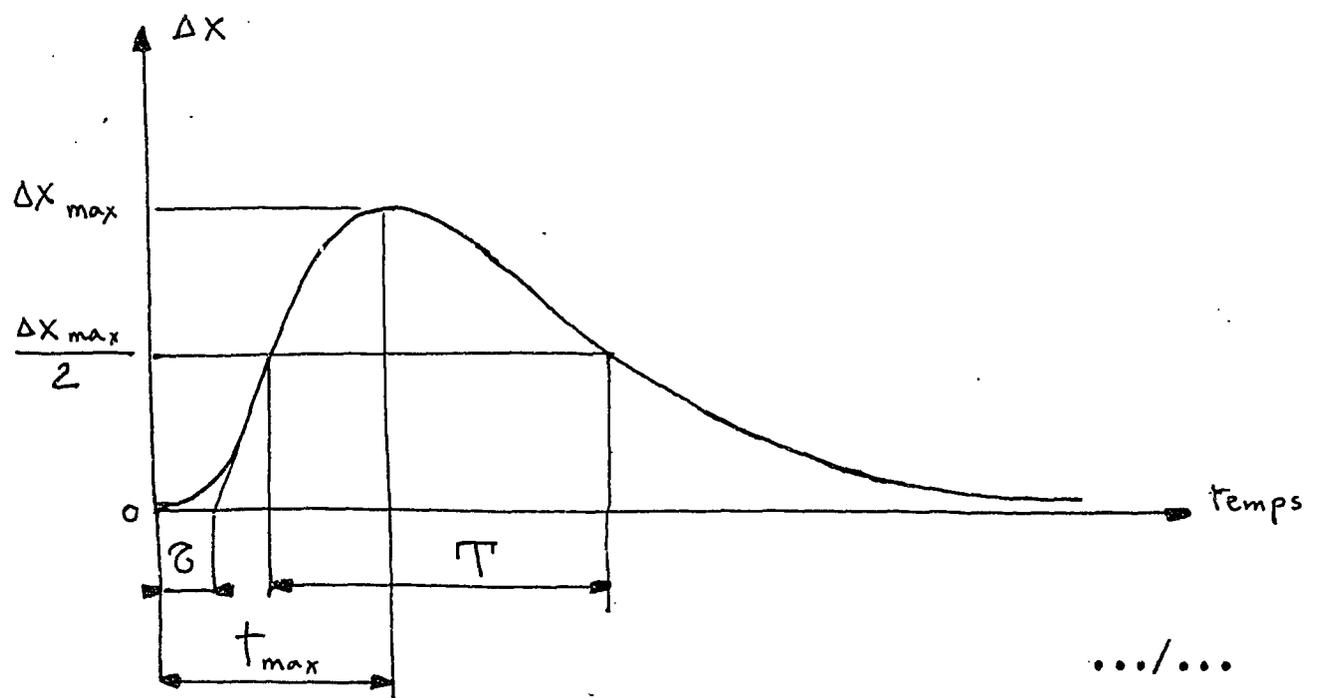
.../...

2 - ETUDE DES VARIATIONS POUR DES PERTURBATIONS AUTOUR DE L'EQUILIBRE NOMINAL MOYEN (CONDITIONS USINE)

Nous avons recherché la réponse impulsionnelle pour une impulsion de concentration de la solution d'alimentation de 3 g/l, durant 15'.

Durant l'impulsion, l'étage 9 "intégré" le signal d'entrée, puis la concentration décroît sensiblement comme un système du premier ordre, de constante de temps 1 heure.

Nous caractérisons la propagation de l'impulsion dans les étages par un retard pur  $\tau$ , par le temps mis, pour atteindre l'amplitude maximum  $t_{max}$ , et par la largeur à mi hauteur  $T$ .



IMPULSION DE 3 g/l SUR  $X_A$  DURANT 15' - EQUILIBRE NOMINAL USINE

n	$\tau$	$t_{\max.}$	T	$\Delta X_{\max.}$ g/l	
6				$\varepsilon$	
8	4'	25'	1 h 40'	0,175	extraction principale
9	0'	15'	40'	1,7	
10				$\varepsilon$	
12	12'	1 h 50'	4 h	0,1	extraction complémentaire
13	4'	1 h	3 h 25'	0,375	lavage partiel
15	20'	2 h 36'	4 h 30'	0,17	
19	1 h 20'	4 h 20'	5 h 10'	0,08	lavage total

Nous observons que les retards purs indiqués sont inférieurs à ceux donnés dans le cas d'une perturbation échelon de concentration d'entrée.

Ceci provient de l'analyse beaucoup plus fine du phénomène dans le cas de la réponse impulsionnelle.

.../...

Variation échelon du titre en T B P

Nous faisons varier le titre en T B P du solvant principal et du solvant complémentaire de - 1 %.

Comme pour les concentrations en Uranium, l'évolution du titre en T B P dans les étages est caractérisé par un retard pur  $\tau$  et un temps de réponse 10 % - 90 %.

Nous indiquons les résultats obtenus dans le tableau suivant :

VARIATION DE - 1 % DU TITRE EN T B P - EQUILIBRE NOMINAL USINE

n	U R A N I U M		$\Delta X$ g/l	T I T R E EN T B P	
	$\tau$	Temps de réponse 10 % - 90 %		$\tau$	Temps de réponse 10 % - 90 %
6	30'	4 h 30'	0,1		
8	45'	4 h 25'	3		
9	50'	4 h 25'	17	40'	1 h
10	1 h	6 h 30'	0,015	0'	40'
12	1 h	5 h 55'	1,9	18'	1 h 40'
13	1 h 15'	5 h 20'	10,5		
15	1 h 50'	6 h 15'	6,3	1 h	1 h 30'
19	3 h 25'	6 h 25'	1,8	1 h 30'	1 h 40'

.../...

Dans le cas des étages 10 - 11 - 12 et 15, la variation du titre en T B P du solvant principal et du solvant complémentaire se traduit par deux évolutions successives. La première, de faible amplitude, est due à la variation de titre en T B P du solvant complémentaire, la seconde est due à la variation du titre en T B P du solvant principal. Ceci explique la variation non continue des retards purs pour chacun de ces étages.

Nous remarquons que la durée des régimes transitoires pour ce type de perturbation est très voisine de celle observée pour une variation de concentration d'alimentation.

Les étages les plus sensibles quantitativement sont naturellement les étages 9 et 13, mais les variations relatives les plus grandes sont observées dans les étages peu chargés des extractions.

#### Variation échelon du débit de lavage

Nous faisons varier le débit de lavage de + 20 %. Les résultats obtenus sont indiqués dans le tableau suivant. Les retards purs sont nuls pour tous les étages.

VARIATION DE + 20 % DU DEBIT DE LAVAGE - EQUILIBRE NOMINAL USINE

n	Temps de réponse 10% - 90%	$X_n(o)$ g/l	$\Delta X$ g/l	$\frac{\Delta X}{X_n(o)}$	
6	4 h 20'	0,006	0,0015	0,25	extraction principale
8	4 h 20'	4	0,5	0,12	
9	9'	59	0	0	
10	2 h 15'	0,014	0,013	1	extraction complémentaire
12	2 h 35'	5,2	+ 2,6	0,5	
13	55'	50,4	- 1,1	0,02	lavage partiel
15	5 h	28,3	+ 2,3	0,08	lavage total
19	40'	21,4	0	0	

Nous observons que les temps de réponse sont plus faibles que pour les autres types de perturbations et que l'étage 12 est le plus sensible aux variations de débit de lavage.

Nous remarquons que la variation de concentration en phase aqueuse à l'étage 13 est négative, alors que le débit de lavage a augmenté. Ce phénomène est normal, dans les conditions opératoires choisies, mais dans le cas d'un solvant très saturé nous aurions remarqué le phénomène inverse

Variations échelon des acidités des phases aqueuses d'alimentation et de lavage

Nous faisons varier les acidités des phases aqueuses de  $\pm 0,3$  N.

L'évolution de l'acidité libre en phase aqueuse dans les étages est caractérisée par un retard pur  $\tau''$  et, par un temps de réponse 10 % - 90 %.

Nous indiquons les résultats obtenus dans les tableaux suivants

VARIATION DE  $- 0,3$  N DANS LA PHASE DE LAVAGE - EQUILIBRE NOMINAL USINE

n	U R A N I U M			ACIDITE EN PHASE AQUEUSE		
	$\tau''$	Temps de réponse 10 % - 90 %	$\Delta X$ g/l	$\tau''$	Temps de réponse 10 % - 90 %	$\Delta Z$ moles/litre
6	4 h 30'	6 h	$10^{-3}$			
8	4 h 30'	6 h 40'	0,4			
9	5 h	7 h 15'	1	3 h 50'	5 h 45'	- 0,07
10	4 h 15'	6 h 15'	$18 \cdot 10^{-3}$	3 h 45'	5 h 30'	- 0,3
12	3 h 30'	6 h 40'	2,6			
13	3 h	6 h 45'	4,2			
15	1 h 45'	7 h 30'	4,5			
19	0	10 h 30'	2,8	0	1 h 50'	- 0,3

VARIATION DE - 0,3 N DANS LES PHASES AQUEUSES D'ALIMENTATION ET DE LAVAGE  
EQUILIBRE NOMINAL USINE

n	U R A N I U M			ACIDITE EN PHASE AQUEUSE		
	z	Temps de réponse 10 % - 90 %	$\Delta X$ g/l	z''	Temps de réponse 10 % - 90 %	$\Delta Z$ moles/litre
6	15'	8 h 10'	$9,5 \cdot 10^{-3}$			
8	5'	8 h 35'	2			
9	0'	9 h 30'	4	0	7 h	- 0,3
10	4h30'	6 h	$8 \cdot 10^{-3}$	3 h 45'	5 h 30'	- 0,3
12	3h45'	6 h 5'	2,6			
13	3h30'	6 h 20'	4,2			
15	2h30'	7 h 20'	4,5			
19	0'	11 h	2,8	0	1 h 48'	- 0,3

Nous observons que les temps de réponse sont beaucoup plus élevés que pour les autres types de perturbation. Ce phénomène est lié à la propagation de la variation d'acidité de la phase de lavage essentiellement.

Naturellement, ce sont les étages de lavage qui évoluent le plus pour cette perturbation, mais la variation relative de concentration en phase aqueuse à l'étage 12 est également très importante, et significative de cette perturbation.

.../...

Détermination des conditions de régulation

Un contrôle parfait du fonctionnement de la batterie devrait réaliser un état de saturation du solvant constant, assurer une production horaire uniforme, avec extractions complètes de l'Uranium et du Plutonium, et optimiser les conditions de lavage pour avoir un bon facteur de décontamination en produits de fission.

L'étude des conditions d'extraction du Plutonium, et l'optimisation des conditions de lavage ne sont pas abordées ici.

Les deux premiers objectifs sont difficiles à réaliser en même temps, car ils supposent la connaissance en continu des concentrations et du titre en T B P du solvant, ainsi que des concentrations de la phase aqueuse d'alimentation.

Les moyens de mesure actuels ne nous donnent pas ces renseignements en continu et nous ne pouvons que réaliser partiellement les objectifs précédents.

A débit de solvant principal constant, une régulation de débit aqueux d'alimentation à partir de la densité en phase aqueuse à l'étage 9 assure une saturation du solvant et une production horaire constante, dans la mesure où le coefficient de partage de l'Uranium ne varie pas à l'étage 9, soit si le titre en T B P du solvant, l'acidité libre dans les phases et la température ne varient pas, ce qui n'est pas le cas en toute rigueur chacun de ces paramètres variant de quelques % autour des valeurs nominales.

Dans le cas d'une régulation de débit de solvant principal nous rencontrons le même problème.

.. ./...

Des deux solutions, la première semble la plus intéressante parce qu'elle compense l'influence des variations des concentrations d'entrée sur la production horaire et que l'action s'effectue immédiatement dans ces conditions, mais une variation de 1 % du titre en T B P, se traduira par une variation de 3 % de production horaire.

Une telle régulation présente l'intérêt de stabiliser le profil de concentrations en Uranium dans l'extraction principale, et par suite, permet d'extraire le Plutonium dans de bonnes conditions, ainsi que de garder le solvant dans un domaine élevé de saturation, condition indispensable pour obtenir de bons facteurs de décontamination en produits de fissions.

Nous observons d'autre part, que l'extraction secondaire et les étages de lavage sont sensibles aux variations de débit de lavage et à l'acidité libre, ainsi qu'aux variations du titre en T B P du solvant.

Afin de maintenir l'efficacité de cette extraction constante et stabiliser dans une certaine mesure les conditions de lavage quelques soient les variations des paramètres précédents, il serait intéressant de réguler le débit de solvant complémentaire sur la densité en phase aqueuse à l'étage 12 par exemple.

Une telle régulation permettrait d'adapter l'extraction complémentaire aux conditions de lavage, qui déterminent pour une bonne part la valeur du facteur de décontamination, et qui peuvent varier intentionnellement suivant le combustible traité et les résultats obtenus.

Nous allons déterminer les conditions de réglage optimum de ces régulations, puis nous allons simuler les régimes transitoires obtenus en boucle fermée pour diverses perturbations d'entrée, et diverses conditions de réglage des régulateurs.

Détermination des paramètres de réglage de la régulation de la solution d'alimentation

La simulation sur calculateur analogique indique que la concentration en Uranium en phase aqueuse, à l'étage 9, évolue sensiblement comme un système du premier ordre, de constante de temps 1 h 1/2, suivant les variations du débit d'alimentation.

La variation de concentration est de 1 g/l pour une variation de débit de 1 l/h.

Si  $x_9$  est la variation de concentration et  $a$  la variation de débit aqueux, la fonction de transfert qui lie  $x_9$  et  $a$  est :  
(voir annexe)

$$\frac{x_9(p)}{a(p)} = \frac{1}{1 + 1,5 p}$$

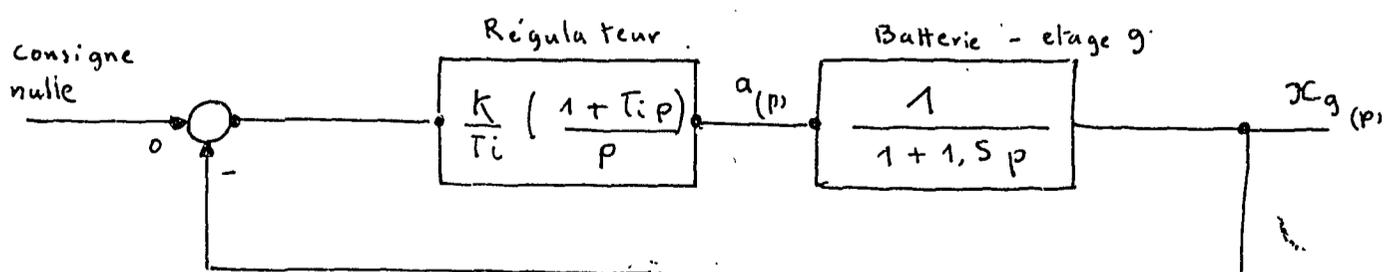
Le régulateur qui commande le débit aqueux en fonction des variations de concentration comporte une action proportionnelle et une action intégrale, d'où sa fonction de transfert :

$$\frac{a(p)}{x_9(p)} = \frac{K}{T_i} \left( \frac{1 + T_i p}{p} \right)$$

K : gain proportionnel du régulateur en l/h / g/l

$T_i$  : temps de répétition du régulateur en heure.

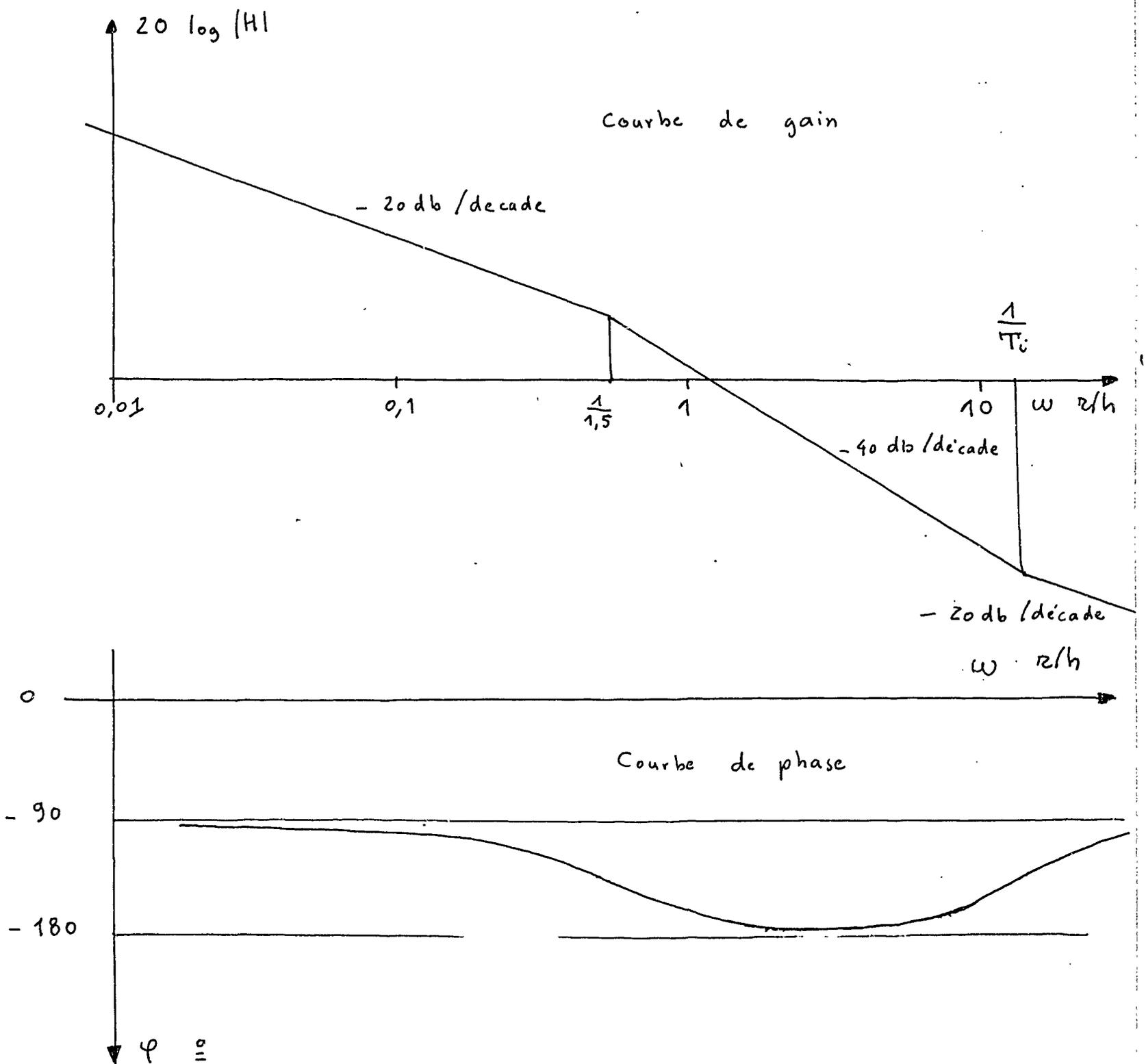
D'où le schéma de la chaîne de régulation :



.../...

Traçons en diagramme de Bode la fonction de transfert en boucle ouverte :

$$H(p) = \frac{K}{T_i} \left( \frac{1 + T_i p}{p} \right) \left( \frac{1}{1 + 1,5 p} \right)$$



.../...

Dans le cas d'une action intégrale forte, défavorable du point de vue stabilité,  $T_i \ll 1,5$  heure, et la condition de marge de phase de  $45^\circ$ , pour  $(H) = 1$ , s'écrit :

$$\frac{K}{T_i} \cdot \frac{1}{1,5} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} = 1$$

d'où :

$$\left( \frac{K}{T_{i_{\max}}} \right) = 1 \text{ l/h}^2 / \text{g/l}$$

Les conditions de réglage usine correspondent à  $T_i = 5$  mm, et l'action proportionnelle maximum pour ces conditions est :

$$K_{\max} = T_i \times 1 = \frac{1}{12} = 0,085 \text{ l/h/g/l}$$

Le gain réalisé en usine par réglage expérimental, est de  $0,1 \text{ l/h/g/l}$ , tout à fait en accord avec le calcul précédent.

Ce réglage, compatible avec les caractéristiques du régulateur, ne représente cependant pas le réglage théorique optimum.

En effet, l'action proportionnelle choisie est très faible, et l'action intégrale est relativement forte.

Cela se traduit par des temps de réponse élevés et des oscillations amorties autour de la valeur d'équilibre.

Dans le cas où on augmente  $T_i$ , nous opérons une avance de phase par rapport au réglage précédent, et, à la limite, si  $T_i = 1,5$  h, la phase est égale à  $-90^\circ$ , dans tout le domaine de fréquence, ce qui permet d'augmenter considérablement l'action proportionnelle sans risque d'instabilité.

... / ...

Dans ce cas l'action proportionnelle sera limitée uniquement par la précision des mesures, par des problèmes d'hydraulique, et par des retards dont nous n'avons pas tenu compte dans le calcul précédent, entre autre retard dû à l'évacuation d'une phase lourde par le fond du décanteur durant les régimes transitoires.

Ces conditions de réglage déterminent un temps de réponse minimum, et la valeur d'équilibre est atteinte sans dépassement.

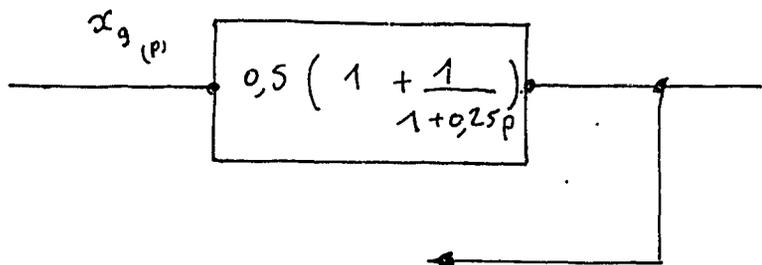
Tout au moins, nous aurons intérêt à utiliser les caractéristiques limites du régulateur, soit  $T_i = 10$  mn, en insistant cependant sur le fait qu'un  $T_i$  de  $1 \text{ h } 1/2$ , et une action proportionnelle élevée, représenteraient le réglage optimum.

Compte tenu de ces résultats, nous étudions le système en boucle fermée, pour divers conditions de réglages :

$K = 0,1 \text{ l/h/g/l}$	$T_i = 5 \text{ mn}$	} réglages usine actuel
$K = 0,1 \text{ l/h/g/l}$	$T_i = 10 \text{ mn}$	
$K = 1 \text{ l/h/g/l}$	$T_i = 10 \text{ mn}$	} réglages possibles usine
$K = 10 \text{ l/h/g/l}$	$T_i = 100 \text{ mn}$	
		} réglage optimal hors caractéristiques du régulateur

Nous tiendrons compte du retard sur la mesure de densité à l'étage 9 conformément aux résultats usine, en admettant que 50 % de la variation de débit massique diffuse immédiatement dans le décanteur, et que 50 % diffuse avec une constante de temps égale à deux fois le temps de renouvellement des volumes morts de l'étage, soit environ 15 minutes.

D'où l'élément supplémentaire dans la boucle de régulation :



.../...

DETERMINATION DES PARAMETRES DE REGLAGE DU DEBIT DE SOLVANT COMPLEMENTAIRE

La simulation sur calculateur analogique indique que la concentration en phase aqueuse à l'étage 12 évolue sensiblement comme un système du premier ordre, de constante de temps 45 mn, suivant les variations de débit de solvant complémentaire.

La variation de concentration est de 0,075 g/l par l/h de débit de solvant complémentaire.

Suivant les mêmes calculs que pour la régulation de débit aqueux d'alimentation, nous trouvons que l'action intégrale maximum, pour  $T_i \ll 45$  mn, est de :

$$\left(\frac{K}{T_{i \max}}\right) = 25 \text{ l/h}^2/\text{g/l}$$

Pour  $T_i = 10$  mn, le gain maximum est de 4 l/h/g/l, soit un gain nettement plus élevé que pour la régulation de débit aqueux d'alimentation.

Le réglage optimal correspond comme précédemment à un  $T_i$  de l'ordre de l'heure, et une action proportionnelle élevée.

Les simulations en boucle fermées sont faites pour diverses conditions de réglage :

K = 0,1	$T_i = 10'$	} réglages possibles
K = 2	$T_i = 10'$	
K = 20	$T_i = 100'$	} réglage optimal

La mesure est effectuée d'un élément retardateur, comme à l'étage 9.

.../...

RESULTATS OBTENUS EN BOUCLE FERMEE

Pour commencer, nous avons simulé des perturbations de concentration d'entrée, avec régulation de la phase aqueuse d'alimentation seulement, pour les conditions de réglage usine, soit  $K = 0,1 \text{ l/h/g/l}$  et  $T_i = 5 \text{ mn}$ . Nous avons affecté la mesure de concentration d'un retard pur variant de 0 à 1 h.

Avec un retard pur nul, le système est quasiment à l'équilibre, après deux oscillations de durée de 12 h. Avec un retard pur d'une demi-heure, le système est beaucoup moins amorti (taux d'amortissement 50 % pour deux extremums successifs), et avec un retard pur d'une heure, le système est instable, et oscille avec une période de 9 heures.

Par comparaison avec les résultats en usine, nous en déduisons que l'hypothèse d'un retard pur sur la mesure de concentration est exagérées et nous remplaçons ce retard par une constante de temps de 15' sur 50 % de la mesure de concentration, conformément à ce qui a été dit plus haut.

Nous montrons cependant par cet essai, toute la difficulté réelle du contrôle manuel de tels systèmes, surtout dans le cas de mesures par analyses, qui déterminent toujours des retards purs dans l'information de l'ordre de l'heure.

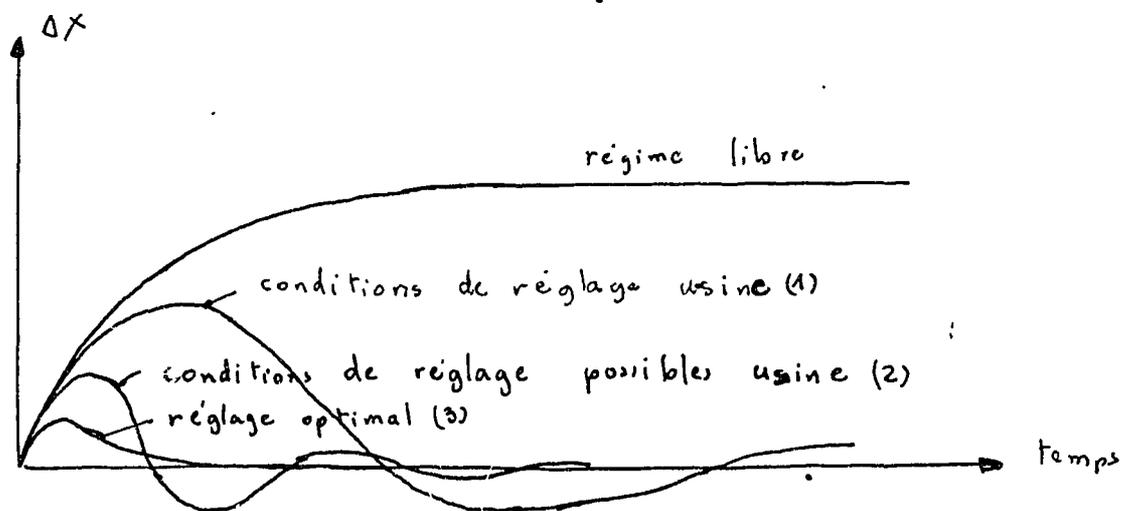
Nous avons ensuite étudié le système, pour une perturbation de concentration d'alimentation de 3 g/l, avec régulation de débit aqueux d'alimentation et régulation de débit de solvant complémentaire, pour diverses conditions de réglage définies précédemment.

Nous caractérisons les évolutions des concentrations dans les étages 9 et 12 par le temps mis pour que l'écart soit inférieur à la valeur 1 % de l'écart maximum en régime libre, le nombre d'extrémum dans cet intervalle de temps, et la grandeur de l'écart transitoire maximum (1er extrémum).

.../...

Pour les autres étages nous indiquons l'écart en régime libre et l'écart final en boucle fermée.

Ces résultats sont donnés dans les tableaux suivants :



.../...

VARIATION DE CONCENTRATION D'ALIMENTATION : 3 g/l

Régulation Phase aqueuse	Etage	$K_g = 0,1 \text{ l/h/g/l}$ $T_i = 10'$	$K_g = 1 \text{ l/h/g/l}$ $T_i = 10'$	$K_g = 10 \text{ l/g/h/l}$ $T_i = 100'$
Régulation solvant complémentaire		$K_{12} = 0,2 \text{ l/h/g/l}$ $T_i = 10'$ (1) réglage usine	$K_{12} = 2 \text{ l/h/g/l}$ $T_i = 10'$ (2) réglage possible usine	$K_{12} = 20 \text{ l/h/g/l}$ $T_i = 100'$ (3) réglage optimal
Ecart maxi en régime libre g/l	9	10,5 g/l	10,5 g/l	10,5 g/l
	12	1,8 g/l	1,8 g/l	1,8 g/l
Temps pour écart < 1 % écart maxi en régime libre heures	9	18 h	9 h	4 h
	12	18 h	8 h	1 h 30'
Nombre d'extrémums (oscillations par rapport à la va- leur d'équilibre)	9	3	5	1
	12	2	4	1
Ecart transitoire maximum	9	5,5 g/l	2,4 g/l	1,1 g/l
	12	0,65 g/l	0,15 g/l	0,02 g/l

.../...

VARIATION DE + 3 g/l EN PHASE AQUEUSES D'ALIMENTATION

Etages	6	8	9	10	12	13	15	19
Ecart en régime libre	+ 2,5.10 <sup>-3</sup>	+ 1,7	+ 10,5	+ 4,5.10 <sup>-3</sup>	+ 1,8	+ 6,3	+ 3,8	2
Ecart final en boucle fermée	- 0,5.10 <sup>-3</sup>	- 0,1	0	0	0	0	0	0

Les régulations comportant un terme intégral, l'écart final est nul pour ce type de perturbation. A l'équilibre, la variation de débit d'alimentation est de - 10,8 l/h et la variation de débit solvant complémentaire est nulle.

(Elle n'est pas nulle en régime transitoire).

L'amortissement plus élevé à l'étage 12 qu'à l'étage 9 est dû à l'action de la régulation de débit aqueux d'alimentation qui amortit les perturbations à l'étage 12, pour une variation de concentration d'entrée.

Pour le premier réglage, correspondant à peu près aux conditions de fonctionnement usine (avec une action intégrale deux fois plus faible, cependant), nous observons que les temps de mise en équilibre sont grands et que les écarts en régime transitoire sont importants.

.../...

Pour le second réglage, correspondant à des actions intégrale et proportionnelle dix fois plus élevées que précédemment, le système répond plus rapidement, mais il est plus proche des conditions d'instabilité, et il y a de nombreuses oscillations.

Dans le troisième cas, correspondant aux conditions de réglage optimum, les actions intégrale et proportionnelle sont respectivement dix fois et cent fois plus élevées que dans le premier cas, mais ce réglage correspond à une avance de phase importante par rapport au second cas, et le système, très stable, évolue vers la valeur d'équilibre sans oscillation et avec un écart transitoire maximum très réduit.

Ce réglage théorique optimum ne peut malheureusement pas être réalisé avec les chaînes de régulation actuelles disponibles sur le marché, ainsi que nous l'avons déjà dit.

Pratiquement, en usine, il serait intéressant d'utiliser un réglage intermédiaire entre le premier et le second cas, en gardant  $T_i = 10'$ .

Notons que les oscillations des débits réglés sont plus accentuées que les oscillations des concentrations, et que, conformément à la théorie, les débits évoluent avec un retard d'environ une heure par rapport aux concentrations.

D'autre part, dans le cas d'une perturbation rampe, les régimes transitoires seraient beaucoup moins accentués, conformément à ce que l'on observe en usine, où les variations des paramètres d'entrée sont rarement brutales.

.../...

CAS DES PERTURBATIONS DE TITRE EN T B P DU SOLVANT, DE DEBIT DE LAVAGE,  
ET D'ACIDITE LIBRE EN PHASE AQUEUSE

1°) Variation du titre en T B P du solvant de - 1 %

Pour une variation de - 1 % du titre en T B P du solvant, nous observons des évolutions du même type que pour une variation de concentration d'entrée, et les remarques faites pour les différents réglages restent valables.

A l'équilibre, la régulation de phase aqueuse opère une variation de - 18 l/h (33 %), et celle de solvant complémentaire une variation de + 5,4 l/h (4 %).

Les concentrations en phase aqueuse dans les extractions principales et secondaires, ainsi que la concentration à l'étage 13, reviennent à leur valeur nominale, à l'équilibre.

On observe une baisse de concentration dans les autres étages de lavage.

2°) Variation du débit de lavage de + 20 %

En ce qui concerne l'extraction principale, à l'équilibre, on observe le même écart de concentration qu'en régime libre, mais en un temps plus court ; La variation de débit aqueux d'alimentation est nulle à l'équilibre.

En ce qui concerne l'extraction secondaire les concentrations reviennent aux valeurs nominales à l'équilibre, et on observe que les conditions de réglage (2) et (3) sont nettement meilleures que les conditions de réglage (1).

.../...

La variation de débit de solvant complémentaire opérée par la régulation est de 21,5 l/h soit 16 %.

Par contre, les variations de concentrations dans les étages de lavage sont amplifiées par rapport au régime libre. Par exemple, les variations sont de :

- 2,3 g/l contre - 1 g/l à l'étage 13, de
- 2,5 g/l contre + 2,2 g/l à l'étage 15, de
- 2 g/l contre 0 à l'étage 19.

3°) Variation de - 0,3 N en phase aqueuse d'alimentation et de lavage

La propagation de la perturbation d'acidité libre est très lente, et elle se traduit par des régimes transitoires longs et des variations de concentrations importantes.

A l'équilibre les concentrations en phase aqueuse à l'étage 9 et à l'étage 12 sont égales aux concentrations nominales. Les variations de concentration dans les autres étages sont divisées d'un facteur 2 à 4 par rapport au régime libre.

La variation de débit aqueux d'alimentation est de - 4 l/h, soit 7 %, et la variation de débit de solvant complémentaire est de + 12,5 l/h, soit 9,5 %.

CONCLUSION

Les régulations des débits de phase aqueuse d'alimentation et de solvant complémentaire stabilisent bien le système pour les perturbations de concentration d'alimentation, de titre en T B P et de débit de phase aqueuse de lavage.

.../...

En ce qui concerne les variations d'acidité libre, les temps de propagation se traduisent par des durées de régime transitoire élevées, et la compensation est partielle.

Les conditions de réglage optimum prédéterminés par le calcul ont été confirmées lors de la simulation pour tous les types de perturbation, et on a intérêt à utiliser les régulateurs actuels aux limites de leurs possibilités, c'est-à-dire avec leur temps d'intégration maximum ( $T_{i_{max}} = 10$  mn pour les régulateurs Foxboro), possible, compatible avec la stabilité.

D'une manière générale, il est difficile de comparer les résultats obtenus par simulation sur calculateur analogique et les résultats obtenus par les essais en usine.

En effet, en usine, il est délicat d'établir un équilibre stable et de faire varier un paramètre à la fois. Il s'ensuit que les régimes transitoires sont toujours la somme de plusieurs actions superposées, et l'analyse des résultats est faussée.

Cependant, les grandeurs des temps de réponse et des variations observées sont tout à fait comparables, ce qui semble valider le modèle choisi pour la simulation sur calculateur.

.../...

A N N E X E

On appelle transformée de Laplace d'une fonction  $f(+)$  l'expression

$$L f(+)=F(p)=\int_0^{\infty} f(+)\ e^{-p+} dt$$

Si un système linéaire est excité par une fonction  $x(+)$ , et si  $y(+)$  est la réponse, nous appelons fonction de transfert de ce système l'expression :

$$H(p)=\frac{Y(p)}{X(p)}$$

Cette fonction de transfert découle directement de l'équation différentielle qui régit le système, et en est une expression équivalente.

Ainsi, pour un système du premier ordre, régit par une équation de la forme :

$$y(+)+\tau \dot{y}(+)=x(+)$$

Avec  $L f'(+)=p F(p)$ , nous avons immédiatement

$$H(p)=\frac{1}{1+\tau p} \quad (\tau \text{ est la constante de temps})$$

L'intérêt essentiel de cette représentation réside dans l'associabilité des fonctions de transfert.

.../...

En effet, la fonction de transfert globale de plusieurs systèmes linéaires mis en série est égale au produit de leurs fonctions de transfert respectives, et on peut ainsi étudier rapidement les régimes transitoires de tels systèmes, par transformation inverse du produit des fonctions de transfert par la transformée de Laplace du signal d'entrée.

D'autre part, si un système linéaire est excité par une fonction sinusoïdale du temps, on appelle transmittance, ou fonction de transfert isochrone, le rapport des vecteurs de Fresnel du signal de sortie et du signal d'entrée.

On montre que la transmittance a la même forme que la fonction de transfert, et il suffit de remplacer " $p$ " par " $j\omega$ " dans cette dernière.

On appelle diagramme de Bode la représentation fréquentielle de la transmittance en coordonnées logarithmiques.

Pour une excitation sinusoïdale d'entrée, la courbe de gain représente l'amplitude du signal de sortie en fonction de la pulsation et la courbe de phase, le déphasage entre le signal de sortie et le signal d'entrée.

L'étude de systèmes asservis à l'aide du diagramme de Bode, ou tout autre diagramme équivalent, permet de définir des gains optimaux et des réseaux correcteurs, afin d'obtenir une bonne stabilité et une bonne précision en boucle fermée.

D I F F U S I O N

SACLAY : D.E.G./S.E.R.

MM. WEILL ..... 1 ex.  
CAILLET ..... "  
UBERSCHLAG ..... "  
DEGRYSE ..... "

C.E.N./F.A.R. : S.C.U.T.C.I.

MM. AMAURY ..... 1 ex.  
DIAZ ..... "  
GRIENEISEN ..... "

D . C .

FAUGERAS ..... "  
TALMONT ..... "  
MICHEL ..... "  
PEREZ ..... "

CENTRE DE LA HAGUE : S . P .

MM. CHAMBON ..... 1 ex.  
MIMAUD ..... "

S . G . N .

M. BERNARD ..... 1 ex.

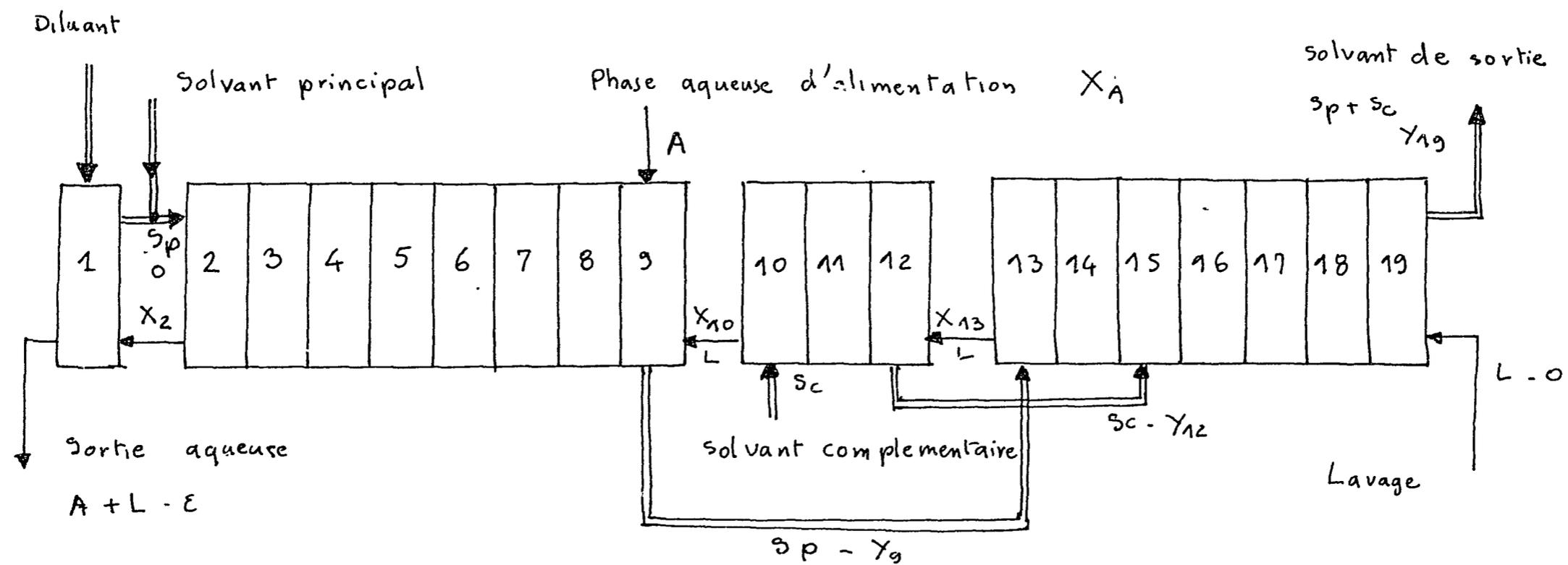


Schéma de l'extraction I