
CHAPITRE 4
VALIDATION, EXPÉRIMENTATION ET ANALYSE DES
RÉSULTATS

[MCours.com](https://www.MCours.com)

4 Validation, expérimentation et analyse des résultats

4.1 Limitation de la validité

Comme nous avons vu à la section 1.4, le processus de modélisation incorpore une étape de validation qui précède l'expérimentation à partir de scénarios. Cette étape permet de s'assurer que le modèle est une représentation raisonnable du système actuel [Law et Kelton, 2000]. Règle générale, le modèle ne peut représenter exactement la réalité, en raison d'actions posées par le spécialiste en modélisation. Ces actions peuvent être imputables à des hypothèses qui ont été émises, à des simplifications, des oublis, voire même à certaines limitations [Chung, 2004]. Sans entrer dans le détail de toutes les causes qui limitent la validité de notre modèle, nous allons en énumérer quelques-unes.

4.1.1 Hypothèses de modélisation

Des hypothèses de modélisation sont souvent posées, parce que le spécialiste manque de connaissance par rapport au fonctionnement du système. Ceci est d'autant plus vrai, lorsque le système est inexistant ou ne peut pas être observé [Pidd, 1998]. De plus, il n'est pas rare que le spécialiste soit confronté à un manque de données qui décrivent le système. Dans ce cas, plutôt que d'attendre que celles-ci soient disponibles, le spécialiste décide de poursuivre la conception du modèle et de poser une hypothèse [Chung, 2004].

Par exemple, dans le cas de notre modèle, il n'était pas possible de répéter plusieurs fois l'expérience d'échantillonnage qui a été décrite à la section 3.3.3.2. Nous avons donc décidé de poser une hypothèse, en ce qui concerne l'assignation des valeurs de certaines variables aléatoires du modèle (voir la section 3.3.3.1). Nous avons assumé que les distributions de probabilités de deux variables (« temps de service » et « temps de transit ») pouvaient être remplacées par leur moyenne échantillonnale (voir la discussion de la section 3.3.3.6).

4.1.2 Simplifications du modèle

Le spécialiste doit parfois simplifier le modèle d'un système, pour entre autre, respecter l'échéancier du projet [Banks et al, 1998]. Également, il peut arriver que certains détails du fonctionnement interne du système soient jugés trop complexes ou non significatifs. Une simplification commune consiste à modéliser plusieurs sous-procédés du système en un seul. Par exemple si un système est basé sur plusieurs variables aléatoires, nous pourrions le simplifier, en collectant les données qu'une seule fois. Ainsi, nous modéliserions qu'une variable au lieu de plusieurs. Le spécialiste peut aussi simplifier le modèle s'il décide délibérément qu'une partie du système n'a pas besoin d'être modélisée. Ceci est notamment envisagé lorsque la partie en question a peu ou pas d'impact sur le reste du modèle [Chung, 2004].

Dans le cadre de notre modèle, nous nous sommes livrés à certaines simplifications. Par exemple, celui-ci ne comporte pas la ressource correspondant à la tour à pâte, puisqu'elle a été modélisée en conjonction avec le vibrocompacteur et la presse (voir la section 3.3.1). Également, nous n'avons pas représenté la progression détaillée des anodes au sein des fours via les trains. Nous nous sommes bornés à représenter les fours comme de simples ressources du système.

4.1.3 Omissions au sein du modèle

Dès que le spécialiste est confronté à un système complexe, il est fort probable qu'il oublie d'intégrer certains éléments au modèle. Dans une telle situation, l'impact sur les mesures de performances [Law et Kelton, 2000] risque d'être significatif et il sera impossible de valider le modèle. Il n'existe aucune solution définitive à ce problème. Une liste des leçons apprises durant chaque projet peut être souhaitable [Chung, 2004]. Pour notre part, nous avons maintenu tout au long du projet, une liste des tâches à effectuer. Celle-ci nous garantissait à tout le moins, que nous n'omettrions aucune de ces tâches et pouvait à la rigueur, nous aider à en identifier d'autres.

4.1.4 Limitations durant la modélisation

Il arrive qu'il soit très difficile de modéliser un système en raison de certaines limitations. L'impact de chacune d'entre elles peut varier de façon significative sur la validité du modèle [Chung, 2004]. On peut penser aux limitations inhérentes au spécialiste, occasionnées entre autre, par un manque de formation. D'autres limitations peuvent aussi apparaître si un VIMS (voir la section 1.8) est utilisé et qu'il ne dispose pas de toutes les fonctionnalités voulues [Pidd, 1998].

Comme nous n'avons pas recouru à des VIMS, nous n'avons pas eu à faire face à ce type de problème. D'ailleurs, comme nous l'avons vu à la section 1.8.4, les modèles conçus à partir de VIMS sont beaucoup moins flexibles que ceux conçus à partir d'une librairie de simulation ou d'un langage de troisième génération, tel Java [Law et Kelton, 2000]. Toutefois, le temps de conception risque d'être accru si cette dernière solution est empruntée.

Finalement, il est possible qu'on ne puisse pas valider adéquatement le système en raison d'un problème durant la collecte des données [Chung, 2004]. Par exemple, il se peut qu'on ait besoin de plusieurs mois pour collecter suffisamment de données, pour effectuer une analyse statistique robuste. Dans ce cas, le spécialiste n'a d'autre choix que de poursuivre l'étude sans ces données. Lorsqu'il est confronté à un manque de données pour décrire une partie d'un système, le spécialiste est souvent amené à regrouper plusieurs sous-processus. Cette limitation est similaire à une simplification du modèle et entraîne les mêmes désavantages.

4.2 Validation en surface

La validation en surface (traduction de l'Anglais « face validity ») est faite en compagnie de l'expert du système modélisé. On considère que le modèle est valide en surface si les résultats de la simulation semblent corroborer avec le comportement du système [Law et Kelton, 2000]. La validation en surface est fondamentale, puisqu'elle permet de faire la promotion du modèle auprès de l'expert, de répondre aux interrogations du spécialiste et de réduire les demandes d'ajustements du modèle [Chung, 2004].

Trop souvent, la validation en surface survient à la fin de la conception du modèle, afin de faire des mises aux points avant la validation statistique [Law et Kelton, 2000] [Pidd, 1998]. Cependant, elle doit être plutôt considérée comme un processus continu. Ainsi, entre la première rencontre avec l'expert et le rapport final, le spécialiste doit planifier des rencontres additionnelles, pour discuter de la validité en surface du modèle.

Afin de mener à bien le processus de validation en surface, le spécialiste s'assure que le modèle ait une certaine ressemblance visuelle avec le système. Ceci ne signifie pas que l'interface et les animations du modèle doivent être la réplication exacte du système actuel. De toute manière, les représentations à l'échelle fournissent rarement assez de détails visuels pour que l'expert puisse appréhender correctement le système [Chung, 2004].

Pour notre part, nous avons choisi d'utiliser un graphe dirigé [Cormen et al., 1994] pour représenter les étapes de *formation, manutention et entreposage des anodes* [Totten et Mackenzie, 2003]. Chaque nœud du graphe symbolise l'une des principales ressources du système. Un nœud affiche l'identificateur unique et le nom de la ressource, ainsi que deux mesures de performances qui changent progressivement, soit le nombre d'entités entrées et sorties de la ressource. Puisque les experts du domaine veulent souvent savoir comment le modèle traite les événements insolites [Chung, 2004], les ressources changent de couleur au gré d'états particuliers :

- Rouge : la ressource est non-opérationnelle en raison d'un arrêt *planifié* ou *non-planifié*.
- Orange : les grues ont cette couleur si leur temps de service est supérieur au temps attendu. Les autres ressources sont ainsi colorées, lorsque leur temps d'inactivité (temps en attente) dépasse le temps de transit maximal des files en aval. Ceci permet d'identifier les blocages au niveau des files en aval.
- Vert : la ressource est en traitement. Lorsqu'une ressource, à l'exception d'une grue, a cet état, alors nous avons $[\text{Nombre d'entités entrées}] = [\text{Nombre d'entités sorties}] + 1$.
- Vert foncé : la ressource est inactive (en attente). Lorsqu'une ressource, à l'exception d'une grue, a cet état, alors nous avons $[\text{Nombre d'entités entrées}] = [\text{Nombre d'entités sorties}]$.

- Blanc : la ressource est dans un état indéfini. Il s'agit d'une situation anormale qui doit être vérifiée par le spécialiste.

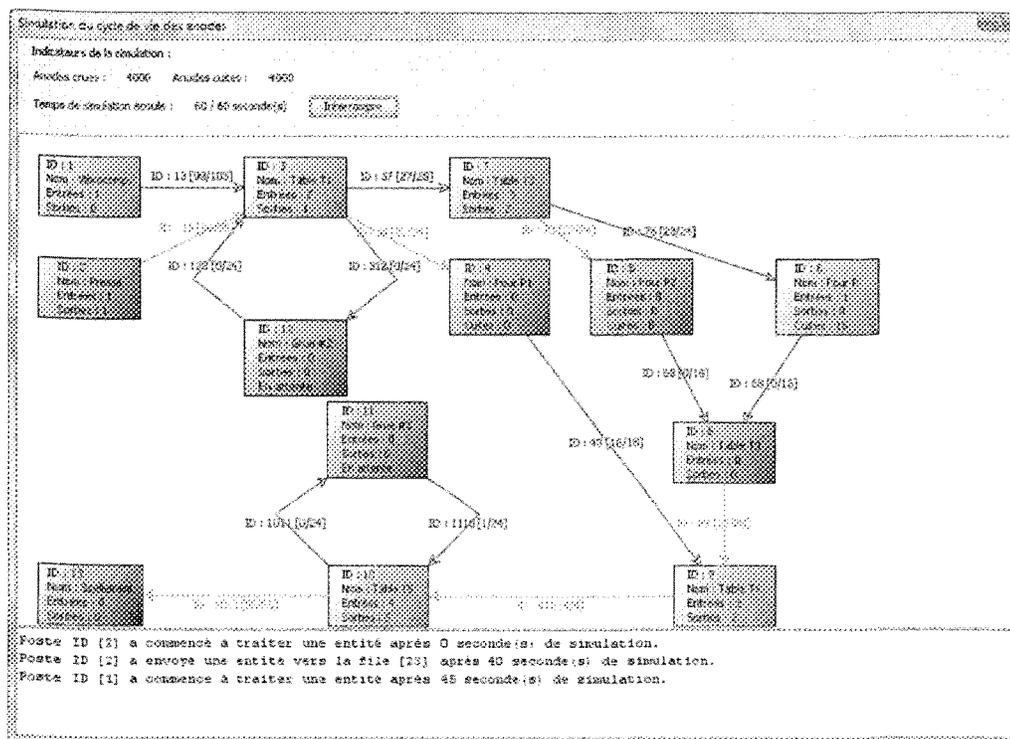


Figure 29 : représentation des étapes de *formation, manutention et entreposage des anodes*

Quant aux files, c'est-à-dire les convoyeurs du système, elles sont symbolisées par les arêtes du graphe. Chacune d'elles affichent un identificateur unique, le nombre d'entités en transit et leur capacité. Les files changent également de couleur en fonction d'états particuliers :

- Rouge foncé : la file est non-opérationnelle, en raison d'un événement *planifié* ou *non-planifié*. Ainsi, on ne peut pas ajouter ou enlever d'entité à la file. Néanmoins, celles qui sont déjà en cours de transit continuent à avancer.
- Rouge : le transit des entités dans la file est interrompu, à cause d'un événement *planifié* ou *non-planifié*. Toutefois, on peut encore ajouter ou enlever une entité à la file.

- Orange : l'entité à la tête de la file est disponible, depuis plus de temps qu'il n'en faut pour faire transiter toutes les entités de la file, lorsqu'elle est à sa pleine capacité. Cette règle empirique nous permet d'identifier les blocages au niveau de la ressource en aval.
- Vert : l'entité à la tête de la file a terminé son transit et est donc disponible pour être traitée par la ressource aval.
- Vert foncé : l'entité à la tête de la file n'a pas terminé son transit ou bien la file est vide.

Notons également que l'interface comporte deux indicateurs qui affichent le nombre d'anodes crues et cuites qui sont actuellement dans l'entrepôt. Cette mesure de performance varie selon l'opération qu'est en train d'effectuer la grue gerbeuse.

4.3 Validation statistique

Afin de valider le modèle nous avons simulé le cas de référence. Celui-ci correspond à un scénario de production standard, d'une durée de sept jours, du lundi 00:00:00 au dimanche 23:59:59. Les données du cas de référence nous ont été fournies par les spécialistes du système. Ainsi, nous avons pu les comparer avec les résultats générés par la simulation de ce cas. Le comparatif a été effectué pour certaines ressources du système. Bien entendu, il est possible de s'intéresser à de nombreuses mesures de performances des ressources. Toutefois, les données fournies par les spécialistes nous permettaient d'établir une corrélation avec seulement un certain nombre de mesures, pour des raisons techniques et de confidentialité. Nous avons donc uniquement effectué notre validation à partir du nombre d'anodes traitées par le *vibrocompacteur*, la *presse*, les *fours* (*P1*, *P2*, *R*) et le *scellement*. Le Tableau 3 montre les données du système durant une semaine de production (ligne [1]), ainsi que les résultats produits par le modèle (ligne [2]). La dernière ligne donne le pourcentage d'écart entre le modèle et le système selon l'équation suivante :

$$\% \text{écart} = \frac{| [\text{Système}] - [\text{Modèle}] |}{[\text{Système}]} \times 100$$

	Vibro-comp. / presse	Four P1 (cycles de 36 heures)	Four P2 (cycles de 36 heures)	Four R (cycles de 36 heures)	Four R (cycles de 32 heures)	Scellement
[1] Système	7400	2268	2268	2613	2690	6652
[2] Modèle	7310	2268	2214	2625	2930	6697
$\% = \frac{ [1] - [2] }{[1]} \times 100$	1,22%	0%	2,38%	0,46%	8,92%	0,68%

Tableau 3 : comparaison du système et du modèle pour le cas de référence

Notons que le pourcentage d'écart est toujours inférieur à 9%, ce qui est tout à fait acceptable dans les circonstances. En fait, outre le résultat obtenu avec un cycle de cuisson de 32 heures pour le *four R*, les données impliquent des pourcentages d'écart tout à fait négligeables.

4.3.1.1 Validation de l'entrepôt

Afin de valider les données générées par le modèle, nous avons également soumis l'évolution des anodes entreposées du lundi 00:00:00 au dimanche 23:59:59, aux opérateurs du *cycle de vie des anodes*. Le comparatif avec l'historique de production de l'usine, s'est avéré positif. Les figures ci-dessous montrent l'évolution de l'*entrepôt* selon le modèle. Notons, encore une fois, que pour des raisons de confidentialité, nous ne pouvons pas présenter l'évolution du système réel.

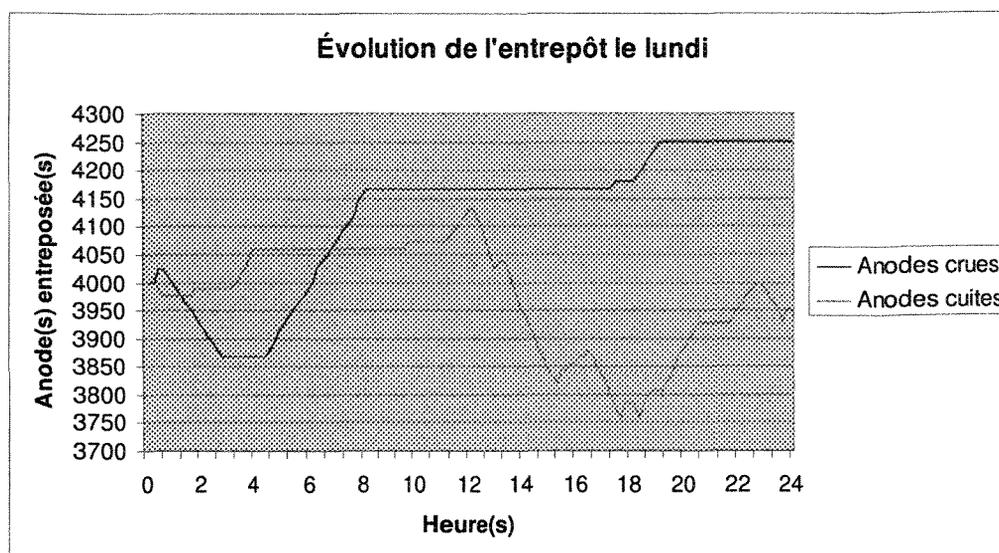


Figure 30 : évolution de l'*entrepôt* le lundi

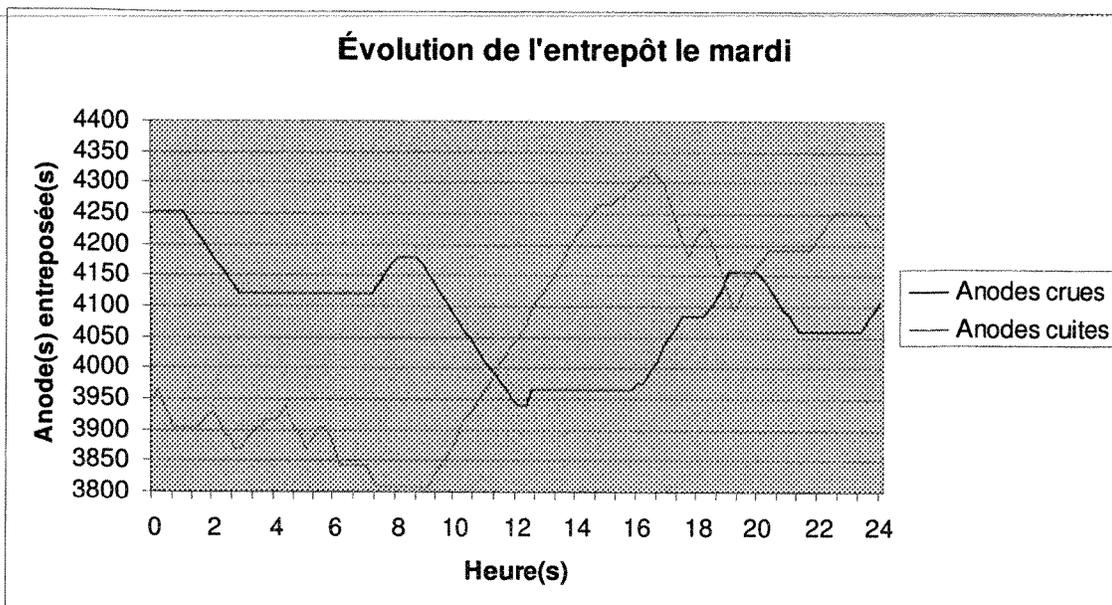


Figure 31 : évolution de l'entrepôt le mardi

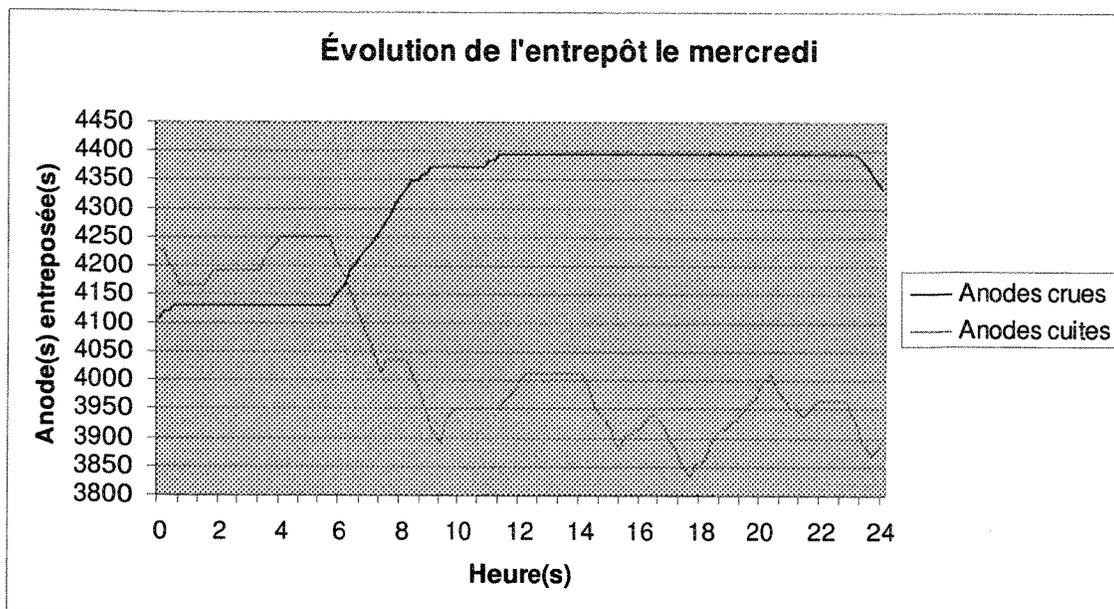


Figure 32 : évolution de l'entrepôt le mercredi

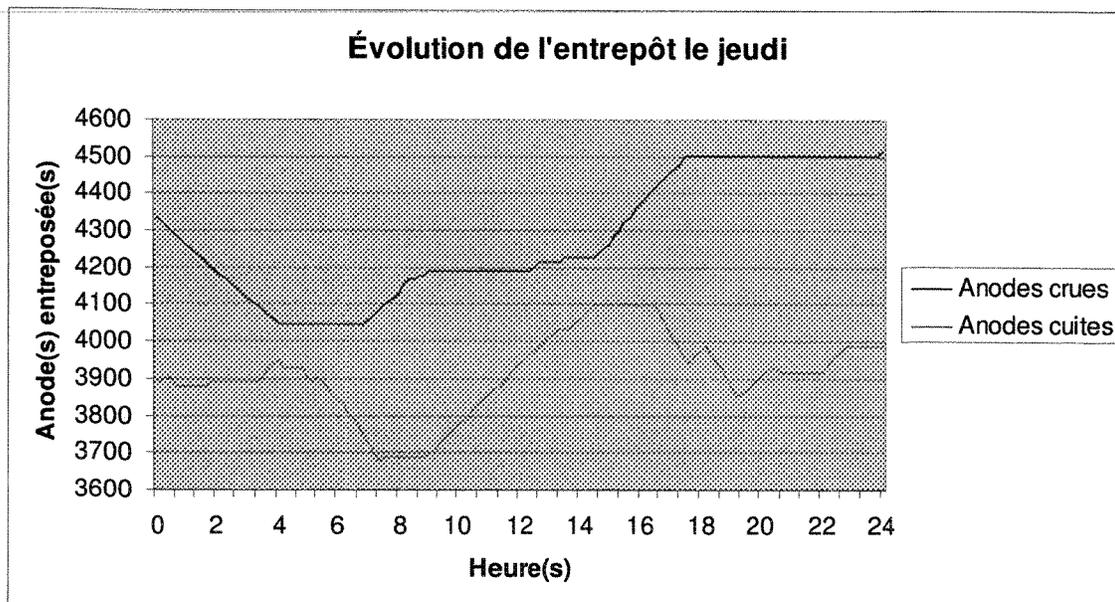


Figure 33 : évolution de l'entrepôt le jeudi

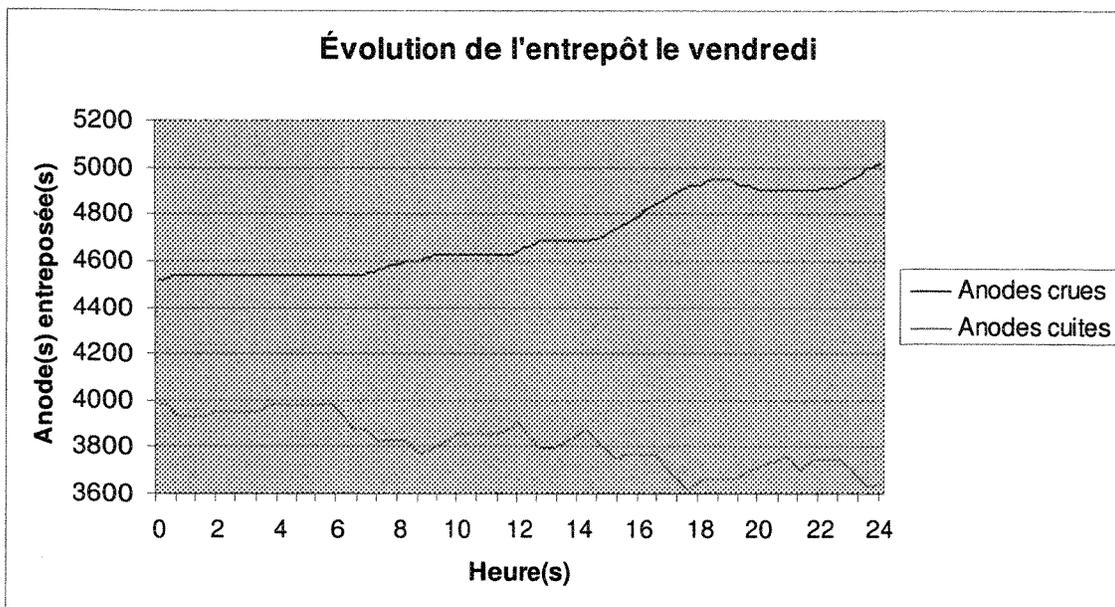


Figure 34 : évolution de l'entrepôt le vendredi

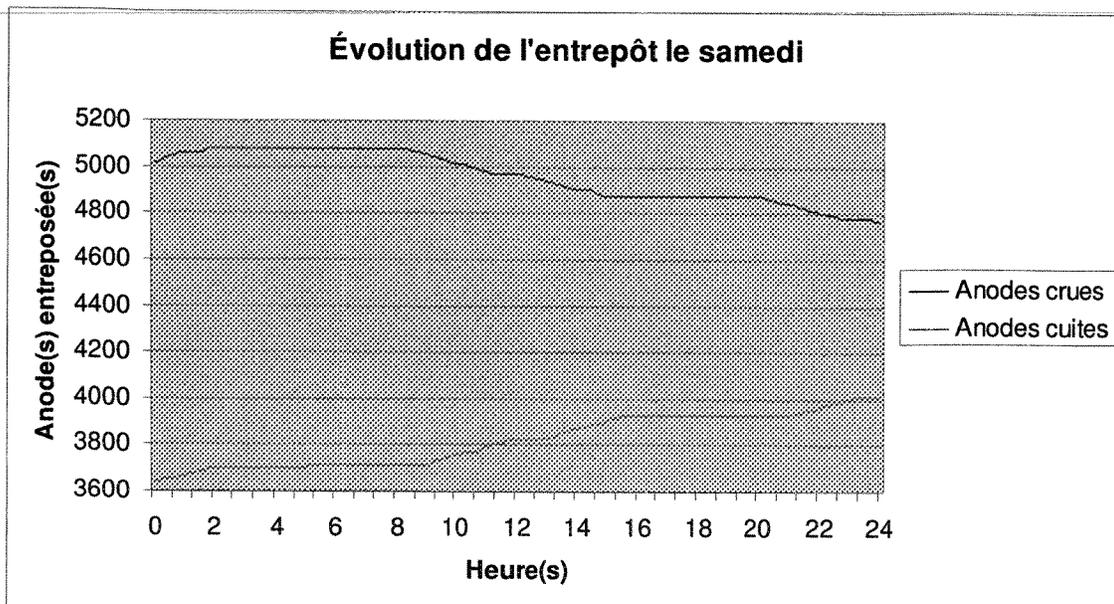


Figure 35 : évolution de l'entrepôt le samedi

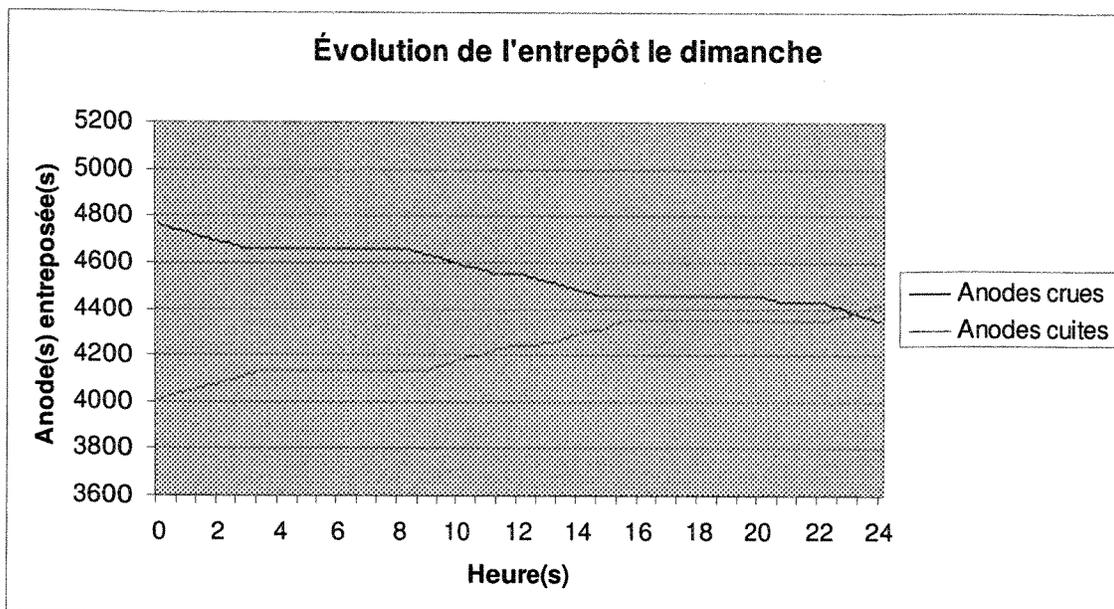


Figure 36 : évolution de l'entrepôt le dimanche

4.3.1.2 Validation des fours

Toujours pour des fins de validation, nous avons également soumis aux opérateurs le nombre d'anodes cuites par les *fours* P1, P2 et R, du lundi 00:00:00 au dimanche 23:59:59. Les résultats des figures suivantes montrent la production des *fours*.

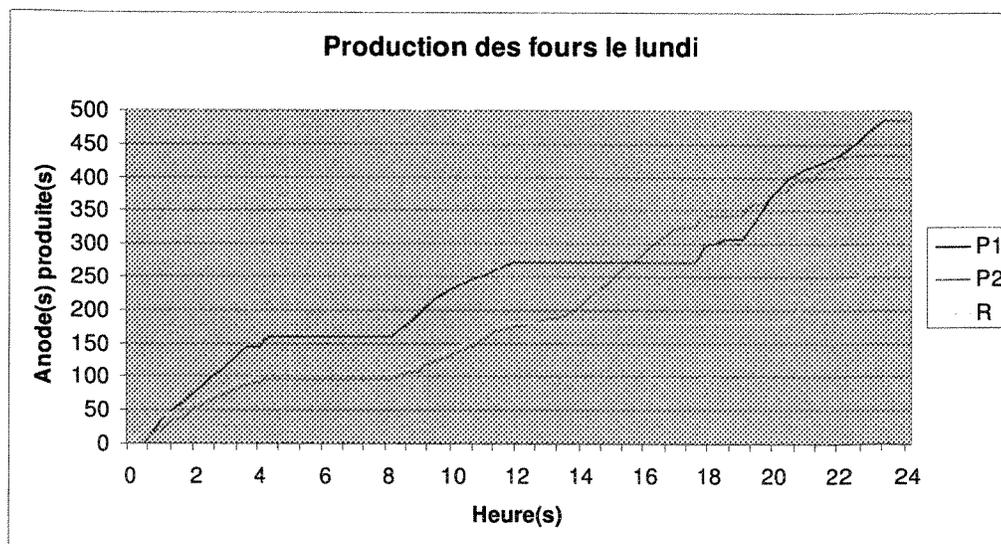


Figure 37 : production des *fours* le lundi

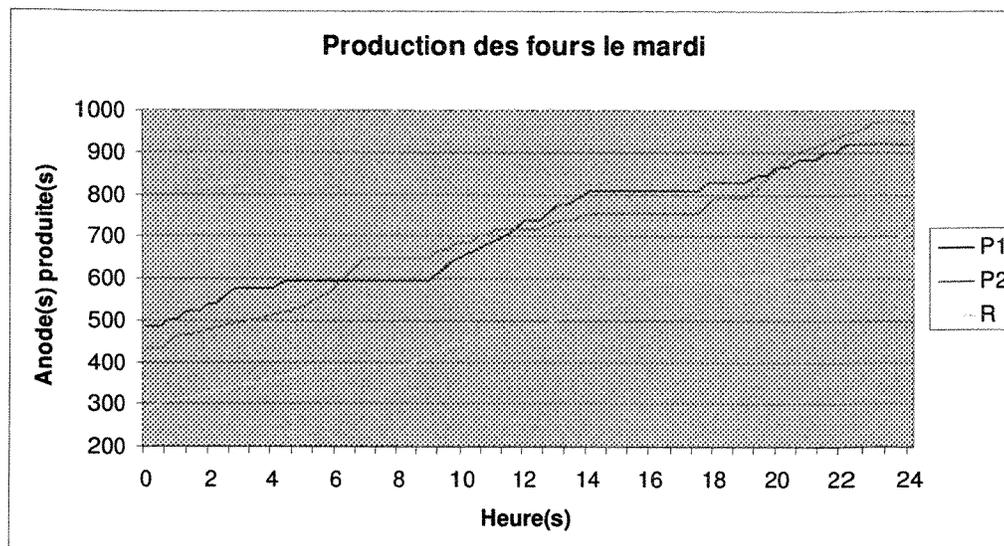
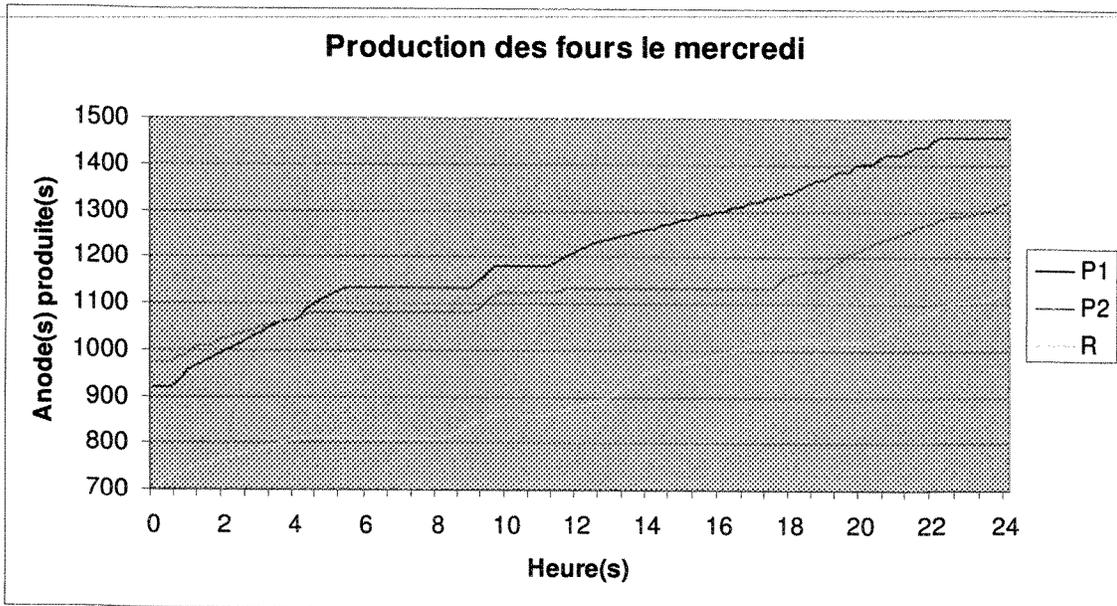
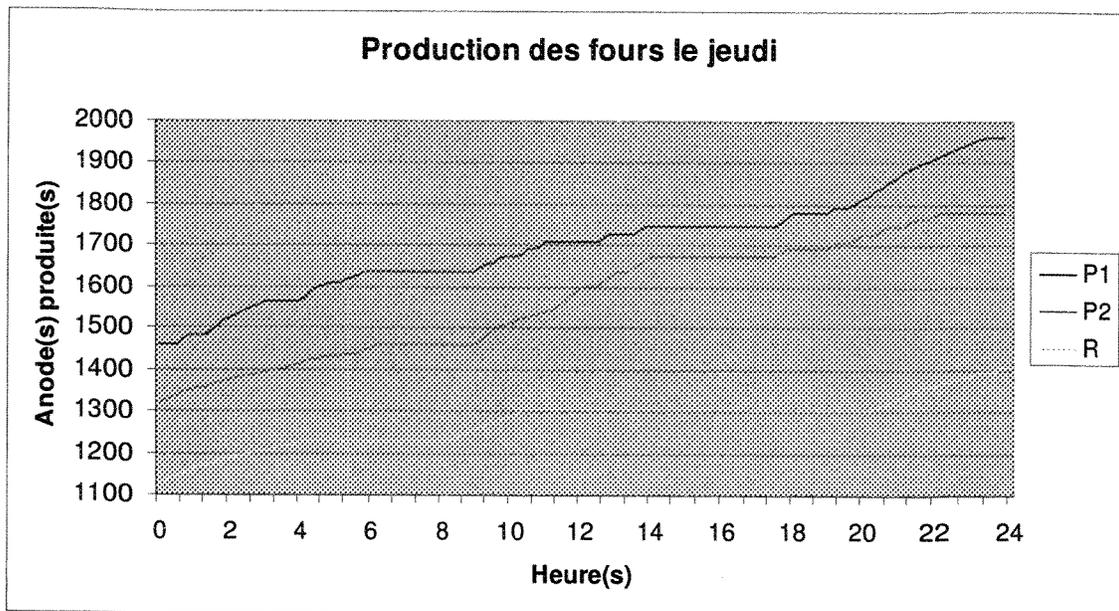
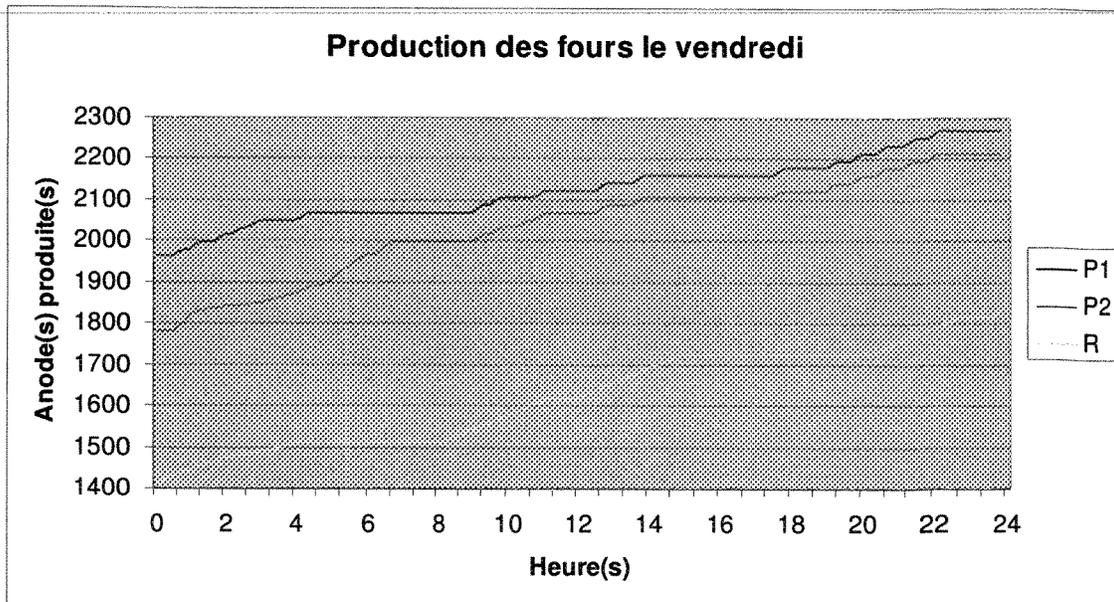
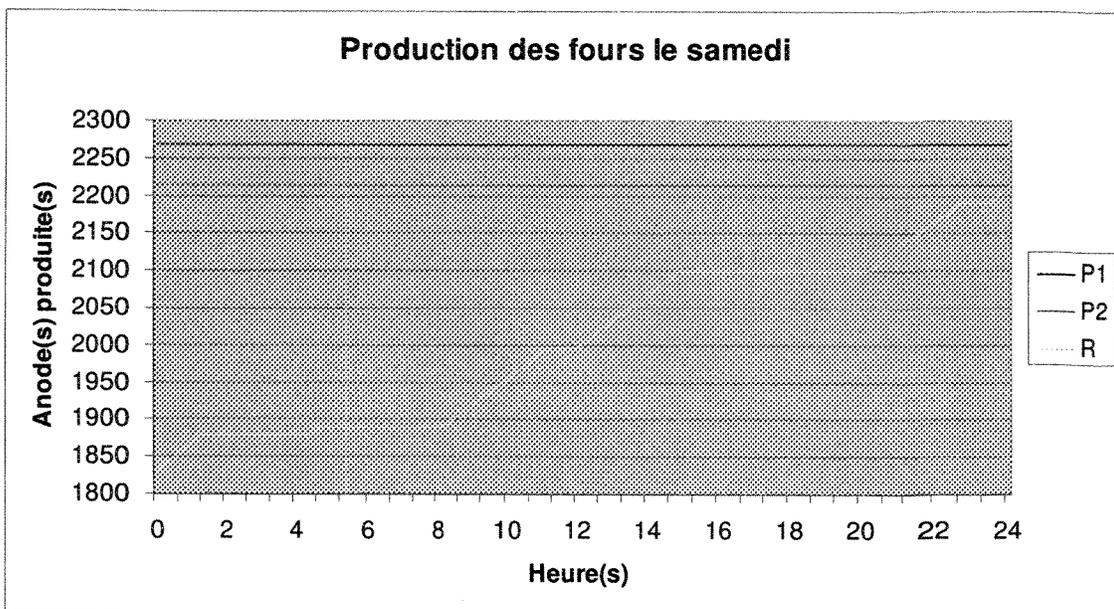
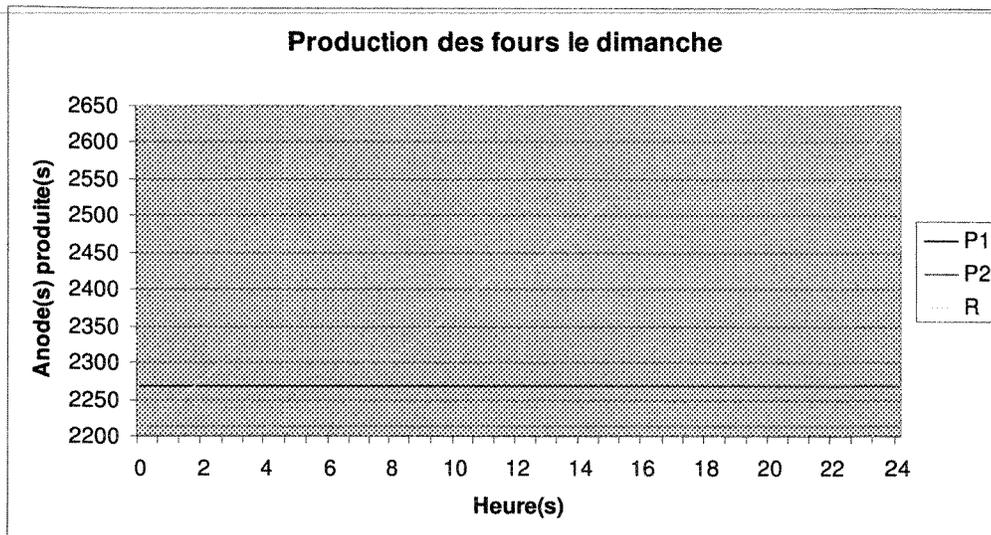


Figure 38 : production des *fours* le mardi

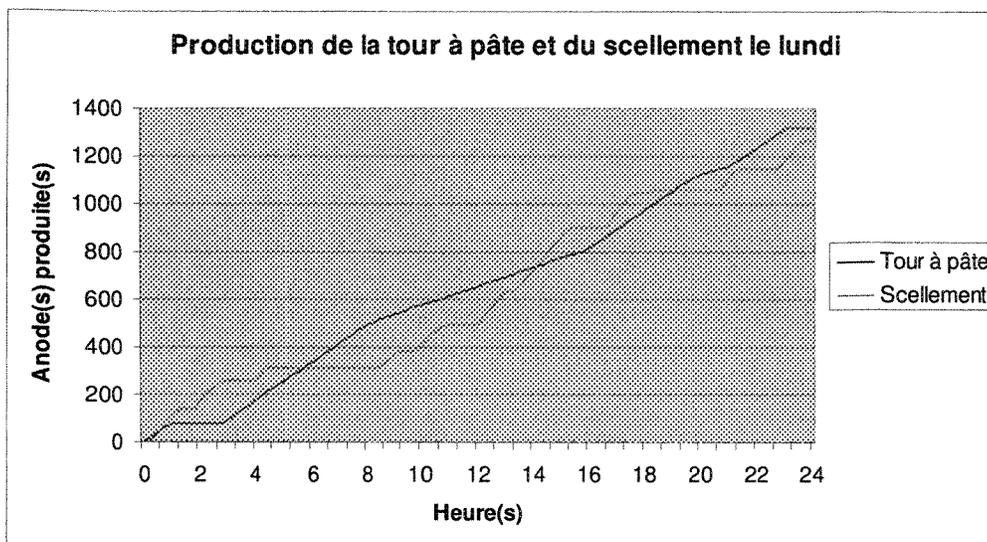
Figure 39 : production des *fours* le mercrediFigure 40 : production des *fours* le jeudi

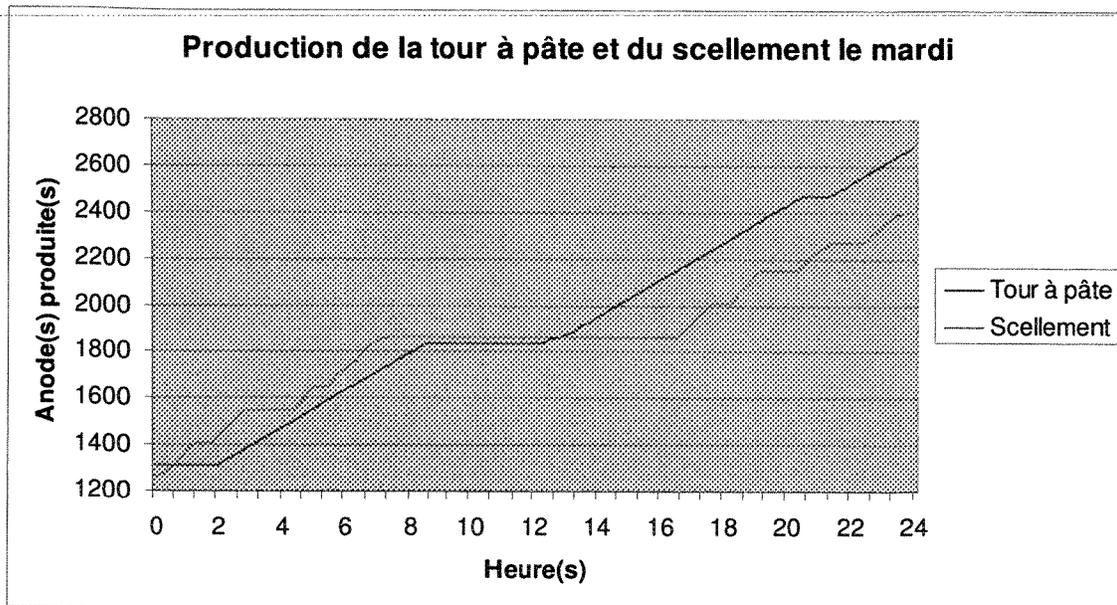
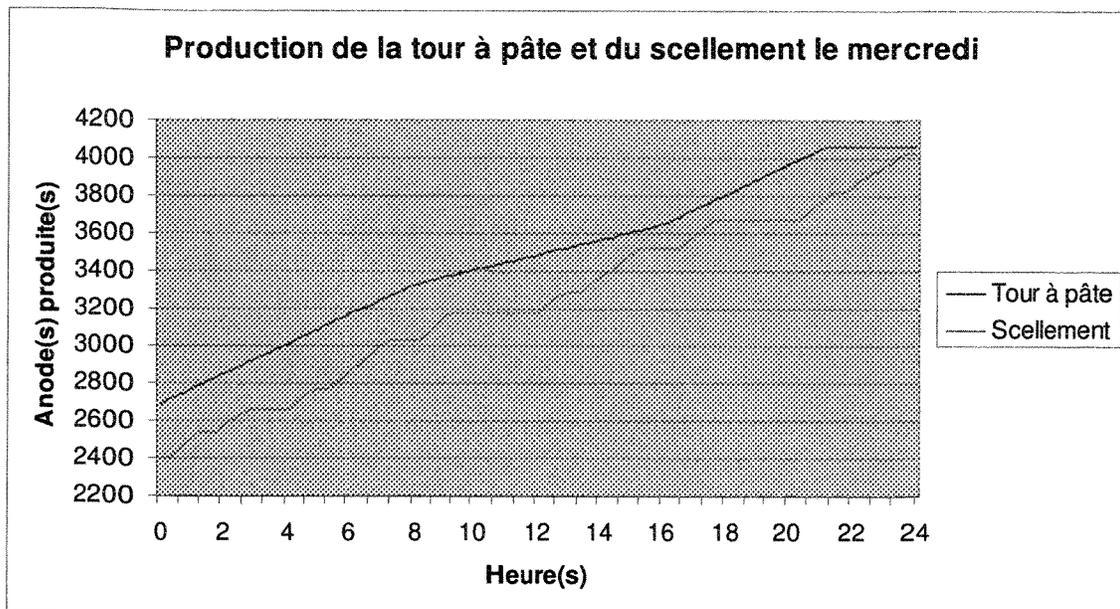
Figure 41 : production des *fours* le vendrediFigure 42 : production des *fours* le samedi

Figure 43 : production des *fours* le dimanche

4.3.1.3 Validation de la tour à pâte et du scellement

Finalement, nous avons aussi vérifié les statistiques de production pour le tour à pâte (c'est-à-dire le *vibrocompacteur/presse*) et le *scellement*, en comparant avec l'historique du système. Là encore, les opérateurs ont observé une corrélation entre le système et le modèle. Les figures ci-dessous illustrent le nombre d'anodes, durant une semaine de production.

Figure 44 : production de la *tour à pâte* et du *scellement* le lundi

Figure 45 : production de la *tour à pâte* et du *scellement* le mardiFigure 46 : production de la *tour à pâte* et du *scellement* le mercredi

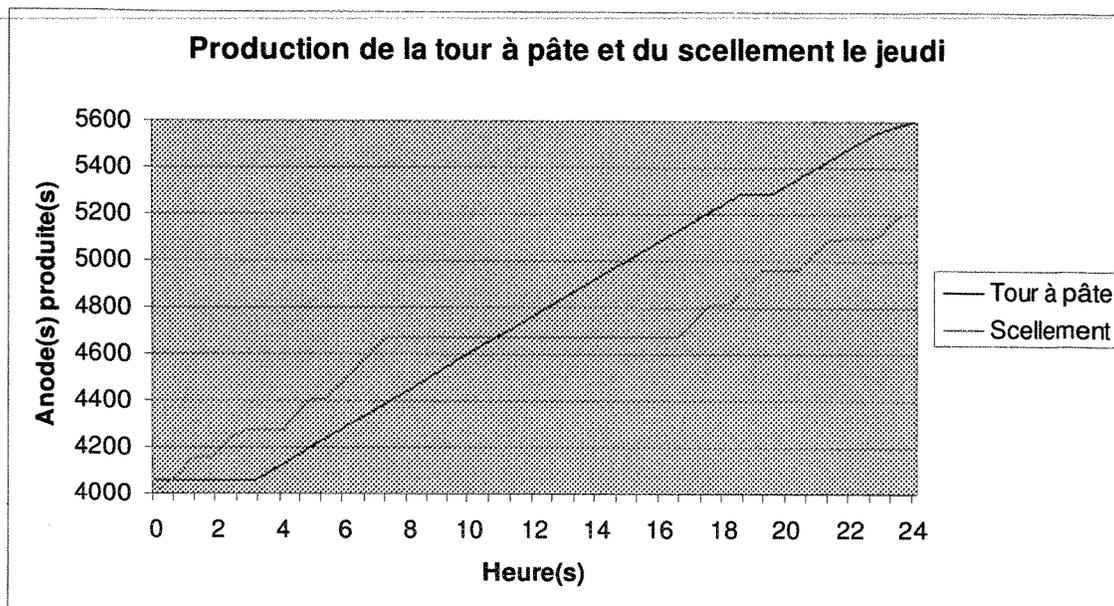


Figure 47 : production de la *tour à pâte* et du *scellement* le jeudi

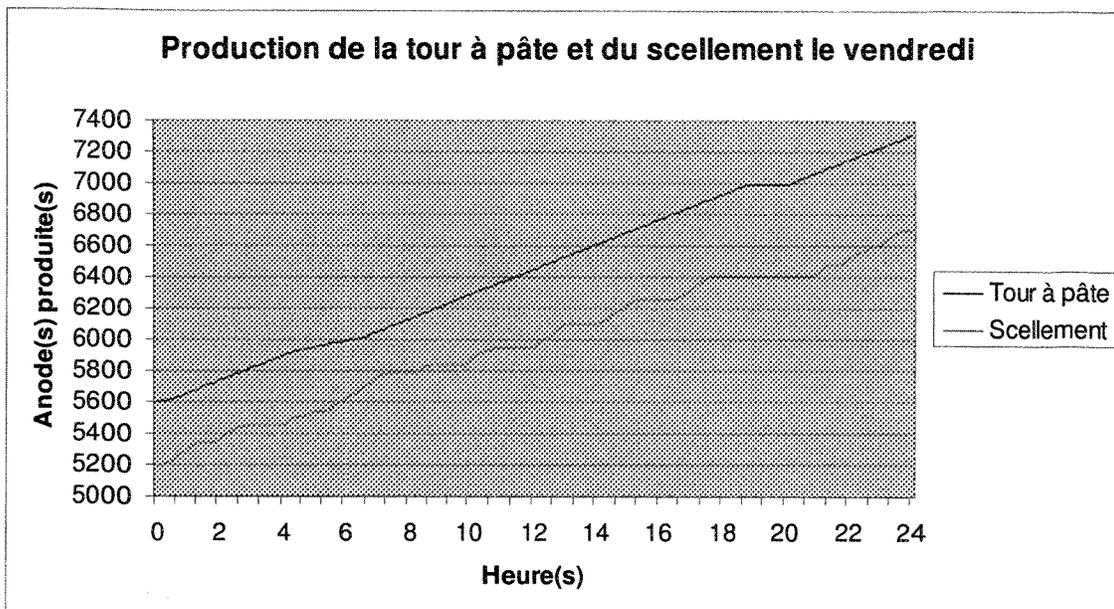


Figure 48 : production de la *tour à pâte* et du *scellement* le vendredi

Notons qu'à partir du samedi 00:00:00 jusqu'au dimanche 23:59:59, tel que stipulé à l'Annexe 1, la *tour à pâte* et l'atelier de *scellement* cessent de fonctionner. Le nombre d'anodes

produites par le *vibrocompacteur* et la *presse (tour à pâte)* est de 7310 à ce moment. Quant au nombre d'anodes scellées il est de 6696.

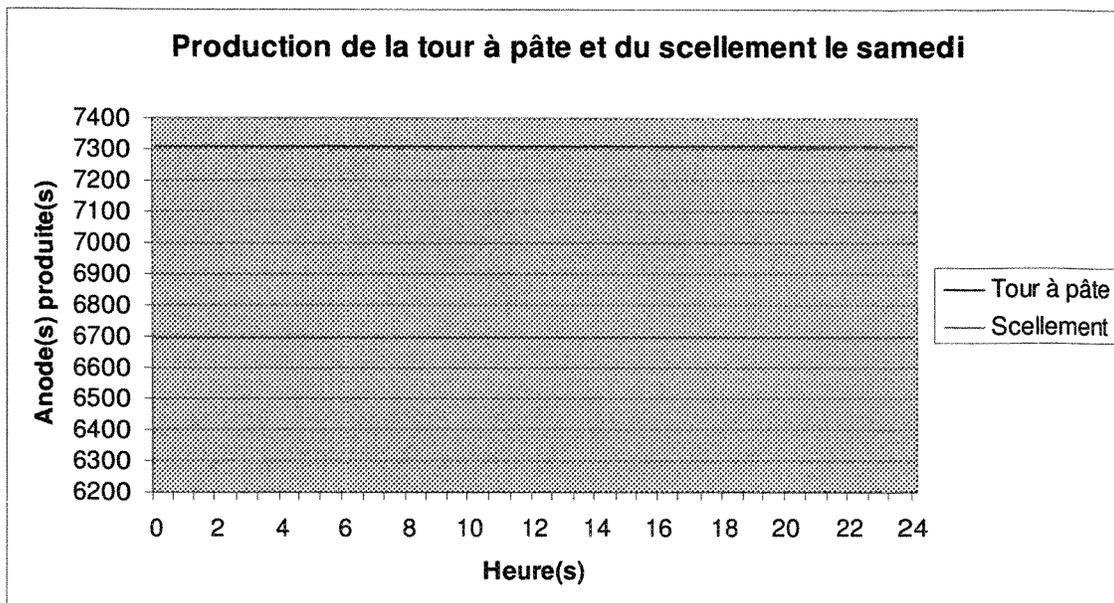


Figure 49 : production de la *tour à pâte* et du *scellement* le samedi

En somme, les comparaisons statistiques des résultats du modèle, avec les mesures du système, ainsi que la validation en surface réalisée en compagnie des spécialistes du procédé, nous permettent de conclure que le modèle représente suffisamment bien la réalité. Par conséquent, il devient possible de l'utiliser comme un outil d'aide à la décision.

4.4 Expérimentation du modèle

Une fois que le modèle du système actuel a été validé, le spécialiste doit concevoir des expériences qui serviront à simuler des scénarios de production alternatifs. Leur choix dépend des objectifs énoncés lors de la formulation du problème. En ce qui nous concerne, cette étape du processus de modélisation a été introduite à la section 3.2. Toutefois, avant de présenter les expériences que nous avons choisies pour la présente étude, nous allons effectuer un petit rappel terminologique et discuter des différents types d'expérimentation.

4.4.1 Facteur et niveau d'une expérience

Lorsque l'on conçoit une expérience, on appelle facteurs « les différentes variables qui sont supposées influencer les résultats produits par le système » NDLR traduit de l'Anglais [Chung, 2004]. Les facteurs peuvent être contrôlés par le spécialiste, de manière à faire varier leurs valeurs, à la fois pour le système actuel et pour le modèle. Par exemple, la vitesse de tables de transfert, la capacité de convoyeurs, ou encore l'horaire d'un poste, sont trois facteurs qui peuvent influer sur les résultats du système que nous modélisons.

De même, pour concevoir des scénarios expérimentaux, il faut pouvoir assigner différentes valeurs aux facteurs du système. Les valeurs qui permettent d'obtenir ces variations sont appelés niveaux [Pidd, 1998]. Par exemple, en augmentant la vitesse de transit d'un convoyeur, sa capacité ou en assignant un nouvel horaire à un poste, on obtient un niveau alternatif, pour chacun des facteurs de l'exemple précédent. En pratique, il existe différentes possibilités d'expérimentations [Law et Kelton, 2000]. La section suivante en présente quelques-unes.

4.4.2 Type d'expérimentation

Deux niveaux pour un facteur

Le type d'expérience le plus simple est celui avec deux niveaux d'alternative pour un même facteur. En temps normal, lorsque le système modélisé est existant, la représentation de la situation actuelle constitue le premier niveau d'alternative. Le second niveau est donc défini par le spécialiste [Chung, 2004]. C'est ce type d'expérience que nous avons choisi pour quatre scénarios d'expérimentation dits extrêmes. Chacun d'eux considère l'état de la ressource comme facteur d'expérimentation. Le premier niveau consiste à assigner l'état de la ressource selon le fonctionnement actuel du système. Quant au second niveau, il implique de désactiver la ressource pendant toute la simulation. Il s'agit d'une configuration hypothétique du système. Nous reviendrons sur ces quatre scénarios à la section 4.4.3. Bien entendu, il est aussi possible d'avoir plus de deux niveaux d'alternative pour un facteur. Toutefois, nous n'avons pas eu recours à ce type d'expérimentation.

Plusieurs niveaux et plusieurs facteurs

Une autre possibilité est de concevoir une expérience avec deux facteurs [Chung, 2004]. Ce type d'expérimentation, plus complexe, consiste à faire varier les deux facteurs à différents niveaux. Dans ce cas, lorsque nous avons un premier facteur A et un second B, le nombre d'alternatives qui sont générées par l'expérience correspond à :

$$[\text{Nombre d'alternatives}] = [\text{Nombre de niveaux facteur A}] \times [\text{Nombre de niveaux facteur B}]$$

Une expérience avec deux facteurs est assez facile à gérer, tant que le nombre de niveaux n'est pas trop grand. Pour notre part, nous avons deux expériences qui comportent deux facteurs, soient celle du cas optimum et celle des tables de transfert. Ces expériences sont aussi décrites à la section 4.4.3.

Plusieurs niveaux et plusieurs facteurs

Le prochain type d'expérience est celui avec de multiples facteurs d'expérimentations et de multiples niveaux [Chung, 2004]. Le nombre d'alternatives peut alors rapidement exploser, ce qui entraîne des expériences forts complexes. Par exemple, en assumant que nous avons le même nombre de niveaux pour chaque facteur, le nombre d'alternatives croît exponentiellement, soit :

$$[\text{Nombre d'alternatives}] = [\text{Nombre de niveaux des facteurs}]^{[\text{Nombre de facteurs}]}$$

Pour réduire le nombre d'alternatives, le spécialiste n'a d'autre choix que de diminuer le nombre de niveaux ou de facteurs. Pour notre part, la complexité inhérente à ce type d'expérience a fait en sorte que nous ne l'avons pas considéré. Une variante fréquemment utilisée de cette méthode consiste à réduire le nombre de niveaux de chaque facteur à deux. Du même coup, on diminue le nombre d'alternatives. C'est ce qu'on appelle la conception d'expérience factorielle 2^k [Law et Kelton, 2000], où k est le nombre de facteurs. Ce type d'expérience est notamment utilisé pour connaître les effets d'un facteur sur un autre. Un arbre binaire est souvent employé pour recenser l'ensemble des alternatives [Chung, 2004].

4.4.3 Scénarios d'expérimentation

Dans le cadre de notre expérimentation, il est possible de considérer une grande variété de scénarios alternatifs, notamment en raison des possibilités de configuration du modèle. Ainsi, les sept expériences que nous avons réalisées génèrent un total de vingt alternatives. Certaines de ces alternatives sont communes à plusieurs expériences, mentionnons celle de la situation initiale, aussi appelée le cas de référence. En fait, les expériences qui ont été réalisées sont les suivantes :

Expérimentation des cycles de cuisson

L'expérience est basée sur un seul facteur, soit la durée des cycles de cuisson du *four R*. Le premier niveau d'expérimentation est la situation actuelle. À ce moment, les cycles de cuisson sont de 36 heures pour les trois fours. Quant au second niveau, il consiste à assigner des cycles de cuisson de 32 heures au *four R*. Pour ces deux alternatives, la répartition des accidents, c'est-à-dire les *arrêts non-planifiés*, est conforme avec la distribution de probabilité qui leur est associée.

Quatre expérimentations de situation extrême

Chacune de ces quatre expériences requiert un seul facteur. Celui-ci correspond à l'état des quatre ressources suivantes : le *vibrocompacteur / la presse* (celles-ci sont considérés comme une même ressource puisqu'elles sont synchronisées l'une après l'autre), l'*entrepôt*, le *four P1* et l'*atelier de scellement*. Le premier niveau de chaque expérience est la situation actuelle. Celle-ci fait en sorte que les ressources sont désactivées selon les arrêts *planifiés* et *non-planifiés*. Le niveau alternatif consiste à désactiver la ressource pour toute une semaine. Cette dernière alternative permet de connaître l'importance relative de la ressource, puisque leur désactivation permet d'étudier leur impact sur l'ensemble du système.

Expérimentation de la situation optimale

Pour ce cas, nous faisons appel à deux facteurs d'expérimentation. Le premier facteur est l'*horaire des arrêts planifiés* et *non-planifiés*. Le premier niveau du facteur consiste à considérer l'*horaire*. Quant au second niveau, il consiste à l'ignorer. Cette alternative fait en sorte que les ressources sont fiables à 100%, d'où l'appellation « situation optimale ». Le second facteur

d'expérimentation est le nombre de cycles de cuisson du four *R*. Les deux niveaux du facteur sont des cycles de 36 et 32 heures. L'expérimentation de la situation optimale permet de connaître la capacité de production maximale et ce, pour chacune des ressources. Le nombre d'alternatives est donc le suivant :

$$[\text{Nombre niveaux pour l'horaire}] \times [\text{Nombre niveaux des cycles de cuisson}] = 2 \times 2 = 4$$

Expérimentation des tables de transfert

Nous utilisons aussi deux facteurs pour cette expérience. Le premier est la vitesse des tables de transfert. Il y a trois niveaux pour le transfert : lent, normal et rapide. Le second facteur d'expérimentation est le nombre de cycles de cuisson du four *R*. Comme nous l'avons mentionné, il y a deux cycles, soit : 36 et 32 heures. Le nombre d'alternatives est donc :

$$[\text{Nombre niveaux pour le transfert}] \times [\text{Nombre niveaux des cycles de cuisson}] = 3 \times 2 = 6$$

4.5 Analyse des résultats

Au cours de cette section, nous présentons les résultats des sept expériences que nous venons de décrire. Celles-ci consistent à simuler un essai de sept jours. Durant chaque essai, nous avons noté plusieurs mesures de performances du système. Plus particulièrement, le nombre d'anodes entrées et sorties de certaines ressources constituent deux mesures de performance qui ont fait l'objet de notre attention. En fait, les ressources en question sont : le *vibrocompacteur* / la *presse*, l'*entrepôt*, le four *P1*, le four *P2*, le four *R* et l'atelier de *scellement*. Rappelons que l'*entrepôt* récupère et entrepose douze anodes à la fois et que ces deux opérations ne sont pas forcément consécutives (voir la section 3.3.1). Le nombre d'anodes entrées et sorties ne sont donc pas nécessairement les mêmes. C'est pourquoi chaque tableau comporte les deux colonnes suivantes : « *Entrepôt (entrées)* » et « *Entrepôt sorties* ». Par contre, les autres ressources traitent les anodes une à la fois. Le nombre d'anodes entrées et sorties par ces ressources est donc ou bien égal ou bien différent à une anode prêt.

4.5.1 Expérimentation des cycles de cuisson

Comme nous l'avons mentionné, cette expérience consiste à faire varier la durée des cycles de cuisson du *four R*. Le tableau ci-dessous illustre l'impact de cette variation sur le nombre d'anodes entrées et sorties. Les mesures de performances ont été obtenues au terme de sept jours de simulation. Le tableau contient les deux alternatives possibles : le cas de référence, avec des cycles de cuisson de 36 heures, ainsi qu'un cas hypothétique, avec des cycles de 32 heures. Étonnamment, des cycles de cuisson plus courts entraînent une diminution du nombre d'anodes scellées. C'est essentiellement parce qu'il y a plus d'anodes en circulation et donc, plus d'encombrement en amont de l'atelier de *scellement*.

	<i>Vibro-comp. / presse</i>	<i>Entrepôt (entrées)</i>	<i>Entrepôt (sorties)</i>	<i>Four P1</i>	<i>Four P2</i>	<i>Four R</i>	<i>Scellement</i>
[1] Cycles 36 heures	7310	6036	5268	2268	2214	2625	6697
[2] Cycles 32 heures	7310	5952	5148	2268	2214	2955	6656
Variation : $\Delta = [2] - [1]$	0	-84	-120	0	0	330	-41

Tableau 4 : variation des anodes entrées / sorties selon les cycles de cuisson

4.5.2 Quatre expérimentations de situation extrême

Les tableaux ci-dessous contiennent les résultats des quatre expérimentations dites extrêmes. Comme nous avons mentionné, la première alternative de chacune des expériences est le cas de référence. Celui-ci correspond à la seconde ligne de chaque tableau. La deuxième alternative consiste à désactiver une ressource pour la durée de la simulation, c'est-à-dire sept jours. Les valeurs des mesures de performances sont celles obtenues au terme de la simulation.

Le Tableau 5 montre l'impact sur le nombre d'anodes entrées et sorties, lorsque l'on désactive le *vibrocompacteur* et la *presse*. Puisque aucune anode n'est produite, les grues entreposent moins, d'où l'écart notable entre les deux alternatives de la colonne « *Entrepôt (entrées)* ». Par contre, les grues de l'*entrepôt* doivent récupérer d'avantage pour compenser cette absence de production, tel que le stipule la colonne « *Entrepôt (sorties)* ».

	Vibro-comp. / presse	Entrepôt (entrées)	Entrepôt (sorties)	Four P1	Four P2	Four R	Scellement
[1] Cas de référence	7310	6036	5268	2268	2214	2625	6697
[2] Désactivation Vibro-comp. / presse	0	3900	10308	2268	2214	2214	6566
Variation : $\Delta = [2] - [1]$	-7310	-2136	5040	0	0	-411	-131

Tableau 5 : variation des anodes entrées / sorties lors de la désactivation du *vibrocompacteur*

Le Tableau 6 montre l'impact sur le nombre d'anodes entrées et sorties, lorsque l'on désactive l'*entrepôt*. Cette alternative crée des blocages en aval du *vibrocompacteur* et des *fours*, parce que les grues n'entreposent plus. Ceci explique pourquoi moins d'anodes sont sorties de certaines ressources. Également, parce les grues ne récupèrent plus, l'atelier de *scellement* n'est pas suffisamment approvisionné, d'où la variation de la colonne « *Scellement* »

	Vibro-comp. / presse	Entrepôt (entrées)	Entrepôt (sorties)	Four P1	Four P2	Four R	Scellement
[1] Cas de référence	7310	6036	5268	2268	2214	2625	6697
[2] Désactivation de l' <i>entrepôt</i>	5482	0	0	2268	1692	1486	5399
Variation : $\Delta = [2] - [1]$	-1828	-6036	-5268	0	-522	-1139	-1298

Tableau 6 : variation des anodes entrées / sorties lors de la désactivation de l'*entrepôt*

Le ci-dessous montre l'impact sur le nombre d'anodes entrées et sorties, lorsque l'on désactive le *four P1*. Puisque autant d'anodes sont produites par le *vibrocompacteur* et que le four *P1* n'en traite plus, les grues doivent entreposer d'avantage, d'où l'écart positif de la colonne « *Entrepôt (entrées)* ». De même, pour répondre aux demandes de l'atelier de *scellement*, les grues doivent compenser en récupérant encore plus d'anodes. Ceci explique la variation sous la colonne « *Entrepôt (sorties)* ».

	Vibro-comp. / presse	Entrepôt (entrées)	Entrepôt (sorties)	Four P1	Four P2	Four R	Scellement
[1] Cas de référence	7310	6036	5268	2268	2214	2625	6697
[2] Désactivation du four P1	7315	7476	7104	0	2214	2625	7093
Variation : $\Delta = [2] - [1]$	5	1440	1836	-2268	0	0	396

Tableau 7 : variation des anodes entrées / sorties lors de la désactivation du four P1

Le tableau ci-dessous montre l'impact sur le nombre d'anodes entrées et sorties, lorsque l'on désactive le *scellement*. Les anodes que l'atelier de *scellement* traitait doivent maintenant être entreposées, d'où l'écart sous la colonne « *Entrepôt (entrées)* ». Également, les grues n'ont plus à récupérer autant d'anodes pour répondre aux demandes du *scellement*. Ceci explique la variation négative de la colonne « *Entrepôt (sorties)* ».

	Vibro-comp. / presse	Entrepôt (entrées)	Entrepôt (sorties)	Four P1	Four P2	Four R	Scellement
[1] Cas de référence	7310	6036	5268	2268	2214	2625	6697
[2] Désactivation du <i>scellement</i>	7312	9240	1776	2268	2214	2625	0
Variation : $\Delta = [2] - [1]$	2	3384	-3492	0	0	0	-6697

Tableau 8 : variation des anodes entrées / sorties lors de la désactivation du *scellement*

4.5.3 Expérimentation de la situation optimale

Le Tableau 9 présente une expérience avec deux facteurs, soit : l'horaire des arrêts et la durée des cycles de cuisson. Les valeurs affichées sont le nombre d'anodes entrées et sorties après sept jours de simulation. Pour la première alternative, nous considérons les arrêts *planifiés* et *non-planifiés* (premier facteur), ainsi que des cycles de cuisson de 36 heures (deuxième facteur). Ceci équivaut à simuler le cas de référence. La seconde alternative est aussi effectuée avec des cycles de 36 heures. Toutefois, elle est dite optimale, puisqu'elle ignore les arrêts. Étant donné que toutes les ressources sont fonctionnelles à 100%, le nombre d'anodes produites et scellées

s'accroît, comme le montre les valeurs de la ligne « Variation : $\Delta = [2] - [1]$ ». L'impact sur les fours est mineur, car le nombre d'anodes qu'ils traitent est assujéti à l'horaire des trains (voir l'Annexe 1). La troisième alternative considère les arrêts et simule des cycles de cuisson de 32 heures pour le four *R*. Finalement, la dernière alternative est aussi basée sur des cycles de 32 heures. Cependant, elle ne considère pas les arrêts. Que ce soit avec des cycles de 32 ou 36 heures, l'absence des arrêts nous amène au même constat quant à la variation du nombre d'anodes. Mentionnons aussi que même en ignorant les arrêts, une diminution des cycles de cuisson a un impact assez faible, lorsque l'on compare les deuxième et quatrième alternatives.

	<i>Vibro-comp. / presse</i>	<i>Entrepôt (entrées)</i>	<i>Entrepôt (sorties)</i>	<i>Four P1</i>	<i>Four P2</i>	<i>Four R</i>	<i>Scellement</i>
<i>Cycles de cuisson de 36 heures pour le four R</i>							
[1] Avec arrêts	7310	6036	5268	2268	2214	2625	6697
[2] Sans arrêt	8672	6300	5564	2304	2214	2670	8193
Variation : $\Delta = [2] - [1]$	1362	264	296	36	0	45	1496
<i>Cycles de cuisson de 32 heures pour le four R</i>							
[3] Avec arrêts	7310	5952	5148	2268	2214	2955	6656
[4] Sans arrêt	8672	6252	5484	2304	2214	3030	8067
Variation : $\Delta = [4] - [3]$	1362	300	336	36	0	75	1411

Tableau 9 : variation des anodes entrées / sorties lorsque la situation est optimale

4.5.4 Expérimentation des tables de transfert

Le Tableau 10 présente une expérience avec deux facteurs, soit : la vitesse des tables de transfert et le nombre de cycles de cuisson du four *R*. Comme pour les autres expérimentations, les deux mesures de performance qui nous ont d'avantage intéressées sont : le nombre d'anodes entrées et sorties. Les valeurs affichées sont celles après sept jours de simulation. La première alternative est effectuée avec une table de transfert normale (premier facteur) et des cycles de cuisson de 36 heures (deuxième facteur). Cette alternative est le cas de référence. Les deux alternatives suivantes sont aussi réalisées avec des cycles de 36 heures mais cette fois-ci, la

vitesse de transfert de leurs tables passe respectivement à lente et à rapide. La vitesse semble être directement proportionnelle avec le nombre d'anodes produites et scellées. Cette conclusion demeure vraie, même lorsque l'on diminue la durée des cycles de cuisson à 32 heures pour les trois dernières alternatives. Nous avons également effectué une petite analyse de sensibilité, avec trois tables situées entre les *fours* et le *scellement* (voir la Figure 23). Ainsi, lorsque la table T5, la T4 ou la T3 est mise en vitesse rapide, nous obtenons 6778, 6675 et 6675 anodes scellées respectivement. Il semble donc que la vitesse de la table T5 joue un rôle prédominant.

	Vibro-comp. / presse	Entrepôt (entrées)	Entrepôt (sorties)	Four P1	Four P2	Four R	Scellement
Cycles de cuisson de 36 heures pour le four R							
[1] Normale	7310	6036	5268	2268	2214	2625	6697
[2] Lente	7309	5664	4800	2268	2214	2625	6609
[3] Rapide	7328	6504	5736	2268	2214	2625	6717
Cycles de cuisson de 32 heures pour le four R							
[4] Normale	7310	5952	5148	2268	2214	2955	6656
[5] Lente	7298	5616	4728	2268	2214	2955	6558
[6] Rapide	7340	6180	5436	2268	2214	2955	6750

Tableau 10 : variation des anodes entrées / sorties en fonction du taux de transfert

4.6 Conclusions

À la lumière des expérimentations que nous avons effectuées, plusieurs conclusions peuvent être émises. Ces conclusions font l'objet de recommandations qui permettent de répondre aux principales interrogations des spécialistes du système.

D'abord, on observe une baisse minime du nombre d'anodes scellées avec des cycles de cuisson plus courts (Tableau 4). Puisque la durée des cycles du four R n'a pas un impact significatif, une modification de ce paramètre n'est pas recommandée.

Deuxièmement, comme on l'a vu à la section 4.5.2, outre l'arrêt du *scellement* (Tableau 8), c'est l'arrêt des grues de l'*entrepôt* qui entraîne la plus forte diminution d'anodes scellées (Tableau 6). Il importe donc de minimiser les arrêts planifiés et non-planifiés de ces deux ressources autant que possible.

L'arrêt du four *P1* provoque un accroissement du nombre d'anodes scellées et une chute drastique du nombre d'anodes cuites entreposées (Tableau 7). L'arrêt d'un *four* n'est donc pas souhaitable, à moins que l'on ait suffisamment d'anodes cuites entreposées.

Comme l'a montré l'expérimentation de la situation optimale à la section Expérimentation de la situation optimale 4.5.3, la diminution du nombre d'arrêts entraîne une augmentation significative du nombre d'anodes scellées (Tableau 9). Il importe donc de réduire leur nombre autant que possible.

Finalement, comme vous pouvez le constater au Tableau 10, une augmentation de la vitesse des tables de transfert est souhaitable, pour accroître le nombre d'anodes scellées et ce, peu importe la durée des cycles de cuisson du four *R*.