



HAL
open science

L'automatisation : un acte de foi ?

Jean-Luc Moullet, François Provost

► **To cite this version:**

Jean-Luc Moullet, François Provost. L'automatisation : un acte de foi?. Sciences de l'ingénieur [physics]. 1994. hal-01909787

HAL Id: hal-01909787

<https://minesparis-psl.hal.science/hal-01909787>

Submitted on 31 Oct 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DES MINES DE PARIS
Corps Techniques de l'Etat

ÉCOLE NATIONALE
SUPÉRIEURE DES
MINES
BIBLIOTHÈQUE
IE 1 [299]

L'AUTOMATISATION: UN ACTE DE FOI?

Le cas de la Chimie

Jean-Luc Moullet et François Provost
Ingénieurs des Mines

CONSULTATION SUR PLACE

Juin 1994

Avant-propos

*"Faire, sans faire savoir, ce n'est rien.
L'industriel doit veiller aux critiques, (...)
les redresser si elles sont fausses:
Bien faire et ne pas laisser dire."
Auguste Detœuf Propos de O.L. Barenton confiseur*

Ce rapport a été réalisé dans le cadre de la formation de troisième année des ingénieurs élèves au Corps des Mines. Il regroupe les conclusions d'un mémoire sur l'impact économique et social de l'automatisation dans l'industrie chimique. Cette étude a été menée, à mi-temps, entre janvier et juin 1994.

Oser encore parler d'automatisation en 1994, face à 3 millions de chômeurs, est-ce vraiment raisonnable? Inversement, à l'aube du XXI^{ème} siècle, est-il gratifiant de limiter le travail des hommes à des tâches manuelles et répétitives? Dans ces conditions, l'automatisation dans l'industrie chimique, sujet a priori technique et obscur, ne peut décidément pas laisser indifférent!

Privilégiant le concret sur les discours convenus, nous avons choisi de fonder notre travail sur la visite de sites et le dialogue avec les acteurs concernés: l'opérateur qui commande son unité depuis un écran d'ordinateur, l'ingénieur de fabrication qui dispose de puissants outils d'analyse pour optimiser son unité, le responsable de maintenance qui troque sa clef à molette contre un oscilloscope, le responsable sécurité-environnement qui s'inquiète de la complexité croissante des systèmes de conduite, le directeur d'usine qui analyse le nouveau rôle des opérateurs dans la chimie, le concepteur d'unité qui est à l'affût des dernières innovations technologiques, la Direction Générale qui s'interroge sur l'intérêt de l'automatisation... ELF-ATOCHEM a accepté de nous ouvrir les portes de ses usines, et de nous faire rencontrer les interlocuteurs concernés.

Après avoir défini l'automatisation dans le contexte de l'industrie chimique et présenté ses finalités, ce rapport analyse les effets pervers de l'automatisation en termes de gestion des ressources humaines, de sécurité, et de surcoût des investissements. A partir de ces constats, nous proposons une nouvelle approche tendant à augmenter l'efficacité des opérateurs, de valoriser leur travail et de diminuer les coûts de l'automatisation.

L'automatisation: un acte de foi?

Étude du cas de la chimie.

Abstract

Sécurité et aspect humains liés à l'automatisation

L'automatisation des unités chimiques modifie profondément l'environnement du travail en faisant émerger un nouvel acteur central, l'opérateur tableau, et en introduisant une plus grande distanciation de l'opérateur à son unité, ainsi qu'une exigence accrue de qualification. La sécurité des installations, à certains égards renforcée grâce au contrôle numérique, est partiellement hypothéquée par des facteurs supplémentaires de risques tant techniques (sensibilité des systèmes numériques) qu'humains (complexité de gestion, réactivité amoindrie par inactivité...).

Le coût élevé de l'automatisation

Les arguments techniques présentés (qualité, rendement...) justifiant toujours plus d'automatisation sont rarement fondés sur des analyses quantifiées convaincantes, tant a priori qu'a posteriori. Les seuls arguments quantifiés évoqués concernent les baisses de frais fixes. Par ailleurs, une stricte analyse fonctionnelle révèle souvent des solutions moins chères que les choix de conception retenus. De nombreux mécanismes expliquent ces surcoûts: (i) la complexité et le coût d'une installation sont considérés comme des signes de performance, (ii) les techniciens ont tendance à "se faire plaisir dans la technique" en choisissant les matériels les plus élaborés, (iii) l'enveloppe commune des desiderata de chaque service est souvent retenue au détriment du coût, (iv) les maîtres d'ouvrage ne sont pas toujours en mesure de faire des arbitrages, à cause de la complexité croissante des techniques...

Comment mieux arbitrer entre tâches automatisées et tâches manuelles?

Il apparaît nécessaire de conserver en poste un nombre suffisant d'opérateurs pour prévenir et gérer les incidents. Cependant, en conduite normale, les opérateurs ne sont occupés qu'une très faible partie de leur temps, ce qui semble anormal tant pour des raisons de motivation, et donc de sécurité, que pour des raisons économiques. L'approche traditionnelle de la conception des unités conduit, nous semble-t-il, à rechercher une

automatisation maximale compatible avec l'enveloppe budgétaire fixée et les moyens techniques disponibles. Cela conduit donc à faire fi de ce potentiel humain qui est pourtant présent. Nous proposons une approche de l'automatisation qui s'appuie sur les trois points suivants.

- Il faut conserver le principe selon lequel la taille de l'équipe de conduite est définie pour gérer les incidents et les phases transitoires.

- En période de conduite normale, pour valoriser le travail des opérateurs et maintenir leur vigilance, il vaut mieux leur donner des tâches effectives de conduite, plutôt que de recourir à une sur-automatisation coûteuse.

- Enfin, les moyens automatiques permettent d'effectuer les autres tâches, notamment celles à forte occurrence.

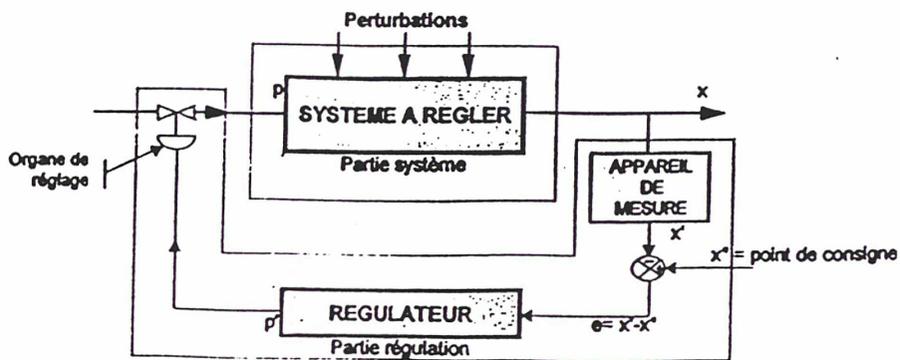
Glossaire

Les personnes que nous avons rencontrées lors de notre étude ont utilisé de façon récurrente les termes qui suivent. Leurs définitions sont bien sûr relatives au contexte de l'industrie chimique.

Mécanisation: Motorisation d'opérations qui, autrement, devraient être effectuées manuellement: commandes de vannes, manutentions, branchement, etc. La mécanisation permet souvent la commande à distance.

Automatisation: Enclenchement par un concours de conditions préalables (de température, de pression...) et sans intervention humaine, de certaines actions mécanisées (démarrage de pompes, ouvertures de vannes). En particulier, dans des processus de production discontinus, automatiser signifie commander des mouvements séquentiels par des automates .

Régulation: Action de maintenir une variable opératoire à une valeur affichée appelée point de consigne. La régulation maintient constants des débits, pressions, niveaux, températures, etc. Le terme **boucle de régulation** regroupe l'ensemble composé de l'organe de mesure, de la variable opératoire à régler (sortie), du régulateur (loi de commande) et de la vanne automatique (commande) qui agit sur cette variable. Voir le schéma ci-dessous.



SCHEMA FONCTIONNEL DE REGULATION AUTOMATIQUE

Fig. 1- Boucle de régulation

Informatisation: Mise en place de la régulation numérique par microprocesseurs.

Optimisation⁽¹⁾: En reliant un ordinateur à l'ensemble des microprocesseurs servant à la régulation numérique, il est possible d'établir un deuxième niveau d'informatisation qui permet: (i) de conduire l'unité au vu de tableaux synoptiques apparaissant sur un terminal d'ordinateurs; (ii) de changer les points de consigne des variables opératoires, par des programmes de calcul appelés "applications". Ces applications mettent en oeuvre des fonctions "objectif" concernant les rendements de la réaction chimique, les consommations d'énergie et de matières premières. Elles permettent d'atteindre le réglage le plus économique pour un niveau de production donné.

Centralisation: Regroupement dans un même centre, situé à une certaine distance du site d'exploitation, des fonctions de surveillance et de commande d'une, ou de plusieurs, unités.

SNCC: Système Numérique de Contrôle Commande. Système centralisé, regroupant des capacités de traitement de données, des interfaces graphiques (synoptiques) permettant la conduite des unités, et la commande de l'ensemble des matériels d'instrumentation.

¹ Cette définition est différente de la notion d'optimisation utilisée en Mathématiques Appliquées

Chapitre 1

Pourquoi les unités chimiques sont-elles automatisées?

- A. Industrie chimique et automatisation
- B. Étude de cas concrets: nos stages opérateurs
- C. Un contexte favorable au développement de l'automatisation
- D. Les finalités de l'automatisation

A. Industrie chimique et automatisation

Le langage courant associe souvent les problèmes d'automatisation aux problèmes de robotisation rencontrés dans les usines du secteur manufacturier, typiquement des usines de montage de voiture, où le travail se traduit par une action concrète sur des produits visibles. Automatiser signifie alors installer des robots effectuant des tâches ponctuelles et séquentielles de transport, de positionnement ou de soudage. Les problèmes relatifs à cette robotisation ont trait au repérage dans l'espace, à la morphologie, aux déplacements de bras articulés, etc.

Le cas de l'industrie chimique est particulier. Il doit être distingué de celui de l'industrie manufacturière présenté ci-dessus. Il convient pour cela, d'abord de comprendre le contexte et les contraintes particulières de la chimie, et ensuite de voir les principes et les solutions techniques d'automatisation qui permettent de répondre à ses besoins. L'exposé ci-dessous s'applique aux branches de la chimie que nous avons pu étudier.

1. Un panorama complexe et hétérogène

a. Une apparente complexité

Une usine chimique est qualifiée d'unité de "process" (ou de procédé): des produits intrants, invisibles aux opérateurs, réagissent à l'intérieur de réacteurs fermés pour donner des produits finis. Quiconque a déjà étudié la chimie dans l'enseignement secondaire chercherait en vain pipettes et béchers; tout, ici, semble démesuré, à l'image de ces inextricables enchevêtrements de tubes et de tuyaux qui traversent l'usine.

De l'arrivée des matières premières, jusqu'à l'expédition de produits finis, il est possible d'aller du début à la fin du cycle de production sans jamais voir physiquement de produit. L'homme semble aussi mystérieusement absent des sites puisque ce n'est que par hasard que l'on rencontre un opérateur effectuant une ronde. Il faut se déplacer jusqu'aux salles de contrôle pour rencontrer une activité humaine. Véritables centres névralgiques commandant la bonne marche des unités, celles-ci semblent également incompréhensibles aux visiteurs qui ne voient que tableaux lumineux, écrans d'ordinateurs et graphiques compliqués.

Des fuites de vapeur, parfois l'obligation de porter un masque de protection à la ceinture, une odeur persistante et souvent âcre, des panneaux de signalisation de danger, le retentissement occasionnel d'une alarme de sécurité contribuent à renforcer l'idée a priori que la chimie est décidément une activité bien obscure, et peut-être dangereuse.

b. Une industrie très diversifiée

Les différentes visites de sites que nous avons pu mener nous ont appris que la chimie est une industrie extrêmement diversifiée, tant dans ses procédés de fabrication, que dans la nature des produits fabriqués, voire dans les technologies employées.

i. Diversité dans la nature des produits

Les différentes usines visitées fabriquent des produits de nature physique très différente. Ils peuvent se présenter sous forme de liquide (ex.: le chlore obtenu par électrolyse, le styrène...), de pâte (ex.: le polyéthylène au niveau de la fonction d'extrusion), de poudre (ex.: le PA12, polymère technique pour le revêtement des paniers de lave-vaisselle notamment), de gaz (ex.: l'éthylène)...

Certains revêtent un caractère particulièrement toxique (ex.: le chlore et le fluor), d'autres sont explosifs (ex.: la décomposition des peroxydes est une réaction explosive), d'autres enfin sont inertes (ex.: le polystyrène).

La conception des unités dépend bien sûr de la nature des produits. De même, les choix d'automatisation retenus sont-ils influencés par les propriétés spécifiques des produits. Par exemple, une réaction ayant une dynamique rapide nécessite des automatismes ayant des vitesses de réaction que les hommes ne peuvent atteindre.

ii. Diversité des procédés et des types de chimie

Pour une réaction chimique donnée, différentes solutions d'exploitation industrielle existent. Ainsi est-il possible de distinguer des procédés continus (ex.: une usine de production de styrène), des procédés séquentiels⁽²⁾, (ex.: une usine de production de polymères techniques). Il faut aussi différencier les unités consacrées à la fabrication d'un seul produit, des ateliers flexibles qui peuvent adapter la nature des produits fabriqués selon les spécifications demandées.

² "séquentiel": le terme consacré est "batch"

Il est également possible de classifier les usines chimiques par la taille caractéristique de leur production. On oppose alors chimie lourde, chimie de spécialités et chimie fine. La chimie lourde produit en grande quantité des molécules fondamentales, ou commodités, par centaines de milliers de tonnes et à bas prix. Cette industrie travaille généralement à partir de bases pétrolières issues du raffinage pour la chimie organique, et de sels minéraux d'origine minière pour la chimie minérale. Ce type de chimie exige des installations de grande dimension (un vapocraqueur peut fournir 500 000 tonnes d'éthylène par an). La chimie de spécialités vise à réaliser des produits précis pour des clients déterminés. C'est une sorte de chimie "à la carte" qui porte sur des tonnages limités (un lot produit par une unité de fabrication de principes actifs pour la pharmacie pèse typiquement un centaine de kilogrammes). La chimie fine réalise la synthèse de molécules complexes dont le coût d'élaboration peut être élevé dans des ateliers de petite dimension avec des réacteurs travaillant souvent en discontinu .

iii. Une diversité des systèmes de commande

A la diversité "intrinsèque" exposée ci-dessus s'ajoute une diversité de niveau de technologie de commande des unités, puisque il est possible de rencontrer sur un même site industriel tous les stades de l'évolution technologique. Certaines unités sont encore pilotées manuellement "comme au XIX^{ème} siècle", d'autres sont contrôlées par commande pneumatique et, enfin, les plus modernes sont truffées de numérique. Ainsi, l'étude du panorama de l'industrie chimique permet-il véritablement de "remonter le temps" en observant les différentes générations de régulation.

Une telle variété peut s'expliquer par l'âge de l'unité. Une usine est construite dans une optique de long terme en utilisant la technologie disponible au moment de sa construction. Si elle ne subit pas de rénovation, elle différera sensiblement d'une usine récente fabricant le même produit, mais qui serait dotée d'une génération de régulateurs ultérieure.

c. Conclusion

A la limite, la variété des sites est telle que rien ne différencie plus une usine chimique qu'une autre usine chimique. Dans un tel contexte, il semblerait que les problèmes d'automatisation soient a priori différents pour chaque unité. Quel sens donner donc à l'expression "automatisation dans l'industrie chimique"?

2. Les principes physiques de la régulation des unités chimiques

a. Une industrie de "process"

Un procédé de chimie industrielle peut s'analyser de la façon simplifiée suivante: des matières premières sont transformées, par réaction chimique, en produits finis au cours d'un procédé qui met en jeu des échanges d'énergie. L'essentiel de l'activité des opérateurs de la chimie consiste à réguler le procédé de fabrication. Ce faisant, ils n'interviennent pas directement sur la matière, comme c'est le cas des industries manufacturières, mais seulement sur les conditions opératoires du procédé. On dit que la chimie est une "industrie de process".

b. La régulation élémentaire

i. Notion de régulation

La notion de régulation est au coeur de l'activité de la chimie industrielle. Conceptuellement, l'activité de régulation⁽³⁾ comprend, autour d'un système à régler, un appareil de mesure⁽⁴⁾, un régulateur qui intègre la différence entre la mesure donnée par le capteur et un point de consigne préalablement fixé ⁽⁵⁾-et un organe de réglage qui est actionné par le régulateur⁽⁶⁾.

Traditionnellement, cette activité de régulation peut être faite par un opérateur qui, à partir de la lecture d'un appareil de mesure (un pressostat par exemple) actionne manuellement un organe de réglage (une vanne par exemple) pour ramener la valeur physique à la valeur de consigne, qui peut d'ailleurs être variable dans le temps. Parler d'automatisation dans l'industrie chimique consiste à automatiser la tâche effectuée par l'opérateur. L'étude du fonctionnement des boucles de régulation sur un exemple simple permet de mieux comprendre les phénomènes en jeu.

³ Voir le schéma correspondant dans le glossaire

⁴ La "sortie" dans le langage l'automaticien

⁵ La "loi de commande" pour l'automaticien

⁶ L'entrée ou la commande pour l'automaticien

ii. Étude d'un exemple simple: une capacité tampon

Considérons un ballon (le système à réguler) intégré dans un processus de production, et servant de capacité tampon entre deux opérations unitaires (voir figure 2, ci- après). L'objectif est de garder le niveau V dans le ballon autour d'une valeur de consigne V_c . Le ballon reçoit en amont un flux de produit F . Il délivre en aval un flux L , contrôlé par une vanne (l'organe de réglage).

La variation du niveau vérifie l'équation de bilan matière suivante $dV/dt=F-L$.

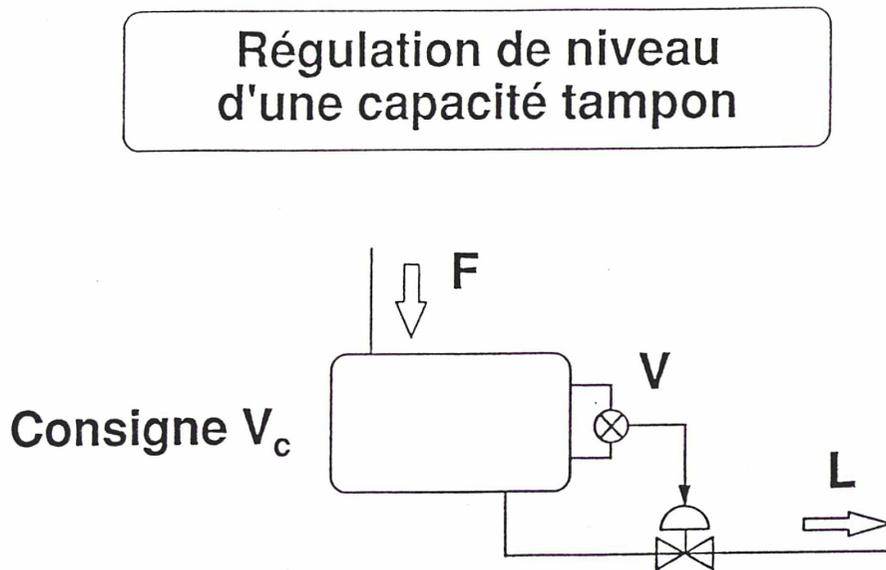


Fig. 2 - Régulation de niveau d'une capacité tampon

En régime permanent, il convient bien sûr de fixer $L=F$ pour avoir un niveau constant dans le ballon. Les difficultés surgissent en régime non permanent.

Dans le cas d'un contrôle manuel, lorsque le niveau dans le ballon monte, l'opérateur doit ouvrir la vanne pour augmenter le débit de sortie L et donc "vider" le ballon. Quand le niveau baisse, il doit au contraire diminuer le pourcentage d'ouverture de la vanne. Si le débit F est irrégulier, l'opérateur doit sans arrêt agir sur la vanne de sortie de façon à réguler le niveau de son ballon. Cette manipulation permanente de vannes peut être très fastidieuse pour l'opérateur. D'où l'idée d'automatiser cette tâche.

L'automatisation du contrôle du niveau dans le ballon consiste à remplacer l'opérateur par un régulateur automatique. Ce régulateur commande le pourcentage d'ouverture de la vanne de sortie en fonction de la mesure du niveau V dans le ballon, du

niveau V_c de consigne, et du flux rentrant F . Classiquement, l'équation de la régulation qui régit l'action du régulateur automatique comprend trois termes:

(i) un terme dit "proportionnel", qui lie linéairement l'ouverture de la vanne à la différence $V-V_c$, et assure la stabilité de la régulation.

(ii) un terme dit "intégral", qui lie l'ouverture de la vanne à l'intégrale dans le temps la différence $V-V_c$, et conditionne la précision de la régulation,

(iii) un terme dit "dérivé", qui lie l'ouverture de la vanne à la dérivée dans le temps de la différence $V-V_c$, et introduit donc un facteur d'anticipation.

Un tel régulateur élémentaire est connu sous le nom de régulateur P.I.D.⁽⁷⁾, pour Proportionnel, Intégral, Dérivé. La description faite ci-dessus correspond à un "LC" pour "Level Controller". On pourrait définir de manière semblable un "FC" pour "Flow Controller", "TC" pour "Temperature Controller", "PC" pour "Pressure Controller".

Le travail de l'ingénieur chargé du procédé consiste à connaître la valeur à affecter à chaque paramètre définissant les trois facteurs ci-dessus, de façon à ce que la régulation se fasse avec la souplesse et la rapidité exigée par le procédé. Le travail de l'opérateur consiste seulement à fixer le point de consigne V_c , et à vérifier que tout se passe bien. En cas de gros à-coup sur F , l'opérateur peut baisser préventivement le niveau de consigne V_c pour absorber l'à-coup de produit. L'opérateur agit donc moins souvent mais avec plus de réflexion et d'intelligence.

c. D'une boucle élémentaire à un système complexe

i. Les voies de la complexification

L'exemple du ballon ci-dessus montre combien l'automatisation d'une tâche élémentaire est conceptuellement simple à réaliser. On imagine aisément qu'il existe à ce stade plusieurs voies de complexification.

Une première voie consiste à multiplier les boucles de régulation sur une unité. Typiquement une installation de taille moyenne est réglée par une centaine de boucles de régulations, on en trouve plus de cinq cents sur un vapocraqueur. Un opérateur est capable de gérer jusqu'à trois cents boucles de contrôle simultanément.

⁷ Il est clair qu'il existe d'autres lois de commandes que le P.I.D. Néanmoins, le P.I.D. est la plus répandue.

Une seconde voie de complexification consiste à faire des cascades de régulateurs en asservissant le niveau de consigne d'un régulateur A au niveau de sortie d'un régulateur B. Typiquement, on trouve sur des unités des cascades d'ordre 2, plus rarement d'ordre 3 ou 4. Aux difficultés conceptuelles que représentent de tels régulateurs en cascade, s'ajoutent les difficultés de mise en oeuvre pratique et les problèmes de coordination de constante de temps, de stabilité et de robustesse.

La complexité des combinaisons potentielles est donc sans borne et contribue à créer des systèmes qui paraissent hermétiques aux néophytes.

ii. Exemple d'une colonne de distillation

Un exemple d'une telle complexification s'observe dans le cas d'une colonne de distillation dont l'automatisation se fait grâce à la mise en cascade de boucles de contrôle.

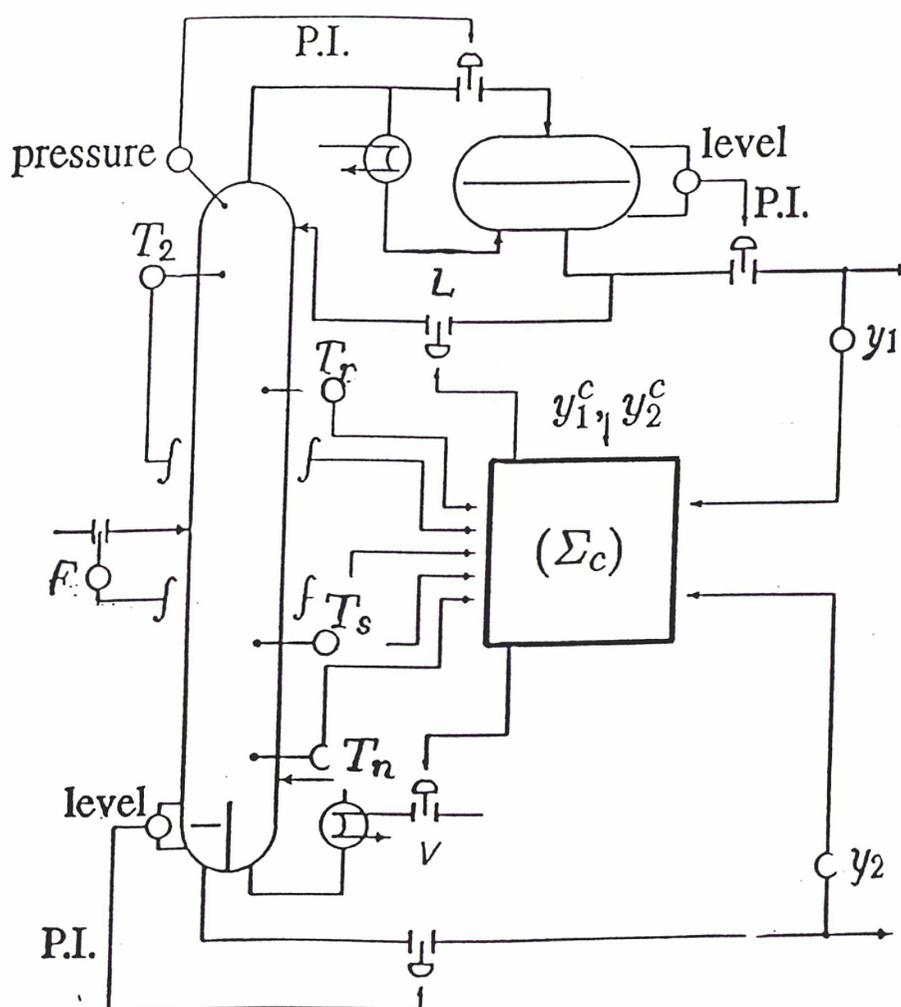


Fig. 3 - L'automatisation d'une colonne de distillation

On reconnaît sur ce schéma:

(i) le niveau du ballon de tête régulé à partir du débit de distillat comme sur l'exemple du paragraphe A.2.b *La régulation élémentaire*.

(ii) en tête de colonne, une boucle PC qui régule la condensation en tête.

(iii) en milieu de colonne, un régulateur multivariable (Σ_c) qui agit simultanément sur le débit de reflux (L) et la puissance de rebouillage (proportionnelle à V), en fonction du débit d'alimentation (F) et des températures des plateaux de la colonne ($T_2, T_r, T_s \dots T_n$), pour maintenir les taux de pureté en tête (y_1), et en fond (y_2) à des spécifications données (y_1^c et y_2^c)

(iv) en bas de colonne, une boucle LC qui actionne la vanne de sortie de produit de fond de colonne en fonction du niveau de fond.

Schématiquement, il est possible de distinguer trois niveaux d'automatisation sur une colonne, selon la dynamique des réactions en jeu.

L'automatisation de premier niveau utilise trois boucles de régulation (deux LC et une PC) comme le montre le schéma ci-dessus. Le temps caractéristique est inférieur à la minute. Des algorithmes P.I.D. suffisent ici car les dynamiques à commander sont simples (et ressemblent à celles explicitées pour le ballon).

Le second niveau d'automatisation met en jeu des phénomènes dont le temps caractéristique est de l'ordre de l'heure. Il s'agit de maintenir la qualité du distillat et du résidu à des valeurs de consigne y_1^c et y_2^c en jouant sur le rebouillage et le reflux. Les algorithmes à mettre en oeuvre sont plus complexes que les P.I.D. (couplage, non linéarité, etc.).

Le troisième niveau d'automatisation met en jeu des phénomènes dont le temps caractéristique est supérieur à cinq heures. Il s'agit de définir les consignes y_1^c et y_2^c , et d'optimiser la production en fonction des coûts tout en respectant certaines contraintes de production (limite de capacité, etc.)

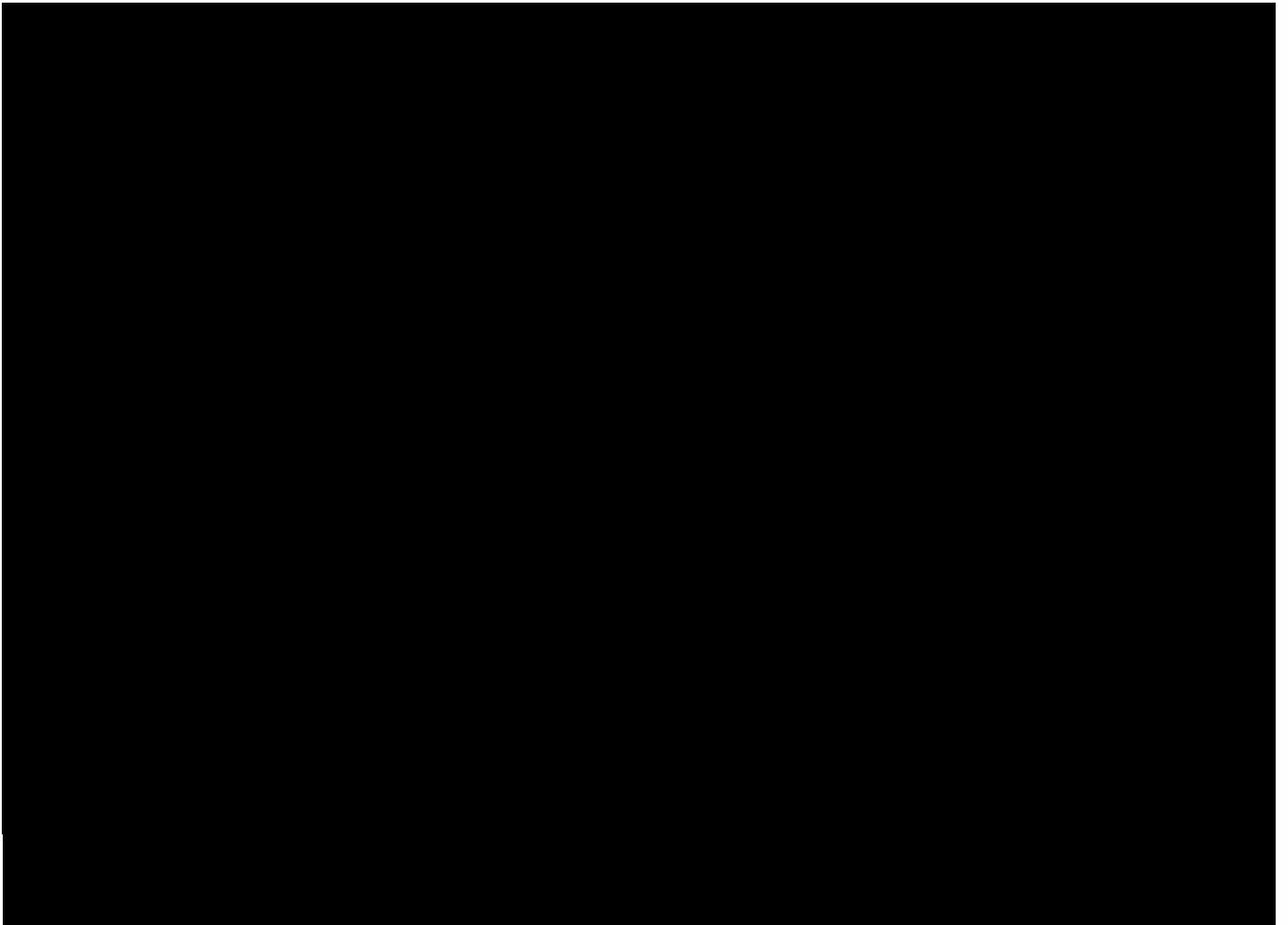
d. De la colonne de distillation au pilotage de l'usine

Aussi variées que puissent être les usines chimiques, il est possible de distinguer trois grandes fonctions essentielles qui sont à la base de l'activité de la chimie industrielle, et que l'on retrouve dans pratiquement toutes les unités: (i) la réaction chimique⁽⁸⁾ qui a lieu le plus souvent dans un réacteur, (ii) l'opération de séparation

⁸ ou opération de conversion

physique des produits, dans des colonnes de distillation par exemple, (iii) les systèmes d'échanges thermiques, comme des fours.

Une unité de production est souvent composée de la mise en série de ces trois types d'opérations unitaires comme le montre le graphique ci-après.



Le pilotage à l'échelle de l'unité de production consiste à fixer les paramètres de marche de façon à ce que les spécifications quantitatives et qualitatives soient assurées tout en minimisant les coûts de production. Les commandes passées à ce niveau affectent le pilotage de chacune des trois fonctions explicitées ci-dessus (réaction, séparation, échange thermique) en fixant des niveaux de consigne. La commande de chaque fonction porte ensuite sur les contraintes dynamiques et structurelles (qualité du produit désiré) par l'intermédiaire des régulateurs multivariables par exemple. On se retrouve alors dans le cas explicité au paragraphe ci-dessus.

e. Conclusion

La complexité apparente des usines chimiques, qui surprend un visiteur non averti, s'explique donc par la superposition et la mise en cascade de boucles de régulation élémentaires. L'étude des différents niveaux de commande explicitée ci-dessus (élément simple, fonction de base, unité de production) permet de comprendre le "changement de variable" progressif dans le travail de l'opérateur. Il passe de la commande de variables d'état physiques (température, pression, etc.) par action sur le pourcentage d'ouverture de vannes, avec des échelles de temps de réaction rapides (quelques minutes au plus), à des variables dynamiques et structurelles (spécification des extraits en sortie de colonne, par exemple) dont les échelles de temps se comptent en heures, jusqu'à des variables économiques (rentabilité de l'unité) qui ont des temps caractéristiques qui peuvent atteindre une journée ou plus.

Cette agrégation des niveaux de commande a été permise par l'augmentation du nombre de régulations accessibles à partir d'une salle de contrôle, due à la miniaturisation des organes de commande et à l'évolution des technologies. Quelles sont donc les technologies qui permettent de réaliser pratiquement les régulateurs?

3. Les aspects technologiques de la régulation des unités chimiques

La technologie des régulateurs a évolué avec le temps, permettant à l'automatisation de prendre une part grandissante dans la conduite des unités. Les premiers régulateurs étaient *pneumatiques*. Ils sont apparus dans les années 50. Ils sont capables d'effectuer des opérations simples. La commande des actionneurs se fait par air pressurisé. Cette technologie permet de mécaniser les tâches et de centraliser les opérations depuis une salle de contrôle. Une telle salle contient des tableaux de commande dont certains peuvent atteindre plusieurs dizaines de mètres de long et qui sont constitués des organes de commande des régulateurs, ainsi que des enregistreurs papier permettant une lecture des variables opératoires.

Au début des années 70, la *régulation électronique* remplace la régulation pneumatique. Elle permet de gagner en précision et en facilité d'utilisation. Les régulateurs électroniques nécessitent néanmoins une longue période de réglage qui peut prendre jusqu'à un mois.

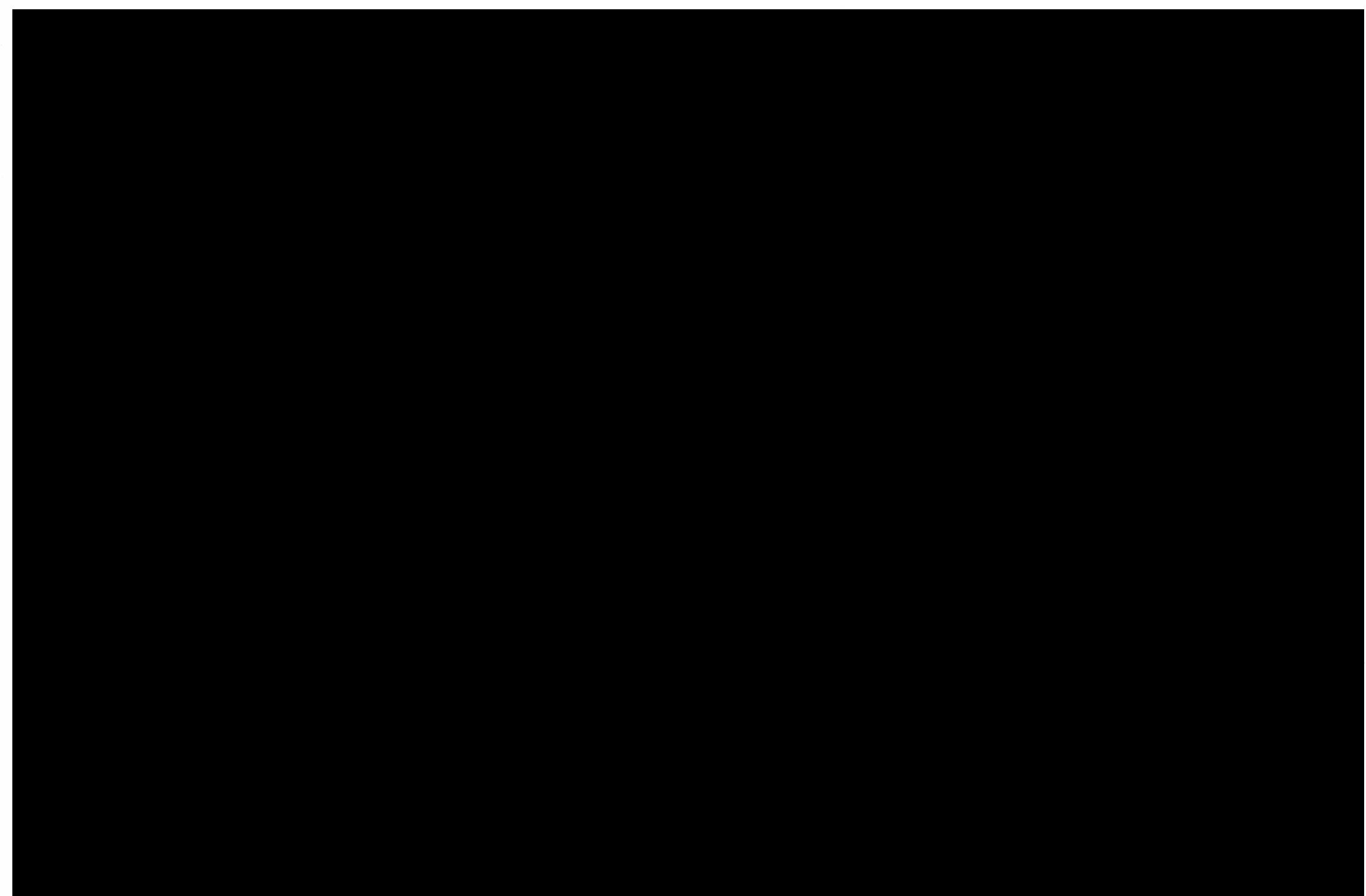
Les sécurités et les alarmes sont constituées par des *relais électromécaniques* qui ne permettent pas d'historique des événements et pour lesquels les dépannages sont laborieux: typiquement une simple extrudeuse nécessite 20 mètres de schémas de câblage et 300 relais; une intervention nécessite au moins 72 heures.

Au milieu des années 70, les premiers *automates programmables* apparaissent aux États-Unis. Ils permettent de remplacer certains relayages et d'obtenir des séquences de démarrage plus élaborées, une détermination discriminatoire du premier défaut ainsi qu'une analyse des défaillances.

A cette époque apparaît le premier *système de régulation numérique* Honeywell. Il est configurable et auto surveillé. Il permet de gérer 8 boucles de régulations, d'être conduit et supervisé par des consoles informatiques, et peut donner des historiques de l'évolution de variables prédéterminées.

Au début des années 80, *des régulateurs numériques* sont mis en réseau. Ils permettent la conduite et la supervision des unités par des consoles connectées à ce réseau. Il est également possible de relier des modules d'application (calculs mathématiques d'optimisation, etc.) au réseau de conduite. Les tableaux de contrôle des salles de commande classiques sont remplacés par des tubes cathodiques et des claviers. On désigne souvent un tel système sous l'appellation Système Numérique de Contrôle Commande (SNCC). Parallèlement aux régulateurs numériques, les premiers *automates de sécurités* (tripliqués) sont lancés sur le marché. Sur un réseau indépendant du système de conduite, ils gèrent les alarmes et les sécurités de façon redondante (avec vote majoritaire 2 sur 3 par exemple).

Dans les années 90 se mettent en place des *systèmes numériques* puissants construits autour de réseaux numériques rapides avec de multiples possibilités de redondances, des calculateurs intégrés et des possibilités de communication avec des automates. On trouvera, ci-après, un exemple de réponse globale.



4. Conclusion

L'évolution des techniques permet donc, par l'intermédiaire d'une mise en cascade des régulateurs élémentaires, d'agréger les niveaux de commande et, à la limite, de commander toute l'unité depuis un seul pupitre. La source principale de progrès dans l'automatisation réside surtout dans cette possibilité de mise en oeuvre à grande échelle de régulateurs P.I.D., d'enregistreurs, etc. Mais la nature même de ces organes élémentaires reste en général d'une algorithmique simple et facile à comprendre. La tendance actuelle est de mettre dans les calculateurs des programmes de commande multivariables qui permettent l'optimisation des conditions opératoires, la gestion d'alarmes, etc.

Après avoir vu que l'automatisation peut remplacer une certaine forme d'action humaine sur les sites chimiques et prendre une part croissante dans la conduite des unités, il est important de voir comment se déroule la vie d'une équipe d'opérateurs "postés" à l'heure de l'automatisation.

B. Étude de cas concrets: nos stages opérateurs

Nous avons eu l'occasion de pouvoir suivre à deux reprises un "poste" de travail avec des équipes d'opérateurs. L'objectif était de mieux comprendre la vie d'une unité, le déroulement d'un poste et le jeu des acteurs. Ces deux stages "postés" d'une semaine ont eu lieu, d'une part dans un gros site pétrochimique très moderne, et d'autre part dans une usine de chimie de base plus ancienne, mais assez instrumentée. Cette partie se veut descriptive: que se passe-t-il durant un poste dans une unité chimique?

1. Les acteurs

L'équipe se compose d'un chef de poste, d'un opérateur tableau, et des opérateurs extérieurs. Le chef de poste est souvent secondé par un adjoint qui fait le travail d'un éventuel absent. Ce dernier est donc polyvalent. Il est notamment capable de conduire l'unité depuis les écrans. L'opérateur-tableau reste à tout moment dans la salle de contrôle face aux écrans. C'est le personnage clé de l'unité puisqu'il contrôle tout depuis son pupitre de commande. Les opérateurs extérieurs, en nombre variable, font des rondes, des prélèvements et des analyses.

Tous sont attachés à leur outil de travail et connaissent bien la réalité de l'installation (positionnement des vannes, etc.).

a. Le chef de poste

Sa première action est de "faire le point" avec son collègue du poste précédent sur l'état de l'unité à son arrivée. Il lit consciencieusement les cahiers de consignes et de suivi. La lecture s'accompagne d'une discussion avec son collègue pour clarifier certains points. Tous les opérateurs passent par la salle de contrôle, le chef de poste peut donc compléter ses informations en les interrogeant. La passation des consignes dure environ 20 minutes. A l'issue de celle-ci, le chef de poste passe en revue les écrans clés de l'unité pour "prendre le pouls" de son installation.

Les heures qui suivent sont monotones et ponctuées par des rondes. Le chef de poste ne contrôle pas tout, son expérience l'amène cependant à vérifier certains points qui lui semblent stratégiques. Il ne s'agit pas de refaire la ronde de l'opérateur extérieur. Dans les cas que nous avons vécus, le chef de poste se préoccupait notamment des démarrages de pompes et de certains matériels qu'il considérait comme étant peu fiables. Certaines rondes durent une heure, car le chef de poste se plaît à voir son unité vivre.

La monotonie du poste est interrompue par des incidents. Le chef de poste en est informé en temps réel par talkie-walkie. Il se précipite en général à la salle de contrôle avant de rejoindre la zone de l'incident si nécessaire. Son rôle est alors important: c'est lui qui est censé connaître le mieux l'unité. Il coordonne l'action des opérateurs extérieurs et peut, en cas d'incident, intervenir directement pour aider l'opérateur extérieur dans une intervention manuelle délicate. Par exemple, il aide un opérateur extérieur à déboucher une colonne bouchée... Son rôle se fait surtout sentir à l'extérieur, plutôt que près des écrans de la salle de contrôle, domaine d'action de l'opérateur tableau.

b. L'opérateur tableau

Son travail est de surveiller les écrans, et de réagir quand les automatismes ne sont plus capables de commander l'unité. Il travaille donc, non pas en actionnant directement et en permanence les paramètres du procédé, mais en réagissant lors du déclenchement d'une "alerte de seuil". Dans ce cas, le déclenchement de l'alarme ne modifie pas les réglages et n'arrête pas l'unité. C'est un signe qui prévient l'opérateur tableau d'un début de déviation par rapport au point de consigne. Il "appelle" alors les

écrans qui l'intéressent et il suit les tendances (ou "trends") pour comprendre ce qui se passe. Il réagit en modifiant certains paramètres de contrôle qui vont pallier les déviations constatées. En pratique, il y a peu d'alarmes. Cependant, certaines se déclenchent de façon récurrente: un capteur défaillant, un seuil mal établi... En cas d'incident, par contre, les alarmes se succèdent. En fait, seules sa bonne connaissance de l'unité, et son expérience, permettent à l'opérateur tableau de hiérarchiser les alarmes qui s'accumulent, et de faire rapidement un synthèse. Nous avons vu des déclenchements d'alarme avec une fréquence de dix par minute, pour un incident mineur. Les alarmes s'impriment en parallèle pour donner aux ingénieurs de production un historique des incidents. Le bruit des imprimantes est tel qu'elles ont été placées derrière une vitrine. Selon les opérateurs, des listings de plusieurs centaines de pages peuvent parfois être imprimés.

En période calme, le travail de l'opérateur tableau est assez monotone. Il ne regarde pas les écrans en permanence. Il le fait en début, en milieu et en fin de poste avec son collègue du poste suivant. Il ne doit pas bouger de la salle de contrôle. Toutefois, le chef de poste le remplace une fois par poste pour lui permettre de prendre une pause.

c. Les opérateurs extérieurs

Leur travail des opérateurs extérieurs se divise en: (i) une mission de surveillance de l'unité, (ii) des tâches spécifiques comme des prélèvements, et (iii) des interventions en cas d'incident sous le contrôle du chef opérateur.

La surveillance n'est pas permanente. Les opérateurs extérieurs ont deux à trois rondes à effectuer par poste. Elles incluent des relevés de température ou de pression. Cette tâche de surveillance est essentielle. Un opérateur extérieur a détecté une fuite dans un circuit d'eau; l'opérateur tableau n'avait pas les moyens de s'en apercevoir! Les opérateurs extérieurs n'apprécient pas de relever des valeurs qui sont par ailleurs ramenées en salle de contrôle. L'opérateur sérieux considère qu'il est pris pour un idiot à faire des relevés inutiles. L'opérateur moins consciencieux passe une seule fois par poste, relève la valeur, et la recopie 8 fois sur le cahier...

Certaines tâches restent manuelles, souvent parce qu'elles ne sont pas techniquement automatisables. Les opérateurs extérieurs font aussi des prélèvements et certaines analyses toutes les deux ou trois heures pour contrôler que la composition de certains produits reste stable.

2. Le déroulement d'un poste

a. Le calendrier de quart

Couvrir sans discontinuité les 365 jours de l'année, en tenant compte au mieux des jours de congé des opérateurs et des éventuels malades, est une opération qui nécessite six⁽⁹⁾ équipes d'opérateurs postés qui travaillent en 5*8.

Leur calendrier comprend cinq types de "journées" de travail ⁽¹⁰⁾:

- deux, ou trois, postes du matin consécutifs de 6h00 à 14h00
- trois, ou deux, postes du soir consécutifs de 14h00 à 22h00
- deux, ou trois, postes de nuit consécutifs de 22h00 à 6h00
- deux, ou trois, jours de repos consécutifs

... et le cycle recommence, à moins que l'on ne soit sur

- de un à quatre jours dit de "briseur". L'opérateur vient à l'usine, mais n'a pas de poste spécifique, il est considéré comme du personnel "flottant" qui va remplacer les éventuels malades, ou effectuer des missions particulières (ex.: repeindre un bâtiment) ou suivre des cours de formation continue.

b. Les quarts de jour

Pendant le poste de jour, le chef de poste doit assurer certaines tâches administratives. Il signe les demandes de travaux, les demandes d'intervention du service maintenance ou de sous-traitants extérieurs. Il suit ces interventions pour s'assurer qu'elles n'entraînent pas de risques pour la sécurité et le fonctionnement de l'unité.

Par ailleurs, c'est pendant les quarts de jour que les ingénieurs de production passent sur l'unité. Ils relèvent les résultats des postes de nuit et fixent les objectifs à atteindre pour les prochaines heures. Les opérateurs extérieurs sont plus sollicités du fait de l'exécution de travaux, de maintenance par exemple, qui sont effectués préférentiellement de jour.

⁹ En fait 6,6 en moyenne statistique en France

¹⁰ Le calendrier dépend en fait de l'usine. Celui-ci est un exemple particulier que nous avons vu.

c. Les quarts de nuit

Contrairement au travail de jour, l'équipe est seule. Deux ou trois nuits s'enchaînent d'affilée, la troisième est physiquement difficile. Lors de l'un de nos stages, c'est aussi durant cette dernière nuit que l'unité a eu le plus de problèmes.

Les opérateurs apprécient le travail en équipe. Ils gagnent un salaire nettement supérieur aux employés de jour. Ils peuvent aussi mener une double vie, notamment à la campagne où certains s'occupent par ailleurs d'agriculture. Tous apprécient de disposer de temps le jour pour bricoler. Toutefois, travailler la nuit ou partir travailler le matin à 4h est, de l'avis de tous, difficile.

Conclusion

Les deux stages "postés" que nous avons fait ont été pour nous l'occasion de découvrir l'univers des opérateurs de la chimie. Les équipes nous ont accueilli à la fois gentiment et simplement. Nous tenons à remercier toutes les personnes que nous avons rencontrées durant ces deux stages.

C. Un contexte favorable au développement de l'automatisation

1. Une science industrialisée

L'industrie chimique est l'application industrielle d'une science expérimentale. Le domaine de la connaissance effectivement maîtrisée est relativement limité.

a. Une certaine faiblesse des modèles théoriques

Les modèles théoriques qu'il est possible de construire ne rendent que partiellement compte de la réalité. En particulier, les phases de démarrage et d'arrêt, les incidents, et plus généralement les phases transitoires⁽¹¹⁾ sont très difficilement modélisables, et mal comprises. Dans un vapocraqueur, par exemple, il est impossible de

¹¹ Une phase transitoire est une phase avec de grandes amplitudes de variation des paramètres de conduite.

déterminer a priori toutes les formes de molécules qui seront obtenues par craquage du naphta reçu. Les variations dans la composition initiale de la charge (différentes sources d'approvisionnement) sont difficiles à prendre en compte dans un modèle théorique. Enfin, des variations de conditions climatiques extérieures influencent le comportement des unités. Par exemple, la variation de l'ensoleillement au cours d'une journée peut modifier le comportement d'une colonne de distillation. Seul l'opérateur qui connaît les réactions de son outil de travail peut adapter les paramètres de conduite en fonction de ces données extrinsèques difficiles à modéliser. C'est donc l'expérience de la conduite de l'unité qui conditionne la connaissance du procédé et, dans une certaine mesure, des réactions chimiques effectives .

b. Les limites des usines pilotes

Pour essayer d'améliorer la connaissance a priori du comportement d'une unité, il est possible de reproduire à échelle réduite les parties sensibles d'une unité (réacteur, colonne de distillation...). Cette étude permet de "dégrossir" le comportement de l'unité avant son démarrage, mais ne dispense pas d'un réglage fin à effectuer au cours de la mise en route de l'unité.

c. Les vertus de l'expérience

La spécificité de la chimie d'être une "science industrialisée" peut être perçue comme une contrainte forte: la mise au point d'une unité neuve est souvent longue et laborieuse. En revanche, cette caractéristique implique une culture de "progrès continu". Rien n'est figé: une unité est en évolution constante. Cette évolution peut être ponctuelle et résulter d'une analyse au jour le jour du comportement de l'unité. L'optimisation locale peut conduire à des progrès importants. Nous avons vu une unité qui, pour un niveau de production fixé à l'indice 100 par le "design" (la conception), fonctionne à un indice 113. Cette évolution peut aussi résulter d'améliorations plus générales du procédé issues de la recherche (mise au point de nouveaux catalyseurs) ou, de la coopération avec les unités déjà construites.

d. Un besoin d'outils d'analyse

Pour améliorer le comportement d'une unité, l'expérience quotidienne de la conduite de celle-ci en donne une connaissance intime et irremplaçable. Mais, seul l'accès à des mesures et des données quantifiées rend cette connaissance efficace. Cela favorise

donc le développement d'outils de mesure et d'analyse. L'automatisation des unités chimiques, et surtout leur informatisation, répond à ce besoin en mettant à la disposition des exploitants un outil d'analyse très puissant qui permet d'espérer des gains substantiels de productivité.

2. Une culture du danger

La notion de danger est une notion indissociable de l'activité de l'industrie chimique. Les quelques accidents récents ayant défrayés la chronique (ex.: Bhopal, Seveso, La Mède, etc.) sont là pour le rappeler. Ce danger est présent dans la nature même des produits manipulés qui peuvent être extrêmement toxiques (ex.: le chlore est létal à quelques ppm), ou explosifs (ex.: les peroxydes se décomposent dans une réaction explosive). Les procédés réactionnels peuvent aussi être dangereux car ils nécessitent souvent de hautes températures et/ou de hautes pressions (ex.: la polymérisation de l'éthylène sous haute pression).

Manipuler des produits dangereux induit une culture du danger dans l'industrie chimique. Elle se traduit, par exemple, par une volonté de sensibilisation des opérateurs: (i) une présentation des dangers potentiels des produits manipulés est faite à tous les nouveaux arrivants sur un site, (ii) le port de vêtements de sécurité est obligatoire, (iii) divers exercices de simulation sont faits au cours de l'année... Ces signes visibles créent une sensibilité à la sécurité à tous les niveaux de la hiérarchie d'une usine. Les responsables d'un site sont alors favorablement disposés vis à vis d'outils censés contrôler le danger.

3. L'influence de la pétrochimie

L'automatisation des unités chimiques a commencé historiquement par le raffinage et la pétrochimie, les vapocraqueurs en particulier. La nature de ces installations est en effet propice au développement de l'automatisation:

(i) elles fonctionnent en continu, domaine de développement par excellence des technologies de régulation. En effet, il y a moins de régimes transitoires importants et donc plus de fiabilité dans la connaissance de ces installations.

(ii) une raffinerie est très sensible aux variations de qualité du brut entrant. Il faut traditionnellement 4 heures pour la recalibrer. Or l'automatisation permet de réduire significativement cette durée.

(iii) ces installations manipulent d'énormes quantités de produits (un vapocraqueur peut fournir 500 000 tonnes d'éthylène par an) et d'utilités (vapeur, électricité) si bien que des gains de rendement faibles entraînent des économies importantes. Typiquement, pour un vapocraqueur, un point de rendement gagné en consommation de matières premières rapporte de l'ordre de 1,5 MF par an.

Dans ce contexte particulier, les apports de l'automatisation se sont traduits par des gains financiers substantiels, qui ont abaissés les temps de retour, et ont permis de justifier les investissements... pour les autres unités de la chimie. Il y a donc eu peu à peu propagation de l'automatisation aux autres secteurs de la chimie industrielle, notamment les procédés "batch" de la chimie fine.

D. Les finalités de l'automatisation.

Après avoir mieux défini ce qu'il faut entendre par le mot "automatisation", cette partie analyse les raisons, que nos interlocuteurs mettent en avant, pour justifier la mise en place d'automatismes dans les unités. Il y a une grande homogénéité dans le discours des acteurs, aussi bien les exploitants, les concepteurs d'unité que les responsables produits et qualité.

1. Augmenter la sécurité des installations

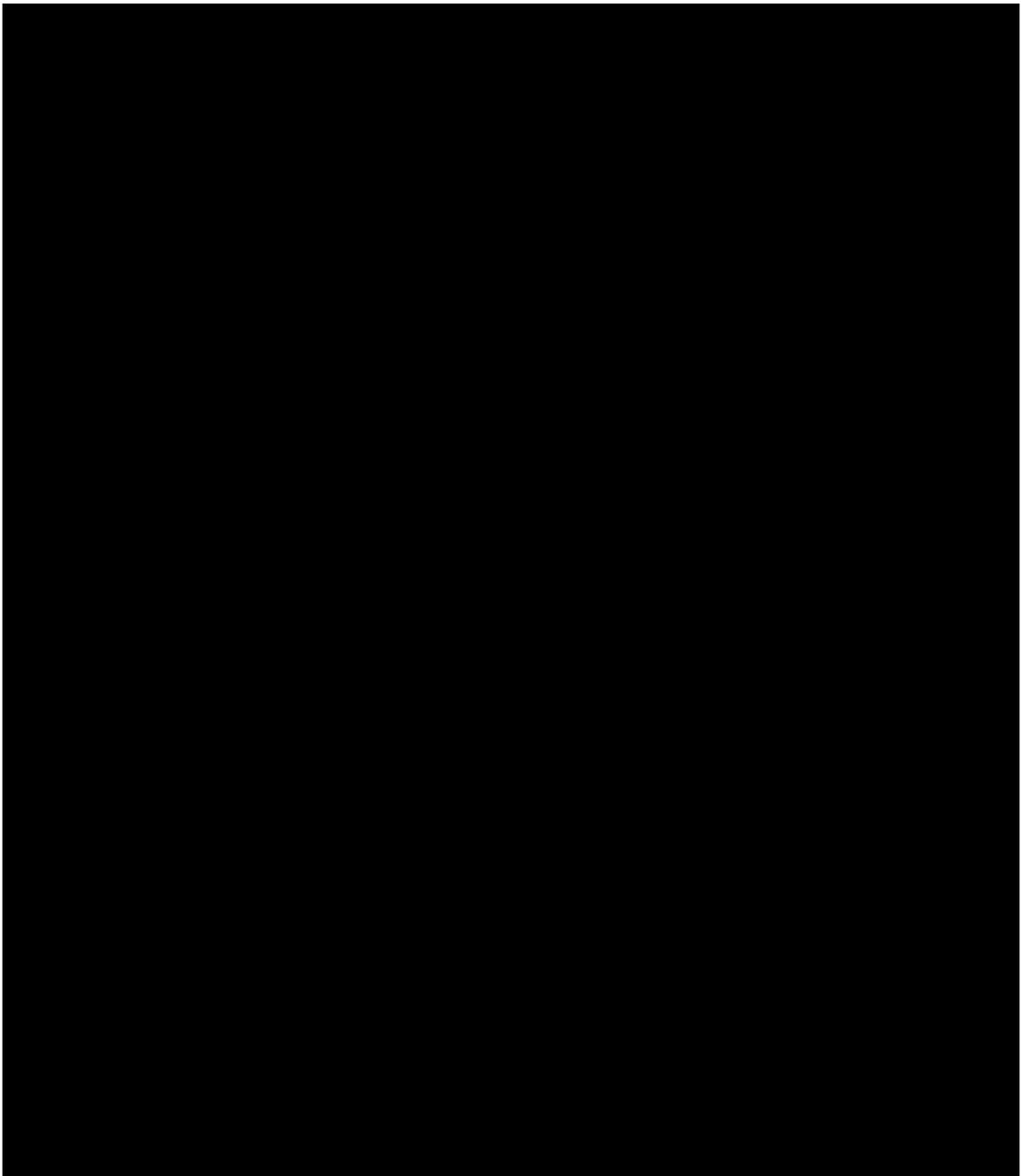
a. Maîtriser la conduite d'une unité

Le schéma de la page ci-après illustre la conception classique du système de sécurité dans une unité.

Pour chaque installation, l'étude de procédé détermine un domaine de fonctionnement autorisé défini comme le domaine représenté par l'ensemble des valeurs permises aux différents paramètres ou à leur évolution (par exemple, "rampe" de montée en température, etc.) que ce soit en fonctionnement stable ou dans les phases transitoires.

A l'intérieur du domaine de fonctionnement autorisé se trouve le domaine de fonctionnement optimal défini comme le domaine représenté par l'ensemble des valeurs

imposées aux différents paramètres pour "optimiser" un ensemble de "fonctions" déterminées lors de l'étude, comme le rendement et la qualité



Le domaine de fonctionnement autorisé est borné par une frontière définie comme l'ensemble des valeurs de chaque paramètre dont le franchissement, sans engendrer de conséquences graves pour les personnes, les biens et l'environnement, présente cependant des inconvénients comme la dégradation de la fonction économique, de la qualité, ou comme la détérioration mineure de l'équipement

Cette première frontière entraîne:

- le fonctionnement d'alarmes de premier niveau informant l'opérateur et lui permettant de prendre toutes les mesures pour ramener les paramètres incriminés à l'intérieur du domaine de fonctionnement autorisé;
- le fonctionnement d'automatismes simples sur des sous-ensembles comme les machines ou packages (ex.: mise en route d'une pompe à huile de secours pour pallier la défaillance d'une pompe attelée).

Au delà de cette première frontière, se trouve une deuxième frontière définie comme l'ensemble des valeurs dont le franchissement entraînerait des conséquences graves pour les personnes, l'environnement et les biens à protéger.

La détection de l'approche de cette seconde frontière est gérée par le système de sécurité, complémentaire et indépendant du système de conduite, qui ramène autoritairement les paramètres à l'intérieur du domaine de fonctionnement autorisé et place le procédé dans une position stable ne présentant pas de danger.

En complément du système de sécurité, et en cas de défaillance de celui-ci, un ensemble de sécurités ultimes interdisent le franchissement de cette seconde frontière (ex.: organes de protection contre les surpressions: soupapes, disques de rupture, etc.).

L'automatisation de la conduite des unités permet ainsi de maintenir l'unité de plus en plus souvent dans le domaine de fonctionnement optimal, et donc a fortiori, dans la zone de fonctionnement autorisé. Par ailleurs, la séparation du système de conduite et du système de sécurité conduit à une plus grande sûreté des installations. L'industriel met en place des automates, parfois tri-redondants, pour amener en sécurité l'installation quand un capteur de sécurité déclenche.

b. Éloigner les opérateurs

En cas d'accident, les opérateurs sont les plus exposés. Par exemple, une onde de choc a entièrement détruit la salle de contrôle d'une raffinerie lors d'un grave accident. Le plafond est tombé sur l'équipe causant la mort de plusieurs personnes.

L'automatisation permet de centraliser le contrôle d'une ou de plusieurs unités dans une salle unique placée loin des parties dangereuses de l'usine. Un directeur industriel nous a cité le cas d'une installation en Allemagne, pour laquelle la décision a été prise de placer la salle de conduite à 1 km du cœur de l'unité. Dans une autre unité

au Texas, toutes les zones d'intervention normale des opérateurs sont à l'extérieur du bâtiment, où la réaction dangereuse a lieu.

c. Connaître l'unité en temps réel

La puissance de traitement des données des nouveaux systèmes de type SNCC permet de ramener couramment plusieurs centaines de paramètres de suivi, en salle de contrôle. L'opérateur obtient quasi-instantanément la valeur d'un paramètre depuis son écran. C'est un facteur de sécurité car il peut ainsi plus facilement détecter et traiter un incident.

Suite à un accident, une unité est généralement reconstruite avec un nombre beaucoup plus important de paramètres de suivi. En effet, l'étude de l'incident montre souvent qu'un phénomène n'a pas été détecté par l'équipe de conduite. Par exemple, sur une unité avec une oxydation très exothermique, la température s'est élevée anormalement dans le réacteur. L'équipe de conduite n'avait pas les moyens informatiques de déceler l'échauffement. La température a atteint un tel niveau que le réacteur a fondu et explosé. L'unité reconstruite a été dotée d'une trentaine de capteurs de température tout au long du réacteur.

d. Un exemple de prise en compte de la sécurité dans le choix du système de conduite

Un défaut dans le système de conduite d'une unité dangereuse (i.e. la défaillance d'une carte de configuration) et la mauvaise réaction de l'équipe avaient conduit à la destruction de l'ensemble de l'installation et entraîné le décès d'un opérateur. L'unité reconstruite est plus instrumentée. Sur l'ancienne unité, les équipes procédés avaient prévu 30 capteurs de suivi; la nouvelle unité en compte entre 300 et 400, avec 150 alarmes. Un système SNCC est installé. Par ailleurs, un automate gère indépendamment du système de conduite les alarmes de sécurité. Il y a beaucoup plus de moyens automatiques pour pallier les erreurs humaines.

2. Diminuer les effectifs.

D'après nos interlocuteurs, la volonté de diminuer les effectifs est à l'origine de la stratégie d'automatisation de l'industrie chimique française.

a. Impact macroéconomique

La courbe ci-après montre une baisse de 1% par an en moyenne des effectifs de la chimie française depuis 1980. Parallèlement, sur la même période, le volume de production a augmenté de 3,4% en moyenne annuelle. Les gains de productivité réalisés sont importants et réguliers. Ils sont vraisemblablement en grande partie attribuables à l'automatisation des unités.

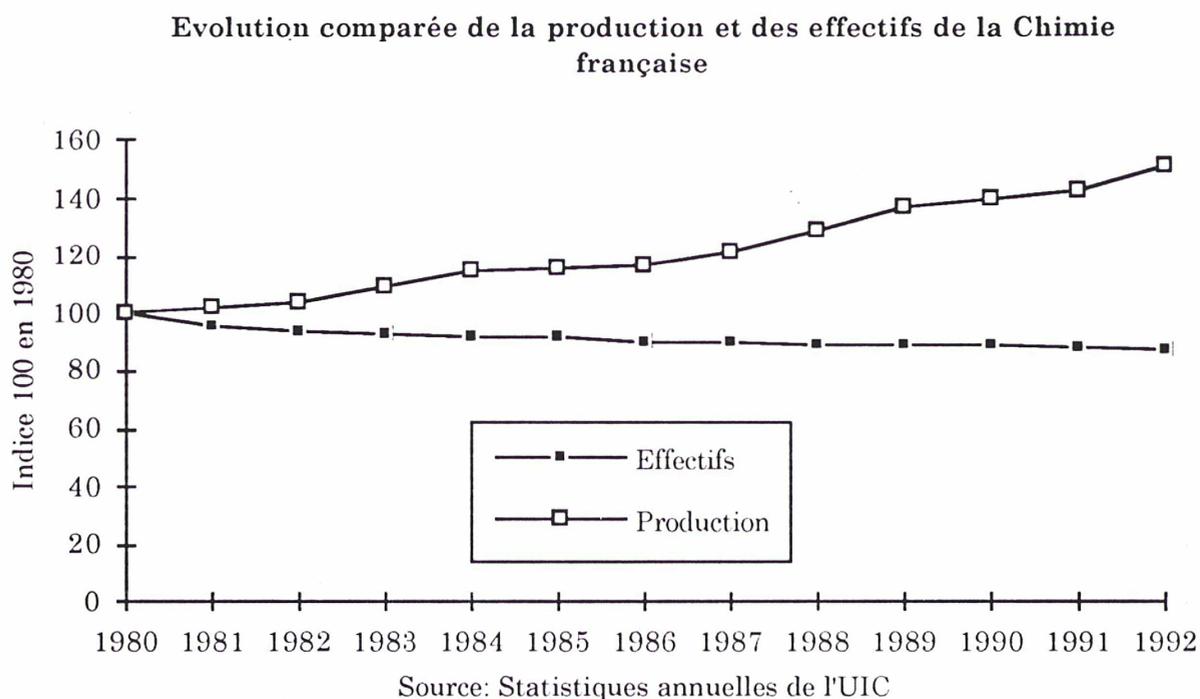


Fig. 7 - Évolution des effectifs de chimie

Source: Statistiques annuelles de l'Union des Industries Chimiques

b. Diminuer les charges de personnel

Automatiser revient à diminuer le nombre d'interventions manuelles, donc à diminuer le personnel, comme le montrent les deux exemples concrets ci-dessous que nous avons eu la possibilité d'étudier.

Exemple 1: Une réorganisation d'ateliers

Analysons les réorganisations d'un atelier contenant trois unités, notées dans la suite A1, A2 et A3, conduisant à des diminutions d'effectifs.

- Avant 1991, A1 et A2 sont déjà en conduite centralisée. Un opérateur tableau conduit A1 et A3. Un autre à la charge de l'unité A2. Chaque unité a un opérateur extérieur. Enfin, un aide opérateur complète l'équipe.

- En 1991, le poste d'aide opérateur est supprimé, ce qui représente un gain de (6 équipes) \times (160 par aide opérateur). L'unité de calcul est l'indice de salaire de l'industrie chimique. Par contre, il reste toujours trois opérateurs extérieurs, leur polyvalence est augmentée, ce qui est accompagné par un surcoût de prime de 6×25 .

En 1991, le bilan s'établit donc à $6 \times 25 - 6 \times 160 = -810$.

- En 1992, l'atelier est maintenant totalement centralisé: un seul opérateur tableau contrôle l'ensemble A1, A2 et A3. Son coefficient est de 215. Deux postes d'opérateur tableau sont supprimés.

En 1992, le bilan s'établit comme suit: $7 \times 215 - 6 \times 200 - 6 \times 202$, soit **-907**.

Suite à cette réorganisation, cinq personnes se sont retrouvés sans affectation. Elles ont été replacées de la façon suivante:

- Deux employés à haut potentiel sont replacés sur des unités plus complexes
- Un opérateur de 58 ans quitte l'usine,
- Un opérateur est affecté au service expédition,
- Un autre rejoint le service environnement.

Cet exemple amène deux conclusions. D'un côté, l'automatisation conduit à la diminution des effectifs par le regroupement de salles de contrôle. D'un autre côté, les syndicats acceptent la suppression de postes mais la négocient, notamment en terme d'augmentation d'indice.

Enfin, remarquons que la diminution du coût du travail sur cette unité ne peut pas justifier, à elle seule, l'investissement en automatisation. La réduction des effectifs fait économiser environ 1 million de francs par an, mais nécessite un investissement de 10 millions de francs. La justification de l'investissement est double: d'une part la

stabilisation du procédé et l'obsolescence des matériels en place, et d'autre part la diminution du coût du travail.

Exemple 2: Comparaison de deux ateliers "batch"

La courbe ci-après compare, pour deux unités équivalentes, le nombre d'heures nécessaires pour la production d'un même lot (procédé "batch"). L'une des unités est automatisée par étapes successives, l'autre conserve le même niveau de technologie de commande. Partant toutes les deux d'un indice 100 en 1988, l'unité modernisée produit un lot en 1992 avec un indice 62 contre 86 pour l'unité laissée en l'état. L'automatisation amène donc, dans ce cas particulier, des gains de productivité importants.

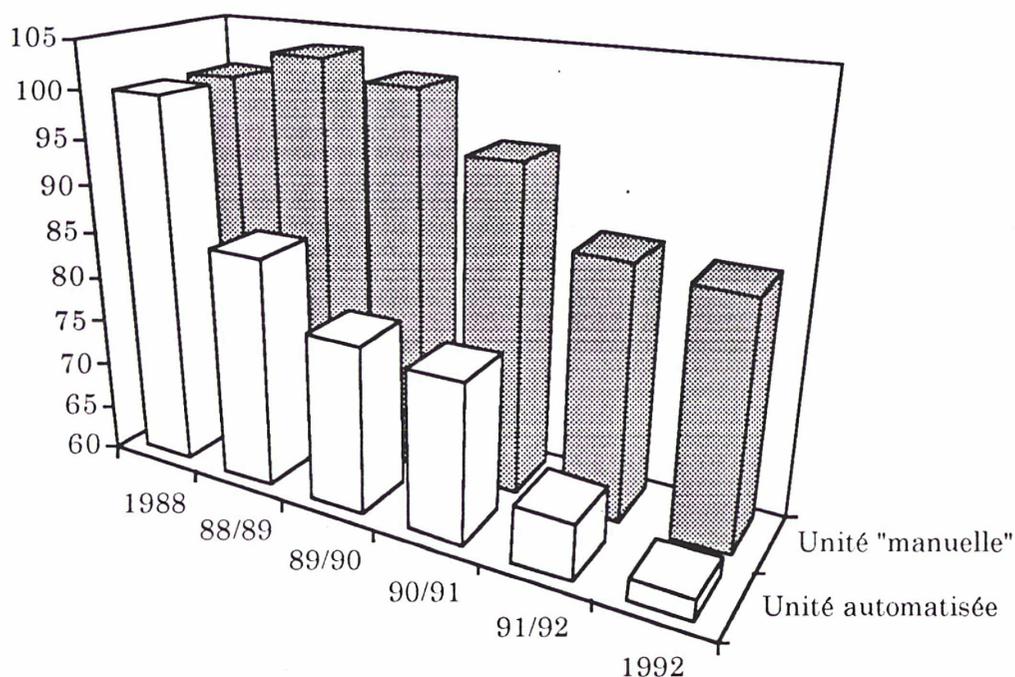


Fig. 8 - Comparaison des unités d'oeuvres nécessaires pour la production d'un même lot sur deux unités de même procédé

c. Une volonté de diminuer les interventions humaines

Les dirigeants de l'industrie chimique française ont le sentiment que le facteur humain était le "maillon faible" d'une unité. C'est la raison qu'ils mettent en avant pour expliquer la stratégie d'automatiser au maximum les usines en France. Ce sentiment ne

repose pas uniquement sur des considérations économiques de coût de la main d'œuvre. Il peut être illustré sur les exemples suivants:

- "Les systèmes informatiques conduisent mieux une installation qu'un homme" nous a expliqué un responsable d'instrumentation d'un gros site pétrochimique. Il a rajouté: "80 à 90 % des accidents sur des unités sont dûs à des erreurs humaines". D'autres rajoutent: "les machines, elles, ne se mettent pas en grève!".

- Commentant le refus très général de donner des tâches de maintenance de premier niveau aux opérateurs de conduite, un responsable met en avant la responsabilité des syndicats. Selon lui, les représentants syndicaux se battent pour maintenir une "hyper-segmentation des tâches". Pour eux, l'opérateur de fabrication ne doit pas faire de maintenance.

- Les responsables d'unité craignent parfois de demander plus aux équipes car tout se monnaie. "Installez une salle de contrôle centralisée confortable avec des écrans... Les syndicats sont d'accord, mais s'empressent de demander une prime informatique...".

Il est assez difficile de juger de la pertinence de ces propos dans l'absolu, mais la comparaison que nous avons menée sur les différences franco-américaine dans les choix d'automatisation des unités, semble confirmer au moins en partie cette impression. (voir Chapitre 3, Partie A, *Le modèle américain*). Ce sentiment critique des responsables par rapport aux interventions humaines est un facteur puissant qui explique sans doute, dans une certaine mesure, le degré d'automatisation dans les usines chimiques françaises.

3. Améliorer les rendements

a. Mieux garder une consigne

La conduite des unités est de plus en plus complexe. Il s'agit d'optimiser le procédé avec des charges dont les spécifications peuvent varier très vite, et avec des produits finaux de plus en plus diversifiés. Garder une consigne demande des réglages de tous les instants, ce qu'un opérateur ne peut pas humainement faire. La régulation est

un moyen très efficace pour maintenir les paramètres clés du procédé dans un domaine resserré autour des valeurs désirées, et donc d'obtenir des rendements meilleurs.

Le schéma ci-après constitue un exemple remarquable d'optimisation de rendement permise par un investissement en automatisation. Il s'agit d'une unité de chimie fine où les responsables de fabrication constataient des variations importantes de la taille des "batch". En 1989, la moyenne des lots s'élevaient à 485,2 kg, avec une très grande dispersion entre les productions. Suite à la mise en place d'un système de conduite élaboré, l'usine réussit à augmenter la taille des lots produits, de 9% en moyenne, et à diminuer la dispersion des lots.

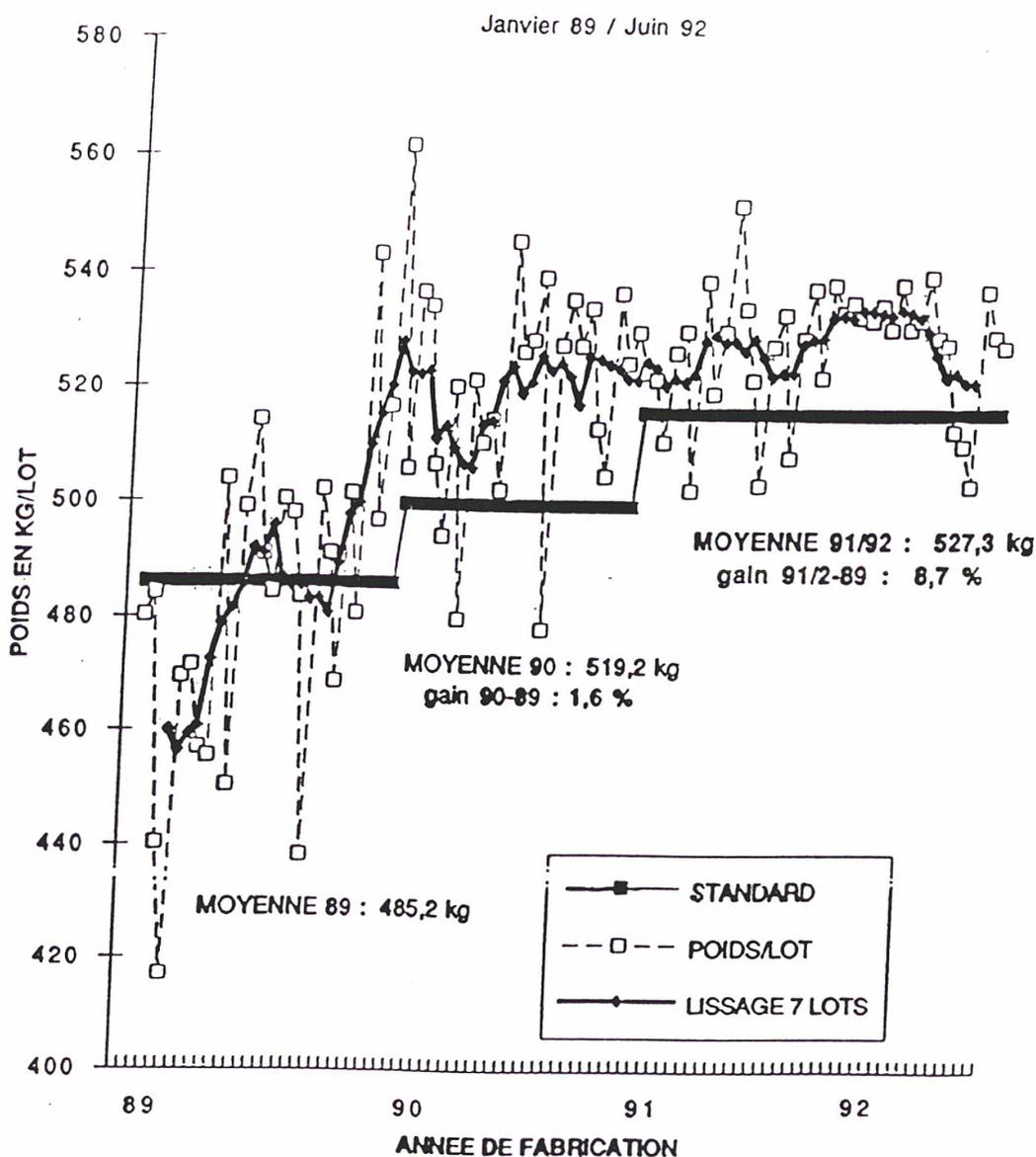


Fig. 9 - Évolution de la taille des lots produits, suite à un investissement d'automatisation fin 89

b. Les historiques (terme consacré: "trend")

Les systèmes permettent aussi de suivre les variations d'un paramètre dans le temps. Cet outil aide à mieux comprendre les mécanismes de l'unité, et donc à améliorer ses performances. Les opérateurs s'en servent durant leur poste pour suivre les déviations à court terme de l'unité, par rapport au fonctionnement normal et connu. Mais, ces historiques sont rarement utilisés dans le cadre d'analyses à moyen terme pour mieux comprendre les mécanismes de fond et faire des propositions d'amélioration.

4. Améliorer la qualité

a. Rester plus proche des spécifications

Les nouveaux systèmes conduisent les unités au plus près des spécifications du procédé. La régulation permet de mieux stabiliser l'unité autour des valeurs de consigne. Par ailleurs, la reproductibilité d'un procédé est mieux assurée par des moyens automatiques, que par des interventions humaines.

Par exemple, un investissement en automatisation d'une unité de synthèse organique est décidé en 1991, car le nombre de lots refusés par les clients est compris entre 30 et 40 par an. En 1992, ce nombre passe à 10, et se stabilise à 2 ou 3 par an, à partir de 1993. L'exploitant explique cette amélioration par la meilleure reproductibilité des actions de dosage et de montée en température du réacteur.

Les produits finaux sont donc a priori plus proches des spécifications commerciales qu'avant. C'est d'autant plus important que les clients demandent des marges de tolérance autour des spécifications de plus en plus faibles. Les exploitants se plaignent même parfois de ne pas être capables de produire ce que les commerçants vendent aux clients: " Nos commerçants promettent des performances que certaines de nos unités, notamment les plus anciennes, ne sont pas capables de faire. Souvent, il ne s'agit pas vraiment d'une demande commerciale, mais d'une surenchère qui permet à nos commerçants de ne pas baisser les prix."

b. Une exigence de traçabilité

Dans le cadre d'actions d'assurance qualité, les clients imposent aux chimistes de leur communiquer, pour chaque lot livré, la valeur mesurée de certains paramètres clés du procédé. C'est en particulier le cas de la FDA (Federal Drug Administration) qui impose à l'industrie pharmaceutique des exigences de traçabilité très fortes. Les outils d'acquisition et de traitement de données des nouveaux systèmes de conduite permettent de répondre à cette exigence à un coût acceptable.

5. Améliorer l'ergonomie et les conditions de travail

a. Automatiser les actions pénibles

La mécanisation d'une vanne difficile à manipuler constitue sans conteste une amélioration sensible des conditions de travail. Certains éléments, par exemple ceux placés en hauteur, sont difficilement accessibles. Les mécaniser améliore donc la sécurité. Un contre exemple le montre: dans une unité de chimie de base très automatisée que nous avons visitée, la plupart des vannes étaient mécanisées. Durant notre passage, une colonne s'est bouchée au niveau d'un plateau situé à mi hauteur. Il a fallu injecter de l'azote sous pression pour la déboucher. A cette fin, le chef de poste et un opérateur extérieur ont dû prendre une échelle pour atteindre la zone en question. Cette opération, vécue en situation dégradée, serait probablement trop pénible et trop dangereuse si les opérateurs devaient la faire en marche normale.

b. Hygiène industrielle: l'exposition aux produits dangereux

La prise répétée d'échantillons par un opérateur le conduit parfois à inhaler des produits. Par exemple, dans une unité où nous avons suivi un poste, certains prélèvements de produits se font par un petit robinet. Il se dégage de la vapeur, en plus du liquide destiné à être analysé. Les inspecteurs du travail exigent donc que l'industriel prenne toutes les mesures pour éviter les contacts de l'opérateur avec les produits dans l'unité. L'automatisation de certains prélèvements doit donc être rendu obligatoire, si les produits sont dangereux.

6. Répondre à un besoin de flexibilité

La demande commerciale est de plus en plus fluctuante, tant en quantité qu'en diversité. Les unités doivent gagner en flexibilité, ce qui est d'autant plus difficile que les unités chimiques sont souvent conçues pour fonctionner à une capacité donnée. Faire marcher un vapocraqueur à 80% de ces capacités n'est pas chose facile, il faut revoir tous les paramètres.... Les opérateurs ont d'autant plus de mal à connaître leurs unités, qu'ils doivent les conduire dans différentes configurations. Pour certains de nos interlocuteurs, l'automatisation est une réponse au besoin de flexibilité des entreprises chimiques. De nouvelles unités sont construites pour être flexibles. D'autres personnes, au contraire, considèrent qu'une unité automatisée fige le procédé au niveau de connaissance acquis au moment de l'automatisation et qu'il est très difficile de faire évoluer l'installation au fur et à mesure des améliorations.

E. Conclusion

Les usines chimiques françaises sont déjà largement automatisées et les apports de l'automatisation font l'objet d'un large consensus parmi les différents acteurs. L'objet de ce mémoire n'est donc pas de savoir s'il convient, ou non, d'automatiser les unités chimiques, mais plutôt de porter un regard critique sur les conséquences de l'automatisation.

Chapitre 2

Les effets pervers de l'automatisation

- A. Conséquences sociales du nouveau métier de conduite
- B. Quelques effets pervers en matière de sécurité
- C. Des coûts d'investissement élevés

Automatiser une usine chimique, ce n'est pas seulement introduire un nouvel outil de travail, c'est aussi modifier profondément le métier de la conduite des installations, en introduisant un certain nombre de ruptures d'ordre social. Par ailleurs, l'analyse de l'impact de l'automatisation sur une usine chimique met en évidence des effets pervers concernant la sécurité des installations. Enfin, une sur-automatisation alourdit des coûts d'investissement sans retour financier réel.

A. Conséquences sociales du nouveau métier de conduite

Les formes les plus récentes d'automatisation passent par l'installation de Systèmes Numériques de Contrôle Commande (SNCC) et donc, nécessairement, par la mise à disposition des opérateurs d'un outil informatique.

1. Une adaptation inattendue à l'ordinateur

Les effets sociaux induits par l'introduction de l'informatique dans les salles de contrôle ne concernent pas d'éventuelles difficultés d'adaptation à l'outil informatique en tant que tel, comme l'on pouvait le craindre lors de l'installation de ces outils. Certes, une période d'adaptation, plus ou moins longue selon l'âge des individus et la familiarisation à l'informatique, a été nécessaire, mais en moyenne celle-ci s'est faite sans trop de difficultés et rares sont les opérateurs qui ne se sont pas adaptés à l'informatique. Au contraire, l'outil informatique intrigue et attire plus qu'il ne repousse.

En fait, cette transition semble avoir été préparée avec soin par des campagnes de sensibilisation et de formation nombreuses. De même, les études ergonomiques des synoptiques ont été faites dans un souci de simplicité, en collaboration avec des opérateurs, et avec une volonté permanente de transcrire le plus fidèlement possible la réalité des procédés.

Les ruptures induites par l'informatique concernent plutôt la redéfinition des tâches, et les modifications de l'espace de vie et des relations entre individus .

2. Une modification sensible de l'environnement de travail

La mise en place d'un SNCC fait de la salle de commande le point névralgique et central de l'installation. Les opérateurs se trouvent rassemblés autour de l'outil informatique, dans une salle conviviale et confortable qui n'a plus rien à voir avec les

anciennes et austères salles de contrôle et leurs immenses panneaux muraux. Les consoles ont remplacé les enregistreurs papiers. L'ergonomie des salles a été travaillée de sorte que les opérateurs s'y trouvent à leur aise. Que l'on ne soit pas surpris si l'on y trouve parfois un grand aquarium, ou un poste radio diffusant une musique douce... Les salles de contrôle sont en effet, surtout pour les postes de nuit, de véritables lieux de vie.

A leur aise dans des salles de contrôle, les opérateurs sont, de manière bien compréhensible, peu enclins à sortir à l'extérieur pour y effectuer leurs rondes. Par ailleurs, pourquoi prolonger une ronde puisque de toutes façons les capteurs centralisent en salle de contrôle les éléments clefs de sécurité? C'est un premier facteur important de distanciation de l'opérateur à l'unité qu'il surveille.

3. Des modifications de statuts

L'équipe conductrice se resserre autour d'une microstructure (1 chef opérateur, 1 opérateur tableau, 2 ou 3 opérateurs extérieurs) au sein de laquelle apparaît un acteur au pouvoir grandissant, l'opérateur tableau.

a. Le déclin du rôle du chef opérateur?

Avant l'informatisation, le chef opérateur tirait sa légitimité d'une bonne maîtrise technique de la fonction de régulation ainsi que des procédés chimiques employés sur son unité. Dans un ensemble automatisé, il a dû rencontrer les mêmes difficultés d'adaptation que son opérateur tableau au nouvel outil informatique. Pratiquant moins, sa connaissance du fonctionnement du SNCC est moins sûre que celle de l'opérateur tableau.

En fait, le travail de surveillance du chef opérateur est désormais réduit en nature et en prestige. Alors qu'auparavant il pouvait superviser la conduite des opérations en un seul coup d'oeil au panneau mural regroupant les quelques enregistrements clefs, il doit à présent s'installer à une console, aux côtés de l'opérateur tableau, et "appeler" comme lui les synoptiques qui lui permettront de connaître l'état du système. Il y a donc une tendance à la perte de la vision d'ensemble qu'il pouvait avoir de l'unité, et une banalisation de son rôle de contrôle.

Compensant cette diminution de son activité de contrôle, le chef opérateur voit en fait son activité passer à celle d'animateur et de coordonnateur. Il est toujours chargé de la gestion de son équipe, mais les modalités de cette gestion changent de nature. C'est à

présent un animateur qui doit veiller à relancer la fonction de vigilance de son équipe (prévention, rapidité et précision de réaction).

b. la prééminence de l'opérateur tableau

En pratique, c'est l'opérateur tableau qui pilote seul l'unité. Il contrôle les paramètres régissant la marche de l'installation et il est chargé de veiller à la performance technique de l'installation en recherchant une optimisation locale des conditions d'exploitation. Il coordonne souvent l'action des opérateurs extérieurs en lieu et place du chef de poste. Ainsi peut-il avoir l'apparence d'être seul maître à bord. Sans doute est-il quelque peu frustré face à son chef de poste qu'il accuse de moins bien connaître l'outil informatique que lui et donc par assimilation (abusive?) le fonctionnement de l'unité. Cette frustration est attisée par l'écart de rémunération entre les fonctions (de l'ordre de 30%).

c. Le cas des opérateurs extérieurs

Finalement, les opérateurs extérieurs ne voient pas leur statut amélioré du fait de l'informatique, au mieux conservent-ils leurs tâches manuelles en extérieur. Leur espoir d'amélioration de statut ne peut venir que d'une plus grande mobilité entre opérateurs extérieurs et opérateurs tableaux. C'est dans cette optique qu'ils essaient de se familiariser avec l'outil informatique.

Le personnage central de la nouvelle salle de contrôle est donc l'opérateur tableau. Quel a été l'impact de l'informatisation des unités sur son mode de travail?

4. Conséquences d'une redéfinition des tâches

L'opérateur ne commande plus directement des actionneurs, mais il "contrôle des contrôles" depuis une salle éloignée. Il n'intervient plus que pour un dérèglement de l'unité. Une de ses principales qualités consiste à être capable de réagir rapidement et établir un diagnostic à partir des éléments qu'il peut observer. Cette redéfinition de tâches n'est pas exempte de conséquences qui peuvent parfois être négatives.

a. Le stress du travail à l'alarme

La mise en place d'un outil informatique donnant sous forme numérique les résultats des capteurs, et gérant automatiquement un certain nombre de boucles de régulations, change le travail de l'opérateur tableau. Il passe d'un système où il était actif (déplacement physique devant les tableaux) et gérait ses consignes à la tendance (observation des dérivations progressives sur des enregistreurs à plume) à un système passif, où il réagit à l'alarme (mise en attention de l'opérateur quand les cotes de première alerte sont dépassées). Ce travail à l'alarme introduit une forme de stress persistante dont se plaignent les opérateurs tableaux. Pour lutter contre l'attente de l'alarme, ils passent en revue les trends d'évolution des principales variables mais la multiplicité du nombre des alarmes possibles rend cette détection parfois peu utile. Rares sont les cas où un opérateur tableau peut faire ce travail prédictif, avant le déclenchement de l'alarme.

Enfin, quand une alarme retentit, il faut savoir rapidement ce que son code signifie, comprendre pourquoi elle a sonné et évaluer son importance...

b. Réalité virtuelle et distanciation

Un facteur important de distanciation résulte de l'utilisation de l'informatique comme moyen de surveillance de l'unité. En effet, en période de marche normale, l'opérateur tableau fonde ses actions sur les éléments qui lui sont transmis par informatique. Il y a recréation informatique d'une réalité virtuelle. Il en résulte pour l'opérateur un transfert de réalité entre l'unité physique et celle sur synoptiques: gérer l'unité devient gérer des éléments numériques dont la matérialité est lointaine physiquement et intellectuellement. Ainsi un opérateur tableau avoue-t-il ne pas savoir où se situe exactement la vanne qu'il est en train de commander. A la limite, il commande un jeu vidéo, pas une unité de chimie.

De cette distanciation résulte une perte du savoir faire intuitif de l'opérateur. Il ne se déplace plus sur l'unité, ne connaît plus intimement et physiquement les réactions de son unité à une opération quelconque. L'ouverture manuelle brusque d'une vanne par exemple peut provoquer un coup de bélier; un certain tour de main est parfois nécessaire pour conduire l'unité en douceur. En revanche, l'opérateur tableau apprend un autre savoir-faire, celui de la manipulation d'éléments numériques dont la réalité sous-jacente peut être oubliée. En cas de marche normale, tout va bien. Que se passerait-il en cas de dysfonctionnement? L'analyse de ce point sera faite dans paragraphe *Les conséquences d'un trop grande distanciation*, Chapitre 2, Partie B.

c. Changement de variables et nivellement de la conduite

La numérisation permet de gérer un plus grand nombre de boucles de régulations sans la limite physique qui existait avec les tableaux pneumatiques. La nature même des boucles que l'opérateur doit réellement gérer change. Les étapes à dynamique rapide sont à présent commandées par ordinateur. Seules les boucles à dynamique plus lente, souvent plus complexes, restent du domaine d'intervention de l'opérateur.

Par ailleurs, l'étude de l'agrégation des niveaux de commande a permis de montrer que l'automatisation amène un transfert de niveau de commande de l'unité. On ne demande plus seulement à l'opérateur de réguler des conditions opératoires (températures, débits, pression, ouverture de vannes...) comme par le passé, mais également des variables de structure comme la qualité d'un produit, ou le rendement de l'unité.

Il y a donc parallèlement à une augmentation de niveau de commande une augmentation de la durée caractéristique des actions de l'opérateur. Le résultat d'une modification se fera sentir à moyen terme et peut-être au delà de la durée de son poste. L'opérateur ne voit plus l'effet en temps direct des modifications de consigne qu'il passe. Cela pose par ailleurs des problèmes de communication entre les postes et nécessite une passation de consignes plus approfondie. On peut noter que cela implique également une certaine uniformisation de la commande de l'unité, et donc nécessairement un nivellement de la conduite de l'unité. En effet, le comportement in fine de l'unité est la résultante des actions menées par des opérateurs sur plusieurs postes. Pour qu'une action soit pérennisée, il faut que les opérateurs tableau successifs ne modifient pas à leur fantaisie les paramètres qui la composent, et donc qu'ils en aient compris les différents éléments. Cela implique que l'on formalise plus les procédures, et que l'on forme mieux les opérateurs.

d. Des exigences accrues de formation

L'introduction de l'outil informatique dans les salles de commande et les effets mis en avant dans les paragraphes précédents soulignent de manière singulière une nouvelle exigence de formation, tout d'abord à la manipulation d'ordinateurs. Les ouvriers de la chimie ne sont pas a priori familiarisés avec cet outil. Les efforts d'ergonomie réalisés dans la conception des logiciels facilitent cependant cet apprentissage.

Mais plus que la familiarisation avec l'outil informatique, le véritable enjeu consiste à former les opérateurs à la manipulation de concepts formalisés et abstraits. La réalité matérielle des objets numériques qu'ils manipulent est plus éloignée que par le passé. Ouvrir physiquement la vanne d'alimentation du réacteur en vapeur d'un quart de tour ou faire augmenter de 0,31 à 0,56 le paramètre repéré X954 sur le synoptique nécessite une capacité d'abstraction qui n'est pas immédiate. De même, savoir que l'augmentation de 2% de la vanne commandant le circuit de chauffage de la colonne de distillation se traduira dans quelques heures par l'augmentation du niveau du ballon de condensation en tête de colonne nécessite une bonne connaissance du procédé. En fait, les ouvriers de la chimie sont dans une certaine mesure habitués à cette gymnastique intellectuelle puisque, traditionnellement, ils manipulent les conditions opératoires de produits qui leurs sont invisibles.

Exigence de formation continue enfin. L'apparente simplicité d'utilisation des SNCC, et le fait, qu'en pratique, les ordinateurs contrôlent la bonne marche de l'unité pourrait faire oublier une exigence de formation continue des opérateurs tableaux, d'autant plus qu'ils semblent être à leur aise dans la marche courante de l'unité. Les distanciations mises en évidence dans les paragraphes ci dessus (perte de contact avec la matière, réalité virtuelle) impliquent nécessairement une perte de la mémoire pratique du procédé. C'est en cas de panne que l'on a besoin de l'opérateur tableau. Il doit être capable de formuler un diagnostic à partir des éléments fournis par le système. Pour cela, il doit être entraîné à réagir rapidement. De même, en cas de nécessité d'une reprise en conduite "manuelle", l'opérateur ne doit pas avoir oublié les mécanismes et les réflexes d'une telle conduite, il doit être formé dans cette optique⁽¹²⁾.

5. Recrutement et carrière

La spécificité de l'outil informatique demande de la part des opérateurs des capacités de conceptualisation et d'abstraction plus importantes que par le passé. Des qualités intellectuelles plus développées, ou une facilité d'adaptation rapide à

¹² Sachant qu'il est pratiquement impossible de construire des simulateurs de conduite pour les unités chimiques, le meilleur moyen de conserver la mémoire d'un savoir faire pratique est en fait de conserver des tâches manuelles pour les opérateurs, selon l'approche suggérer au Chapitre 3

l'informatique, sont alors exigées. La politique de recrutement des ouvriers de la chimie peut s'en trouver modifiée.

a. Quel avenir pour de jeunes ouvriers désabusés?

Lors de la construction d'une nouvelle unité informatisée, le directeur d'une usine n'a souhaité embaucher que des jeunes ouvriers de la chimie, ayant obtenu le Certificat d'Aptitude Professionnelle de Conduite des Installations Chimiques, pour remplir les rôles d'opérateur (mixte tableau et extérieur). Naturellement familiarisés avec l'informatique, ils n'ont bien sûr eu aucun mal à s'adapter à cet outil. C'était un des buts recherchés.

Le contremaître de l'unité nous a confié sa déception face à l'attitude de ces jeunes embauchés. Après deux ans d'expérience, ils sont lassés par leur travail et se disent démotivés. Ils se cantonnent dans leur rôle de surveillance lointaine de l'unité depuis la salle de contrôle et ne sont pas intéressés par l'apprentissage intime du fonctionnement du procédé chimique. Par ailleurs, ils n'ont pas su établir la relation affective avec leur unité que les anciens avaient su établir en leur temps avec l'unité qu'ils conduisaient plus manuellement.

Ils se montrent pourtant impatients. Après avoir rapidement "fait le tour" de la fonction d'opérateur tableau, ils revendiquent des prises de responsabilités supérieures. "Ils veulent tout et tout de suite". Ils se démarquent encore ainsi de leurs aînés qui avaient suivi une lente progression de carrière et pour lesquels un poste d'opérateur sur une unité informatisée est un aboutissement, souvent une fin de carrière. Pour les jeunes embauchés, il n'existe en revanche aucun prestige particulier à travailler avec des ordinateurs.

Peu motivés par leur travail, sans les connaissances requises pour prétendre à des postes d'encadrement à terme, quelle est leur place dans l'usine? Comment les remotiver?

b. Des BTS enfermés dans leur statut de technicien

Pour satisfaire les exigences accrues de niveau de formation, il est également possible d'embaucher des jeunes diplômés, typiquement des techniciens de niveau BTS. Ceux-ci ont en effet de bonnes facilités d'adaptation, et d'assimilation des nouvelles fonctions qui sont les leurs. De plus, contrairement au cas des jeunes ouvriers de la chimie décrits ci-dessus, les jeunes BTS ont une maîtrise des procédés chimiques

suffisante pour pouvoir prétendre à des postes d'encadrement. En revanche, les usines ayant eu recours au recrutement systématique de BTS, se trouvent bloquées par le développement de carrières à leur offrir. En effet, les perspectives qui leur sont offertes sont limitées à la fois par le profil et par la hauteur de la pyramide des niveaux hiérarchiques qui leur sont accessibles.

Limitation en profil tout d'abord. Les BTS sont systématiquement embauchés à la base comme opérateurs de façon à ce qu'ils puissent doubler leur savoir théorique d'une bonne connaissance pratique des unités. Attachés à leur statut de technicien, ils ne veulent considérer ce travail d'opérateur que comme temporaire et transitoire, même si l'étendue du champs d'activité potentiel d'un opérateur tableau laisserait libre cours à la valorisation de leur savoir de technicien (analyse des conditions d'exploitation, recherche d'amélioration par étude méthodique des éléments d'analyse chiffrés fournis par le SNCC). Cependant, les postes d'encadrement à pourvoir sont moins nombreux que les postes d'opérateurs pourvus et certains BTS se voient donc cantonner pendant de longues années dans un rôle d'opérateur qui ne correspond pas à leurs attentes. Il s'en déduit une perte de motivation certaine et la recherche d'une valorisation de leur diplôme dans d'autres secteurs industriels.

Par ailleurs, la hauteur de la pyramide des niveaux hiérarchiques qui leurs sont offerts est limitée par ce même statut de technicien. Les meilleurs d'entre eux, ceux qui ont eu une progression de carrière correspondant à leurs attentes (passage rapide à des postes d'encadrement), sont bloqués hiérarchiquement au bout d'une dizaine d'années par ce statut de technicien dont ils ne peuvent sortir que s'ils sont cadrés, ce qui est rarement le cas. Ils ont moins de trente cinq ans et peu de perspectives devant eux. Quelle carrière leur offrir? C'est un phénomène qui n'est pas propre à la chimie et qui marque la limite de la formation BTS. Par rapport aux opérateurs, leur formation leur fait gagner une quinzaine d'années de carrière, avantage qu'ils ne peuvent exploiter une fois qu'ils ont atteint le sommet hiérarchique auquel ils peuvent prétendre.

6. Conclusion

L'automatisation des unités chimiques entraîne donc de multiples ruptures sociales et porte en germe des conflits, ainsi qu'un risque d'une certaine démotivation des opérateurs. Former, remotiver et communiquer sont donc des impératifs qui prennent un jour nouveau à l'heure de la modernisation des unités.

B. Quelques effets pervers en matière de sécurité

La nature dangereuse des produits utilisés pose avec une acuité particulière le problème de l'automatisation des unités chimiques. Dans le Chapitre 1, Partie D, le paragraphe *Augmenter la sécurité des installations* a montré comment l'automatisation est, a priori, une source supplémentaire de sécurité. Cependant, parce qu'elle bouleverse le métier de conduite des unités, l'automatisation induit aussi des effets pervers dont il convient de prendre la mesure. Il est possible de distinguer deux types de facteurs qui concourent à augmenter le risque des unités.

1. Des facteurs de risques liés aux techniques employées

Aux risques propres au génie chimique, s'ajoutent les défaillances potentielles des nouveaux systèmes de conduite numériques.

a. Des technologies sensibles

Entièrement dépendante de son alimentation électrique, une unité automatisée est extrêmement sensible aux coupures et micro-coupures qui peuvent survenir. C'est alors pour les salles de contrôle la peur de l'écran noir et du pilotage en aveugle des unités. Si ces phénomènes sont de faible occurrence et si des moyens de secours sont mis en place pour palier une panne du réseau E.D.F. (onduleurs...), la gravité potentielle d'un tel incident mérite qu'il soit mentionné.

La micro-informatique est par nature fragile. De ce fait, elle a rendu les unités très sensibles à différents problèmes comme les phénomènes de surtension, etc. Les conditions climatiques (humidité, orages...) peuvent, par exemple, gravement endommager des cartes électroniques et rendre inopérantes les commandes.

Enfin, la connaissance de l'état dans lequel se trouve l'unité est exclusivement dépendante des capteurs qui envoient en permanence des informations vers les salles de contrôle. Privée de ses capteurs, une salle de commande est aveugle. De même, si le système leur transmet une fausse image de l'état réel de l'unité, les opérateurs seront amenés à prendre une série d'actions cohérentes avec cette image, mais qui peuvent être dangereuses pour la conduite réelle de l'unité. Par exemple, l'analyse d'un accident récent d'accident a montré que la défaillance d'une carte a conduit à des prises de décisions conduisant à un accident mortel.

La prise en compte de tous ces risques technologiques supplémentaires amène les services d'entretiens à faire des campagnes de contrôle sur l'état du matériel plus fréquentes. Le graphique ci après, montre l'évolution croissante des coûts de maintenance récurrents sur une unité automatisée dans une usine qui a subi deux campagnes d'automatisation, la première en 1981 et la seconde en 1989.

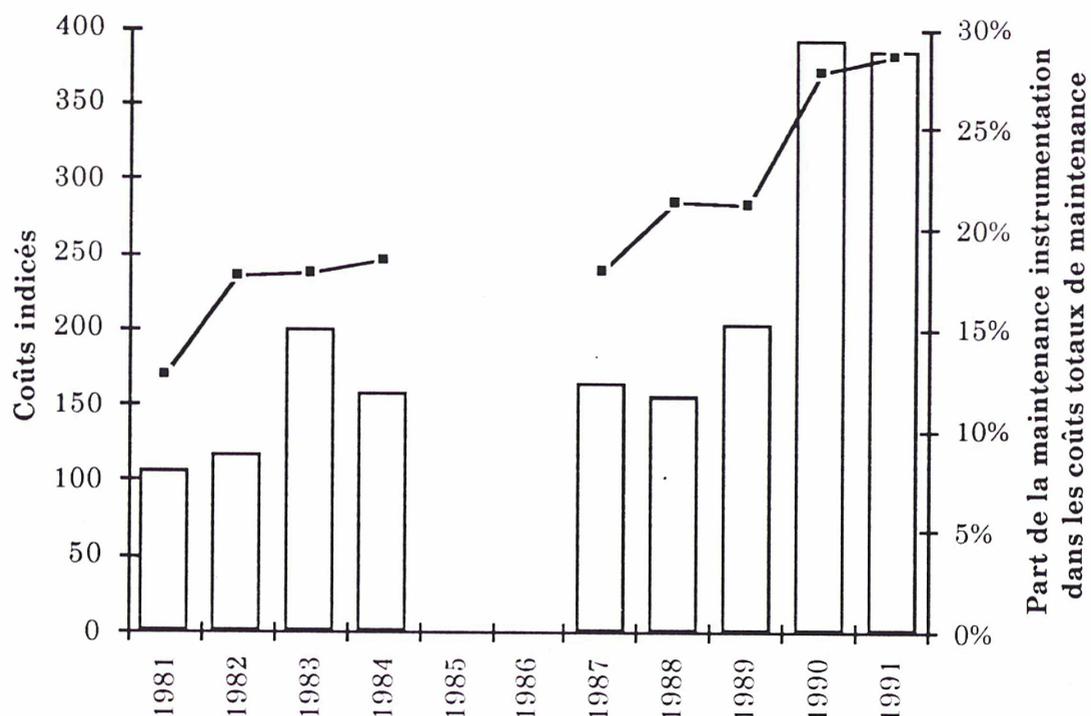


Fig. 10 - Évolution des coûts récurrents de maintenance instrumentation

b. Le syndrome de la "boite noire"

L'absence de maîtrise de la programmation des unités informatisées est un facteur supplémentaire de risque.

La spécialisation de l'industriel de la chimie sur son métier de base l'amène à sous-traiter la réalisation pratique des programmes de conduite des unités. Des entreprises sous-traitantes livrent donc des "boîtes noires" aux industriels de la chimie selon les cahiers des charges prescrits. Ceux-ci n'ont alors plus qu'à effectuer les différents tests de sécurité qu'ils jugent nécessaires. Mais la maîtrise effective du programme leur échappe, et l'existence d'un "bug" non décelé peut avoir des conséquences graves en termes de sécurité. Ainsi une usine disposait de deux réacteurs jumeaux A et B. Suite à une erreur de programmation, l'opérateur visualisait sur le synoptique du réacteur B les

éléments d'informations données par les capteurs du réacteur A, et sur le synoptique du réacteur A les mêmes éléments d'informations données par les capteurs du réacteur A. L'opérateur n'a donc pas pu s'apercevoir d'une montée en température dans le réacteur B qui a conduit à son explosion.

2. Une augmentation des facteurs de risques humains

L'analyse des accidents récents met en évidence de manière très nette l'importance du facteur humain dans la responsabilité des accidents. 90% des incidents sur les usines chimiques seraient dus à des erreurs humaines. Les ruptures dans les modes de travail introduits par l'automatisation sont des sources nouvelles de risques qu'il convient d'explicitier.

a. Les conséquences d'une trop grande distanciation

La distanciation évoquée dans ce chapitre, dans le paragraphe A.4, *Les conséquences d'une redéfinition des tâches*, peut être une source nouvelle d'incidents. Habitué à travailler sur une unité virtuelle (informatique), les opérateurs tableaux font moins bien le lien entre le synoptique qu'ils visualisent et la réalité matérielle des installations.

Sortant moins sur l'unité, les opérateurs se rendent moins compte de l'état réel de celle-ci. Sur une unité particulière, le système de sécurité détectait souvent une alarme de niveau bas sur un ballon de stockage intermédiaire. Pour ne pas être ennuyé trop souvent, l'opérateur tableau a abaissé le seuil de l'alarme, sans détecter de conséquences sur le fonctionnement de l'unité. Ce n'est qu'au hasard d'une ronde que l'on s'est aperçu qu'une fuite sur le ballon faisait en fait déclencher l'alarme. Cet exemple n'a heureusement pas conduit à un accident.

Géographiquement, la localisation précise des éléments que les opérateurs tableaux commandent n'est parfois pas bien connue ce qui limite la coordination efficace de l'action des opérateurs extérieurs en cas d'accident.

N'ayant plus à gérer les petites déviations quotidiennes qui permettraient de garder un savoir-faire et une connaissance de la vie de l'installation, les opérateurs perdent la mémoire des réactions de l'unité aux différentes actions qu'ils peuvent mener en cas d'accident.

Enfin, les opérateurs ont tendance à perdre leur esprit critique face aux données numériques: ce qui sort d'un ordinateur semble marqué par le sceau de la vérité, alors

qu'ils hésiteraient moins à remettre en cause des données analogiques (qui rentrent dans la sphère du familier).

b. Complexité de gestion et erreur humaine

Les systèmes modernes peuvent être complexes à gérer, en particulier lorsque la modernisation s'est faite par étapes successives intégrant une architecture ancienne peu adaptée aux besoins nouveaux. Nos interlocuteurs ont mentionné le cas d'une unité qui était en pratique non gérable et pour laquelle il a fallu, en faisant appel à un consultant extérieur, simplifier et rationaliser l'architecture du système de contrôle-commande ainsi que séparer les systèmes de conduite et de sécurité.

Les systèmes de sécurité très puissants permettent d'augmenter le nombre d'alarmes. En cas d'accident, l'opérateur doit souvent faire face à une cascade infernale d'alarmes souvent non hiérarchisées, qui vont se déclencher au fur et à mesure de la diffusion de l'incident. L'accumulation d'information est trop complexe pour que l'opérateur puisse établir un diagnostic dans de bonnes conditions.

Enfin, les capacités de l'entendement humain sont singulièrement diminuées avec le stress de l'accident et la durée disponible pour élaborer un diagnostic. Une étude statistique menée par l'Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire⁽¹³⁾ (IPSN), sur un échantillon de 200 tests d'équipes de conduite de centrales nucléaires, met en évidence la probabilité d'échec d'un diagnostic en fonction du délai disponible pour effectuer ce diagnostic.

¹³In *Etude Probabiliste de Sûreté des Réacteurs à Eau Sous Pression* IPSN, Rapport de Synthèse 1990

PROBABILITE D'ECHEC DU DIAGNOSTIC

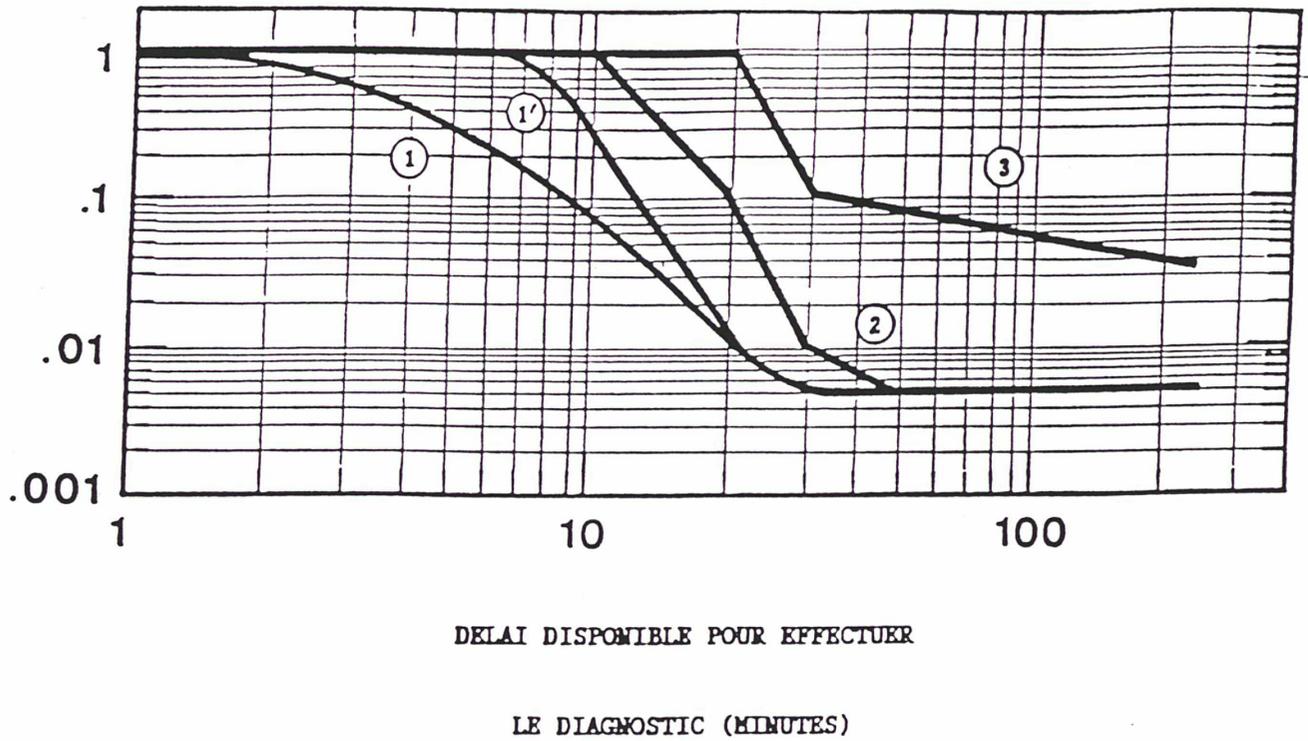


Fig. 11 - Probabilité d'échec d'un diagnostic

Les courbes 1 et 1' sont relatives aux diagnostics les plus faciles.
 La courbe 2 est relative aux situations moyennes.
 La courbe 3 correspond aux diagnostics les plus difficiles.

En prenant comme élément de référence une situation moyenne, on observe que si une équipe dispose de dix minutes pour établir un diagnostic, la probabilité pour que celui-ci échoue est proche de 1! On comprend donc le rôle que peuvent jouer les procédures et la formation continue pour donner aux opérateurs les moyens de gérer ces situations difficiles.

c. Vigilance ou somnolence?

Les situations d'urgence sont, en pratique, et, heureusement, rares. N'ayant en fait que très peu de choses à faire quand tout va bien (soit la majeure partie du temps), l'homme a une propension bien compréhensible à entrer dans des phases d'endormissement et à perdre sa réactivité face à un événement inattendu. Maintenir artificiellement en éveil les opérateurs en leur projetant des films vidéo est une solution proposée par JC Wanner dans *Catastrophes? non merci! La prévention des risques technologiques et humains*.

Le maintien de la vigilance des opérateurs est en effet un facteur clef dans la sécurité des installations. Ils doivent pouvoir réagir promptement et efficacement à toute situation.

3. Conclusion

A limite, en période normale, l'ordinateur s'occupe de tout et l'opérateur n'a plus rien à faire; Lors d'un d'accident, la machine ne contrôle plus le système, et l'opérateur n'est pas en mesure d'agir. A quoi servent donc les opérateurs?

Une problématique peut être la suivante.

- L'automatisation à son niveau actuel est-elle à un point d'équilibre stable du point de vue de la sécurité? Est-on allé trop loin dans l'automatisation en créant des systèmes trop difficiles à gérer pour des opérateurs en cas de difficulté, et qui augmentent artificiellement les risques liés à la conduite des opérations?

- Ou bien au contraire doit-on, par confiance en la technique, intégrer encore plus en amont le processus d'automatisation et, par crainte de l'erreur humaine, source potentielle d'accidents, limiter au maximum les interventions humaines ?

C. Le coût élevé de l'automatisation

"Il y a trois manières de se ruiner, disait le grand Rothschild: le jeu, les femmes- et les ingénieurs. Les deux premières sont plus agréables- mais la dernière est plus sûre"

Auguste Detœuf Propos de O.L. Barenton confiseur

L'analyse du degré d'automatisation des unités chimiques et du choix des matériels amène naturellement à s'interroger sur la procédure de choix des investissements dans laquelle interviennent toutes les fonctions de l'entreprise. La Division Produit, détectant une opportunité commerciale, déclenche l'étude d'un projet. Après une mise au point du procédé, la Direction Technique chiffre le coût de l'investissement. L'analyse de la rentabilité du projet qui en résulte détermine la décision de sa réalisation. Une équipe projet, regroupant les représentants des directions technique, industrielle, produit, sécurité-environnement, etc., sous la direction d'un maître d'ouvrage, appelé aussi parfois directeur de projet, en général issu de la Division Produit, gère le projet dans son intégralité. Un maître d'œuvre, ou chef de projet, se charge de veiller au suivi technique du projet.

Concernant le coût d'un projet, il est étonnant de constater qu'il existe un écart important, parfois dans un rapport de un à deux, entre une option minimale, mais viable et le résultat que l'on obtient en fin de compte par la procédure complète. Cette option minimale émane typiquement, et pour les petits projets, du Bureau d'Études usine. L'exploitant veut évidemment réaliser le projet et aura tendance à serrer les coûts pour en assurer la rentabilité.

Après l'exposé de quelques exemples, cette partie analyse certains mécanismes à l'origine de ces surcoûts et critiquent les arguments avancés par nos interlocuteurs pour justifier toujours plus d'automatisation.

1. Trois exemples.

Trois exemples issus d'usines différentes, de procédé différents, illustrent les idées présentées en introduction.

a. Un mélangeur de produit

C'est une grosse cuve cylindrique d'une capacité d'environ 1200 tonnes qui traite des produits finis pour une application particulière. L'usine et le centre technique envisagent d'abord une unité totalement neuve d'une capacité de 1200 tonnes. Le coût s'élève à 43 MF selon un projet chiffré du centre technique chargé de faire l'ingénierie des nouveaux projets. Dans ces conditions, le projet n'est pas rentable et il est refusé par la Direction Générale.

Le centre technique revoit le projet en abaissant la capacité à 800 tonnes et surtout en réutilisant le bâtiment de l'installation ancienne. Le coût du projet passe à 25 MF; la partie instrumentation-électricité s'élève à 5 MF, soit 20% du coût total. Une nouvelle fois, la Direction Générale refuse le projet.

La Direction Industrielle souhaite faire aboutir le projet et se résout à consulter une entreprise extérieure. Le cas s'y prête en fait assez bien car ce n'est pas de la haute technologie: le risque de divulguer des secrets de fabrication est nul. Le cabinet d'ingénierie extérieur propose une solution chiffrée à 11 MF. Le mélangeur lui-même est exactement le même, mais la partie instrumentation-électricité représente 1,1 MF au lieu de 5 MF dans le chiffrage précédent. Les solutions techniques retenues sont simples et rustiques. Mais, est-il nécessaire de piloter par un logiciel le démarrage du compresseur centrifuge, alors qu'il s'agit, ni plus ni moins, que de maintenir une cuve à température et pression données?

b. Un exemple d'investissement dans le domaine des polymères

Le centre technique, en collaboration avec l'usine, présente un projet dont le coût s'élève à 220 MF. Une nouvelle fois, le refus de la Direction Générale oblige les participants au projet à se remettre en question car ils souhaitent le faire aboutir. L'usine engage un gros travail d'analyse fonctionnelle destiné à "enlever le superflu" (sic) qui débouche sur un nouveau chiffrage de 150 MF. Des capteurs jugés nécessaires dans le premier projet se révèlent moins utiles. L'instrumentation passe de 45 MF à 30 MF, soit une diminution d'un tiers! Par rapport au cas du mélangeur ci-dessus, un nouvel acteur entre en jeu: le responsable procédé. Sollicité par l'usine, il revoit le procédé et réussit à supprimer des équipements. Par exemple, le chargement journalier d'un autoclave, prévu d'être réalisé automatiquement, peut être fait par le opérateur extérieur. Cet opérateur ne peut pas être supprimé pour des raisons de sécurité: "Personne ne se risquerait à enlever du monde sur une unité dangereuse" nous explique le responsable de production. Cet

exemple rentre tout à fait dans le cadre de la proposition présentée dans ce rapport, dans le Chapitre 3, Partie B, *Vers un nouvel arbitrage automatisation / travail*.

c. Deux unités de pétrochimie identiques?

Ce dernier exemple s'appuie moins sur des considérations de coût. Il s'agit de deux unités de pétrochimie identiques dont l'une a une instrumentation très moderne, fondée sur un système numérique de contrôle commande (SNCC). Si on en croit le discours sur les intérêts de l'automatisation, l'unité plus instrumentée doit être plus sûre, conduite par moins de personnel. Elle doit avoir un meilleur rendement et une meilleure qualité de produits en sortie. Le technicien en charge de ses deux installations nous explique: "Franchement, je ne suis pas capable de voir de différences sur tous les critères de performances que vous m'avez cités. Quand on doit remplacer un système de conduite obsolète, on a tendance à retenir automatiquement le modèle le plus élaboré."

2. Les causes du surcoût.

L'analyse des causes conduisant à un surcoût important des projets amène les remarques suivantes:

a. "Se faire plaisir dans la technique"

"Les Échos" du 2 février 1994 affirmaient que la complexité croissante des produits est un facteur de manque de compétitivité pour certaines industries européennes. L'industrie automobile, consciente du problème, met en avant la "maladie de l'ingénieur", cet amour de la technique dans lequel l'homme de l'art - le technicien - trouve ses satisfactions professionnelles. Suite à nos visites, force est de constater que ce sont les dernières innovations technologiques qui sont choisies et mises en avant. Les exemples présentés ci-dessus le mettent en évidence. Dans une entreprise chimique, la complexité et le coût d'une installation sont perçus comme un signe de performance. Le plus moderne, le plus sophistiqué ne signifie pourtant pas le plus intelligent et le plus adapté. Dans la quasi-totalité des cas, nous n'avons pas obtenu de justification économique a priori, ni même a posteriori, qui explique les choix technologiques réalisés. L'analyse de la valeur semble être peu, voire pas, utilisée: la tendance est de mettre en place les matériels les plus modernes au lieu de matériels plus éprouvés, mais catalogués comme "obsolètes".

Reprenons ces éléments sur un exemple. Une usine comptait quinze unités du même type de conception ancienne. Plutôt que d'investir dans une remise à niveau de l'ensemble, le choix est fait de construire une unité complètement neuve, d'une capacité plus importante, et permettant la fabrication de presque tous les produits des quinze autres lignes. La diversité des produits fabriqués par cette nouvelle installation est très importante. L'aspect du paysage dans ce village de Normandie en est modifié. Les anciennes lignes étaient abritées dans des bâtiments d'une dizaine de mètres de haut. La nouvelle unité a 25 mètres de hauteur et un grand panneau sur un côté de l'installation nous a permis de nous repérer à plus d'un kilomètre. Un œil non exercé ne peut pas croire que la nouvelle unité produit le même type de choses: la complexité de l'installation est sans commune mesure avec la rusticité des autres lignes. Par exemple, le sommet de l'autoclave est entouré de deux douzaines de vannes: l'approvisionnement de l'ensemble des matières premières est automatique, même pour les catalyseurs. Les techniciens du projet ont retenu un système de pompe en acier inoxydable pour l'approvisionnement d'un acide dans le réacteur. Le coût pour automatiser cette tâche est d'environ 1 MF. Malheureusement, à l'usage, l'acidité de ce composant pose des problèmes de fonctionnement. Quant aux systèmes de conduite et de sécurité, cinq automates gèrent 1500 Entrées-Sorties sur la nouvelle ligne, au lieu de 35 sur une unité ancienne. Le coût d'une Entrée-Sortie est d'environ 10 kF, en comptant les fils, les boîtiers d'Entrées-Sorties et 20 h de programmation en moyenne. Par ailleurs, un effort particulier a été consenti pour automatiser les séquences batch compte tenu de la diversité des produits.

Ce "plaisir dans la technique" a, par ailleurs, une conséquence sur le choix où se porte l'effort d'automatisation. C'est souvent sur la partie la plus technique que travaillent des ingénieurs alors que parfois, les problèmes se posent au niveau des périphériques. Par exemple, l'extrusion est une partie des unités de plastiques un peu délaissée car elle est moins "noble" que le réacteur de polymérisation. Pourtant, c'est aussi à ce niveau que se créent des problèmes importants de qualité (création de points noirs, etc.). Les ateliers d'ensachage sont eux totalement conçus et exploités par la sous-traitance: "ce n'est pas de la chimie" nous a-t-on déclaré. Les problèmes de conditionnement constituent pourtant une cause importante des retours clients... La formation des jeunes ingénieurs est peut-être en cause: il faut savoir leur donner les moyens de juger ce qui est important d'automatiser.

Terminons sur la parabole du garage à vélos qui nous a été expliquée par un haut responsable de la chimie française. Selon lui, construire un garage à vélos dans l'enceinte de l'usine, serait cinq fois plus cher que de le réaliser à l'extérieur de celle-ci. En effet, à l'intérieur de l'établissement, les procédures et le perfectionnisme des ingénieurs conduiraient à prendre en compte tous les risques éventuels, même les plus improbables, et donc à retenir des solutions très coûteuses.

b. Impact de la conjoncture économique

La situation économique actuelle est difficile, le nombre de projets va diminuant. Dans ces conditions, les coûts d'études par projet sont sans doute plus élevés, car le coût des fonctionnels est réparti sur moins de projets. Les techniciens travaillent donc plus les projets, les rendant plus compliqués et donc plus chers. Les responsables de l'ingénierie pallient cela en rapatriant en interne des travaux d'études sous-traités.

c. Le syndrome "ça peut servir"

L'organisation par projet, qui a fait ses preuves par ailleurs, présente au moins un inconvénient. Au cours des discussions des groupes projet, la règle est de tenir compte de l'avis de chacun. La conséquence est que, souvent, l'enveloppe commune des desiderata est retenue ce qui augmente d'autant le coût d'un projet. Parfois même, les différentes motivations des intervenants créent de nouveaux besoins: par exemple, le représentant du Centre Technique présente le dernier modèle de SNCC, en soulignant qu'il permet de gérer beaucoup plus de variables. Ses collègues, notamment l'exploitant et le responsable sécurité-environnement, vont profiter de l'occasion pour demander de nouveaux paramètres de suivi en arguant que "cela peut servir". On justifie ainsi, in fine, le choix le plus cher, mais pas toujours le plus rentable.

Les systèmes SNCC sont très flexibles, ce qui permet facilement d'acquérir une nouvelle donnée ou de changer la configuration de boucles de régulation, par exemple en créant des boucles en cascade, etc. Autant d'avantages tant que le système reste gérable. Cela entraîne le risque d'une multiplication de modifications, et autres raffinements, dont l'utilité n'est pas toujours établie. Le responsable sécurité d'un site pétrochimique nous expliquait: "on modifie beaucoup en se disant que cela peut servir. Mais on n'estime pas le coût des modifications. Cela occasionne des papiers et des procédures dans tous les services ce qui est très lourd."

d. La spécialisation

La présentation qui vient d'être faite peut être critiquée, notamment en mettant en avant le rôle d'arbitre du maître d'ouvrage qui devrait permettre de limiter les excès du syndrome "ça peut servir". En fait, compte tenu de la spécialisation croissante des personnes, et en particulier de celle des spécialistes de l'automatisation, le maître d'ouvrage ne peut pas toujours faire un arbitrage financier face aux arguments techniques qui lui sont présentés. Un ancien responsable de fabrication nous a avoué: "sur ce projet, je n'avais pas les moyens de décider du système de conduite. Les instrumentistes ont un pouvoir de plus en plus grand: c'est le problème des experts."

e. La procédure de chiffrage

Lors de la pré-étude, la Division Produit demande au Centre Technique un pré-chiffrage qui sert de base au calcul de la rentabilité d'un projet. Le Centre Technique a tendance à surestimer le coût du projet (certains nous ont parlé d'une "sécurité" de 30%), pour être sûr de ne pas dépasser le budget alloué.

Ceci se comprend d'autant plus qu'au niveau du chiffrage initial, les incertitudes sur la définition du projet sont importantes. Les Divisions Produits ne donnent pas beaucoup de précisions et modifient parfois largement les demandes, au fur et à mesure de l'avancement du projet, au gré des changements des estimations de marché, et de l'évolution des produits... Le Directeur Technique déclare: "Avant, c'était toujours le projet qui "prenait"⁽¹⁴⁾. Maintenant, j'exige des directeurs de divisions qu'ils s'engagent. S'ils changent leurs dossiers, cela doit faire l'objet d'une demande auprès de la Direction Générale." Ce même directeur réfute l'argument du surcoût lié à la procédure de chiffrage. "Je demande à mes collaborateurs un chiffrage honnête en fonction de la demande que nous recevons de la part des Divisions Produits, et des contraintes de sites. Au fur et à mesure de l'avancement du projet, le chiffrage s'affine. En moyenne, nous réalisons les projets avec un surcoût de 3% par rapport au chiffrage définitif."

Effectivement, le coût final du projet est assez proche du chiffrage initial. Cela ne réfute pourtant pas notre argumentation. Il existe de fait une sécurité dans le chiffrage

¹⁴ Ceci signifie que l'augmentation du coût de l'investissement généré par les changements ne faisait pas l'objet d'une procédure d'acceptation par la Direction Générale mais étaient intégrés dans les surcoûts de la réalisation du projet.

qui permet d'absorber les aléas décrits ci-dessus. Mais, une fois l'enveloppe budgétaire accordée, elle est dépensée in fine dans son intégralité pour contenter tout le monde, et notamment le Centre Technique qui risquerait sinon de perdre sa crédibilité sur les chiffrages. L'exploitant trouve aussi toujours de bonnes raisons pour demander plus. Par exemple, le surdimensionnement de certains matériels d'utilités permet de faire passer des achats servant à d'autres unités qui seraient refusés par ailleurs. Concernant l'automatisation, le choix d'un système de conduite élaboré devient possible et il est facile de se convaincre de la nécessité de nouveaux paramètres de suivi. (cf. Le syndrome "ça peut servir")

f. L'influence de l'administration

La législation semble influencer le degré d'automatisation. Par exemple, la directive Seveso du 24 juin 1982 stipule dans ses motifs "qu'il convient (...) de concevoir et d'orienter le progrès technique de façon à répondre au souci de la protection de l'environnement". Plus loin le texte demande, dans son article 4, que "les États membres prennent les dispositions nécessaires afin que, pour toute activité industrielle (...) le fabricant soit tenu de prendre toutes les mesures qui s'imposent pour prévenir les accidents majeurs et pour en limiter les conséquences sur l'homme et l'environnement." La prise en compte de cette directive amène donc l'industriel à recourir à des moyens automatiques.

Ainsi, la DRIRE reconnaît le principe de "sécurité active" mais refuse la solution de l'intervention humaine ce qui pousse l'industriel à mettre en place un moyen automatique (capteurs déclenchant une vanne "Tout Ou Rien"). Cela s'explique bien dans les cas critiques comme une canalisation de chlore. En cas de rupture de la canalisation, l'objectif est de minimiser les émissions de ce gaz toxique dans l'atmosphère. Pour couper la canalisation en amont, il faut fermer une vanne. Seul un déclenchement automatique (fondé sur un débitmètre) permet de raccourcir au maximum le délai de réaction.

Par contre, le recours systématique à l'automatisme entraîne une perte de l'importance du facteur humain. Les opérateurs ont donc de moins en moins de responsabilités ce qui diminue leur vigilance et leur capacité d'intervention. Ces derniers doivent réagir vite et bien dans les cas les plus critiques, i.e. ceux que les automatismes ne savent pas gérer car ils correspondent aux événements inconnus. Les ingénieurs français sont rassurés par la technique, à leurs yeux infaillibles. Ils sont, par contre, mal à l'aise sur le facteur humain. Nous considérons que "si une erreur peut être commise, elle

le sera". Une étude américaine a montré qu'il était impossible de créer une installation parant toutes les erreurs humaines possibles.

Il n'est pas possible, ni d'enlever toute présence humaine sur l'unité, ni de mettre en place un système palliant toutes les erreurs humaines possibles. Il faut donc prendre en compte ce facteur humain, d'une part en le valorisant donc en maintenant des tâches manuelles de conduite et de sécurité, d'autre part en diminuant le couple (niveau de défaillance, gravité en cas de défaillance) de l'erreur humaine. Par exemple, si les conséquences d'une erreur de manipulation sont graves, il faut mettre en place un moyen pardonnant mais, autant que faire se peut, laisser à l'opérateur l'initiative et le contrôle de l'action.

3. Analyse des arguments techniques justifiant les choix d'automatisation

Il s'agit de critiquer ou de relativiser, point par point, les analyses développées dans la Partie D du Chapitre 1, *Les finalités de l'automatisation*.

a. Les limites à la diminution des effectifs

Le paragraphe D.2 du chapitre 1 a mis en évidence que les entreprises chimiques françaises veulent limiter le nombre d'opérateurs dans leurs unités pour des raisons de sécurité et de productivité.

En termes de sécurité, il est vrai que moins de personnes sur l'unité signifie moins de victimes en cas d'accident (sic); cependant, la présence humaine est un facteur objectif de sécurité active (partie B de ce chapitre): il faut donc revaloriser le potentiel humain dans les unités et ne pas prôner systématiquement plus d'automatisation.

En ce qui concerne la productivité, un poste supprimé, suite à l'automatisation de certaines opérations, entraîne tout de même des coûts de maintenance plus élevés en matériel et en personnel (instrumentistes...). Par exemple, dans l'une des usines visitées, une nouvelle unité est conduite par 1,5 à 2 opérateurs, certains pouvant partager leur travail entre deux unités. Cette unité très moderne (et donc très automatisée) n'emploie pas moins de personnel que les plus anciennes. Par contre, la maintenance du système de conduite a obligé l'usine à réorganiser son service maintenance-instrumentation. Compte tenu de la surcharge de travail générée par l'automatisation, une demi personne supplémentaire est nécessaire. Comme le montre le tableau comparatif ci-après, le coût de la maintenance sur la nouvelle unité est plus élevé que sur les anciennes:

Coût comparé de la maintenance (base annuelle):

NOUVELLE UNITÉ	ANCIENNE UNITÉ
1600 kF	500 kF
dont 800 pour l'électricité-instrumentation	dont 130 pour l'électricité-instrumentation

On pourra également se reporter à la figure 10, Chapitre 2, Partie B.1.a, *Des technologies sensibles*, qui montre l'augmentation des frais de maintenance instrumentation en volume et pourcentage des frais de maintenance totaux suite à deux campagnes d'automatisation de l'unité.

b. Obsolescence des matériels et baisse des prix?

Les fournisseurs de matériels d'instrumentation rechignent à vendre des matériels d'anciennes générations et préfèrent proposer leurs derniers modèles. Cet argument est mis en avant par les exploitants pour justifier le remplacement de l'ancien matériel, simple et rustique, par du neuf, plus sophistiqué.

L'exemple systématiquement cité en usine est celui de la régulation pneumatique. "Il n'existe plus de pièces de rechange; dans ce cas, c'est sûr, il faut changer la régulation" nous a-t-on expliqué... Pourtant, nous avons découvert dans le magasin de pièces de rechange d'une unité américaine, des rayons remplis de pièces d'équipement pneumatique. Il ne s'agissait pas d'un reliquat de vieux stocks, mais bien de pièces récemment commandées. L'argument de l'obsolescence est donc contestable, ce qui ne signifie pas par ailleurs qu'il ne faille pas remplacer les équipements les plus anciens...

Il est également erroné de mettre en avant la forte baisse du prix des matériels informatiques. En fait, le coût de l'instrumentation a tendance à augmenter, car les entreprises chimiques choisissent systématiquement le dernier modèle, toujours plus cher. Même le représentant français d'un grand fournisseur de SNCC reconnaît: "le prix de vente de nos matériels baisse, mais beaucoup moins que dans l'informatique. Le prix du dernier modèle reste inchangé..." Dans les faits, c'est toujours lui qui est choisi! Par exemple dans les raffineries françaises, toutes les générations de SNCC sont représentées ainsi que tous les fournisseurs. La future raffinerie Elf de Leuna sera équipée du système le plus évolué: est-ce bien nécessaire?

c. Maintien d'une avance technologique

Le risque de retard technologique semble être l'argument le plus pertinent pour justifier le choix de privilégier la mise en place des dernières innovations technologiques au détriment de solutions éprouvées et moins coûteuses. De façon un peu triviale, privilégier le court terme (le coût) au détriment du long terme (la nécessité d'être au top de la technologie) risque de faire perdre à l'entreprise chimique sa compétitivité. D'un autre côté, maintenir une veille technologique n'implique pas la mise en place "d'usines à gaz" de façon systématique... Les fournisseurs de matériels critiquent la méthode française. "Les Français font de l'agitation technique, sur les systèmes experts par exemple, au lieu de privilégier la réflexion sur l'outil pour améliorer la production." Ces termes durs formulés par un responsable d'un grand groupe fournissant des SNCC sont corroborés par notre impression sur la mise en place de systèmes experts. "On essaye sur un chantier pilote" nous a déclaré un ingénieur du centre technique, sans bien savoir ce que cela pourra apporter. Un chercheur en automatique nous a dit: "Systèmes experts, réseaux de neurones, là n'est pas la question. Les ingénieurs pensent trouver la solution miracle avec des outils de ce type, en évitant soigneusement de réfléchir! Le problème est de comprendre les mécanismes de réaction et de les modéliser pour les simplifier et les commander."

Par opposition, les Allemands ont une démarche de modernisation de leurs unités plus homogène. Ils étudient les nouvelles évolutions en matière de contrôle-commande mais leur objectif est de mettre au même niveau l'ensemble de leurs unités. Peut-on en conclure pour autant que l'industrie chimique allemande soit en retard sur nous!

d. Des gains en qualité à démontrer

Selon nos interlocuteurs, automatiser permettrait de stabiliser le procédé, et donc d'améliorer la qualité des produits. Il apparaît que ce n'est pas une condition nécessaire pour obtenir de bons produits comme le prouve le "Dupont Award of Quality" attribué à une usine ancienne et très peu automatisée aux USA.

Les gains en qualité obtenus en grâce à l'automatisation sont rarement mesurables: nous n'avons pratiquement jamais vu de données quantifiées (ni a priori pour justifier un choix d'automatisation, ni même a posteriori pour s'en féliciter) le mettant en évidence. De plus, il apparaît parfois que les techniciens choisissent d'automatiser les parties les plus techniques d'une unité et pas la partie du procédé où

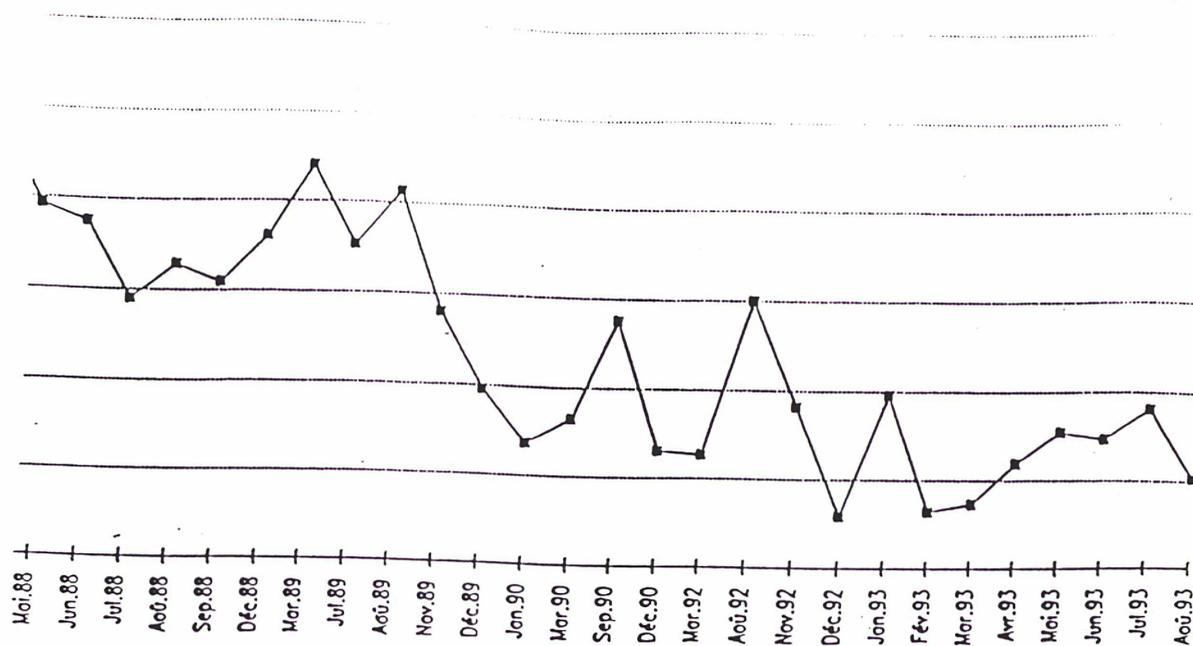
les gains en qualité seraient les plus forts (par exemple, l'extrusion par rapport au réacteur de polymérisation). Enfin, choisir le dernier modèle de matériel entraîne souvent une longue période de mise au point et des mauvaises surprises au démarrage. Par exemple, sur une nouvelle unité, les ingénieurs avaient choisi un système de pompe à vide très complexe pour éviter la formation de points noirs. Au démarrage, la nouvelle unité très automatisée dès sa conception pour diminuer les points noirs, en produisait plus que les vieilles lignes manuelles! La pompe était en fait en cause: une modification de celle-ci pour la transformer en pompe à vide classique a permis de résoudre le problème. Par ailleurs, alors que des arguments de qualité avaient été annoncés a priori pour justifier le coût élevé du nouvel investissement, on peut être surpris de lire a posteriori: "l'objectif que nous nous étions fixés était d'atteindre un niveau de qualité au moins équivalent à celui des anciennes lignes et si possible de l'améliorer."(sic).

e. Des gains en rendement non prouvés

Comme pour la qualité, les gains sur les consommations spécifiques ne sont pas souvent clairement mis en évidence. Les chiffres sont difficiles à établir, d'autant plus que les investissements d'automatisation ne sont souvent qu'une partie d'un projet plus important. Même dans les cas où l'étude est possible, elle est rarement convaincante et ne l'est jamais sur les unités ayant déjà une conduite avec des régulateurs électroniques, sans système SNCC.

Parfois, un habile changement d'échelle permet de parler de gains sans que l'on puisse l'affecter à un investissement d'instrumentation. Les courbes ci-après le montrent. La première courbe a été utilisée par des techniciens pour mettre en évidence les gains en consommation de combustible, suite à la mise en place d'un SNCC qui s'est fait entre Automne 1988 et 1991. Cette courbe fait effectivement apparaître un gain. Par contre, une étude sur un intervalle de temps plus grand, de 1982 à 1993 (courbe du bas), montre deux choses: d'une part les gains les plus importants ont été réalisés avant la mise en place d'un SNCC et, d'autre part, il n'y a pas de ruptures sur la courbe suite à la mise en place d'un SNCC. Les gains entre 1988 et 1993 peuvent autant être imputés à une optimisation de l'outil existant qu'à un effet direct de la mise en place du nouveau système de conduite.

CONSOMMATION DE COMBUSTIBLE



CONSOMMATION COMBUSTIBLE

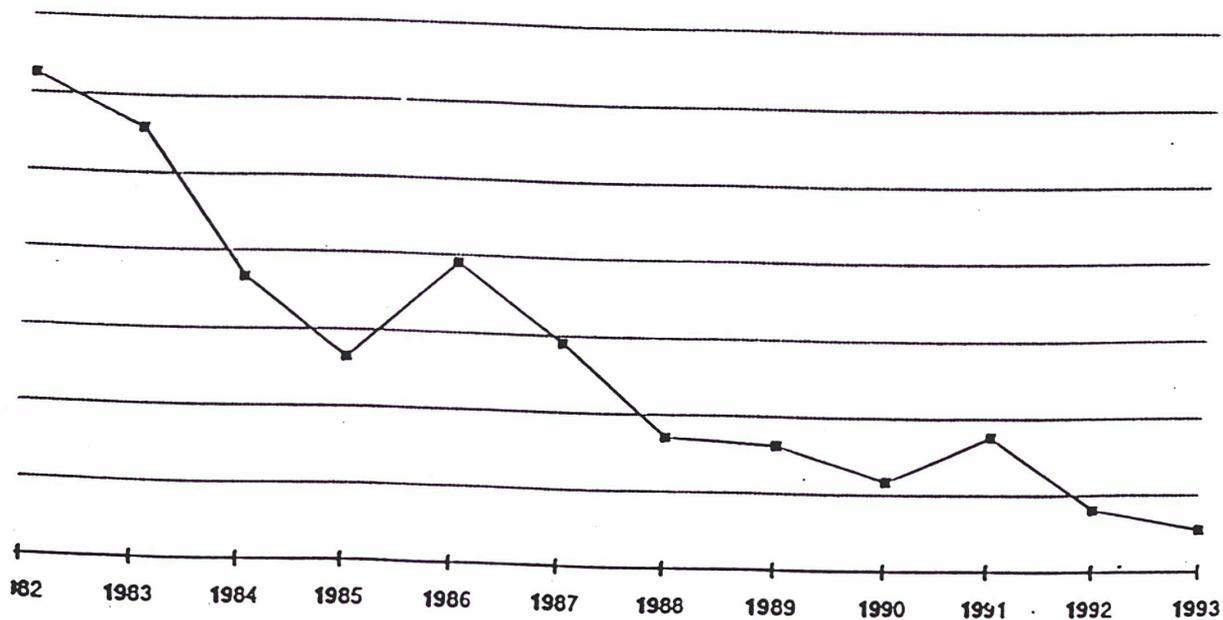


Fig. 13 - Évolution de la consommation de combustible sur deux échelles de temps différentes (15)

15 Nous avons volontairement masqué l'axe des ordonnées

f. Un outil de management pour les chefs d'unité

Les responsables d'exploitation ajoutent un certain nombre d'arguments psychologiques pour pousser à la mise en place de SNCC. L'accès à des écrans dans des salles de contrôles confortables donne un aspect ludique et valorisant au travail des opérateurs qui apprécient l'automatisation. La nature de leur travail change: après des années en extérieur ou devant des tableaux, les voilà projetés dans un univers de type "consoles vidéo". L'investissement d'automatisation permet de casser la routine et de remotiver les opérateurs. "Il faut parfois savoir décider d'un investissement pour motiver les hommes" nous disait un chef d'unité pour résumer cette idée. Force est de constater que, souvent dans l'industrie, le changement, quel qu'il soit, améliore la situation...

4. Conclusion

A la lecture des arguments développés ci dessus, le choix du degré d'automatisation conduit souvent à des solutions techniques complexes et coûteuses sans retours mesurables en termes de rendement et de qualité.

Pour changer cet état de fait, il pourrait être envisageable de rattacher la compétence technique à chaque Division Produit. Les techniciens seraient alors plus au contact des besoins des clients de l'entreprise. Mais, cette solution se heurte, notamment dans le domaine de l'automatisation, à la spécialisation croissante des techniques: pour des raisons d'économie d'échelle, la mise en place d'une cellule instrumentation dans chaque division est impossible. Partant de ce principe, on pourrait aussi envisager de mettre en concurrence le Centre Technique avec des cabinets extérieurs spécialisés: la conséquence serait certainement une meilleure adéquation des choix technologiques avec les contraintes des Divisions Produits. Toutefois, le secret du procédé risque de sortir de l'entreprise, ce qui rend cette solution inapplicable.

Dans la majorité des cas, tout repose sur la persévérance du maître d'ouvrage (ou directeur de projet) à faire respecter le cahier des charges à un coût minimum. Son travail est rendu difficile par la spécialisation de ces interlocuteurs et la complexité des techniques, notamment en matière d'automatisation. Certaines personnes que nous avons rencontrées, attribuent la responsabilité des surcoûts des investissements à un manque d'engagement personnel du maître d'ouvrage dans les choix techniques. "Certains délèguent tout à l'usine et au maître d'oeuvre (ou chef de projet)", nous a-t-on expliqué.

Dans tous les cas, le maître d'ouvrage a une importance stratégique certaine pour maîtriser les coûts.

D. Conclusion: Un acte de foi?

Promus par les représentants des grandes marques de systèmes centralisés, recommandés discrètement par les représentants de l'administration, encouragés par les responsables marketing qui demandent toujours plus de diversité dans les produits (et donc de flexibilité dans la production), défendus par les techniciens qui y voient un instrument de satisfaction personnelle, demandés par les exploitants pour des raisons de prestige et des besoins d'information, exigés par les responsables de la sécurité pour des motifs impérieux de sécurité... Les systèmes centralisés de contrôle-commande semblent bien faire l'unanimité autour d'eux!...

A l'issue de cette partie, il semble bien que les arguments économiques réels permettant de justifier toujours plus d'automatisation soient évincés au profit d'arguments non quantifiables et impérieux qui touchent au coeur de l'activité de la chimie industrielle.

La difficulté de mise en évidence a priori de l'utilité de l'automatisation, l'absence même d'études de rentabilité a posteriori, les effets pervers mis en évidence ci-dessus n'empêchent pas les industriels de la chimie de croire en l'automatisation. Ce credo revêt bien les aspects d'un acte de foi.

Chapitre 3

D'autres approches...

- A. Le modèle américain
- B. Vers un nouvel arbitrage automatisé / travail
- C. Et le futur?

A. Le modèle américain

Dans le cadre d'un déplacement aux USA, nous avons tenté de mener une comparaison franco-américaine sur l'automatisation. Outre deux sites de production, l'un dans le Michigan et l'autre au Texas, ce voyage d'études nous a permis de rencontrer les responsables d'une entreprise chimique américaine, et ceux d'un centre technique qui conçoit les nouvelles unités.

Les conclusions tirées de l'étude d'un cas particulier ne peuvent pas se généraliser à l'ensemble de l'industrie chimique américaine. Les usines visitées sont anciennes et n'ont pas été maintenues à niveau car leur précédent propriétaire appliquait une stratégie financière orientée sur le court terme. Selon nos interlocuteurs américains, les grandes entreprises chimiques ont presque toutes abandonné ce type de politique. Leurs nouvelles unités sont très modernes et très automatisées.

Enfin, les conceptions françaises sur l'automatisation ont probablement influencé la façon dont l'entreprise chimique américaine visitée, filiale d'un groupe français, conçoit ses nouvelles unités.

Néanmoins, le contexte économique, législatif et culturel américain conduit à des choix d'automatisation différents. Nous les avons étudiés, dans le cadre de ce rapport, suivant quatre thèmes:

- La sécurité et l'environnement
- Le contexte social
- La responsabilité
- Le management

1. Étude d'un exemple

Les Français ont mis en œuvre dans une nouvelle unité en France un procédé américain. Ce cas est remarquable car deux unités, l'une française, l'autre américaine, existent et une comparaison est donc possible. Un responsable américain estime que le coût de l'investissement en France est 20% plus élevé qu'aux USA. Certes, les exigences de l'Administration française sont sans doute supérieures à celles de "l'Environmental Protection Agency" ("E.P.A.") mais cela ne justifie pas un tel écart. Restreignons la comparaison au seul système de conduite et de sécurité :

Choix technologiques du système de conduite et de sécurité:

FRANCE	USA
un automate de conduite	un PC relié aux contrôleurs (modèle de contrôleur à quatre boucles)
23 vannes de régulation	20 boucles de régulation
une centaine de capteurs	50 capteurs
des analyseurs en ligne	aucun analyseur en ligne
un automate de sécurité avec un grand nombre de sécurité	10 sécurités, dont surtout la température dans le réacteur, gérées par des contacteurs

soit un coût total (incluant le hardware (automates, écrans, PC...), les logiciels, les interfaces et la programmation)

FRANCE	USA
2 millions de francs	250 kF
dont 500 kF pour l'automate sécurité	un coût négligeable pour la sécurité

soit **un rapport de 1 à 8 en absolu.**

On devine donc déjà qu'il existe des différences importantes entre les conceptions américaines et françaises concernant l'automatisation.

2. Les intérêts de l'automatisation pour les Américains

Curieusement, rien de fondamental ne permet de différencier les arguments en faveur de l'automatisation évoqués par nos interlocuteurs américains des arguments couramment entendus en France.

- Les Américains insistent prioritairement sur l'importance grandissante des lois sur l'environnement et en particulier celles qui concernent les risques technologiques. "Il nous est impossible de transiger sur la sécurité et sur l'environnement. Il faut prévoir un système automatique pour pallier les erreurs humaines pouvant avoir de graves conséquences sur l'environnement," nous a affirmé le responsable de l'ingénierie du centre technique.

- Une meilleure conduite des installations permet de mieux stabiliser le procédé, et donc d'améliorer la qualité et les rendements.

- L'argument de la diminution du personnel n'arrive qu'ensuite, alors qu'il a été à la base de la stratégie d'automatisation en France.

Les arguments qualitatifs qui justifient une stratégie d'automatisation sont donc les mêmes en France et aux USA, même si les priorités sont différentes. La suite de ce chapitre étudie les différences dans les choix d'automatisation.

3. La sécurité et l'environnement

a. Un exemple

Dans une unité fabriquant des produits très dangereux, les Français, suite à une étude de dangers, ont décidé de mettre en place un rideau d'eau déclenché par un réseau de détecteurs de gaz toxiques. Le but est d'empêcher toute émission de ces gaz en dehors de l'unité, d'autant plus que l'usine se situe à proximité d'une zone urbaine.

La même unité est en phase de construction aux USA dans une zone non urbanisée. Des considérations de protection civile n'imposent donc pas de rideau d'eau. De plus, si les lois américaines n'imposent pas d'études de dangers aussi complètes et strictes qu'en France, elles sont en revanche draconiennes sur le contrôle des effluents. Le retraitement des eaux après un déclenchement du rideau d'eau serait très coûteux. Les Américains ont donc décidé de ne pas installer ce rideau d'eau. Cet exemple introductif montre que des contextes législatifs différents entraînent des choix de systèmes de sécurité différents.

b. La législation américaine

L'administration américaine est particulièrement sévère sur la gestion des déchets et sur les émissions dans l'atmosphère. Des lois existent au niveau national: le "Clean Air Act", le "Clean Water Act", le "Resources Conservation and Recovery Act", etc. Pour compléter cette législation nationale, les États ont la possibilité d'adopter des normes plus sévères. En pratique, ce sont les États qui font l'essentiel du contrôle et qui délivrent les autorisations d'exploitation de certaines unités. Ce contrôle semble assez "lâche" par manque de moyens. Mais, si une infraction est constatée, les amendes encourues peuvent atteindre \$25 000 par jour et peuvent contraindre à la fermeture de sites. Par exemple, une centrale thermique de conception ancienne située dans la banlieue de Détroit, a dû

fermer ses portes au bout de deux semaines, à cause du poids financier représenté par les amendes qu'elle s'est vu infliger en polluant l'atmosphère.

En revanche, jusqu'à présent, les entreprises chimiques n'ont pas eu l'obligation de mener une étude de dangers pour chaque nouveau projet. Pourtant en France, cette dernière amène l'industriel à se poser beaucoup de questions et donc à mieux comprendre les risques inhérents à une unité: c'est un facteur objectif de sécurité.

c. Influence de la législation sur la conception des systèmes de sécurité.

Les différences de législation évoquées entre la France et les USA entraînent des systèmes différents de sécurité.

N'étant pas astreint à faire des études de dangers, les Américains n'ont pas mis en place de gros systèmes de sécurité fondés sur des automatismes permettant de pallier les multiples scénarios d'accident. Dans les usines visitées, seuls quelques boutons/poussoirs permettent de mettre l'unité en sécurité. Ces systèmes simples et rustiques présentent néanmoins des avantages. Ils sont d'une disponibilité et d'une fiabilité éprouvées. Ils sont plus simples à utiliser par les opérateurs et ils sont moins chers.

Par opposition, les Français doivent tirer les conséquences des études de dangers imposées par l'Administration et mettre en place des moyens rapides (donc automatiques!) pour mettre les unités en sécurité.

Les Américains rencontrés s'accordent à dire que les nouvelles unités contiennent un plus grand nombre de sécurités, gérées par un automate programmable indépendant du système de conduite.

4. Le contexte social

a. L'équipe de conduite

En France, la taille de l'équipe de conduite est dimensionnée pour faire face à l'imprévu, aux incidents et pour redémarrer l'unité. Dans les usines américaines visitées, la taille de l'équipe dépend du travail à faire en conduite normale. C'est ainsi que les ingénieurs de production américains estiment que, dans les unités peu automatisées, les opérateurs sont occupés jusqu'à 80% de leur temps en tâches effectives de conduite (par opposition à la simple vigilance passive, comme le contrôle sur écran de SNCC). Ce chiffre est à comparer au standard français qui se situe autour de 10%. Certaines unités sont

conduites par un seul opérateur: il assure à la fois la commande depuis les écrans ou les tableaux et les opérations manuelles à faire dans le procédé. En cas d'incident, le personnel de jour ou les opérateurs d'autres unités viennent aider l'équipe de conduite.

Une unité américaine que nous avons visitée, est organisée de la façon suivante:

- horaires de travail pour un opérateur:

4 jours de 23h à 7h⁽¹⁶⁾

4 jours de repos

6 jours de 7h à 15h

2 jours de repos

5 jours de 15h à 23h

soit un cycle de 21 jours avec 120 heures, donc une moyenne de 40 heures par semaine

- constitution de l'équipe: un opérateur et un assistant (chargé notamment des prélèvements et des analyses)

- effectif total: 8 personnes (2 postes en 4 équipes)

b. Une grande flexibilité de la main d'œuvre

Les lois du travail et les habitudes américaines conduisent à une plus grande flexibilité de la main d'œuvre, surtout dans les usines sans syndicat. Cela explique sans doute que les Américains soient moins poussés à automatiser. Ils ont moins le réflexe de recourir à des réductions d'effectifs en automatisant au maximum. A la différence des responsables français, les Américains ne ressentent pas la main d'œuvre comme un facteur de rigidité.

En cas d'absence d'un opérateur, ses collègues des postes précédents et suivants s'arrangent pour tenir le poste. Ils sont payés en heures supplémentaires sur la base de 1,5 fois le salaire horaire nominal. Grâce à cette organisation, un poste ne nécessite que 4 à 5 employés, au lieu de 6 à 7 en France. En effet, l'employeur n'a pas à prévoir un surpotentiel a priori. En cas d'absence d'un opérateur, il est sûr de pouvoir obtenir le personnel dont il a besoin par un simple coup de téléphone, et avec un préavis très court. Ce recours aux heures supplémentaires réduit le coût du travail: en moyenne et compte tenu du surcoût des heures supplémentaires, un poste aux USA nécessite au moins un salaire d'opérateur de moins qu'en France.

¹⁶ La durée d'un poste est de 12 heures sur d'autres unités.

c. le coût de la main d'œuvre américaine

Un employé américain posté de l'industrie chimique coûte sensiblement moins cher que son homologue français. Le salaire de base est légèrement inférieur, soit \$30 000 par an en moyenne. Les congés payés sont plus courts (de 2 à 5 semaines selon l'ancienneté). Les charges sociales s'élèvent seulement à 28% du salaire de base, y compris les cotisations de l'employeur aux fonds de retraite. Le coût total annuel d'un employé posté s'élève donc à environ 230 kF par an (avec un cours du dollar estimé à 6F en 1994), à comparer au coût total pour l'employeur en France estimé à 400 kF (sur la base de 250 kF de salaire brut).

Le coût total annuel du maintien d'une fonction d'opérateur posté en 5x8 dans une unité en France et aux USA s'élève donc respectivement à 2,4 millions de francs en France (6 personnes à 400 kF par an) contre 1,15 millions de francs aux USA (5 personnes à 230 kF par an). Soit plus du double!

d. Conclusion

Malgré les chiffres ci-dessus, la différence entre le coût du travail posté en France et aux USA n'est pas le point le plus important aux yeux des dirigeants français. Ils ressentent, à tort ou à raison, le facteur humain comme étant le "point faible" de l'organisation d'une usine chimique. La manque de flexibilité de la main d'œuvre française explique sans doute le choix d'automatiser au maximum fait par nos entreprises chimiques. En France, réduire les interventions humaines aux opérations que la technique ne peut pas automatiser reste un réflexe pour les acteurs de l'entreprise et notamment pour les concepteurs d'unités.

5. La notion de responsabilité

a. Un état d'esprit plus responsable?

La précarité du système social américain pousse ceux-ci à adopter un comportement considéré comme plus responsable par des Français vivant aux USA. Dans la vie professionnelle, la responsabilité des employés américains est plus importante que celles de leurs collègues français: d'une part, les opérateurs ont plus d'interventions

manuelles à réaliser dans les unités que nous avons visitées, et d'autre part, des erreurs professionnelles répétées conduisent inmanquablement à un licenciement. En France, les systèmes de conduite assurent la quasi-totalité des tâches et les employés français ont naturellement tendance à attribuer à la machine la responsabilité des problèmes qui se produisent dans les unités dont ils ont la charge.

b. Deux types de comportement chez les opérateurs

En France comme aux USA, deux types de comportement des opérateurs existent. Une discussion entre deux employés dans la salle de commande centralisée d'une usine du Texas l'illustre. L'opérateur le plus âgé a travaillé longtemps dans une unité plus ancienne très peu automatisée, fonctionnant sur un procédé "batch". Il regrette de ne plus avoir la responsabilité d'un "batch" tout au long du "process". Son nouveau travail, dans l'unité continue avec une commande centralisée, l'ennuie. Il se moque de son jeune collègue qui préfère le confort de la salle de contrôle. Ce dernier n'a jamais travaillé sur l'une des unités peu automatisées de ce site et la conduite plus directe des opérations ne l'attire pas.

c. Le choix des investissements

Les Américains rencontrés sont très concernés par la rentabilité économique des investissements d'automatisation qu'ils demandent. Si, en France, l'automatisation est considérée comme un "acte de foi", aux USA, les exploitants s'engagent plus sur des résultats chiffrés et des contrôles a posteriori sont faits.

Analysons la démarche américaine sur un exemple de rénovation de l'ensemble d'une unité. L'objectif est de changer par étapes successives, l'instrumentation du réacteur principal, puis une colonne de distillation ancienne dont l'instrumentation pneumatique est obsolète, enfin il s'agit de mettre en place un système de purge d'un réacteur secondaire. Un gain sensible en rendement est escompté: il est d'autant plus facile à justifier que l'unité en question a été conçue à la fin des années 40, et qu'elle n'a pas été rénovée depuis. L'ingénieur de production reconnaît aussi qu'il est plus facile de justifier un investissement en automatisation dans le cadre d'un projet d'ensemble plutôt que pour un projet d'instrumentation seul. L'unité compte en fait six colonnes du même type, mais les exploitants américains décident d'investir d'abord sur une colonne... pour voir le résultat. L'ensemble de l'unité est commandé par moins de 100 boucles, chaque colonne étant conduite par une dizaine d'entre elles. D'emblée, le choix se porte sur un

système capable de gérer de 50 à 300 boucles de régulation. En fait, les Américains n'envisagent pas d'augmenter la régulation, mais comptent suivre plus de paramètres, notamment au niveau du réacteur pour mieux comprendre le procédé. Toutefois, le nombre des paramètres suivis n'excède pas 100. Retenons enfin que l'ensemble du projet, et donc les choix d'automatisation, est décidé par l'usine: son représentant insiste bien sur le fait qu'un gros système SNCC est inutile, et que ce genre de système peut peut-être se justifier pour des unités beaucoup plus grosses comme des raffineries.

Le coût du système de conduite pour l'investissement de la nouvelle colonne de distillation est relativement faible. Il se décompose en:

1 Unité centrale	\$50 000
1 système d'interface	\$50 000
PC+data+software	\$13 000

Remarque: Ces matériels ne seront pas à racheter lors du remplacement des cinq autres colonnes de distillation, car ils sont la base du système de conduite de l'ensemble de l'unité.

Le coût du matériel d'instrumentation de la nouvelle colonne s'élève à \$75 000 environ, qui se décompose en 6 détecteurs de température à \$500 l'unité, 2 capteurs de pression et 5 mesures de niveau à \$1 200 l'unité, des boucles de régulation (2 LI, 2 PI et 2 P.I.D....), des vannes...et \$15 000 pour la pose. A titre indicatif, le coût d'investissement total de la colonne de distillation est de \$400 000.

Cet exemple amène trois remarques.

- Les Américains ont retenu l'option minimale correspondant à leur besoin, ce qui a conduit à une solution peu coûteuse, même si elle ne permet pas facilement des évolutions ultérieures.

- Le système de conduite sélectionné est assez rudimentaire: son fonctionnement est éprouvé et simple. Les ingénieurs comptent sur des coûts de maintenance très faibles, bien inférieurs à ceux entraînés par l'ancienne instrumentation pneumatique.

- Cette modernisation ne s'accompagne pas d'une refonte complète des principes de la conduite de l'unité: de nouveaux paramètres seront amenés sur l'écran du PC, notamment des températures au niveau du réacteur principal mais il n'y a pas inflation du nombre de capteurs et de boucles de régulation.

La logique américaine est donc différente des réflexes français tels que nous les avons observés dans les unités visitées en France. Les Français auraient sans doute préféré une refonte complète de l'ensemble de l'instrumentation (ou de l'unité) en une seul

fois. Un SNCC aurait probablement été choisi et le nombre de paramètres de suivis et de contrôle aurait été fortement augmenté. Rien ne prouve que les gains obtenus auraient été supérieurs à ceux obtenus dans cette usine. Cet exemple dégage bien les différences de management des entreprises chimiques entre la France et les USA.

6. Le management

a. Un management très financier

Les Américains sont très sensibilisés à la rentabilité économique des projets. L'objectif n'est pas de mettre en place les dernières innovations technologiques ou le maximum d'automatismes, mais de gagner de l'argent. Ce management très financier, et orienté sur le court terme, s'oppose à la gestion française plus sensible à la technique et aux choix à long terme. Cette différence peut s'expliquer par la formation des dirigeants. Aux USA, les responsables sont souvent des financiers, tandis qu'en France, les dirigeants sont plutôt des ingénieurs.

" Vos usines sont mieux construites car vous avez une mentalité de techniciens. Les usines américaines sont plus rentables car nous sommes plus sensibles au marketing et aux aspects financiers. Mais les lois sur l'environnement sont maintenant si sévères que ces différences s'estompent." Ce jugement du responsable industriel d'une entreprise chimique américaine atténue le jugement critique que notre rapport semble porter sur la gestion très, ou trop, technique des entreprises chimiques en France. D'un côté, le coût de l'automatisation en France est élevé, mais d'un autre côté, les usines françaises paraissent plus sûres et mieux entretenues que les unités américaines visitées.

b. Ne retenir que des solutions techniques éprouvées

En France, remettre en cause l'existant est un signe de dynamisme. Les Américains, au contraire, remettent rarement en cause une unité qui marche. Ils la font fonctionner jusqu'au bout, souvent sans faire d'investissements de remise à niveau. La conséquence est que les unités anciennes que nous avons visitées fonctionnent, mais sont en mauvais état.

Face à un choix technologique, les Américains ne retiennent souvent que des solutions techniquement éprouvées, au détriment du tout dernier modèle. Les directeurs

d'usines rencontrés aux USA refusent, par exemple, la mise en place d'analyseurs en ligne. Ces matériels, dont le coût dépasse un million de francs, sont déjà couramment utilisés en France, avec des succès variables. Six avaient été installés sur un vapocraqueur à titre d'essai et ont été retirés car ils n'apportaient rien. Aux USA, le chef d'un centre technique essaie d'imposer sans succès ce type de matériels aux usines: "c'est une véritable croisade" nous a-t-il expliqué. Les directeurs d'unité ne font pas confiance à cette technologie trop jeune: ces instruments sont difficiles à mettre au point et ils sont très onéreux. De même, les responsables de production américains préfèrent de simples contrôleurs, capables de gérer de 1 à 4 boucles de régulation mis en réseau et connectés à un PC pour assurer la supervision de l'unité, plutôt qu'un gros système SNCC. Ces systèmes sont moins puissants. Mais ils sont bien moins chers que les SNCC, dans un rapport de 1 à 10 au moins. Pour peu que l'usine assure en interne la programmation et la mise en place, ils sont en outre relativement évolutifs. Une stricte analyse fonctionnelle montrerait que beaucoup d'unités petites et moyennes sont commandables dans de bonnes conditions sans recours à des SNCC.

Ce type de comportement se retrouve en Allemagne. Selon un haut responsable de la chimie française, les Allemands mettent à niveau l'ensemble de leurs unités avec des technologies éprouvées plutôt que de doter quelques unités des dernières innovations de la technologie, comme c'est le cas en France. Cependant, le réflexe français de veille technologique, et de remise en cause permanente de l'existant, n'a pas que des inconvénients. Les experts techniques se posent plus de questions, réagissent plus vite aux progrès de la technique: cela s'inscrit mieux dans une démarche de progrès continu. Mais les gains escomptables sont impossibles à chiffrer...

c. Une conduite plus visuelle des unités.

La conduite d'une usine chimique en France se fait surtout par l'intermédiaire d'un écran d'ordinateur: l'opérateur tableau perd tout contact avec le concret de son unité. Les Américains utilisent, parallèlement aux écrans, des moniteurs vidéo et choisissent pour certaines canalisations ou réacteurs des matériaux transparents. Cela donne une image concrète et réelle de certains points clés de l'unité.

Cette idée est sans doute à retenir car les téléviseurs ramènent dans la salle de contrôle des informations indépendantes du système de conduite ce qui améliore la connaissance en temps réel de l'unité, et donc la sécurité. Certains incidents peuvent être détectés avant l'alarme de seuil, comme un début de fuite par exemple.

d. Automatiser jusqu'au bout.

L'entreprise américaine visitée s'engage dans la voie d'une automatisation plus poussée, appliquant ainsi la politique de sa maison mère française. La dernière unité construite sera totalement automatisée et les opérateurs n'auront même pas le droit d'y pénétrer pendant son fonctionnement. Même les prélèvements ont été décentralisés dans une petite cabane à l'extérieur de l'unité. Cet exemple souligne le caractère jusqu'au boutiste des Américains (l'automatisation est poussée jusqu'au bout) par rapport au caractère plus adaptatif français (l'automatisation n'entraîne pas la disparition complète des opérateurs dans l'unité).

7. Conclusion.

Le contexte américain entraîne des choix différents en terme d'automatisation. La prise en compte de la rentabilité économique semble très forte aux USA, ce qui entraîne des coûts d'investissement, notamment d'automatisation, plus faibles qu'en France. Par ailleurs, les opérateurs des usines peu automatisées que nous avons visitées semblent plus responsabilisés et plus occupés que dans les unités françaises.

Une stratégie trop financière a cependant des conséquences néfastes sur l'efficacité et l'entretien d'une installation chimique, et donc aussi sur la sécurité. Notre sentiment est, en effet, que les usines américaines que nous avons visitées semblent fonctionner dans des conditions de sécurité plus précaires qu'en France. Toutefois, la tendance actuelle est d'automatiser toujours plus, notamment pour améliorer la sécurité, la qualité et les rendements.

B. Vers un nouvel arbitrage automatisation / travail

L'observation de la vie des unités chimiques exposée dans le Chapitre 1, Partie B: *Étude de cas concrets: nos stages opérateurs*, nous conduit à proposer une nouvelle approche de l'arbitrage automatisation/travail à partir de deux constats indépendants, mais contradictoires.

1. Deux constats contradictoires

a. Constat 1: Il n'apparaît pas possible de supprimer toute présence humaine sur les sites chimiques.

Ce fait n'est nullement une évidence: certaines unités de production d'Air Liquide fonctionnent sans aucune présence humaine. De même, sur les sites chimiques, des activités peu nobles (les chaudières et le centre énergie, par exemple) fonctionnent-elles pratiquement sans intervention humaine. Ces installations sont à procédé simple (faible nombre d'intrants par exemple) et sont souvent de taille réduite, il est alors possible d'imaginer que les progrès futurs de l'automatisation permettront un jour de supprimer toute tâche manuelle dans certaines parties d'unités chimiques. Mais est-ce souhaitable?

i. Une nécessaire complémentarité des visions

La conduite d'une unité, qu'elle soit manuelle ou automatique, nécessite la connaissance de l'état dans lequel se trouve le système. Cependant, un système d'acquisition entièrement automatique est en pratique nécessairement imparfait.

- Système d'acquisition automatique et fiabilité

L'imperfection de tout système d'acquisition d'informations réside dans ses limitations. Elles sont financières et techniques.

En effet, il est impossible de mettre des capteurs sur l'ensemble d'une unité pour des raisons évidentes de coût. Il faut donc procéder à des choix et laisser a priori des zones grises dans la connaissance de l'unité.

Par ailleurs, les capteurs mis en place peuvent être défaillants: au cours de visites annuelles d'inspection, le service instrumentation d'un site détecte 1% de capteurs défaillants en moyenne⁽¹⁷⁾.

Enfin, les capteurs ne sont pas forcément performants: deux détecteurs mesurant la même information par des moyens physiques différents peuvent donner un écart de 20% sur des mesures de niveau dans des ballons. Par ailleurs, l'odorat humain est plus sensible que les détecteurs de gaz installés. Pour éviter des déclenchements intempestifs

¹⁷ Remarque: pour pallier cet inconvénient, les services instrumentation veillent à installer sur les points critiques au moins deux capteurs de nature physique différente.

due aux imperfections (manque de sélectivité, par exemple) de certains capteurs complexes (fréquence-mètre par exemple), il est parfois nécessaire d'agir sur les seuils d'alarme pour rendre les capteurs moins sensibles...

La connaissance imparfaite de l'état d'une unité est dangereuse. Nombreux sont les accidents qui l'illustrent: sur un site, la montée en température et en pression d'un réacteur n'était pas détectée en salle de contrôle (pas de capteur à cet endroit du réacteur), c'est un agent de maîtrise qui s'est rendu compte de visu de l'échappement de vapeurs suspectes, juste avant l'explosion du réacteur...

- "L'homme est le meilleur ordinateur qui soit" ... mais le moins fiable

Pour compléter la connaissance imparfaite des unités que les moyens automatiques donnent, la présence humaine se révèle nécessaire car elle apporte une réelle valeur ajoutée qui permet d'accroître la connaissance effective des unités:

- L'opérateur est mobile et peut, a priori, se déplacer partout sur l'unité, pour peu que l'ergonomie de l'unité soit satisfaisante.
- L'opérateur est pluri sensoriel et intelligent: il peut détecter des phénomènes difficilement observables par des moyens mécaniques (fuites de gaz, points de corrosion sur des tuyaux, fuites malignes, bruits suspects...) et est capable de diagnostics inductifs.

Avoir une vision plus étendue de l'unité est une source importante de sécurité: une détection précoce d'incidents potentiels évite de nombreux accidents. Les opérateurs ont ainsi un rôle d'observation déterminant et indispensable. Cependant, pour autant que les capacités sensorielles et inductives de l'homme soient performantes, elles sont néanmoins liées à la volonté de celui-ci de les mettre en éveil, et à d'autres paramètres purement subjectifs... car humains. Mauvaise humeur, problèmes familiaux ou relationnels, rhumes, etc. Les limites des capacités de l'opérateur sont aussi liées aux limites physiques de celui-ci: il est des endroits où un opérateur ne peut simplement pas aller, comme l'intérieur d'un four par exemple.

La nécessité de mettre en place à la fois des capteurs "humains" et des capteurs "mécaniques" se fait donc sentir. Il y a une réelle complémentarité entre l'opérateur plurisensoriel et les capteurs mécaniques.

ii. La gestion des impondérables

La présence sur site d'opérateurs est également indispensable pour toutes les tâches qui ne sont pas encore automatisées... Derrière cette évidence, se cachent les phases de démarrage, d'arrêt, et les incidents.

- Les connaissances théoriques du comportement effectif des unités sont telles que les régimes transitoires ne peuvent pas être modélisés de façon fiable (non linéarités, changements de phases, changements de modèles, etc.). Dans ces conditions, ils ne sont pas automatisés, ou peu, et la présence d'opérateurs est alors nécessaire pour conduire les unités dans ces phases.

- Dans la vie quotidienne d'une unité, il existe un certain nombre de tâches qui nécessitent une intervention manuelle rapide. Une vanne qui répond faiblement aux commandes automatiques, et pour laquelle existe des incohérences entre les débits affichés et l'ouverture spécifiée, a besoin d'être "bipassée" pour que l'unité puisse continuer à travailler en sécurité. Pris à temps, une telle intervention est bénigne, sans intervention il peut y avoir un déclenchement de l'unité avec des conséquences importantes en termes de coûts.

Conclusion

Les différentes raisons exposées ci-dessus amènent donc à conclure que la présence humaine sur les sites de production chimiques est indispensable pour des raisons de sécurité et d'opérabilité.

b. Constat 2: Les opérateurs sont occupés 10% de leur temps en régime permanent.

Ce constat résulte de l'observation directe, pendant quelques jours, du travail effectué par une équipe d'opérateurs extérieurs postés. Le travail des opérateurs extérieurs consiste en deux rondes d'observation dont la durée varie entre 15 et 30 minutes, accompagnées par la prise d'échantillons ou des relevés de mesures. Ce faible niveau d'occupation n'est pas sans soulever quelques problèmes.

i. Pour l'employeur...

Il paraît aberrant de payer cher des opérateurs qui sont occupés au plus une heure par poste. Un poste 5*8 représente (en tenant compte de la limitation de la durée du travail, des maladies et des congés) entre 6 et 6,6 opérateurs en moyenne en France,

soit un coût annuel employeur de 2,5 MF (base 400 kF annuel par opérateur). Rapporté au nombre d'heures effectivement travaillées, le salaire horaire est élevé!

ii. En termes de sécurité...

L'inactivité de fait entraîne des problèmes de vigilance et de réactivité certains. Tout individu qui n'est pas occupé pendant 6 heures consécutives entre 23h et 5h du matin a une tendance naturelle et bien compréhensive à l'assoupissement, et si cela n'est pas le cas, tout au moins à une certaine léthargie. Qu'arriverait-il en cas d'incident? Quel est le niveau de réactivité d'un opérateur dans de telles circonstances?

iii. En termes humains...

Les opérateurs eux-mêmes se plaignent de leur manque d'activité. Ceux qui ont connu des systèmes moins automatisés regrettent l'époque où leur travail était valorisé et où leurs actions avaient un impact concret réel. Ils ont un emploi, mais pas de travail.

Les deux constats énoncés sont bien sûr contradictoires: des raisons de sécurité imposent une certaine présence humaine, mais en pratique ces opérateurs n'ont rien à faire.

2. Une approche valorisant le potentiel humain

a. Exposé de l'approche suggérée

L'impératif de sécurité, énoncé ci-dessus, est majeur. La chimie est une activité qui manipule des produits qui peuvent être dangereux, dans des conditions opératoires qui le sont également. Cette caractéristique ne permet pas la prise de risques inconsidérés.

De manière traditionnelle, l'effectif "posté" est d'ailleurs dimensionné en fonction de cet impératif: l'équipe doit être de taille suffisante pour pallier un éventuel incident. La taille de cette équipe dépend en fait principalement du procédé chimique choisi et assez peu du niveau d'automatisation requis, puisque l'équipe doit pouvoir assurer la reprise en main de l'unité en cas de défaillance du système de conduite automatique.

L'approche traditionnelle de la conception des unités conduit, nous semble-t-il, à faire fi de ce potentiel humain qui est pourtant présent, car imposé a priori pour les raisons de sécurité évoquées. Les concepteurs recherchent au contraire le niveau d'automatisation maximal de l'unité construite compte tenu des ressources techniques disponibles. Les tâches non automatisées sont alors de fait attribuées aux opérateurs, mais dans un second temps seulement.

Une méthode alternative consisterait plutôt à chercher, d'abord à valoriser le potentiel humain à la disposition de l'unité en lui affectant des tâches de conduite véritables, et seulement ensuite, à compléter par des moyens automatiques les tâches non affectées dans l'étape précédente. Il s'agit donc de "renverser l'ordre de préséance" de façon à utiliser la ressource humaine à son meilleur niveau et l'accompagner ensuite par des ressources techniques (automatismes).

b. Méthodologie possible

i. Une segmentation des tâches à réaliser

L'ensemble des opérations à réaliser pour conduire une unité peut se segmenter en fonction de l'occurrence de celles-ci, de leur impact sur la qualité du produit, de l'effort physique demandé pour les accomplir... Il est facile de concevoir que certaines d'entre elles doivent nécessairement être automatisées: (i) celles à occurrence importante : on ne va pas demander à un opérateur d'aller tourner une vanne toutes les 10 secondes, (ii) celles dont la conduite par ordinateur est nécessaire à l'obtention d'un produit qui respecte certaines normes de fabrication (iii) les opérations dangereuses, par exemple, celles qui nécessitent de monter fréquemment en haut d'une colonne de distillation... D'autres tâches en revanche ne doivent pas être nécessairement automatisées. Il convient donc de rechercher la valeur ajoutée réelle de leur automatisation, et à en faire l'arbitrage avec une manipulation manuelle. L'automatisation ne doit pas être une fin en soi, la parabole de l'arrosoir ci-dessous illustre cette affirmation.

Une unité de fabrication d'un polymère utilise un acide comme limiteur de chaîne. Le dosage de cet acide est un paramètre important qui rentre dans la qualité du produit fabriqué. L'unité possède deux types de lignes: l'une est entièrement manuelle, l'autre est des plus modernes, mais les procédés de fabrication sont sensiblement identiques. Dans les lignes anciennes, un opérateur prépare, deux fois par poste, dans un arrosoir une solution d'acide à partir de cristaux (qu'il a au préalable pesés sur une balance), puis

ouvre le réacteur et y verse l'acide, grâce à son arrosoir. Sur la ligne nouvelle, l'opérateur est toujours là, mais le procédé est entièrement automatisé. Cependant, cela ne marche pas: l'acide corrode les joints, le débit volumique est peu fiable... Le coût de l'automatisation de cette fonction dépasse le million de francs. Quelle analyse de la valeur a été menée a priori? A combien a-t-on estimé le coût de l'arrosoir dans l'étude?

ii. Des tâches effectives dans la conduite de l'unité

Nombreuses sont les tâches dont l'automatisation n'est pas nécessaire, soit qu'une manipulation deux fois par poste suffise, soit qu'une précision de régulation trop fine ne soit pas exigée...Des ouvertures de vannes de purge, des préparations de ballons de catalyseurs, des analyses de dépôts en fond de colonne de distillation sont des opérations effectives qui peuvent être confiées aux opérateurs.

Il nous paraît de plus essentiel de confier aux opérateurs des tâches qui correspondent à un besoin réel dans la conduite de l'unité et qui ne soient pas créées de façon artificielle comme cela est parfois le cas. Il est dégradant de demander à un opérateur d'effectuer des relevés de mesures qui sont par ailleurs effectués par un capteur et transmises directement en salle de contrôle. L'opérateur doit participer à l'élaboration du produit et avoir le sentiment que sa responsabilité est engagée par les conséquences de ses opérations.

iii. Des tâches de maintenance de premier niveau

"Il faut responsabiliser les opérateurs devant leur outil de travail". C'est un discours classique, que l'on a largement pu vérifier ailleurs que dans l'industrie chimique, dans l'industrie automobile par exemple.

Différents arguments peuvent être présentés contre cette approche, en particulier pour des raisons de sécurité: "donnez une caisse à outil à des opérateurs, ils démonteront l'usine", "le travail réalisé manquera de professionnalisme", "cela créera des conflits avec les équipes de maintenance déjà en place". Ces arguments ne paraissent pas constructifs et semblent peu pertinents. Confier des tâches de maintenance à des opérateurs de la chimie, donc sans formation en mécanique, nécessite un effort de formation et de remise à niveau permanent des connaissances, une ferme volonté de limiter le cadre des interventions des opérateurs et une bonne gestion des relations avec les autres services des usines. Une telle activité paraît clairement envisageable...

c. Avantages de l'approche proposée.

Une analyse rapide et qualitative permet de dégager les points suivants.

i. Une diminution des risques.

Affecter des tâches effectives aux opérateurs permet d'accroître leur présence sur le site et par là même leur vigilance, même inconsciente. Les incidents potentiels sont détectés plus rapidement et donc traités plus en amont. De plus, la réactivité des opérateurs est accrue par leur activité même. Tous ces éléments concourent à diminuer les facteurs de risque sur l'unité.

ii. Une certaine diminution des coûts.

L'approche proposée ne permet pas de réduire les frais de personnels postés: elle est en effet fondée sur un niveau constant en personnel de fabrication. En revanche, elle entraîne une diminution

- des frais d'instrumentation: une vanne dont on supprime l'automatisation, c'est trois vannes qui disparaissent également (2 vannes tout-ou-rien "TOR" manuelles amont et aval, 1 vanne bypass manuelle),

- des frais de maintenance: moins d'automatisation et plus de maintenance préventive donc moins de personnel de maintenance et moins de frais de remplacement de matériel,

- et des frais imputables à des pannes et déclenchements: par une meilleure vigilance et une plus grande réactivité de la part des opérateurs.

iii. Une valorisation du travail des opérateurs.

Les opérateurs ont un travail qui leur permet d'avoir une emprise concrète sur l'activité de l'unité. Ils sont responsabilisés et leurs compétences sont utilisées et valorisées. Ils sont dans de bien meilleures conditions pour participer à la vie de l'entreprise.

3. Conclusion

L'approche présentée ci-dessus ne prétend pas résoudre l'ensemble des problèmes liés à l'automatisation. Partant de deux constats concrets, elle se contente de proposer une alternative permettant d'éviter certains écueils liés à une certaine vision de l'automatisation. Son message est simple: il est envisageable de mieux valoriser le potentiel humain nécessairement présent pour des raisons de sécurité, en analysant au mieux la valeur ajoutée réelle de l'automatisation.

C. Et le futur?

1. De nouveaux outils d'aide à la conduite...

Les récents progrès et les voies de recherche en intelligence artificielle vont, d'après l'analyse des ingénieurs des centres techniques, modifier à moyen terme la conduite des unités de l'industrie chimique. Les recherches vont dans le sens d'une automatisation accrue où l'on cherche, si ce n'est à remplacer l'opérateur, du moins à l'assister fortement. De manière non exhaustive, les nouveaux outils à sa disposition seront fondés sur des systèmes experts, la physique qualitative, la logique floue, la programmation par contraintes, les réseaux de neurones, etc.. A ce jour, seuls les systèmes experts et les réseaux de neurones connaissent un début d'application industrielle.

a. Les systèmes experts

Ils fournissent des aides à la conduite et au diagnostic en cas de panne, grâce à une modélisation du savoir faire des opérateurs. La philosophie sous-jacente repose sur le fait que les aptitudes des opérateurs à émettre un diagnostic correct, en situation de crise et donc de stress, sont réduites (voir ci-dessus l'étude de l'IPSN Chapitre 2, Partie B.2 *Une augmentation des facteurs de risques humains*). En revanche, la capitalisation de l'expérience déjà acquise, et les enseignements tirés d'accidents passés, doivent permettre de fournir aux opérateurs des éléments fiables d'aide au diagnostic.

Les récents essais de tels systèmes ont mis en évidence, à ce jour, les limites suivantes.

- Un système expert n'est pas facile à faire évoluer, il est difficile de l'enrichir par l'expérience et il est incapable d'apprentissage. C'est un livre de recettes à nombre de pages fixe.

- Les systèmes experts utilisent peu de variables qualitatives, et ne savent donc pas moduler leur diagnostic.

- La fréquence des diagnostic est faible pour l'instant, un toutes les 25 minutes, et il faut attendre quatre diagnostics identiques pour déclencher une action fiable.

- De plus, le fait que les opérateurs sachent garder leur esprit critique face aux diagnostics délivrés par les systèmes experts n'est nullement évident, ce qui introduit un facteur de risques supplémentaire dans la conduite de l'unité.

b. Les réseaux de neurones

Le développement des réseaux de neurones repose sur la constatation simple qu'il est des tâches pour lesquelles les ordinateurs conventionnels sont mal adaptés: reconnaissance des formes, commande de mouvement... alors que les systèmes nerveux d'animaux simples les réalisent facilement. A l'heure actuelle, un neurone formel est encore un objet rudimentaire. C'est un automate binaire dont l'état est actif ou inactif. L'état du neurone est actualisé périodiquement: le neurone "prend un décision" en comparant une certaine combinaison des entrées à un seuil qui lui est propre. On peut ensuite créer des réseaux de neurones pour créer des fonctions utiles dans les applications industrielles.

L'originalité des réseaux de neurones est qu'ils nécessitent un apprentissage (pour fixer les valeurs seuils de chaque neurone, et les paramètres de la pondération à affecter à chaque entrée...). Cet apprentissage consiste à calculer les coefficients de telle manière que les sorties du réseau soient aussi proches que possible des sorties désirées. Il s'agit, dans le cas d'applications à l'industrie chimique, du processus à commander.

Il existe quelques réseaux de neurones qui fonctionnent actuellement. Dans le cas de la commande d'usines chimiques, ils ne sont pour l'instant utilisés que comme aide au diagnostic pour l'opérateur. Les limitations de ces réseaux viennent:

- du faible nombre de couches des réseaux actuels et donc du caractère limité de leur domaine de réponse,

- de la nécessité de recourir à l'apprentissage préalable des différents cas de figure à envisager. Comment le réaliser? Doit-on mettre l'unité en situations extrêmes pour que le réseau apprenne la conduite à suivre dans ces cas là?

- des interrogations sur le comportement du réseau de neurones lors de situations nouvelles (pour lesquelles il n'y a pas eu d'apprentissage).

Dans tous les cas, le rôle de l'opérateur comme superviseur ultime des actions proposées par le réseau de neurones, ou le système expert, doit être affirmé. En effet, la fiabilité de ces systèmes semble pour l'instant trop faible pour leur laisser la commande des unités, et donc supprimer totalement les opérateurs. Dans ces conditions, on se retrouve dans la problématique décrite dans le Chapitre 2. Partie B.3, il faut de toutes façons un opérateur, pourquoi le laisser inactif?

Parallèlement à l'amélioration des outils d'aide et de commande, un autre axe de modernisation des unités se développe dans le prolongement de l'action d'agrégation des niveaux de commande déjà entreprise. Il consiste à intégrer l'ensemble des actions de commande d'une usine autour d'un même outil informatique. Honeywell propose par exemple le concept de "Total Plant Management".

2. Autour du "Total Plant Management" proposé par Honeywell

Le "Total Plant Management" est un concept qui propose des solutions d'automatisation intégrées qui couvrent tous les domaines d'activité de l'usine.

A partir d'une station de travail, un "opérateur" a potentiellement accès à un réseau complexe qui gère:

- l'instrumentation terrain. D'une nouvelle génération, cette instrumentation numérique intelligente, compacte et de grande précision auto-diagnostique (auto-détection de pannes), et communique numériquement avec le reste du réseau. L'opérateur peut donc modifier la base de donnée du transmetteur, changer sa calibration, et disposer d'un diagnostic d'état de l'appareil.

- le contrôle-commande du procédé, qui, à partir de l'archivage numérique de toutes les données disponibles (relevés de mesures, commandes déjà passées, analyses de qualité, ...), et en utilisant des modules d'optimisation mathématiques des fonctions de production, commande et surveille l'unité, depuis l'arrivée des matières premières jusqu'aux quais d'expédition..

- les contraintes économiques (contrôle à chaque instant des rendements, des coûts de production. etc.), logistiques (optimisation de la qualité, des quantités, et des coûts d'approvisionnement, ordonnancement de production, gestion de la maintenance, etc.) et humaines (disponibilité et gestion du personnel, etc.) de l'ensemble de l'unité.

Cette solution globale pousse jusqu'à son terme l'automatisation des unités chimiques puisqu'elle propose une intégration complète de toutes les fonctions d'une usine au coeur d'un même système. A la limite, une telle usine pourrait fonctionner avec un

personnel extrêmement réduit. En effet, poussé à son terme, le concept décrit ci-dessus implique nécessairement la réduction drastique de nombreux services fonctionnels (planification, etc.), et donc des restructurations importantes de l'organisation en personnel d'une usine. Certains prédisent déjà: "après la disparition des cols bleus, à quand celle des cols blancs?".

Dans ce modèle, la place de l'opérateur, dans son acception originale, est considérablement amoindrie. Ces attributions traditionnelles de conducteurs d'unité sont bouleversées, ses compétences techniques inexploitées.

On peut au contraire considérer que le rôle de l'opérateur soit renforcé si on le considère désormais comme un agent économique, responsable d'une fonction de production, et munis des attributions auparavant répartis entre plusieurs services de l'usine.

Un tel modèle révolutionne également le concept de hiérarchie. Quelle place et quel rôle donner aux agents de maîtrise, que deviendraient les ingénieurs?

3. Conclusion

Monstre incontrôlable, ou simple achèvement d'une certaine idée du progrès technologique, le concept de "Total Plant Management " nous paraît en tout cas trop peu avancé aujourd'hui pour être applicable en la matière, à des usines chimiques. De plus, des considérations de sécurité (nécessité, à nos yeux, d'une présence humaine sur sites), des blocages culturels (ex: besoin de fournir aux opérateurs des données quantifiées sur les coûts de production, pression des syndicats contre les restructurations de service, etc.), des difficultés de réalisation techniques et l'absence de calculs de rentabilité crédibles, devraient limiter l'essor d'un tel concept.

Conclusion

Les entreprises chimiques investissent toujours plus en automatisation. Les justifications économiques de ces investissements sont de moins en moins convaincantes. L'automatisation relève de l'acte de foi.

Il ne faudrait toutefois pas conclure de la lecture de ce rapport que nous considérons qu'il faille prôner un "retour en arrière", et que les efforts de recherche en automatisation soient vains. Force est de constater que les usines modernes sont plus performantes et plus sûres que les unités conçues dans les années soixante. L'automatisation a donc des vertus cachées. Ses effets se font sentir à long terme, et ne sont pas compatibles avec les analyses financières de rentabilité économique, privilégiant structurellement le court terme.

Mais, la volonté systématique de diminuer les interventions humaines par une sur-automatisation a conduit aux effets pervers que nous avons décrits.

Il est donc temps de chercher une autre voie qui allie aux vertus de l'automatisation, les apports nécessaires de la présence humaine sur les sites chimiques. La méthode proposée s'appuie sur le principe que la taille de l'équipe de conduite est définie pour gérer les incidents et les phases transitoires. En période de conduite normale, pour valoriser le travail des opérateurs et maintenir leur vigilance, il vaut mieux leur donner des tâches effectives de conduite, plutôt que de recourir à une sur-automatisation coûteuse. Enfin, les moyens automatiques permettent d'effectuer les autres tâches, notamment celle à forte occurrence...

Remerciements

L'étude de l'automatisation dans l'industrie chimique a été intéressante et instructive pour nous, car elle nous a permis d'aborder des sujets techniques, humains, financiers, et relatifs à la sécurité et l'environnement.

Nous tenons à remercier tout particulièrement, Messieurs G. AGUINET, F. PERIER, et P. ROUCHON pour leur aide et leurs conseils tout au long de notre travail.

Nous tenons également à remercier l'ensemble des personnes suivantes pour l'aide qu'elles nous ont apporté dans la réalisation de ce mémoire.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES MINES DE PARIS

P. ROUCHON, Ingénieur en Chef des Mines, Maître de Recherches au Centre Automatique et Systèmes

ELF-ATOCHEM

J. PUECHAL, Président Directeur Général

F. PERIER, Directeur de la Division Intermédiaires Organiques de Synthèse

G. AGUINET, Directeur Industriel Pétrochimie et Polyoléfines

Y. VEROT, Direction Sécurité Environnement Industrie

F. TAILLY, Directeur Technique

P. de LESQUEN, Directeur des Procédés

F. ROCQUET, Directeur des Relations Humaines

J. CHABROL, Directeur Qualité, Chef du Département Développement Qualité

M. GOEBEL, Directeur Economie, Plan, Energie

M. BERGOUGNAN, Direction Industrielle Pétrochimie et Polyoléfines

• Centre Technique Atochem (69)

H. GIRIN, Directeur du Centre Technique

F. CAESEMAECKER, Département Technique, Maintenance

P. CHARLON

A. MARION

M. SOUCHE
E. TISSIER
A. BOUDEHEN

• Usine de Gonfreville (76)

A. DEVIC, Directeur
J.P. LETORT, Responsable Relations Humaines
Ph. DELFORGE, Responsable Communication
D. AUBOURG, Responsable Sécurité, Environnement, Inspection, Coordination
T. VASSEUR, Sécurité, Environnement, Inspection, Coordination
J. MORCH, Sécurité, Environnement, Inspection, Coordination
J.F. LAPLANCHE, Responsable Secteur Pétrochimie/ Energie
Y. LYET, Responsable du Service Instrumentation
M. DUVAL, Service Instrumentation
X. ARNAUD, Responsable de l'Informatique Industrielle
Y. BOIRAUD, Responsable du Secteur Maintenance
F. BONETTI, Responsable Service Formation
J.C.. RONDI, Chef de l'Unité de Styrène
G. MOREL, Chef Opérateur, et son équipe.

• Usine de Chauny (02)

M. BARBE, Directeur
J.P. STIOT, Responsable du Secteur Fabrication

• Usine de Serquigny (27)

P. VINCENT, Directeur
P. VIPREY,
E. RIGAL, Responsable Polymérisation
J. DUVAL, Responsable Services Techniques
B. JOIGNEAULT, Responsable Electricité Instrumentation, Fluides Généreaux
D. DELAMARE, Services Techniques
F. REGUILLOT, Responsable Ateliers Aval
S. TALIBON, Responsable Ateliers Poudres
B. LAMY, Responsable Laboratoire Contrôle Fabrication
G. PICHON, C.CO

• Usine de Pierre Bénite (69)

M. CORBEIL, Directeur

M. VIRELY, Directeur Adjoint

V. FERNANDO, Chef du Service Minérale

• Usine de Saint Auban (04)

Y. SEYTRE, Directeur

J.C VERGELY, Directeur Adjoint

M.PONT, Responsable de sServices Techniques

P. CORGIER, Chef du Service Electricité Instrumentation

M. BRAULT, Service Electricité Instrumentation

D. EMERY, Informatique Industrielle

A. ROYER, Responsable Social

ELF-ATOCHEM NORTH AMERICA

Dr. Jan de BOER, Director of Manufacturing, Fine Chemical Group

Hemant K. SHAH, Director of Manufacturing, Industrial Chemical Group

Edward J. McGINN, Director, Industrial Relations

Erik R. EYBYE, Director Compensation

Edwin L. WILCOX, Jr., Manager, Labor Relations

G. George ZARGARIAN, Manager-Process Development, Organic Peroxides

• Usine de Riverview, Michigan.

M. di MAGGIO, Plant Manager

Rakesh C. VASAVADA, Senior Process Engineer

Didier AUBER, Process Engineer

Daniel SPOKE, Process Engineer

Frederick BURY, Senior Chemical Engineer

Mark MADEJ, Chemical Engineer

Charles MELEKIAN, Project Engineer

Karl H. ERNST, Project Engineer

• Usine de Crosby, Texas

J. Thomas VOLTZ, Plant Manager, Fine Chemical Group

• Etablissement de King of Prussia, Pennsylvania

Dr. BOSSO, Site Manager

James J. KARR, Principal Scientist, Central Analytical Chemistry

M. HOECKENBURY, Senior Engineer, Central Engineering Group

Richard MATUSEWICZ, Senior Chemical Engineer

Erich ZIMMERMAN, Senior Environmental Engineer

Steven M. GALATON, Pilot Plant Manager

Steven G. SCHON, Senior Chemical Engineer, Pilot Plant

Robert P. NELSON, Chemical Engineer, Pilot Plant

David F. BARBIERI, Superintendent, Pilot Plant Operations and Maintenance

SANOFI CHIMIE, Usine d'Aramon (30)

Nicolas TRUELLE, Directeur

G. GARDES, Responsable de l'Activité Synthèse

M. ARNOUX, Responsable de l'Atelier de Synthèse 2

Jean-François KOPP, Responsable Procédé

C. MONTBROUSSOU, Informatique Industrielle

RHONE POULENC

Robert CHANEZON, Directeur Stratégie et Planification Groupe

Jean Marie GUICHARD, Directeur Sécurité

UNION DES INDUSTRIE CHIMIQUES

M. BAZILE, Président

**MINISTÈRE DU TRAVAIL, DE L'EMPLOI, ET DE LA FORMATION
PROFESSIONNELLE**

Christian SCHERER, Ingénieur en Chef des Mines, Conseiller Technique à la Délégation à l'Emploi

INSPECTION GÉNÉRALE DES AFFAIRES SOCIALES
Claude CHETCUTI, Inspecteur Général des Affaires Sociales

INSTITUT DE PROTECTION ET DE SURETÉ NUCLÉAIRE
Philippe VESSERON, Ingénieur Général des Mines, Directeur
Jacques BRISBOIS

HONEYWELL FRANCE
M. de MORTIER, Directeur de la Division Contrôle Industriel
D. CRESSENT, Ingénieur Technico-Commercial

Bibliographie

G.STEPHANOPOULOS

Chemical Process Control

Prentice-Hall Editeur

J.L. NICOLET, A. CARNINO, J.C WANNER

Catastrophes ? Non Merci! La prévention des risques technologiques et humains

Masson Editeur

P.CAPDEVIELLE, F. HERAN

Automatisation et restructuration des activités dans la production

in "Ouvriers qualifiés, maîtrise et techniciens de production dans les industries en cours d'automatisation", Volume II, Collection des Etudes

Centre d'Etudes et de Recherches sur les Qualifications (CEREQ)

B. HILLAU

Formes actuelles de la haute qualification ouvrière

in "Ouvriers qualifiés, maîtrise et techniciens de production dans les industries en cours d'automatisation", Volume III, Collection des Etudes

Centre d'Etudes et de Recherches sur les Qualifications (CEREQ)

J.C. FAYOLLE et L. PELLERIN, ESSO Chimie

Mise en service de nouveaux Systèmes de contrôle à N.-D. de Gravenchon

in Pétrole et Technique n°300-août-septembre 1983

J.P. LETORT et D. PASCAL, ELF ATOCHEM

De la régulation à l'informatisation au vapocraqueur de Gonfreville

in Pétrole et Technique n°300-août-septembre 1983

H. RIBIERE, SHELL Chimie

*Transformation des systèmes de régulation dans une unité en fonctionnement continu
"extraction butadiène" à Berre*

in Pétrole et Technique n°300-août-septembre 1983

Ph. LAPOUGE et J. VUILLEMENOT, ex PCUK

*Evolution des mentalités et des comportements du métier de l'industrie chimique. Cas de
"Vinyfos"*

in Pétrole et Technique n°300-août-septembre 1983

G. DREYFUS

Les Réseaux de Neurones Formels

Ecole Supérieure de Physique et Chimie Industrielle

Table des matières

Avant-propos.....	1
Abstract.....	2
Glossaire.....	5
Chapitre 1. Pourquoi les unités chimiques sont-elles automatisées?.....	7
A. Industrie chimique et automatisation.....	9
1. Un panorama complexe et hétérogène.....	9
a. Une apparente complexité.....	9
b. Une industrie très diversifiée.....	10
i. Diversité dans la nature des produits.....	10
ii. Diversité des procédés et des types de chimie.....	10
iii. Une diversité des systèmes de commande.....	11
c. Conclusion.....	11
2. Les principes physiques de la régulation des unités chimiques.....	12
a. Une industrie de "process".....	12
b. La régulation élémentaire.....	12
i. Notion de régulation.....	12
ii. Étude d'un exemple simple: une capacité tampon.....	13
c. D'une boucle élémentaire à un système complexe.....	14
i. Les voies de la complexification.....	14
ii. Exemple d'une colonne de distillation.....	15
d. De la colonne de distillation au pilotage de l'usine.....	16
e. Conclusion.....	18
3. Les aspects technologiques de la régulation des unités chimiques.....	18
4. Conclusion.....	21

B.	Étude de cas concrets: nos stages opérateurs	21
1.	Les acteurs.....	21
a.	Le chef de poste.....	22
b.	L'opérateur tableau.....	22
c.	Les opérateurs extérieurs.....	23
2.	Le déroulement d'un poste.....	24
a.	Le calendrier de quart.....	24
b.	Les quarts de jour.....	24
c.	Les quarts de nuit.....	25
	Conclusion.....	25
C.	Un contexte favorable au développement de l'automatisation	25
1.	Une science industrialisée.....	25
a.	Une certaine faiblesse des modèles théoriques.....	25
b.	Les limites des usines pilotes.....	26
c.	Les vertus de l'expérience.....	26
d.	Un besoin d'outils d'analyse.....	26
2.	Une culture du danger.....	27
3.	L'influence de la pétrochimie.....	27
D.	Les finalités de l'automatisation.	28
1.	Augmenter la sécurité des installations.....	28
a.	Maîtriser la conduite d'une unité.....	28
b.	Éloigner les opérateurs.....	30
c.	Connaître l'unité en temps réel.....	31
d.	Un exemple de prise en compte de la sécurité dans le choix du système de conduite.....	31
2.	Diminuer les effectifs.....	31
a.	Impact macroéconomique.....	32
b.	Diminuer les charges de personnel.....	32
c.	Une volonté de diminuer les interventions humaines.....	34
3.	Améliorer les rendements.....	35
a.	Mieux garder une consigne.....	35
b.	Les historiques (terme consacré: "trend").....	37
4.	Améliorer la qualité.....	37
a.	Rester plus proche des spécifications.....	37
b.	Une exigence de traçabilité.....	38

5.	Améliorer l'ergonomie et les conditions de travail	38
a.	Automatiser les actions pénibles	38
b.	Hygiène industrielle: l'exposition aux produits dangereux.....	38
6.	Répondre à un besoin de flexibilité.....	39
E.	Conclusion	39
Chapitre 2. Les effets pervers de l'automatisation		41
A.	Conséquences sociales du nouveau métier de conduite	43
1.	Une adaptation inattendue à l'ordinateur	43
2.	Une modification sensible de l'environnement de travail	43
3.	Des modifications de statuts	44
a.	Le déclin du rôle du chef opérateur?.....	44
b.	la prééminence de l'opérateur tableau	45
c.	Le cas des opérateurs extérieurs	45
4.	Conséquences d'une redéfinition des tâches.....	45
a.	Le stress du travail à l'alarme	46
b.	Réalité virtuelle et distanciation.....	46
c.	Changement de variables et nivellement de la conduite	47
d.	Des exigences accrues de formation	47
5.	Recrutement et carrière	48
a.	Quel avenir pour de jeunes ouvriers désabusés?.....	49
b.	Des BTS enfermés dans leur statut de technicien.....	49
6.	Conclusion.....	50
B.	Quelques effets pervers en matière de sécurité	51
1.	Des facteurs de risques liés aux techniques employées.....	51
a.	Des technologies sensibles.....	51
b.	Le syndrome de la "boite noire"	52
2.	Une augmentation des facteurs de risques humains	53
a.	Les conséquences d'une trop grande distanciation.....	53
b.	Complexité de gestion et erreur humaine.....	54
c.	Vigilance ou somnolence?.....	56
3.	Conclusion.....	56

C.	Le coût élevé de l'automatisation	57
1.	Trois exemples.....	57
a.	Un mélangeur de produit.....	58
b.	Un exemple d'investissement dans le domaine des polymères.....	58
c.	Deux unités de pétrochimie identiques?.....	59
2.	Les causes du surcoût.....	59
a.	"Se faire plaisir dans la technique".....	59
b.	Impact de la conjoncture économique.....	61
c.	Le syndrome "ça peut servir".....	61
d.	La spécialisation.....	62
e.	La procédure de chiffrage.....	62
f.	L'influence de l'administration.....	63
3.	Analyse des arguments techniques justifiant les choix d'automatisation.....	64
a.	Les limites à la diminution des effectifs.....	64
b.	Obsolescence des matériels et baisse des prix?.....	65
c.	Maintien d'une avance technologique.....	66
d.	Des gains en qualité à démontrer.....	66
e.	Des gains en rendement non prouvés.....	67
f.	Un outil de management pour les chefs d'unité.....	69
4.	Conclusion.....	69
D.	Conclusion: Un acte de foi?	70
Chapitre 3. D'autres approches.....		71
A.	Le modèle américain	73
1.	Étude d'un exemple.....	73
2.	Les intérêts de l'automatisation pour les Américains.....	74
3.	La sécurité et l'environnement.....	75
a.	Un exemple.....	75
b.	La législation américaine.....	75
c.	Influence de la législation sur la conception des systèmes de sécurité.....	76
4.	Le contexte social.....	76
a.	L'équipe de conduite.....	76

b.	Une grande flexibilité de la main d'œuvre.....	77
c.	le coût de la main d'œuvre américaine.....	78
d.	Conclusion.....	78
5.	La notion de responsabilité.....	78
a.	Un état d'esprit plus responsable?.....	78
b.	Deux types de comportement chez les opérateurs.....	79
c.	Le choix des investissements.....	79
6.	Le management.....	81
a.	Un management très financier.....	81
b.	Ne retenir que des solutions techniques éprouvées.....	81
c.	Une conduite plus visuelle des unités.....	82
d.	Automatiser jusqu'au bout.....	83
7.	Conclusion.....	83
B.	Vers un nouvel arbitrage automatisation / travail.....	83
1.	Deux constats contradictoires.....	84
a.	Constat 1: Il n'apparaît pas possible de supprimer toute présence humaine sur les sites chimiques.....	84
i.	Une nécessaire complémentarité des visions.....	84
ii.	La gestion des impondérables.....	86
b.	Constat 2: Les opérateurs sont occupés 10% de leur temps en régime permanent.....	86
i.	Pour l'employeur.....	86
ii.	En termes de sécurité.....	87
iii.	En termes humains.....	87
2.	Une approche valorisant le potentiel humain.....	87
a.	Exposé de l'approche suggérée.....	87
b.	Méthodologie possible.....	88
i.	Une segmentation des tâches à réaliser.....	88
ii.	Des tâches effectives dans la conduite de l'unité.....	89
iii.	Des tâches de maintenance de premier niveau.....	89
c.	Avantages de l'approche proposée.....	90
i.	Une diminution des risques.....	90
ii.	Une certaine diminution des coûts.....	90
iii.	Une valorisation du travail des opérateurs.....	90
3.	Conclusion.....	91

C.	Et le futur?	91
1.	De nouveaux outils d'aide à la conduite.....	91
a.	Les systèmes experts	91
b.	Les réseaux de neurones	92
2.	Autour du "Total Plant Management" proposé par Honeywell.....	93
3.	Conclusion.....	94
Conclusion		95
Remerciements		97
Bibliographie		103
Table des matières		105