

Conditions d'utilisation des contenus du Conservatoire numérique

1- [Le Conservatoire numérique](#) communément appelé [le Cnum](#) constitue une base de données, produite par le Conservatoire national des arts et métiers et protégée au sens des articles L341-1 et suivants du code de la propriété intellectuelle. La conception graphique du présent site a été réalisée par Eclydre (www.eclydre.fr).

2- Les contenus accessibles sur le site du Cnum sont majoritairement des reproductions numériques d'œuvres tombées dans le domaine public, provenant des collections patrimoniales imprimées du Cnam.

Leur réutilisation s'inscrit dans le cadre de la loi n° 78-753 du 17 juillet 1978 :

- la réutilisation non commerciale de ces contenus est libre et gratuite dans le respect de la législation en vigueur ; la mention de source doit être maintenue ([Cnum - Conservatoire numérique des Arts et Métiers - https://cnum.cnam.fr](#))
- la réutilisation commerciale de ces contenus doit faire l'objet d'une licence. Est entendue par réutilisation commerciale la revente de contenus sous forme de produits élaborés ou de fourniture de service.

3- Certains documents sont soumis à un régime de réutilisation particulier :

- les reproductions de documents protégés par le droit d'auteur, uniquement consultables dans l'enceinte de la bibliothèque centrale du Cnam. Ces reproductions ne peuvent être réutilisées, sauf dans le cadre de la copie privée, sans l'autorisation préalable du titulaire des droits.

4- Pour obtenir la reproduction numérique d'un document du Cnum en haute définition, contacter [cnum\(at\)cnam.fr](mailto:cnum(at)cnam.fr)

5- L'utilisateur s'engage à respecter les présentes conditions d'utilisation ainsi que la législation en vigueur. En cas de non respect de ces dispositions, il est notamment passible d'une amende prévue par la loi du 17 juillet 1978.

6- Les présentes conditions d'utilisation des contenus du Cnum sont régies par la loi française. En cas de réutilisation prévue dans un autre pays, il appartient à chaque utilisateur de vérifier la conformité de son projet avec le droit de ce pays.

NOTICE BIBLIOGRAPHIQUE

NOTICE DE LA REVUE	
Auteur(s) ou collectivité(s)	Auteur collectif - Revue
Titre	L'Industrie nationale : comptes rendus et conférences de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale
Adresse	Paris : Société d'encouragement pour l'industrie nationale, 1949-2003
Collation	167 vol.
Nombre de volumes	167
Cote	INDNAT
Sujet(s)	Industrie
Note	Numérisation effectuée grâce au prêt de la collection complète accordé par la Société d'encouragement pour l'industrie nationale (S.E.I.N.)
Notice complète	https://www.sudoc.fr/039224155
Permalien	https://cnum.cnam.fr/redir?INDNAT
LISTE DES VOLUMES	
	1949, n° 1 (janv.-mars)
	1949, n° 2 (avril-juin)
	1949, n° 3 (juil.-sept.)
	1949, n° 4 (oct.-déc.)
	1949, n° 4 bis
	1950, n° 1 (janv.-mars)
	1950, n° 2 (avril-juin)
	1950, n° 3 (juil.-sept.)
	1950, n° 4 bis
	1951, n° 1 (janv.-mars)
	1951, n° 2 (avril-juin)
	1951, n° 3 (juil.-sept.)
	1951, n° 4 (oct.-déc.)
	1952, n° 1 (janv.-mars)
	1952, n° 2 (avril-juin)
	1952, n° 3 (juil.-sept.)
	1952, n° 4 (oct.-déc.)
	1952, n° spécial
	1953, n° 1 (janv.-mars)
	1953, n° 2 (avril-juin)
	1953, n° 3 (juil.-sept.)
	1953, n° 4 (oct.-déc.)
	1953, n° spécial
	1954, n° 1 (janv.-mars)
	1954, n° 2 (avril-juin)
	1954, n° 3 (juil.-sept.)
	1954, n° 4 (oct.-déc.)
	1955, n° 1 (janv.-mars)

	1955, n° 2 (avril-juin)
	1955, n° 3 (juil.-sept.)
	1955, n° 4 (oct.-déc.)
	1956, n° 1 (janv.-mars)
	1956, n° 2 (avril-juin)
	1956, n° 3 (juil.-sept.)
	1956, n° 4 (oct.-déc.)
	1957, n° 2 (avril-juin)
	1957, n° 3 (juil.-sept.)
	1957, n° 4 (oct.-déc.)
	1957, n° spécial (1956-1957)
	1958, n° 1 (janv.-mars)
	1958, n° 2 (avril-juin)
	1958 n° 3 (juil.-sept.)
	1958, n° 4 (oct.-déc.)
	1959, n° 1 (janv.-mars)
	1959, n° 2 (avril-juin)
	1959 n° 3 (juil.-sept.)
	1959, n° 4 (oct.-déc.)
	1960, n° 1 (janv.-mars)
	1960, n° 2 (avril-juin)
	1960, n° 3 (juil.-sept.)
	1960, n° 4 (oct.-déc.)
	1961, n° 1 (janv.-mars)
	1961, n° 2 (avril-juin)
	1961, n° 3 (juil.-sept.)
	1961, n° 4 (oct.-déc.)
	1962, n° 1 (janv.-mars)
	1962, n° 2 (avril-juin)
	1962, n° 3 (juil.-sept.)
	1962, n° 4 (oct.-déc.)
	1963, n° 1 (janv.-mars)
	1963, n° 2 (avril-juin)
	1963, n° 3 (juil.-sept.)
	1963, n° 4 (oct.-déc.)
	1964, n° 1 (janv.-mars)
	1964, n° 2 (avril-juin)
	1964, n° 3 (juil.-sept.)
	1964, n° 4 (oct.-déc.)
	1965, n° 1 (janv.-mars)
	1965, n° 2 (avril-juin)
	1965, n° 3 (juil.-sept.)
	1965, n° 4 (oct.-déc.)
	1966, n° 1 (janv.-mars)
	1966, n° 2 (avril-juin)
	1966, n° 3 (juil.-sept.)
	1966, n° 4 (oct.-déc.)
	1967, n° 1 (janv.-mars)
	1967, n° 2 (avril-juin)
	1967, n° 3 (juil.-sept.)

	1967, n° 4 (oct.-déc.)
	1968, n° 1
	1968, n° 2
	1968, n° 3
	1968, n° 4
	1969, n° 1 (janv.-mars)
	1969, n° 2
	1969, n° 3
VOLUME TÉLÉCHARGÉ	1969, n° 4
	1970, n° 1
	1970, n° 2
	1970, n° 3
	1970, n° 4
	1971, n° 1
	1971, n° 2
	1971, n° 4
	1972, n° 1
	1972, n° 2
	1972, n° 3
	1972, n° 4
	1973, n° 1
	1973, n° 2
	1973, n° 3
	1973, n° 4
	1974, n° 1
	1974, n° 2
	1974, n° 3
	1974, n° 4
	1975, n° 1
	1975, n° 2
	1975, n° 3
	1975, n° 4
	1976, n° 1
	1976, n° 2
	1976, n° 3
	1976, n° 4
	1977, n° 1
	1977, n° 2
	1977, n° 3
	1977, n° 4
	1978, n° 1
	1978, n° 2
	1978, n° 3
	1978, n° 4
	1979, n° 1
	1979, n° 2
	1979, n° 3
	1979, n° 4
	1980, n° 1
	1982, n° spécial

	1983, n° 1
	1983, n° 3-4
	1983, n° 3-4
	1984, n° 1 (1er semestre)
	1984, n° 2
	1985, n° 1
	1985, n° 2
	1986, n° 1
	1986, n° 2
	1987, n° 1
	1987, n° 2
	1988, n° 1
	1988, n° 2
	1989
	1990
	1991
	1992
	1993, n° 1 (1er semestre)
	1993, n° 2 (2eme semestre)
	1994, n° 1 (1er semestre)
	1994, n° 2 (2eme semestre)
	1995, n° 1 (1er semestre)
	1995, n° 2 (2eme semestre)
	1996, n° 1 (1er semestre)
	1997, n° 1 (1er semestre)
	1997, n°2 (2e semestre) + 1998, n°1 (1er semestre)
	1998, n° 4 (4e trimestre)
	1999, n° 2 (2e trimestre)
	1999, n° 3 (3e trimestre)
	1999, n° 4 (4e trimestre)
	2000, n° 1 (1er trimestre)
	2000, n° 2 (2e trimestre)
	2000, n° 3 (3e trimestre)
	2000, n° 4 (4e trimestre)
	2001, n° 1 (1er trimestre)
	2001, n° 2-3 (2e et 3e trimestres)
	2001, n°4 (4e trimestre) et 2002, n°1 (1er trimestre)
	2002, n° 2 (décembre)
	2003 (décembre)

NOTICE DU VOLUME TÉLÉCHARGÉ	
Titre	L'Industrie nationale : comptes rendus et conférences de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale
Volume	1969, n° 4
Adresse	Paris : Société d'encouragement pour l'industrie nationale, 1969

Collation	1 vol. (56 p.) : ill. ; 27 cm
Nombre de vues	68
Cote	INDNAT (89)
Sujet(s)	Industrie
Thématique(s)	Généralités scientifiques et vulgarisation
Typologie	Revue
Langue	Français
Date de mise en ligne	03/09/2025
Date de génération du PDF	08/09/2025
Recherche plein texte	Non disponible
Permalien	https://cnum.cnam.fr/redir?INDNAT.89

Note d'introduction à [l'Industrie nationale \(1947-2003\)](#)

[L'Industrie nationale](#) prend, de 1947 à 2003, la suite du [Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale](#), publié de 1802 à 1943 et que l'on trouve également numérisé sur le CNUM. Cette notice est destinée à donner un éclairage sur sa création et son évolution ; pour la présentation générale de la Société d'encouragement, on se reportera à la [notice publiée en 2012 : « Pour en savoir plus »](#)

[Une publication indispensable pour une société savante](#)

La Société, aux lendemains du conflit, fait paraître dans un premier temps, en 1948, des [Comptes rendus de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale](#), publication trimestrielle de petit format résumant ses activités durant l'année sociale 1947-1948. À partir du premier trimestre 1949, elle lance une publication plus complète sous le titre de [L'Industrie nationale. Mémoires et comptes rendus de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale](#).

Cette publication est différente de l'ancien [Bulletin](#) par son format, sa disposition et sa périodicité, trimestrielle là où ce dernier était publié en cahiers mensuels (sauf dans ses dernières années). Elle est surtout moins diversifiée, se limitant à des textes de conférences et à des rapports plus ou moins développés sur les remises de récompenses de la Société.

[Une publication qui reflète les ambitions comme les aléas de la Société d'encouragement](#)

À partir de sa création et jusqu'au début des années 1980, [L'Industrie nationale](#) ambitionne d'être une revue de référence abordant, dans une sélection des conférences qu'elle organise — entre 8 et 10 publiées annuellement —, des thèmes extrêmement divers, allant de la mécanique à la biologie et aux questions commerciales, en passant par la chimie, les différents domaines de la physique ou l'agriculture, mettant l'accent sur de grandes avancées ou de grandes réalisations. Elle bénéficie d'ailleurs entre 1954 et 1966 d'une subvention du CNRS qui témoigne de son importance.

À partir du début des années 1980, pour diverses raisons associées, problèmes financiers, perte de son rayonnement, fin des conférences, remise en question du modèle industriel sur lequel se fondait l'activité de la Société, [L'Industrie nationale](#) devient un organe de communication interne, rendant compte des réunions, publiant les rapports sur les récompenses ainsi que quelques articles à caractère rétrospectif ou historique.

La publication disparaît logiquement en 2003 pour être remplacée par un site Internet de même nom, complété par la suite par une lettre d'information.

Commission d'histoire de la Société d'Encouragement,

Juillet 2025.

Bibliographie

Daniel Blouin, Gérard Emptoz, [« 220 ans de la Société d'encouragement »](#), Histoire et Innovation, le carnet de recherche de la commission d'histoire de la Société d'encouragement, en ligne le 25 octobre 2023.

Gérard EMPTOZ, [« Les parcours des présidents de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale des années 1920 à nos jours. Deuxième partie : de la Libération à nos jours »](#), Histoire et Innovation, carnet de recherche de la commission d'histoire de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale, en ligne le 26 octobre 2024.

S. E. I. N.
Bibliothèque

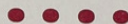
L'INDUSTRIE NATIONALE

*Comptes rendus et Conférences
de la Société d'Encouragement
pour l'Industrie Nationale*

*fondée en 1801
reconnue d'utilité publique*



Revue trimestrielle
1969 - N° 4



SOMMAIRE

TEXTES SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES.

L'industrie chimique et la formation de ses ingénieurs, par
M. André ETIENNE p. 3

**Quelques aspects de l'évolution des méthodes industrielles
de synthèse organique**, par M. Francis WEISS p. 33

ACTIVITES DE LA SOCIETE D'ENCOURAGEMENT
POUR L'INDUSTRIE NATIONALE.

**Fin de la liste des Prix et Médailles décernés pour l'année
1968.**

VIII. Médailles des Ouvriers, Contremaîtres et Cadres
d'exécution p. 59

TABLE DES MATIERES p. 60

INDEX des AUTEURS des Conférences
publiées en 1969 p. 61

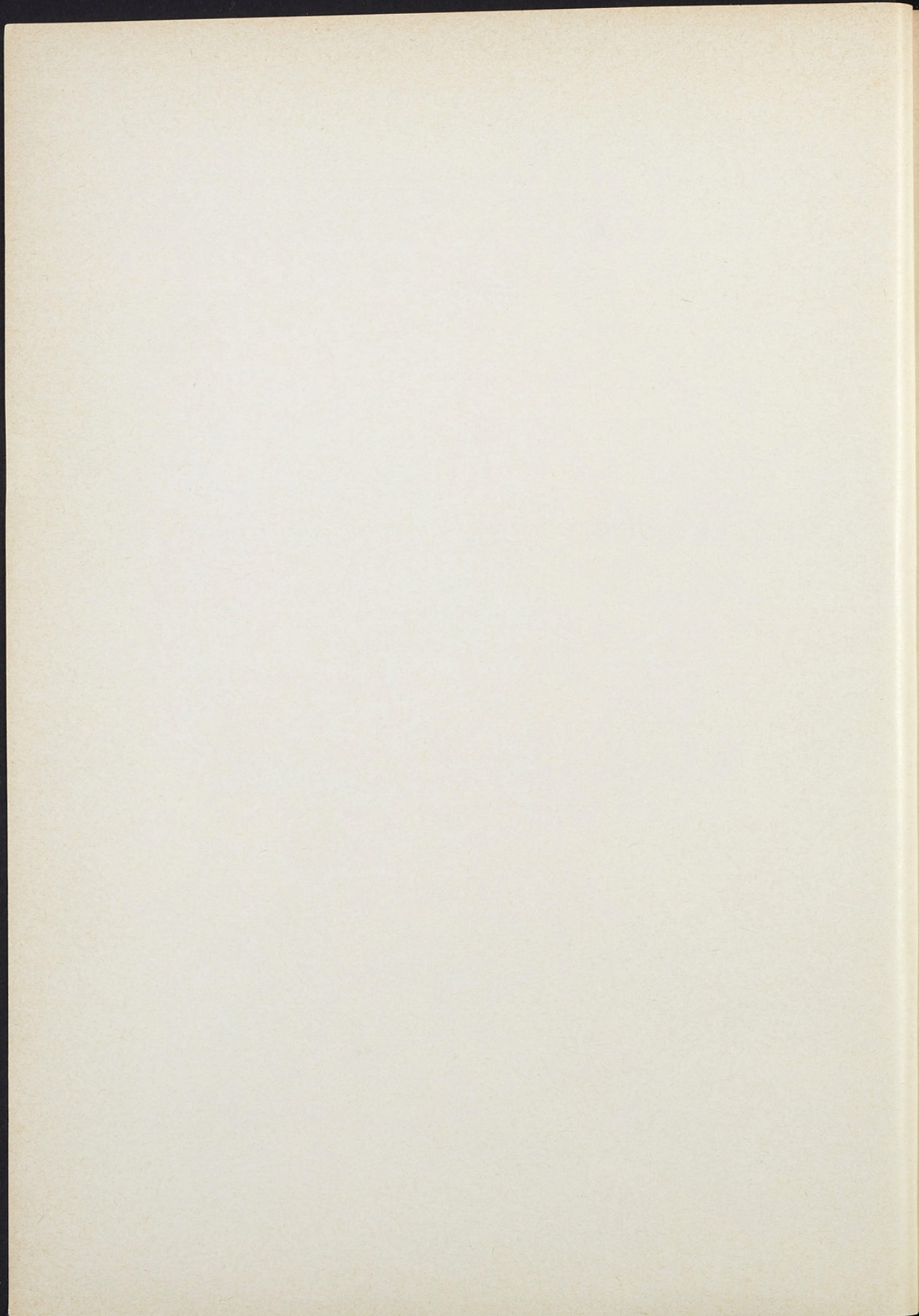
Publication sous la direction de M. Jacques TREFOUËL

Membre de l'Institut, Président

Les textes paraissant dans *L'Industrie Nationale* n'engagent pas la responsabilité de
la Société d'Encouragement quant aux opinions exprimées par leurs auteurs.

Abonnement annuel : 28 F le n° : 10,00 F C.C.P. Paris, n° 618-48

TEXTES SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES



L'industrie chimique

*et la formation de ses ingénieurs **

par ANDRÉ ETIENNE,
Professeur au Conservatoire National des Arts et Métiers.

Il peut être bien présomptueux de prétendre exposer brièvement des sujets aussi vastes que ceux faisant le point de la situation de l'industrie chimique, en particulier de la place tenue par la recherche et le développement ainsi que de la formation des ingénieurs responsables de la bonne marche de cette activité industrielle. Nous pensons néanmoins arriver à nos fins en nous limitant à mettre en relief les aspects les plus caractéristiques.

I. — L'INDUSTRIE CHIMIQUE

Il est peu de disciplines dont l'influence sur les transformations de la société ait été aussi grande, mais aussi mal mise en relief devant le grand public, que celle de la chimie.

Alors que la nature a fourni longtemps aux hommes la majeure partie des produits qui leur étaient simplement nécessaires pour subsister, l'industrie chimique de cette seconde moitié du ^{xx}e siècle leur livre, en grand nombre et à bas prix, des produits destinés à satisfaire leurs désirs sans cesse accrus par

les sollicitations de la société de consommation des pays évolués.

L'agriculture, par les engrais et les pesticides, la construction, par les matières plastiques, l'automobile, par les caoutchoucs, l'habillement, par les fibres textiles et les colorants, la santé, par les médicaments et les produits alimentaires, sont tributaires de l'industrie chimique. Et l'on ne saurait oublier que les industries de pointe : énergie atomique, électronique, informatique, espace, lui sont redevables de la production des matériaux qui leur sont indispensables.

A-t-on toujours bien discerné aussi les incidences politiques et historiques du développement de cette industrie et de sa participation au potentiel militaire d'un pays ?

Sans vouloir lui concéder un rôle primordial dans la fabrication de la bombe atomique, on se contentera de mentionner deux exemples pour illustrer l'influence un peu trop oubliée de ses réalisations dans le déroulement de ces deux dernières guerres mondiales.

En se référant aux opinions d'économistes anglais et américains, on est en

(*) Conférence prononcée le 11 décembre 1969, à la Société d'Encouragement pour l'Industrie nationale.

droit d'affirmer que jamais la première guerre n'aurait duré plus de quatre années si la synthèse de l'ammoniac par le procédé Haber-Bosch n'avait été mise au point en Allemagne dès 1913*.

Peut-être certains se souviennent-ils aussi que ce pays avait développé, entre les deux guerres, grâce à la chimie industrielle, la fabrication de nombreux produits de remplacement (ersatz) des matières d'origine naturelle que le Reich ne pouvait se procurer à l'extérieur pour des raisons d'autarcie économique liées à des buts militaires : les exemples les plus marquants sont bien ceux des essences et des caoutchoucs synthétiques nécessaires aux armées allemandes pour leurs campagnes de la seconde guerre mondiale. Bien que certains de ces produits, nés dans une époque de pénurie, aient disparu, d'autres ont été proposés récemment, pour remplacer des aliments naturels tels que le lait et la viande (lait artificiel, protéines d'origine pétrolière ou tirées du soja). Que penser, en particulier, des perturbations sociales que pourraient alors entraîner ces substitutions ?

Quoi qu'il en soit, toutes les recherches entreprises pour la fabrication de ces produits de remplacement ont contribué à accroître le potentiel de production de l'industrie chimique, laquelle est maintenant en mesure de fabriquer, en quantités énormes et à bas prix, les produits les plus variés dont nos contemporains sont de plus en plus avides.

La consommation massive de biens de toute sorte caractérise, en effet, notre civilisation des précédentes. Les industries de la chimie ont participé largement à la satisfaction de ces demandes au cours des quinze dernières années, si l'on tient compte que leur vitesse moyenne de croissance, mesurée par les indices de production, fut plus grande que celle des autres activités industrielles et que les prix des produits chimiques ont moins augmenté (ils ont même parfois baissé) que ceux des autres produits (1).

Il y a tout lieu de penser que le mouvement s'amplifiera dans l'avenir, si l'on tient compte que la population du globe augmente dans des proportions considérables, voire inquiétantes (on prévoit qu'elle sera de 6,5 milliards d'hommes à la fin du siècle, alors qu'elle est actuellement de 3 milliards environ et qu'elle n'était que de 500 millions il y a trois cents ans) et que les peuples évolués et en voie de développement ont tous une fringale de biens de consommation.

Connaissant l'importance de l'industrie chimique, examinons ses caractéristiques, son état actuel et son évolution probable dans notre pays.

CARACTÉRISTIQUES DE L'INDUSTRIE CHIMIQUE.

Comparée aux autres industries électrique et électronique, mécanique, métallurgie, etc., l'industrie chimique est caractérisée principalement par les points suivants (2) (5).

Tout d'abord, son expansion a été l'une des plus rapides puisqu'on a prétendu que la chimie et l'électronique sont les deux domaines dont le développement a été le plus grand au cours de ces cinquante dernières années. Les procédés de fabrication et certains produits perdent vite de leur intérêt et se démodent rapidement (durée de vie 10 années) ; cet état de fait est l'une des conséquences du développement intense de la recherche dont la manifestation est la découverte de composés de plus en plus nombreux et toujours meilleurs, préparés suivant les procédés les plus économiques, c'est-à-dire les plus simples et les plus directs.

Les recherches au stade du laboratoire et de l'installation pilote sont entreprises dans de grands centres organisés disposant d'un personnel nombreux très spécialisé dont le fonctionnement est onéreux (l'évaluation des frais de recherche et de développement d'une

(*) L'ammoniac est à la base de la fabrication de l'acide nitrique, matière première des explosifs.

société peut atteindre jusqu'à 5 % de son chiffre d'affaires).

Industrie soumise à une vive concurrence bénéficiant de tous les progrès techniques, les frais d'installation d'unités de production continue, automatisées, de plus en plus grandes, sont très élevés et ils doivent être amortis en assez peu de temps, 10 ans maximum (la moitié des produits des principales compagnies ont moins de 10 ans d'âge). En revanche, les besoins en personnel d'exploitation sont faibles mais des techniciens de haute qualification sont nécessaires pour le contrôle de la bonne marche des fabrications.

Industrie de transformation, l'industrie chimique est grosse consommatrice de matières premières et d'énergie.

On justifie par-là l'implantation primitive des usines chimiques, fabriquant des produits de base, au voisinage des sources de matières premières et d'énergie, notamment dans les bassins miniers, près des gisements de pétrole et de gaz naturel, ainsi que dans les régions montagneuses où l'énergie électrique était bon marché. A l'heure actuelle, ces conditions sont devenues moins impératives, car les matières premières se transportent facilement par bateaux, par gazoducs et oléoducs et par les lignes à haute tension, pour l'électricité. Aussi le choix du lieu de production est-il souvent dicté par des considérations commerciales, telles que la proximité des lieux d'arrivée des matières premières et de consommation des produits ainsi que par la facilité d'expédition de ceux-ci vers l'étranger (près des ports, par exemple).

Cet aperçu des caractéristiques générales des fabrications chimiques permet de discerner l'influence des facteurs qui interviennent dans la rentabilité d'un procédé et dans le prix d'un produit chimique.

Dans notre système économique, basé sur le profit, l'industrie chimique n'étant pas considérée comme un service public a pour but, comme les autres industries, de gagner de l'argent. Toutefois, cette préoccupation sans

grande noblesse ne peut être justifiée que par la prise de faibles marges bénéficiaires sur la vente de produits de grande consommation aux prix les plus bas. La baisse du prix de certains produits chimiques est l'une des conséquences de l'élargissement des marchés, procurant un volume d'affaires compatible avec une bonne rentabilité ; le développement des fibres textiles et des matières plastiques en sont des exemples.

Voyons comment l'abaissement du prix de revient est obtenu en considérant l'importance relative des éléments principaux qui entrent dans sa composition : prix des matières premières et de l'énergie, coûts des fabrications et éventuellement des sous-produits, amortissement des frais d'investissement.

Le coût des matières premières entrant en réaction dans un procédé intervient en prépondérance dans le prix de revient d'un produit, mais l'influence de ce facteur varie dans de larges limites avec la nature du composé fabriqué : produit de base, produit intermédiaire ou produit fini. D'autre part, les prix des matières premières sont soumis aux fluctuations économiques qui proviennent de la demande, des disponibilités mondiales et des facilités d'approvisionnement. En règle générale, la découverte de nouvelles sources de matières premières naturelles (soufre, gaz naturel, pétrole, etc.) et les progrès de la synthèse chimique contribuent à la baisse des prix des matières premières.

L'industrie chimique étant grosse consommatrice d'énergie sous toutes ses formes (combustibles, vapeur, électricité) le coût de celle-ci intervient de manière notable dans le prix de revient, mais son incidence est peu sensible par rapport au tonnage fabriqué. Ainsi, une énergie bon marché favoriserait indiscutablement le développement de certains procédés de fabrication, notamment des procédés électrochimiques, gros consommateurs de courant. C'est pourquoi on est en droit de fonder de grands espoirs sur l'installation des grandes centrales nucléaires (puissances de 600 à 1 200 MW) qui pourraient, à la fois, fournir de la vapeur et du courant

électrique à un prix inférieur à celui des centrales traditionnelles.

Les frais d'investissement ont aussi une participation de première importance dans le montant des prix, très bas, des produits de base et dans ceux, peu élevés, des produits intermédiaires, mais elle l'est moins pour les produits vendus très chers (produits pharmaceutiques, par exemple). A ce propos, rappelons que l'augmentation moins rapide du prix de certains produits chimiques que celui des autres produits industriels, compte tenu de la dépréciation de la monnaie, et même parfois leur diminution en valeur absolue, n'ont pu être obtenues que par les progrès technologiques, l'automatisation et l'augmentation de la taille des unités de production.

Les améliorations de procédés sont des conséquences de l'activité intense des travaux de la recherche et du développement qui aboutissent principalement à une meilleure connaissance des processus chimiques et à leur industrialisation par une optimisation de l'appareillage.

L'automatisation dans la conduite des usines par l'emploi des ordinateurs dans les ateliers de fabrication permet aussi d'accroître la rentabilité et la qualité de la production. Cependant, une technologie et une automatisation très avancées n'ont pu avoir leur plein effet sur l'abaissement des prix de revient que lorsqu'elles s'appliquent à des usines géantes de fabrication de produits chimiques de base (par exemple ammoniac sur la base de 400 000 t/an, éthylène à raison de 350 000 à 450 000 t/an). Ces unités mastodontes, automatisées, semblent être, à l'heure actuelle, la panacée pour la réduction des frais d'investissements et de fabrication, eu égard aux quantités produites. Cependant, leur emploi ne peut se concevoir que sans arrêts intempestifs (pannes), ceux-ci ayant des inconvénients beaucoup plus graves que pour des unités de moindre importance. La tendance à la construction de grosses unités se maintiendra

sans doute, mais aura-t-elle, à l'avenir, la même importance qu'aujourd'hui sur la rentabilité des procédés ? Il est permis de répondre à cette question en admettant que la limite à la dimension des usines viendra de la lenteur de la mise en régime, de la difficulté de conduite et des possibilités de défaillances du matériel*.

Enfin, un problème qui pèse sur les prix de revient est la valorisation des sous-produits de fabrication. Bien qu'une synthèse chimique, judicieusement choisie, ne devrait jamais donner de sous-produits, cette règle n'est pas toujours d'application facile. Aussi est-on souvent obligé de prévoir des installations spéciales pour la récupération et la transformation des produits secondaires en composés nouveaux, d'un marché plus ou moins étendu. On s'achemine ainsi vers la création de complexes importants, qui caractérisent, à l'heure actuelle, les grandes entreprises de la chimie. L'exemple, désormais classique, est celui du chlore et de la soude formés simultanément, avec de l'hydrogène, par électrolyse du chlorure de sodium. A l'origine le chlore, produit secondaire de la fabrication électrolytique de la soude, amena la création de l'industrie des corps organiques chlorés dont le développement fut si considérable qu'on ne sait plus, à l'heure actuelle, si c'est le chlore ou la soude qui est le sous-produit.

L'INDUSTRIE CHIMIQUE FRANÇAISE.

Le développement de l'industrie chimique française, comme celui des industries étrangères du même type, s'est accéléré après la deuxième guerre mondiale, c'est-à-dire, surtout à partir des années 1950. Il faut bien s'attendre, au cours de la prochaine décennie, à des transformations encore plus profondes que celles auxquelles nous avons assisté, mais sans qu'on puisse cependant formuler des prévisions très précises sur cette évolution.

(*) On pallie, en partie, les dangers des arrêts de production par une interconnexion des unités de fabrication.

Aussi, ferons-nous d'abord rapidement le point des aspects techniques et économiques des industries de la chimie avant de montrer quelles pourront être les perspectives des prochaines années.

Aspects techniques.

Ces vingt dernières années ont été caractérisées surtout par le développement intensif de l'industrie organique : expansion des produits anciens et découverte de produits nouveaux dans les domaines des matières plastiques, des textiles et caoutchoucs synthétiques, des détergents, des médicaments, des pesticides, etc. (2). Cependant, l'industrie minérale n'est pas restée en arrière, notamment dans le secteur des engrais où la part des fertilisants azotés et phosphatés complexes devient de plus en plus grande (2).

Cette progression a exigé un approvisionnement en matières premières qui n'était plus le même que dans la période d'avant-guerre.

L'industrie chimique française, comme celle des autres pays européens, ne pouvait plus se contenter d'utiliser, pour ses synthèses, les produits dérivés de la houille par les procédés de la carbochimie (carbonisation et gazéification des charbons) et le pétrole ainsi que le gaz naturel durent alors prendre la relève du charbon pour la fabrication des matières premières par les procédés de la pétrochimie. La France eut non seulement à reconstituer ses raffineries, en partie détruites par la guerre, mais à en augmenter la capacité et à en créer de nouvelles pour fournir, en priorité, de l'essence aux automobiles dont le nombre ne cessait de s'accroître.

Cependant, le simple raffinage des pétroles bruts donne, à côté de l'essence légère, d'autres sous-produits : hydrocarbures gazeux, essences lourdes, mazouts, etc., qu'il fallut valoriser autrement que comme combustibles. Les firmes chimiques qui s'intéressèrent à ces produits, en accord avec les sociétés

pétrolières, firent appel à des procédés dont la plupart avaient été mis au point aux Etats-Unis (craquages et reformages catalytiques) pour obtenir des hydrocarbures éthyléniques (éthylène, propylène, butènes, butadiène) et aromatiques (benzène, toluène, xylènes) nécessaires aux synthèses des produits organiques de toutes sortes, des plastiques et des fibres synthétiques. D'autre part, la production d'hydrogène dans ces procédés amena le développement d'unités de synthèse d'ammoniac, matière première de base des engrais azotés et complexes.

Les usines pétrochimiques se regroupèrent ainsi au voisinage des raffineries situées sur les côtes françaises : région du Havre et de Rouen, de Nantes - Saint-Nazaire, de Bordeaux et de Berre. Cette situation s'est maintenue pendant une dizaine d'années, jusque vers les années 60, mais les gaz de raffineries ne purent satisfaire une demande de plus en plus forte en matières premières pétrochimiques.

La découverte du gisement de gaz naturel de Lacq, à cette époque, est arrivée à point pour fournir, non seulement un matériau énergétique dont la France avait besoin, le méthane, mais également un produit de grande valeur pour l'industrie chimique, le soufre*, et enfin des hydrocarbures de base : méthane, éthane, etc. Un complexe chimique important se développa dans le sud de l'Aquitaine qui contribua à la production d'ammoniac, de méthanol, d'éthylène, de styrène, etc.

Toutefois, cet apport d'hydrocarbures reste insuffisant pour la chimie et l'on a dû faire appel à de nouveaux produits pétroliers. Parmi ceux-ci, les essences lourdes ou naphas de traitement des bruts, peu utilisables comme carburants automobiles et comme combustibles**, étaient tout désignés pour la production des matières premières nécessaires aux synthèses chimiques.

La dernière décennie se caractérise donc par le développement de la produc-

(*) La France devint ainsi le 4^e pays producteur de soufre du monde.

(**) Les pétroles algériens, dont la France peut disposer, contiennent aussi des proportions importantes d'essences lourdes.

tion des oléfines (éthylène, propylène, butadiène), par les procédés de craquage à la vapeur (steam-cracking) des naphas. La fabrication de l'hydrogène est intéressante aussi par la conversion oxydante catalytique de ces mêmes fractions pétrolières et elle a donné lieu à l'installation d'usines d'ammoniac, matière de base de la fabrication des engrais, par l'intermédiaire de l'acide nitrique.

Ainsi, la pétrochimie fournit, à l'heure actuelle, les matières premières de l'industrie des engrais et des produits organiques de base.

La facilité de déplacement des produits pétroliers par oléoducs ou par gazoducs décida de l'implantation des usines chimiques non plus aux points d'arrivée des pétroles bruts, mais dans les lieux du territoire national à grande concentration industrielle ou situés dans les zones d'utilisation importante des produits fabriqués.

Toutes ces entreprises se caractérisent par des productions à une échelle dont on n'avait aucune idée il y a encore une dizaine d'années. Des unités de production de 330 000 à 360 000 t/an (1 000 t/j) d'ammoniac et des craquages à la vapeur produisant 200 000 à 400 000 t/an d'éthylène deviennent courantes. Il est hors de doute que si le rythme du développement de ces dernières années se maintient, les fractions pétrolières liquides ne pourront suffire et l'on devra se préoccuper d'utiliser directement les pétroles bruts. Quant à la production d'hydrogène, elle deviendra tributaire en prépondérance du méthane dont les ressources nationales sont faibles, par rapport aux besoins (le gisement d'Aquitaine est insuffisant) mais que l'on trouve en abondance dans les pays voisins (Hollande) et en mer du Nord; un apport de gaz naturel provient aussi d'Afrique du Nord (Algérie) dont le transport, sous forme liquide, par les navires méthaniers, est déjà réalisé.

Aspects économiques.

Après ce bref aperçu de l'évolution technique de l'industrie chimique française, on essaiera de dégager les aspects économiques de celle-ci.

Production.

La France, depuis dix années, occupe la sixième place sur la liste de classement, d'après les chiffres d'affaires des industries chimiques des divers pays; elle se trouve ainsi après les Etats-Unis, l'U.R.S.S., le Japon, l'Allemagne Fédérale et le Royaume Uni, et elle est suivie de très près par l'Italie.

Le chiffre d'affaires de l'industrie chimique française a dépassé 33 milliards de francs, T.T.C. en 1968 (2) (6) alors que celui de la République Fédérale Allemande, l'un de nos concurrents les plus redoutables du Marché Commun, a été de 45 milliards de D.M. en 1968 (il a dépassé légèrement celui de l'industrie mécanique).

Malgré les événements de mai-juin, la production de l'année 1968 s'est traduite par un accroissement de l'indice de production voisin de celui de l'année précédente, estimé provisoirement à + 8,8 % et supérieur à celui prévu par le V^e plan de 8,3 % (6); l'indice de production annuelle corrigé des jours ouvrables correspondant à la base de 100 en 1959 a été de 222 en 1967, de 241,6 en 1968 (+ 8,8 %).

Pour l'ensemble de l'industrie chimique française, l'expansion dans l'année considérée a été la plus marquée, puisque l'on admet que l'ensemble des secteurs industriels n'a progressé que de 3,5 %.

Si l'on se réfère maintenant à l'année 1969, les résultats sont plus satisfaisants encore que ceux de l'année précédente par la progression de la production jusqu'à la limite des capacités des installations et par un rétablissement progressif de l'équilibre des échanges extérieurs dû à la dévaluation*.

(*) Renseignements fournis en mars 1969, (3), mais non donnés dans la conférence du 11 décembre 1969, qui remplacent ceux relatifs à l'année 1968.

L'indice de production met en évidence une augmentation globale pour l'année 1969, de 20 %. La progression n'a, toutefois, pas été aussi forte dans les

trois grands secteurs principaux : chimie minérale, chimie organique et parachimie (tableau I).

TABEAU I. — *Productions françaises des principaux produits de base, en 1969, et pourcentage d'augmentation par rapport à 1968 (3).*

Produits	Production (milliers de tonnes)	Accroissement (%)
Acide sulfurique	3.527 kt	+ 5,5
Engrais phosphatés (P ₂ O ₅)	964	+ 2,8
Ammoniac (N)	1.523	+ 3,3
Engrais azotés (N)	1.390	+ 3,4
Acide nitrique (N)	595	—
Carbure de calcium	486	— 2,5
Carbonate de soude	1.330	+ 18
Soude caustique	1.142	+ 19
Chlore	975	+ 19
Sulfure de carbone	102	+ 22
Méthanol	195	+ 21
Phénol	118	+ 20
Acétone	115	+ 25
Ethylène	760	+ 43
Propylène	498	+ 45
Butadiène	124	+ 36
Benzène et homologues	606	+ 27
Chlorure de polyvinyle	370	+ 31
Polyéthylène	313	+ 55
Caoutchoucs synthétiques	276	+ 23
Colorants organiques	22,8	+ 20

En chimie minérale, la progression moyenne a été très modérée, 6,7 % (3), mais plus forte que celle de l'année précédente, 4,8 % (6), perturbée par les événements de mai-juin. Une certaine distorsion se manifeste, cependant, dans les divers secteurs de la branche. Alors que les productions de chlore, de soude et de carbonate de soude se sont accrues de 18 à 19 %, celles des engrais, qui représentent sensiblement la moitié de la chimie minérale, n'ont augmenté que faiblement : 2,8 à 3,4 %. La raison doit être trouvée dans la diminution de la demande des pays en voie de développement, équipés récemment de nouvelles installations.

Pour la chimie organique, la production a été plus du double de celle de l'an-

née précédente : 32,7 % par rapport à 1968, (3), au lieu de 13,7 % en 1968 par rapport à 1967, (6). Les ventes des produits de base de cette branche (éthylène, propylène, phénol, etc.) ont été stimulées par l'expansion de l'industrie des plastiques et des fibres synthétiques (augmentation de 30 %).

La parachimie, qui groupe les activités concernant la fabrication des produits finis, livrés directement à la consommation, est un secteur dont la production a bien augmenté : 9,6 % en 1969, (3) contre 7,2 % en 1968, (6).

Commerce extérieur.

Alors que la production française des industries de la chimie peut être considérée comme satisfaisante, la balance des

échanges des produits chimiques est encore déficitaire mais elle paraît moins préoccupante en 1970 qu'elle ne l'était

dans le courant de l'année précédente (tableau II).

TABEAU II. — *Echanges commerciaux des produits chimiques. Importations et exportations françaises en 1969 (3)*

Commerce avec les pays étrangers et ceux de la zone franc.

Pays	Exportations		Importations		Solde
	Valeurs des échanges (millions de francs)	Taux d'accroissement 1968-1969	Valeurs des échanges (millions de francs)	Taux d'accroissement 1968-1969	Valeur (millions de francs)
Pays étrangers	7.192 MF	+ 24,6 %	7.348 MF	+ 23,9 %	— 156
Pays de la zone franc	1.082 MF	+ 11,9 %	73 MF	+ 11 %	+ 1.009
Ensemble des pays	8.274 MF	22,8 %	7.421 MF	23,8 %	+ 853

Commerce avec les principaux pays étrangers.

Pays étrangers	Exportations		Importations	
	Valeurs des échanges (millions de francs)	Taux de variation 1968-1969	Valeurs des échanges (millions de francs)	Taux de variation 1968-1969
Allemagne fédérale	1.358,1 MF	+ 46 %	2.152,6 MF	+ 25 %
Etats-Unis	374,4	+ 9,1	1.004,8	+ 17,8
Italie	912,6	+ 34,1	559,4	+ 19,1
U.E.B.L.	716,3	+ 31,5	939,8	+ 22,6
Pays Bas	459,6	+ 26,5	936,9	+ 25,1
Suisse	445,1	+ 17,4	574,5	+ 26,5
Grande Bretagne	381,1	+ 18,6	525,2	+ 31,4
U.R.S.S.	157,9	+ 57,6	—	—
Japon	144,2	+ 17,5	—	—
Espagne	375,8	+ 31,8	—	—
Ensemble des pays C.E.E.	3.446,7	+ 36,9	4.558,8	+ 23,8
Ensemble des pays AELE	1.156,9	+ 18,7	1.231,3	+ 27,4
Ensemble des pays OCDE	5.706	+ 29,3	7.022	+ 23,9
Ensemble des pays étrangers	7.192	+ 24,6	7.348	+ 23,9

Pour la balance du commerce extérieur avec les pays étrangers, le déficit était de 158 millions de francs environ, en 1968, contre un bénéfice de 154 millions, en 1967 (6) ; le déficit avait été une conséquence des grèves et de la double opération douanière, le 1^{er} juillet 1968 : suppression des droits de douane à l'intérieur de la C.E.E. (3 %) ainsi que de

la mise en place du tarif douanier commun réduit de 20 %, en application du Kennedy Round, la déprotection ayant été plus importante pour la France que pour ses partenaires de la C.E.E., Allemagne et Benelux, notamment.

A la fin de 1969, la balance générale des échanges avec l'extérieur ne s'est pas modifiée (3). Elle est, en effet, tou-

jours déficitaire vis-à-vis des pays étrangers, de 156 millions de francs au lieu de 158 millions en 1968, bien qu'elle reste excédentaire pour l'ensemble du monde, pays étrangers et pays de la zone franc (853 millions de francs en 1969 contre 743 millions de francs en 1968), les exportations vers la zone franc se situant toujours à un haut niveau (tableau II). Cependant, bien que le solde des échanges avec l'étranger soit toujours défavorable, les transactions se sont développées à un point tel qu'on peut y voir les signes d'une amélioration : accroissement des exportations par rapport à 1968, (+ 24,6 %), légèrement supérieur à celui des importations (+ 23,9 %).

Les échanges avec les pays étrangers méritent aussi quelques commentaires.

L'Allemagne Fédérale est toujours le principal client et fournisseur de la France en produits chimiques, mais nos exportations se sont fortement élevées en 1969, tandis que l'accroissement de nos importations n'a pas varié ; nous importons toujours plus de ce pays que nous n'exportons, mais les conséquences à long terme de la dévaluation du franc et de la réévaluation du mark pourraient modifier cette tendance.

Les Etats-Unis sont devenus de moins bons clients en produits chimiques français, mais ils restent toujours au second rang de nos fournisseurs et notre balance est fortement déficitaire de ce côté.

Ce n'est guère que vers l'Italie que nos exportations dépassent nos importations et c'est, finalement, le seul pays de la C.E.E. pour lequel notre balance est favorable.

Enfin, les ventes vers la Russie ont fortement augmenté (57,6 %) par rapport à celles de l'année précédente (10 %).

En ce qui concerne les échanges vers les pays de la zone franc, ils se sont améliorés dans les deux sens d'une manière sensible.

En résumé, les principaux clients de la France sont ses meilleurs fournisseurs pour des produits très élaborés ; ce sont les pays dont l'industrie chimique est la plus avancée et la plus importante, donc les plus riches, qui importent le plus.

La société de consommation, développée par l'accroissement du pouvoir d'achat dans une économie industrielle, crée des besoins qui ne sont satisfaits que par des échanges commerciaux intenses : les grands pays producteurs sont de grands consommateurs, non seulement de leurs produits, mais de tous ceux qu'ils achètent à l'extérieur.

Prix des produits chimiques.

Pour en terminer avec les aspects économiques actuels de notre industrie chimique, il faut signaler que les prix de gros (T.T.C.) de l'ensemble des produits chimiques français ont subi une baisse de 2 % de 1958 à 1968 (indice des prix de gros établi par l'INSEE, sur la base de 100 en 1962) (6). En réalité, cette diminution est due en partie au changement de taux de la T.V.A. à partir du 1^{er} janvier 1968 et une nouvelle modification de cette taxe laissait apparaître, fin 1968, une faible hausse de 0,7 %. En revanche, à la fin de 1969, on constate un accroissement moyen, hors taxes, de 2 % par rapport à l'année précédente (3).

Il n'en reste pas moins à reconnaître le mérite des firmes chimiques d'avoir réussi à stabiliser, jusqu'à l'année dernière, les prix de leurs produits dans une conjoncture économique inflationniste où les charges s'accroissent. L'effort de l'industrie chimique devra encore s'accroître dans le même sens au cours des années qui viennent, pour faire face à la concurrence internationale. Nous discuterons ci-après des moyens pour y parvenir.

La taille et le groupement des entreprises chimiques.

D'après l'importance de leur chiffre d'affaires, on peut classer les entreprises chimiques mondiales en trois catégories : de grandes entreprises internationales, à activité diversifiée, dont le chiffre d'affaires atteint et dépasse 1 milliard de dollars, puis des entreprises plus petites et plus spécialisées que les premières, mais encore de taille internationale et dont le chiffre d'affaires se situe au voisinage de 1/2 milliard de dollars, enfin, des entreprises purement nationales, dont le chiffre d'affai-

res est beaucoup plus faible et qui exportent très peu de leur production (4).

L'un des aspects de l'industrie chimique européenne est l'existence d'un nombre très limité de grandes sociétés mais une grande dispersion en firmes d'importance moyenne et petite (1).

L'industrie chimique française était, fin 1968, la plus dispersée du Marché Commun. En effet, 40 % du chiffre d'affaires étaient réalisés par 12 groupes français alors qu'il l'était par 3 grands groupes allemands comparables à celui des plus grandes entreprises chimiques anglaises et italiennes (4), (5).

D'autre part, on assiste, depuis quelques années, à une implantation de plus en plus importante de firmes étrangères en France (4) : par exemple, pour les entreprises qui réalisaient un chiffre d'affaires supérieur à 20 millions de francs et qui représentaient 80 % de la chimie française en 1968, le pourcentage du chiffre d'affaires total imputable aux firmes étrangères est passé de moins de 20 % en 1960 à 27 % fin 1968. Les investissements les plus importants sont d'origine américaine, mais les entreprises allemandes attachent un intérêt de plus en plus évident à leur implantation en France (4). Cet état de fait ne constituerait pas une marque de faiblesse si nos industries investissaient à l'extérieur autant que les autres chez nous, mais ce n'est pas le cas puisque les proportions relatives de nos investissements à l'étranger ne sont que le tiers ou le quart de ceux des firmes étrangères en France.

Cette politique se justifie lorsque la société étrangère est très puissante et pour des pays où le marché est suffisamment large car elle est plus efficace, pour valoriser un nouveau produit ou un nouveau procédé de fabrication, que la vente d'une licence dans un pays étranger (5). Enfin, l'installation d'unités de production à l'extérieur constitue, d'une part, un moyen de contourner les barrières douanières et de se jouer des mesures protectionnistes étatiques et, d'autre part, de réduire les frais de transport du lieu de la production à celui de la consommation.

L'association entre firmes nationales et étrangères s'est aussi instituée en France, notamment en vue de l'échange d'informations ou de procédés. Elle a été très critiquée, bien que, d'après le Dr Timm (5), les accords d'une firme avec un partenaire étranger puissant, dont les productions se complètent, puissent constituer une amélioration de la compétitivité.

Le gouvernement français s'est inquiété de l'ampleur prise par la participation des firmes industrielles étrangères à l'économie nationale, et, notamment dans le secteur de la chimie. Aussi, depuis le début de l'année 1968, a-t-on assisté à une pression gouvernementale pour une restructuration de l'industrie en vue d'éviter que les firmes moyennes et petites ne tombent sous la coupe de sociétés étrangères américaines ou allemandes. Les conséquences sont qu'il y a maintenant, en France, un groupe chimique de taille internationale polyvalent, dont le chiffre d'affaires d'environ 10 milliards de francs, est comparable à celui des deux premiers des trois grands de la chimie allemande et du numéro 3 de la chimie américaine, ce qui représente 30 % environ du chiffre d'affaires total de la branche avec un nombre de salariés directs et indirects supérieur à 120.000.

Le grand concurrent français, d'un chiffre d'affaires comparable mais d'activité plus homogène, limitée à l'exploitation pétrolière et à la pétrochimie, est un groupe semi-public créé par le Gouvernement pour modérer la pénétration étrangère.

Il est probable que, dans une étape ultérieure, d'autres regroupements s'opéreront entre grosses, moyennes et petites entreprises chimiques.

Ces absorptions et ces fusions se traduisent par une réorganisation des fabrications et de l'emploi du personnel qui aboutissent souvent à des compressions d'effectifs, surtout au niveau des cadres supérieurs.

Devons-nous admettre nécessairement que ces concentrations d'entreprises n'aient que des effets heureux concernant les potentiels de production et de

recherche, l'organisation commerciale, ainsi que les possibilités financières ?

L'avis de certaines personnalités de l'industrie chimique est très nuancé (1), (5). Ainsi le gigantisme d'une entreprise, par la complexité de son organisation n'est pas, nécessairement une garantie de succès et de survie. Il semble, tout au moins pour l'Europe, qu'il y ait une taille optimale à ne pas dépasser. Ainsi, atteindre un chiffre d'affaires d'environ 10 milliards de francs (avant la dernière dévaluation) est une limite, si l'on tient compte de l'exemple de nos voisins allemands, chez lesquels il n'est pas question que les trois grands de la chimie se réunissent à nouveau, comme ils l'étaient avant la guerre au sein de l'I.G. Farbenindustrie, puisqu'ils représentent chacun, à l'heure actuelle, une puissance supérieure à celle de l'ancien trust ; on assisterait plutôt à l'évolution inverse, puisque certaines firmes de l'ancienne I.G., encore liées aux trois grandes sociétés allemandes, s'en détachent pour devenir indépendantes lorsqu'elles ont atteint une taille et un potentiel industriel et commercial suffisants.

Les firmes moyennes et petites peuvent, si elles sont bien gérées, avoir un taux de croissance plus élevé que les grandes sociétés et rester compétitives tout en réalisant des bénéfices substantiels (1).

L'ÉVOLUTION DE L'INDUSTRIE CHIMIQUE DANS LES PROCHAINES ANNÉES.

Prévoir l'évolution de l'industrie chimique, comme celle des autres industries d'ailleurs, ne peut se faire que d'après la conjoncture passée, et en imaginant que les événements obéiront aux règles établies où interviennent de multiples paramètres.

La méthode qui consiste à effectuer des calculs mathématiques très précis avec ces diverses données ne fournit pas de résultats satisfaisants pour la prévision à long terme, par exemple 20 ans (1). Aussi, ne peut-on avoir sur l'avenir que des idées assez sommaires, dégager certaines tendances et émettre quelques vœux.

Concernant le chiffre d'affaires, le Dr Reichl (1) fournit quelques valeurs pour les principaux pays européens, en 1995, avec des taux de croissance annuels correspondant à ceux de 1968 ; en particulier, il est prévu qu'en 1995 le chiffre d'affaires de l'ensemble de l'industrie chimique européenne sera cinq fois plus élevé qu'en 1968, si la répartition des firmes reste la même que maintenant.

On peut aussi admettre que la poussée de gigantisme des unités de production de l'industrie chimique continuera pour la simple raison que l'expérience du passé a montré que l'une des causes de la faible augmentation ou de la diminution du prix des produits chimiques va de pair avec la croissance des unités de production. Il n'est pas interdit de penser cependant que l'on arrivera à une limite inférieure dans l'abaissement des coûts de production en ayant atteint la taille optimale correspondant à la perfection technique. N'est-on pas déjà parvenu à ce stade pour les prix de certains produits de base (NH_3 , H_2SO_4) où le coût de la matière première est prépondérant ? D'ailleurs n'a-t-on pas pensé aux conséquences sociologiques et politiques de voir se maintenir cette obsession de la concurrence dans la course à l'abaissement des prix pour la conquête des marchés mondiaux.

Concernant l'avenir des principaux secteurs de l'industrie chimique, on peut esquisser quelques prévisions qualitatives (1). L'expansion globale peut être admise simplement si l'on considère les besoins créés par l'augmentation de la population mondiale et les exigences de l'installation des hommes sur d'autres planètes.

Parmi les gros produits, les engrais, notamment les complexes, ne cesseront d'être demandés par une agriculture en progrès constant.

L'expansion prodigieuse des fibres textiles synthétiques et des plastiques, sans oublier les caoutchoucs, se poursuivra, compte tenu de la place qu'occupent ces matériaux dans la vie moderne. L'emploi des plastiques dans l'habitation et dans l'automobile ne peut que croître et l'on prévoit l'utilisation de ces nouveaux ma-

tériaux dans la construction des bases spatiales. Mais, discerner quelle catégorie de fibres textiles ou de plastiques sera préférée et notamment quel sera l'avenir des nouveaux produits mis récemment sur le marché est bien difficile (1). Il est probable que la demande en nylons, chlorure de polyvinyle, polystyrène, polyéthylène continuera à progresser à cause de leur bas prix, dû à leur facilité de préparation à partir de matières premières bon marché : l'éthylène, le chlore et le benzène. De nouvelles fibres, telles que le nylon 12 et de nouveaux plastiques comme l'A.B.S. et le S.A.N. *, bien qu'ayant des propriétés supérieures aux matières anciennes, ne remplaceront celles-ci que pour certaines applications particulières, car ils sont d'un prix plus élevé, leur fabrication exigeant plusieurs catégories de matières premières et des procédés plus compliqués.

Concernant les produits très élaborés, tels que les produits pharmaceutiques, les pesticides, les matières colorantes, les détergents, l'expansion se continuera.

Il sera toujours nécessaire, en effet, de trouver de nouveaux médicaments pour guérir certaines maladies que l'on sait encore mal soigner et il faudra toujours chercher de nouveaux antibiotiques pour combattre l'accoutumance des microbes aux bactériostatiques. Mais l'industrie pharmaceutique, dans ses productions d'aujourd'hui, n'est-elle pas vulnérable par les décisions des pouvoirs publics concernant la réglementation de l'emploi de certaines drogues ?

Des restrictions analogues peuvent aussi être opposées à l'emploi de certains pesticides nécessaires à la préservation des cultures et de certains matériaux, mais, en contrepartie, l'utilisation de produits nouveaux pour la culture sélective des végétaux et pour la défense de ceux-ci contre certaines maladies sera toujours nécessaire.

L'industrie des détersifs peut être aussi soumise à certains impératifs, destinés

à éviter la pollution de nos cours d'eau; elle y fait face déjà en fabriquant de nouveaux détergents biodégradables.

Enfin, dans ce bref tour d'horizon prévisionnel, on ne saurait oublier l'industrie des matières colorantes. Bien qu'elle soit l'une des plus anciennes industries de la chimie, son développement, lié maintenant à celui des fibres synthétiques, se poursuit par la production de substances destinées à donner aux nouveaux tissus des coloris de plus en plus agréables. Le secteur des colorants photographiques devra s'occuper lui aussi de satisfaire les besoins nouveaux créés par la diffusion de la photographie et de la télévision en couleur.

Comment espérer voir l'industrie chimique française participer à l'évolution générale de la production des produits chimiques et quelles sont les voies devant la conduite à occuper une place honorable dans la compétition internationale.

La mise en application complète du Marché Commun, le 1^{er} juillet 1968, par la suppression des droits de douane obligera les industriels français à diminuer le coût de leurs fabrications. Ils pourront y arriver, si l'accroissement de leurs charges n'est pas considérable, par une gestion rigoureuse, plutôt que par le bouleversement des marchés ou par le déséquilibre du commerce extérieur (4).

Les industries chimiques devront compter uniquement sur elles-mêmes pour leur développement, à la différence de certaines industries françaises qui ont pu bénéficier, au titre du V^e plan, d'une aide financière de l'Etat, pour la recherche et l'innovation, par le système des actions concertées et de l'aide au développement, sidérurgie et plan calcul, par exemple.

Il importe aussi de posséder, en France, une technologie ou ingénierie (engineering) des procédés chimiques de dimensions internationales, de développer la recherche de l'amélioration de procédés de fabrication de produits déjà employés, ainsi que de découvrir des

(*) Nylon 12 : polydodécalactame.

A.B.S. : copolymère acrylonitrile, butadiène, styrène.

S.A.N. : copolymère styrène, acrylonitrile.

produits nouveaux, utilisables, faciles à fabriquer (4).

Malgré de belles réalisations techniques et la construction d'usines dans nombre de pays étrangers, il existe encore un certain déséquilibre dans la balance des échanges avec l'extérieur, des licences de fabrications et d'installations d'usines ; nos recettes ne couvraient fin 1968, que 60 % des dépenses avec une tendance nette à l'aggravation (4).

L'industrie chimique française fait encore trop souvent appel pour la construction de ses grandes unités de production, notamment dans la pétrochimie, à des bureaux d'étude étrangers, principalement américains, pour que cette situation ne soit pas préjudiciable à notre économie nationale.

La question est ainsi posée de savoir si les entreprises chimiques françaises doivent construire elles-mêmes les unités de production qu'elles ont conçues, d'après leurs installations pilotes, ou bien confier la réalisation de ces unités à des sociétés d'engineering spécialisées, plus aptes à valoriser les procédés qui leur sont confiés. La réponse de M. Rauline (4) n'est pas ambiguë : les procédés mis au point dans les entreprises devraient être exploités industriellement au moyen d'unités de fabrication construites par des firmes de génie chimique de taille internationale, qu'il importe de développer en France.

L'industrie française est assez peu favorisée par le prix de l'énergie, notamment de l'électricité. Il serait alors souhaitable que les pouvoirs publics s'en préoccupent et que tous les partenaires du Marché Commun s'accordent sur une politique et sur des prix analogues de l'énergie pour usages industriels (4).

L'industrie chimique française traverse une période difficile d'adaptation à une économie de marché (4). Des efforts visant à la recherche de l'efficacité maximale doivent être entrepris par tous ceux qui sont concernés par son développement. Aux pouvoirs publics, il appartient d'abord de ne pas accroître la lourdeur des charges auxquelles sont soumises les sociétés, de veiller aux con-

ditions normales de la concurrence entre les entreprises et entre les Etats et d'imprimer les orientations nécessaires dans le cadre du VI^e Plan.

Aux chefs d'entreprise, il appartient d'acquiescer un esprit de compétition en ne comptant que sur eux-mêmes pour la conquête des marchés, laquelle sera obtenue par l'abaissement des prix de revient.

Aux personnels de toutes catégories, et notamment aux cadres, il sera demandé d'avoir conscience de leurs responsabilités dans l'exécution des tâches exigeant une technicité et des connaissances de plus en plus élevées.

Quant à l'industrie chimique européenne du Marché Commun, elle se trouve engagée dans une vive concurrence sur les grands marchés mondiaux avec l'A.E.L.E. et l'industrie américaine. Parmi les moyens permettant de lutter à armes égales avec ses concurrentes, elle doit avoir pour objectifs :

- le renforcement de sa position dans la recherche et le développement,
- la formation de groupes industriels d'une taille comparable à celle des concurrents mondiaux,
- la création de nouvelles unités de fabrications près des grands marchés, dans des endroits favorables au point de vue approvisionnement en matières premières et en énergie,
- l'installation de centres de production et de distribution dans les sites des principaux marchés mondiaux, afin d'entrer directement en concurrence avec l'industrie chimique locale et de surmonter les obstacles s'opposant au libre échange.

Voilà rapidement brossé un tableau d'ensemble, très sommaire, des possibilités futures des industries de la chimie. Une telle expansion est, évidemment, liée à celle d'une société de plus en plus avide de biens de consommation, que l'on met en condition d'être exigeante par les méthodes de la publicité et du marketing. Y aura-t-il un freinage de cette fringale ? Nous laisserons à nos économistes et à nos sociologues le soin d'y répondre et de nous indiquer aussi les voies à suivre

pour que la chimie ne cesse pas de nous rendre la vie meilleure.

Quoi qu'il en soit, en l'état actuel des choses, c'est de la participation des techniciens et, en particulier, des ingénieurs à la recherche et au développement, que l'on attend le plus.

Aussi, essaierons-nous de donner maintenant un bref aperçu de ce sujet : la recherche et le développement en chimie.

II. — LA RECHERCHE ET LE DEVELOPPEMENT (R ET D) EN CHIMIE

L'arme de la lutte concurrentielle des entreprises est plus que jamais l'innovation technique, soit qu'il s'agisse de trouver un produit nouveau utilisable, soit d'abaisser le prix de revient par l'amélioration et la découverte de procédés originaux de fabrication.

Les moyens nécessaires pour arriver à ces buts, qui s'étendent de l'invention à l'exploitation industrielle et commerciale, font partie de la recherche scientifique et technique désignée encore par l'expression de recherche et développement.

De nombreuses études ont été consacrées à la recherche en chimie, un peu moins à celles qui concernent les applications industrielles, c'est-à-dire au développement.

Notre propos n'est pas de traiter ici d'un sujet aussi vaste, mais surtout d'indiquer quelques-unes des tendances actuelles de la recherche et de son développement en vue de l'exploitation des résultats dans l'industrie chimique, puis de faire le point de la question et des perspectives de son évolution surtout en France.

MOYENS ET RENTABILITÉ.

Les missions des services de recherche et développement, qui comprennent à la fois la recherche exploratoire et la réalisation des installations pilotes, sont très longues et coûteuses. Aussi, la question s'est-elle posée de savoir si ces orga-

nisations sont rentables et adaptées à la dimension des entreprises ainsi qu'aux résultats qu'on attend d'elles. Nous allons essayer d'y répondre en nous inspirant d'une étude parue aux Etats-Unis en 1964 (7).

Le budget de la recherche et du développement d'une firme chimique, qui englobe surtout l'achat du matériel et la rémunération du personnel, est en rapport avec le chiffre d'affaires de la société pour une période de plusieurs années (trois ans) ; il est généralement alimenté par un certain pourcentage du montant des sommes provenant des ventes pour la même période : 3,5 %, 4 à 4,5 %, et même 5 % aux Etats-Unis ; en France, la moyenne est de 3,8 %. Le pourcentage maximal de 5 % du chiffre d'affaires, avec une possibilité de variation de 10 % comprend généralement : 4 % pour la recherche et 1 % pour le travail au stade pilote ; toutefois, lorsque les dépenses des installations pilotes sont élevées, certaines sociétés américaines ne les englobent pas dans leur budget R et D.

Certains prétendent que prévoir un budget de recherches d'après le chiffre d'affaires d'une période passée n'est qu'un pur exercice d'arithmétique, puisque ce volume des ventes ne dépend que des recherches antérieures.

De plus, les crédits de recherche annuels doivent tenir compte de la hausse des prix et des augmentations de salaires ; les dépenses qui correspondent aux émoluments du personnel sont les plus importantes, puisqu'elles constituent environ les deux tiers des crédits globaux. Ainsi, aux Etats-Unis, pour conserver simplement le même potentiel, une augmentation annuelle de 3 à 5 % du budget de recherche est nécessaire. Sa variation, dans des limites assez étroites, implique une certaine fixité des effectifs des chercheurs ; aussi n'est-il guère possible d'augmenter brusquement le nombre de ceux-ci en vue d'une recherche nouvelle et n'est-il pas fréquent d'éliminer brusquement des collaborateurs lorsqu'une étude est terminée.

Enfin, mentionnons qu'aux Etats-Unis (d'après National Science Foundation), dans l'industrie chimique, la répartition

des dépenses R et D est en moyenne : recherche de base ou exploratoire 11 %, recherche appliquée 37 %, développement 52 %.

Les sommes importantes investies dans la recherche et le développement, surtout pour les grosses sociétés, sont-elles toujours génératrices de profits supplémentaires pour les entreprises et dans quelle mesure ? C'est ce que nous allons examiner en considérant quelques caractéristiques de la R et D dans l'industrie chimique et sa rentabilité (7).

Tous les efforts de la recherche et du développement doivent être orientés vers la rentabilité maximale, c'est-à-dire vers le gain d'argent le plus élevé, eu égard aux sommes investies. Aussi les projets doivent-ils se rapporter aux secteurs où l'on peut prévoir des marchés importants, compte tenu que les chances de rentabilité de produits nouveaux dans des marchés déjà saturés en produits de bonne qualité sont de plus en plus faibles.

Mais l'innovation technique est de plus en plus difficile et coûteuse. Un exemple permettra de le comprendre. Dans le domaine des produits phytosanitaires, on admet que l'on a des chances de trouver un produit actif, d'un prix de revient suffisamment bas permettant la fabrication industrielle, pour 5 000 et même 10 000 corps nouveaux préparés. Pour l'industrie pharmaceutique, la proportion n'est pas aussi faible, le prix de revient ayant moins d'importance, mais il faut tenir compte du temps de lancement d'un médicament (4 à 7 ans).

Aussi considère-t-on maintenant, aux Etats-Unis, qu'il y a pléthore de projets de recherche et que l'on arrive à une indigestion de travaux de faible productivité. En particulier, certains prétendent que le temps de la préparation d'un grand nombre de produits nouveaux et de la découverte de réactions originales, sans applications en vue, est révolu ou, tout au moins, que cette activité n'est plus du ressort de la recherche industrielle. Quelques personnes prétendent même qu'il faut aussi cesser de propager ce mythe de la recherche industrielle que, plus on dépense d'argent pour celle-ci, plus on aura de résultats sensationnels.

Cependant, bien que les décisions de la recherche soient dictées par les besoins des marchés présents ou futurs et non plus simplement par la curiosité scientifique, un grand nombre de directeurs d'organisations de recherches essaient de tempérer ce commercialisme de la R et D en prévoyant une certaine place pour la recherche de base (recherche exploratoire) dans leurs budgets : moyenne de 11 % avec variation de 3-5 à 20 % (7). Certaines firmes américaines désirant encourager la recherche fondamentale admettent même que leurs ingénieurs de recherche puissent occuper une partie de leur temps (10 à 15 %) à des travaux qu'ils jugent dignes d'intérêt. En réalité, force a été de constater que peu de chercheurs profitent de cette liberté, car ils prétendent être trop occupés par leur travail habituel pour disperser leur activité à d'autres tâches, fussent-elles très intéressantes; certains directeurs de recherche admettent, d'ailleurs, qu'une minorité de leurs chercheurs industriels (10 à 20 %) ont suffisamment d'idées originales pour vouloir entreprendre des recherches à caractère fondamental.

La productivité d'un service de recherche et de développement et sa rentabilité par rapport aux moyens investis est une préoccupation constante des dirigeants de sociétés mais la mesure de la rentabilité ou le rendement de la R et D est difficile à établir.

Quelques entreprises font un bilan sur cinq ans des dépenses R et D et des profits provenant des travaux issus de l'organisation de recherche, par exemple, les bénéfices résultant de la vente des produits nouveaux, les économies réalisées par les améliorations de procédés, les projets du développement technique, etc. Cette méthode d'évaluation, qui a l'avantage d'être pratique, ne tient pas compte, cependant, d'autres services difficiles à comptabiliser, qui contribuent notamment à accroître le prestige national ou international de la firme et lui apporter quelques profits à une échéance plus ou moins lointaine; il s'agit des publications scientifiques, des brevets déposés, des produits nouveaux et des projets de fabrication susceptibles d'être

développés et commercialisés ultérieurement.

La plupart des bilans de recherche et de développement envisagés sous l'angle commercial de la rentabilité en espèces monétaires sont déficitaires. Ainsi, la Du Pont de Nemours estime que 1 sur 20 de ses programmes exploratoires aboutit à des résultats commercialisables ou encore que 5 dollars consacrés à la recherche rapportent, au sens commercial, 1 dollar (7).

On ne peut donc estimer la rentabilité de la R et D pour elle-même et l'on doit considérer que celle-ci ne procure pas de profits réellement spécifiques. En revanche la R et D stimule l'activité de l'entreprise dans les domaines scientifiques, technologiques et du marketing puis elle accroît son potentiel industriel et commercial à plus ou moins longue échéance. De plus, elle participe au développement général de toutes les connaissances scientifiques et techniques utiles à notre civilisation.

La difficulté d'apprécier la rentabilité de la R et D rend très délicat le choix des projets de recherches prospectives et appliquées par rapport au travail de développement et à l'amélioration des produits anciens (travail défensif).

Les critères du choix des projets sont difficiles à établir. Des méthodes plus ou moins rationalisées et de nombreuses formules mathématiques ont été proposées pour évaluer l'intérêt des projets de recherche mais certains estiment que ces formules normalisées sont insuffisantes et qu'elles ne servent à rien car elles ne sont que l'accumulation d'hypothèses et d'approximations qui n'ont aucun rapport avec la réalité ; d'après eux, l'intuition et le jugement ont beaucoup plus d'intérêt et d'importance pour la décision d'entreprendre ou d'arrêter une recherche (7).

La recherche est, avant tout, un art de création.

LA RECHERCHE ET LE DÉVELOPPEMENT DANS L'INDUSTRIE CHIMIQUE FRANÇAISE.

En s'inspirant d'une enquête de la DGRST, publiée en 1969 dans le *Progrès scientifique*, on peut essayer de faire le

point sur l'ampleur de l'effort de recherche et de développement dans le secteur de la chimie en France.

Pour mieux en situer l'importance, on donnera d'abord quelques indications sur les moyens, pour l'ensemble de l'industrie française et l'on examinera ensuite le cas de la chimie.

Les dépenses globales R et D en 1965 (9) se sont élevées à 2 % du produit national brut (P.N.B. 461 437 MF), soit à environ 9 200 millions de francs. Admettant une croissance moyenne du P.N.B. de 4 % par an on aurait, pour les dépenses nationales R et D, 14.025 MF en 1970 et 29 000 MF en 1980 (8), (9), soit respectivement de 2,5 % et 3,5 % du P.N.B. brut. Ce niveau serait alors le même en pour cent que celui des Etats-Unis, à l'heure actuelle.

Si l'on considère, en particulier, les sommes consacrées, en 1966, en France, à l'exécution de travaux de recherche et développement dans l'industrie, elles se sont élevées à 5 850 millions de francs pour un effectif légèrement supérieur à 23 000, de chercheurs et ingénieurs comptés en équivalent plein temps (8). La recherche industrielle, dans les entreprises privées, aussi bien que dans les entreprises du secteur public et les centres techniques divers, représente ainsi 54 % des dépenses globales de recherche et développement évaluées à 10 800 millions de francs (8). Cette participation de 54 % est notoirement faible, comparée à celle des autres pays industriels où l'industrie compte pour les 2/3 dans l'exécution des travaux R et D.

D'autre part, la proportion des travaux de recherche et développement est plus importante dans les organismes d'Etat que chez les autres nations industrielles où certaines tâches R et D sont plus largement réservées à l'industrie qu'en France.

Si l'on examine maintenant (8) (9) la part de la recherche fondamentale et appliquée (R F A) par rapport à l'effort national R et D, on constate que la part consacrée, en France, à la R F A est, en valeur relative, plus importante qu'en Grande-Bretagne et aux Etats-Unis

mais, en revanche, la part du développement est plus faible.

L'effort de développement est situé à un niveau trop bas en France par rapport à celui de l'ensemble de la R et D, ce qui risque d'accroître notre dépendance technologique vis-à-vis de l'étranger. Aussi serait-il nécessaire de modifier l'équilibre actuel pour amener les parts respectives des différentes formes de recherche à 35-40 % pour la R F A et à

60-65 % pour le développement, à la fin du VI^e Plan.

Il est réconfortant, en revanche, de constater que les dépenses R et D, rapportées au chiffre d'affaires des entreprises industrielles françaises qui ont une activité de recherche* sont comparables à celles des sociétés américaines, sauf en mécanique (tableaux III et IV).

TABLEAU III. — Dépenses de la recherche et du développement dans les différents secteurs industriels (sauf l'énergie) en valeur absolue (millions de francs) et en pourcentage du chiffre d'affaires total du secteur (y compris les entreprises qui ne font pas de recherche) [(8), p. 18].

Secteur	Dépenses R et D (année 1966)	Pourcentage du chiffre d'affaires du secteur (année 1965)
Industries aérospatiales	1.773,4 MF	20,4 %
Construction électrique, électronique et informatique	1.206,0	4,6 (informati- que non comprise)
Chimie, y compris la pharmacie	723,1	2,4 %
Automobile	378,0	0,7 %
Mécanique	406,1	0,3 %
Pétrole	199,4	0,6 %
Métallurgie	172,1	1,1 %
Industries textiles	122,8	0,4 %
Matériaux de construction, verre, céra- mique	99,5	0,3 %
Bâtiment, travaux publics	64,0	0,05 %
Transformation du caoutchouc et des plastiques	40,0	0,5 %
Industries agricoles et alimentaires ..	40,0	0,04 %
Bois, papiers, cartons	19,6	—
Autres	262,0	—
Total (sans l'énergie)	5.506,0 MF	

La participation de l'Etat dans les dépenses de recherche et développement est importante en France, mais elle semble l'être moins qu'aux Etats-Unis pour l'ensemble de l'industrie. Malheureusement, la chimie ne se trouve pas parmi les secteurs privilégiés, si l'on compare les pourcentages de l'aide gouvernementale qu'elle reçoit à celle

accordée aux autres secteurs traditionnels : mécanique, métallurgie et pétrole et aux secteurs de pointe qui sont très favorisés dans la distribution des fonds publics (tableau V).

Après avoir donné des indications générales sur l'importance de la recherche et du développement dans l'industrie française, examinons la part de la chimie

(*) Les entreprises qui font de la recherche ont réalisé, en 1965, 42 % du chiffre d'affaires total de l'industrie française.

TABLEAU IV. — *Pourcentage du financement de la recherche et du développement par rapport au chiffre d'affaires des entreprises ayant une activité de recherche et de développement en France et aux Etats-Unis [(8), p. 24].*

Secteur	France 1966 (source DGRST)	Etats-Unis 1965 (source NSF)
Industries aérospatiales	3,4 %	3,4 %
Construction électrique et électronique.	4,5 %	3,5 %
Chimie, y compris la pharmacie	3,8 %	3,6 %
Mécanique	1,5 %	3,2 %
Automobile	2,2 %	2,3 %
Métallurgie	0,9 %	0,7 %
Pétrole	0,9 %	1,0 %
Textile	2,4 %	0,4 %
Ensemble de l'industrie	1,9 %	2,0 %

TABLEAU V. — *Pourcentage du financement public de la recherche et du développement dans certains secteurs industriels, en France et aux Etats-Unis [(8), p. 25].*

secteurs	France 1966 (source DGRST)	Etats-Unis 1965 (source NSF)
Industries aérospatiales	84,5 %	88 %
Construction électrique et électronique.	37,5 %	62 %
Chimie, y compris la pharmacie	2,3 %	14 %
Mécanique	28 %	23 %
Métallurgie	5,8 %	4 %
Pétrole	11,5 %	16 %
Ensemble de l'industrie	37,4 %	55 %

par rapport aux autres secteurs d'activité.

Les dépenses R et D de la chimie, y compris la pharmacie, en 1966, de 723,1 MF représentent 2,4 % du chiffre d'affaires total de l'ensemble des entreprises effectuant ou non des recherches, et 3,8 % de celui des firmes ayant une activité de recherche (tableaux III et IV) *. Ces moyens financiers placent l'industrie chimique en troisième position, après les secteurs de pointe (industries spatiales et électroniques), mais en tête des secteurs traditionnels qui conditionnent l'efficacité de l'économie ; en

particulier, elle surclasse la mécanique, l'automobile et la métallurgie. Peut-être, en considérant cet état de fait, est-on en droit de dire qu'il y a déséquilibre en France, entre les investissements R et D des activités productrices du moment et celles qui préparent l'avenir ?

D'autre part, il est nécessaire de constater (tableau V) que la chimie est le secteur traditionnel le moins aidé par les fonds publics (2,3 % du financement public R et D) et la comparaison est encore plus frappante avec les industries de pointe, (84,5 % pour les industries aérospatiales et 37,5 % pour la cons-

(*) D'après M. Gabriel Maillard, Président de la Chambre Syndicale des Produits Pharmaceutiques (*Nouvelles de la Chimie*, n° 33, 29 mai 1969), l'industrie pharmaceutique française consacre 7,5 % de son chiffre d'affaires à la recherche.

truction électrique et l'électronique). L'industrie chimique en France ne doit donc compter que sur elle-même pour progresser.

EVOLUTION DE LA RECHERCHE ET DU DÉVELOPPEMENT EN FRANCE (8).

Les dix dernières années de politique scientifique ont été déterminées par des impératifs de rattrapage consécutif au retard pris à cause de la guerre.

Le coût considérable des grands projets de développement ne peut permettre qu'aux très grands pays, économiquement forts, d'avoir une action efficace dans la plupart des domaines. Pour les autres nations, il est nécessaire de faire un choix, en ne retenant que les projets susceptibles d'être réalisés avec des moyens financiers limités. Il serait donc souhaitable que les choix de l'Europe, et en particulier de la France, soient dirigés vers des buts économiques et sociaux plutôt que vers des actions de simple prestige.

Il est bien évident que, dans les orientations nécessaires, on doit tenir compte de la possibilité de ne pas aboutir à la fois dans la recherche et dans l'exploitation, si l'on ne dispose pas de moyens suffisants, et l'on en arrive ainsi à la notion de seuil critique ou niveau minimal des moyens pour obtenir le succès technique et sa commercialisation. En particulier, il est nécessaire d'évaluer avec soin le nombre et l'ampleur des actions que l'industrie peut engager simultanément et il ne faut pas perdre de vue que beaucoup de grandes opérations françaises se situent à un niveau voisin du seuil critique, en raison de la limitation des moyens financiers et humains disponibles.

Il en résulte qu'une recherche industrielle homothétique de la recherche américaine doit être écartée et qu'il importe surtout de concentrer l'essentiel des efforts dans un certain nombre de domaines bien choisis, sans sacrifier totalement les autres secteurs. L'industrie chimique, en particulier, doit déterminer, dans chaque branche, un certain nombre de créneaux où elle a le plus de

chance d'aboutir à une compétitivité certaine.

D'autre part, l'importance des recherches dans les secteurs de pointe ne doit pas avoir pour conséquence un amoindrissement des efforts dans les domaines traditionnels tels que la chimie, les matériaux, la mécanique, et la technologie générale. En effet, les progrès, dans les grands secteurs fondamentaux de l'économie, dans l'habitation et dans les industries de pointe, reposent sur l'existence de matériaux nouveaux (matières plastiques, matériaux céramiques) fabriqués par l'industrie chimique. D'autre part, l'industrie est aussi tributaire des progrès de l'industrie mécanique, dont la faiblesse est notoire en France et qui vit sur le savoir-faire américain, préférant produire sous licence que de prendre des risques hors de sa portée.

En bref, le développement de l'industrie dans tous les domaines repose sur des bases technologiques solides. Malheureusement, la place de la technologie n'est pas assurée, en France, de façon satisfaisante, car cette spécialité, considérée comme trop vulgaire, est dépréciée par rapport aux activités scientifiques et technico-commerciales (8) et l'on voit trop souvent les chercheurs et les ingénieurs formés aux disciplines industrielles s'orienter de préférence vers ces activités plus spectaculaires.

Enfin, la concentration des entreprises est nécessaire à l'accroissement du potentiel R et D (8). Celui-ci, en effet, consiste, dans les sociétés à gros chiffres d'affaires, en moyens financiers suffisants pour recruter les meilleurs chercheurs, ainsi que pour doter les organisations de recherche du matériel et des équipements variés les plus modernes. De plus, l'exploitation à grande échelle des résultats de la recherche au stade développement n'est généralement pas entravée par l'insuffisance des crédits disponibles, tandis que la propriété industrielle, acquise par des brevets, peut être assurée par un développement rapide.

Néanmoins, il ne faut pas sous-estimer la part que peuvent prendre, parfois, dans la recherche, les entreprises moyen-

nes et petites, où il existe un potentiel inventif très intense. Mais, sauf cas exceptionnels, les ressources humaines et financières trop restreintes ne permettent pas d'envisager une extrapolation rapide au stade développement.

D'autre part, les échecs toujours possibles dans les réalisations technologiques ou dans la commercialisation sont plus facilement supportables pour les grandes sociétés que pour les petites entreprises. On comprend ainsi pourquoi ces dernières, ne voulant pas prendre de risques, préfèrent recourir à l'achat de licences et renoncer, du même coup, aux investissements d'un service R et D efficace. Cette conception n'est pas sans danger car il n'est, en effet, pas toujours possible de compter sur l'acquisition de licences, notamment des firmes étrangères lesquelles préfèrent vendre directement leurs produits en France ou y implanter des usines par le jeu des participations dans certaines sociétés françaises.

La concentration de sociétés en groupes puissants permet seule de disposer de moyens de recherche et de développement d'une taille suffisante pour faire face à la concurrence intense qui caractérise tous les secteurs de l'industrie à notre époque.

Les aspects sociologiques de la R et D en France méritent aussi une certaine attention (8).

Il semble que la majorité des Français n'aient pas encore pris suffisamment conscience d'être entrés dans une ère technologique.

L'apparente facilité de l'entre-deux-guerres et de ces vingt dernières années, où la France vivait en association économique étroite avec ses territoires d'Outre-Mer dans des frontières économiques fermées, n'avait pas incité nos concitoyens à se rendre compte de ce que pouvait être la compétitivité avec les industries étrangères. A plus forte raison, l'importance du développement

technologique, issu de la recherche dans la lutte concurrentielle, restait assez diffuse.

D'autre part, le goût des études théoriques ne débouchant sur aucune application pratique immédiate caractérisait beaucoup de chercheurs quelle qu'ait été leur formation d'origine (Université ou Ecole d'ingénieurs). La véritable noblesse était dans la recherche désintéressée où tout souci de rentabilité devait être banni.

Il est donc urgent d'inculquer une mentalité nouvelle au corps social français afin de promouvoir la technologie à un certain rang de noblesse, que ce soit dans le domaine de l'enseignement ou de la recherche.

III. — LA FORMATION DES INGENIEURS DE L'INDUSTRIE CHIMIQUE

Cet exposé, qui fait entrevoir quelques aspects de l'industrie chimique ainsi que de la recherche et du développement, serait incomplet s'il passait sous silence le rôle des hommes qui ont participé et qui devront contribuer, dans le futur, au progrès de cette industrie : il s'agit des ingénieurs*.

Il est bien reconnu que l'élaboration du monde moderne ne peut se passer de l'ingénieur, puisque c'est lui qui dirige les principaux secteurs de l'entreprise industrielle et qui détient en particulier, les clés de la recherche et de la production, scientifiques et technologiques, ainsi que de la commercialisation.

Les ingénieurs, par leur esprit d'entreprise et de prévision, bien au cœur des réalités, soucieux de l'efficacité, mériteraient d'ailleurs d'avoir une participation plus active à la gestion des affaires publiques, qu'elles soient régionales, nationales et même internationales (10). En France, trop souvent incompris du monde politique, on ne les

(*) Le terme ingénieur est pris dans le sens le plus large. Il s'applique à l'homme qui remplit des fonctions de direction de travaux scientifiques et techniques. Dans la catégorie des ingénieurs, on range, notamment, les ingénieurs diplômés des Grandes Ecoles, les licenciés des Universités, les autodidactes et tous ceux qui ont un rôle de direction dans la recherche et dans la production.

aime que lorsqu'ils se taisent (la Grande Muette n'est plus le corps des officiers mais, aujourd'hui, celui des ingénieurs), et qu'ils sont réduits au rôle de simples producteurs obscurs [Louis Armand (10)]. Il est à souhaiter qu'un jour on ne puisse plus écrire, comme certains l'ont fait, que la France est un pays de juristes, dirigé par des rhéteurs [Louis Armand (10)] et que, dans le monde politique de demain, on ne voie triompher que les hommes réalistes et réfléchis : l'Europe des réalités n'est actuellement autre que celle des ingénieurs (10).

La formation de ces hommes, c'est-à-dire leur profil intellectuel et caractériel, dont on attend beaucoup, est l'une des missions de l'enseignement supérieur.

L'organisation de l'enseignement supérieur français est assez diversifiée puisque, à côté des Universités, se trouvent un grand nombre d'établissements à statuts variés : les Grandes Ecoles.

Jusqu'à il y a peu, l'industrie n'avait guère été satisfaite du système d'enseignement des Universités pour la formation de ses cadres, à moins que ceux-ci n'aient acquis un titre de docteur, marque de leur aptitude à la recherche, car la principale mission des Facultés des Sciences restait surtout la formation des professeurs et des chercheurs pour la recherche scientifique fondamentale.

En revanche, le monde industriel appréciait beaucoup les Ingénieurs des Grandes Ecoles, sans doute parce que le titre est la garantie d'une sélection sévère des meilleurs élèves de l'enseignement secondaire, par la voie rébarbative de concours d'entrée difficiles. Peut-être aussi un certain esprit de corps incitait-il certains directeurs à recruter leurs jeunes collaborateurs pourvus du même sigle du titre d'ingénieur que le leur ?

Les ingénieurs de la Promotion Sociale bénéficiaient aussi d'une grande estime lorsque leurs aptitudes avaient été révélées au cours de leur travail dans l'entreprise.

Les Grandes Ecoles forment indiscutablement d'excellents ingénieurs, d'une grande culture scientifique, visant parfois un peu trop à l'érudition, et il est

dommage que certains de leurs anciens élèves soient peu tentés par les carrières plus ou moins obscures de la technique. Beaucoup préfèrent les situations mieux rémunérées de l'administration et de la gestion des entreprises, voire même du commerce. Certains prétendent, d'ailleurs, que cette tendance ne fait que s'amplifier parmi les jeunes chez lesquels l'ambition est grande d'arriver très vite à de hauts postes de direction (12). Que dire, alors, du rendement de l'utilisation des connaissances scientifiques scolaires.

Il est nécessaire de convaincre les jeunes ingénieurs de l'intérêt des carrières dans la science et la technique et de l'obligation qu'une forte proportion d'entre eux se consacrent à la recherche et au développement.

L'Université doit, elle aussi, maintenant former des hommes pour le secteur industriel. Elle devrait y parvenir par la voie du diplôme d'études approfondies et la thèse du 3^e cycle qui sont à la base de la préparation à la recherche fondamentale et appliquée.

Il apparaît, en effet, de plus en plus urgent de donner une formation de chercheur, sanctionnée ou non par un diplôme, à tout ingénieur ou cadre supérieur des secteurs scientifiques et techniques, comme c'est la règle dans les pays anglo-saxons. Les raisons sont au moins de deux sortes :

La première est que toute personne qui a des responsabilités de direction de travaux est mieux capable d'apprécier ce qu'elle peut attendre de ses collaborateurs et ne pas ainsi surestimer les possibilités de son organisation, lorsqu'elle a connu elle-même les difficultés d'un travail de recherche expérimentale.

La seconde est que l'homme rompu aux disciplines de la recherche sera toujours capable d'accroître lui-même ses connaissances par un choix bibliographique des renseignements qui lui seront nécessaires (pour la chimie dans les American Chemical Abstracts), puis par la lecture des revues et des traités spécialisés. Il aura souvent d'ailleurs l'occasion de constater qu'il peut facilement se tenir au courant de l'évolution

de la science et de la technique et se recycler, par lui-même, en prenant connaissance des innombrables ouvrages parus, surtout en langue anglaise, sur toutes les questions, des plus anciennes aux plus modernes. On pourrait presque dire que, à l'heure actuelle, il doit y avoir fusion du métier d'ingénieur avec celui de chercheur.

Dans notre société, tout groupement humain, s'il veut être entendu, doit être important. Est-ce le cas des ingénieurs et avons-nous une idée de leur nombre, maintenant, puis, pouvons-nous le prévoir à une époque pas trop lointaine ?

D'après un rapport de la DGRST (11), la France posséderait actuellement une masse de 300 000 ingénieurs et scientifiques, dont 200 000 à peine ont reçu une formation scientifique de base. Il est notoirement insuffisant, si on le compare aux 1 700 000 ingénieurs et chercheurs que possédaient les Etats-Unis, en 1965, pour une population seulement quatre fois plus grande. D'autres précisions méritent aussi d'être données.

En 1966, le nombre des scientifiques promus dans l'année (licenciés ès sciences et diplômés des Grandes Ecoles) était de plus de 12 000, ce qui correspond à un pourcentage de scientifiques, par rapport à la population active de classe d'âge de 25 ans, de 2,8 %. Compte tenu de la poussée démographique, on peut prévoir des effectifs annuels de scientifiques de 26 615 (3,25 % de la classe d'âge) en 1975 et de 32 063 (4 % de la classe d'âge) en 1980. Ces chiffres correspondraient à environ un tiers des diplômés de l'enseignement supérieur, ordre de grandeur généralement admis dans les principaux pays (11).

Il est permis de se demander si ces objectifs pourront être atteints en 1980 pour que la France puisse rattraper son retard. Deux conditions sont essentielles : d'une part, solliciter les vocations pour les sciences parmi les adolescents, d'autre part, développer l'enseignement scientifique. Nous examinerons ces deux points spécialement.

Une constatation inquiétante est faite dans la plupart des pays très industrialisés (Etats-Unis, Allemagne, Suisse) : c'est la désaffection des jeunes pour le métier d'ingénieur; la science à un niveau supérieur ne semble plus intéresser la jeunesse actuelle (12). En France, le phénomène paraît, à première vue, moins marqué par le recrutement même des Grandes Ecoles, drainage des meilleurs bacheliers en mathématiques. Mais, étant donnée la difficulté croissante des baccalauréats mathématiques, le nombre de ces diplômés risque de baisser par rapport au nombre total de toutes les séries : un taux moyen de 25 %, de 1966 à 1980, serait à maintenir.

A quoi pouvons-nous attribuer ce glissement d'intérêt des jeunes vers d'autres disciplines telles que la littérature, les langues vivantes, la sociologie, les sciences économiques, la médecine, etc. ?

Tout d'abord, au stade de l'enseignement secondaire, la méthodologie mathématique, considérée comme trop abstraite, n'incite pas les adolescents à faire un effort important dont ils ne discernent l'intérêt que pour réussir à des examens considérés comme difficiles.

L'entrée dans une Grande Ecole d'Ingénieurs, par la voie de la sélection sévère d'un concours, pour lequel l'acquisition de connaissances de plus en plus vastes est nécessaire, puis, une fois admis, la perspective de mener encore, pendant trois ou quatre ans, une existence austère, sont bien aussi, à l'heure actuelle, des raisons pour que les jeunes préfèrent l'enseignement plus libéral des universités.

N'est-il pas décevant aussi d'entendre dire que l'évolution de la science et de la technique est si rapide que les connaissances acquises dans les écoles sont rapidement périmées* au bout de 5 à 10 ans et que tout scientifique doit se perfectionner constamment par un travail continu qui empiètera sur ses loisirs. Lorsqu'en plus, l'exemple de

(*) Les jeunes ingénieurs américains considèrent que 25 % des connaissances acquises au cours de leurs études sont périmées (Power, août 1968).

carrières médiocres montre que le métier d'ingénieur n'a pas la place qu'il mérite dans notre société, comment espère-t-on convaincre de jeunes hommes, très avertis des problèmes politiques et sociaux, de choisir une carrière vers laquelle ils ne se sentent pas attirés par vocation ?

Aussi, pour que le recrutement de nos ingénieurs puisse, non seulement, se maintenir, mais encore se développer, y aurait-il lieu d'abord de valoriser le métier puis de limiter l'importance de la sélection par les mathématiques, dans certaines spécialités scientifiques, la chimie, entre autres. Il est nécessaire de prévoir un enseignement des mathématiques, non pas pour des candidats à la recherche dans cette spécialité, mais pour des utilisateurs de formules et de diagrammes. Il faut bien être convaincu que les ingénieurs américains du génie chimique ont construit de grandes usines chimiques très perfectionnées, en s'aidant de données suffisamment précises fournies par des formules empiriques et des abaques.

L'augmentation souhaitable du nombre de nos scientifiques et de nos ingénieurs laisse supposer des moyens d'enseignement accrus. Examinons dans quel sens nous pouvons développer et utiliser les organisations existantes ou, éventuellement, en créer de nouvelles.

Les Grandes Ecoles, à faibles effectifs, pourraient accroître le nombre de leurs élèves (promotions variant de 50 à 300), mais l'organisation d'une école souffre de promotions trop lourdes (optimum 150 à 200 élèves) (10) et souvent d'ailleurs un certain malthusianisme s'est développé chez les anciens élèves qui redoutent que l'inflation de leur titre ne leur porte préjudice. Aussi, pour faire face aux besoins de l'industrie, a-t-on envisagé la création, soit de nouvelles écoles, soit d'autres organisations d'enseignement.

La première solution ne semble pas avoir été retenue par les Pouvoirs Publics en France, tout au moins pour les Instituts Nationaux des Sciences Appliquées (7 à 800 élèves par an) où le recrutement se fait sur titres (10).

En revanche, l'intérêt semble se porter sur des formules considérées comme nouvelles, les Universités Techniques, n'ayant à respecter aucune tradition de Faculté des Sciences ou de Grande Ecole (10). Certaines seront sans doute bientôt créées. Les ingénieurs ou les scientifiques qui y seront formés seront-ils meilleurs et plus efficaces dans l'industrie que leurs prédécesseurs ? Il est difficile d'être affirmatif, mais il ne faut pas perdre de vue que, quelle que soit la formule d'enseignement adoptée, elle ne pourra avoir pour ambition de donner aux futurs ingénieurs, en plus de quelques connaissances de base dans une spécialité, que des méthodes de travail pour un perfectionnement continu dans l'art de la profession. N'a-t-on pas dit que l'ingénieur est un perpétuel étudiant dont les qualités d'intelligence, de travail, d'organisation et d'esprit critique sont les auxiliaires les plus sûrs de sa réussite. Le diplôme ne doit pas être autre chose qu'un label de garantie d'une formation devant permettre à son titulaire de se perfectionner au cours de sa carrière par l'information sous toutes ses formes, c'est-à-dire de devenir un parfait autodidacte.

Après ces considérations sur l'importance et les caractéristiques du métier d'ingénieur, en général, il est nécessaire d'examiner plus spécialement le cas de cette profession dans l'industrie chimique.

Fabriquer des produits dans les meilleures conditions économiques, but des industries de la chimie, exige des tâches multiples et complexes qui sont du ressort de deux catégories d'ingénieurs.

Le premier genre d'activité est d'élaborer des produits nouveaux et d'améliorer la préparation de composés connus (recherche exploratoire) par des méthodes essentiellement expérimentales au laboratoire. Bien que d'immenses progrès aient été faits dans la systématisation des réactions, la chimie reste toujours une science où la part de l'expérience est la plus importante. En France, ces travaux sont confiés à des chimistes ou à des ingénieurs-chimistes

provenant des Ecoles de Chimie, des Facultés des Sciences (licenciés), de la Promotion Supérieure du Travail, ou simplement à des autodidactes (ingénieurs-maison), chacun d'eux pouvant se prévaloir, en outre, d'un titre de docteur (doctorat d'Etat, d'Université ou d'Ingénieur).

La deuxième sorte d'activité est la réalisation des unités de production, c'est-à-dire le développement de procédés industriels, à partir des données du laboratoire. En France, cette tâche revient plus spécialement à des ingénieurs ayant reçu une formation spéciale en mécanique, en physique, en physico-chimie. Parmi ces spécialistes se rangent, maintenant, un certain nombre d'anciens élèves de quelques écoles où se trouve donnée une formation orientée vers la mise au point des procédés : les ingénieurs du génie chimique.

Ce corps d'ingénieurs a été créé assez récemment (vingt années) sur le modèle des chemical engineers américains et anglais. Est-il destiné à avoir une place prépondérante parmi les ingénieurs dans l'industrie chimique française et européenne, comme c'est le cas déjà aux Etats-Unis ? C'est ce que nous allons examiner maintenant.

LE GÉNIE CHIMIQUE.

La pratique du génie chimique est très ancienne, puisque certaines opérations considérées maintenant comme faisant partie de cette activité étaient utilisées depuis très longtemps d'une manière empirique sous le nom de technologie chimique : citons, par exemple, le broyage, le tamisage, la distillation, le séchage et les échanges thermiques.

Les tentatives de dégager les fondements théoriques de ces opérations sont aussi assez éloignées. Les premiers théoriciens furent nombreux et, parmi ceux-ci, nous n'en citerons que deux : tout d'abord, Fourier, considéré comme le véritable père du génie chimique par l'élaboration de sa théorie mathématique

de la transmission de la chaleur, en 1822. Le second, Sorel, qui proposa la première théorie de la distillation (1899) par les plateaux théoriques et la détermination de leur nombre, d'après une méthode encore valable aujourd'hui.

Beaucoup d'usines chimiques avaient, d'ailleurs, été construites en utilisant des méthodes correspondant à celles du génie chimique avant que les doctrines de cet art n'aient été bien établies.

Cependant, jusqu'à la première guerre, la plupart des produits chimiques étaient préparés en quantités relativement faibles par des méthodes similaires à celles du laboratoire. Les appareils étaient alors conçus, soit par des chimistes ayant quelques notions de technologie, soit par des ingénieurs-mécaniciens, et la collaboration des deux catégories de spécialistes s'imposa pour la construction des grandes installations de production.

Le développement de la pétrochimie et la complication de l'appareillage ont exigé la révision de ce schéma, aux Etats-Unis et en Angleterre. On arriva vite à la conclusion que l'expansion de l'industrie chimique ne pourrait être réalisée convenablement que par la création (en 1915 ou 1920) d'une nouvelle profession : le chemical engineer, traduit en français par ingénieur du génie chimique*.

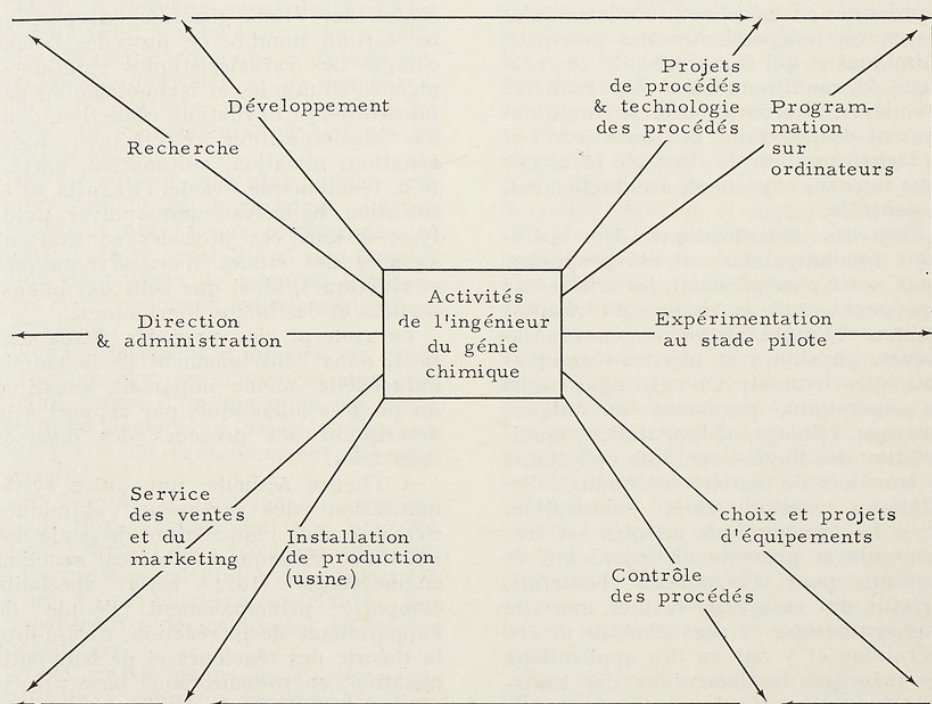
Le génie chimique (chemical engineering) est donc venu ainsi constituer la quatrième catégorie des arts et des techniques de l'ingénieur (génie), les trois plus anciens étant dans l'ordre chronologique de leur création : le génie civil (civil engineering), le génie mécanique (mechanical engineering) et le génie électrique (electrical engineering). Plusieurs définitions du génie chimique ont été données (15) mais la plus simple est celle-ci (14) : le génie chimique est la spécialité de l'art de l'ingénieur qui s'occupe de la conception, de la construction et de l'installation industrielle dans laquelle la matière subit un changement d'état et de composition.

(*) La traduction littérale est ingénieur-chimiste mais cette expression étant déjà utilisée, celle d'ingénieur du génie chimique parut plus convenable.

L'ingénieur du génie chimique s'occupe ainsi principalement de la transposition des résultats du laboratoire au stade industriel.

Les fonctions de cet ingénieur, d'après les conceptions américaines et anglaises, sont cependant plus vastes puisqu'elles englobent, non seulement la mise au point proprement dite des procédés industriels par des opérations d'usine (pro-

jets, installations pilotes et de production, contrôle, mais aussi la recherche, le service des ventes et le marketing (fig.) (14). L'ingénieur du génie chimique apparaît ainsi comme un personnage important soucieux de l'efficacité et de la production maximale. Il se distingue ainsi du scientifique pur où la justification de la solution d'un problème est la satisfaction de sa curiosité (14).



Représentation schématique des fonctions de l'ingénieur du génie chimique, d'après O.A. Hougen, *The Chemical Engineer*, n° 191, C.E. 222, 1965, reproduit dans la leçon inaugurale du Professeur G.V. Jeffreys, *University of Aston, Birmingham* (14).

Examinons quelques particularités du génie chimique et de la formation d'un ingénieur de cette spécialité sur le modèle anglo-américain, puis de l'évolution de cet art ou de cette science (14).

Avant la première guerre, lorsque le génie chimique n'était pas autre chose que de la technologie, les spécialistes

des procédés de fabrication recevaient une formation en chimie, en mécanique, en physique, en chimie industrielle, par la description des principales industries et de leurs procédés.

La première tentative d'abstraction et de généralisation fut l'adoption du concept des opérations fondamentales ou

unitaires (unit opérations)* formulée, la première fois, par Arthur D. Little, en 1915.

Les opérations fondamentales sont les processus mécaniques, physiques et physico-chimiques de l'industrie chimique. Elles comprennent l'ensemble des moyens non spécifiquement chimiques permettant d'exécuter une fabrication suivant un procédé chimique quelconque. Toute fabrication, à n'importe quelle échelle, fait ainsi appel à une série coordonnée d'opérations fondamentales distinctes, indépendantes des processus chimiques et qui comprennent : le groupage, le conditionnement des matières premières, la séparation et le conditionnement des produits, la transmission et la transformation de l'énergie (chaleur) sous tous ses aspects et, éventuellement, le contrôle.

Plusieurs classifications des opérations fondamentales ont été proposées. Dans notre enseignement, les critères de classement sont la nature du résultat obtenu, et l'unité des phénomènes mécaniques, physiques et physico-chimiques qui interviennent. On distingue ainsi les opérations purement mécaniques (broyage, criblage, sédimentation, manipulation des fluides, etc.) des opérations de transfert de matière (extraction, distillation, cristallisation, absorption, etc.). La systématique adoptée est très cohérente et présente un grand intérêt pratique pour l'ingénieur. Toutefois, certains ont essayé de donner une vue plus synthétique et plus générale de ces opérations et y ont vu des applications des principes fondamentaux des transferts de matière, de chaleur, et des quantités de mouvement (Foust, etc.). Cette conception trop abstraite est très utile pour la recherche, mais peu commode pour une utilisation directe (15).

Les opérations fondamentales ne sont, cependant, que des processus annexes subordonnés à la transformation ou processus chimique proprement dit de la fabrication.

Une généralisation analogue a été entreprise pour ramener les principales

réactions de l'industrie chimique à un nombre limité de processus-types caractéristiques : les procédés chimiques fondamentaux ou unitaires (unit processes).

Les critères, pour une généralisation de cet ordre sont cependant trop divers pour que l'accord ait été fait sur l'adoption d'une classification des principales fabrications en procédés chimiques fondamentaux. Nous avons néanmoins tenté, dans notre enseignement, de présenter une étude générale qui propose un certain nombre de procédés tenant compte des caractéristiques chimiques, physico-chimiques et technologiques des fabrications : oxydation, réduction, double décomposition, électrolyse, halogénéation, nitration, sulfonation, alkylation, réactions de Friedel et Crafts, estérification, hydrolyse, ammonolyse, pyrolyse; à tous ces procédés se trouvent associés des études thermodynamiques et cinétiques, ainsi que celle des bilans matière et des bilans thermiques.

Le concept des procédés fondamentaux, dans l'enseignement de la chimie industrielle, même imparfait, constitue un progrès didactique, par rapport à la description des procédés des diverses industries.

A l'heure actuelle, une autre systématisation des processus chimiques s'élabore sous l'appellation de génie des réactions chimiques (chemical reaction engineering) (15); cette spécialité comporte principalement l'étude de l'appareillage de la réaction, c'est-à-dire la théorie des réacteurs et de leur optimisation, en prenant pour base principalement la cinétique. Malheureusement, les travaux théoriques dans ce domaine sont peu avancés et ils ne sont pas encore d'un grand secours pour la pratique industrielle, basée toujours sur des méthodes semi-empiriques (15).

D'autre part, la régulation et le contrôle automatiques font partie, maintenant, de la conduite des appareils des opérations fondamentales et des réacteurs, puis des unités complètes de production.

(*) En allemand : Grundverfahren.

L'une des dernières acquisitions de la technique, l'optimisation des systèmes, a été introduite aussi en génie chimique. Cette spécialité trouve sa place dans la détermination des conditions optimales des processus de production et de fonctionnement des appareils de toute sorte (réacteurs et appareils des opérations fondamentales).

Inutile de dire que toutes ces tâches exigent des calculs souvent compliqués qui sont résolus au moyen d'ordinateurs.

Enfin, le développement des procédés de simulation a amené aussi les spécialistes du génie chimique à l'étude des installations nouvelles et de leurs systèmes de contrôle, par simulation au moyen de calculateurs analogiques et digitaux (14).

On ne saurait non plus oublier que l'ingénieur du génie chimique doit se préoccuper des aspects économiques et humains de sa spécialité et que l'acquisition de notions de sciences économiques et de sociologie est nécessaire à sa formation.

Voilà brièvement indiquées les grandes lignes des connaissances que l'on devrait exiger d'un ingénieur du génie chimique anglais ou américain et qui font partie de l'enseignement de cette spécialité.

En Europe, la doctrine du chemical engineering anglo-saxon n'a pas été adoptée partout dans son intégralité (13) et la tendance est plutôt de répartir les tâches entre plusieurs spécialités qui ressortissent à des catégories différentes d'ingénieurs.

Ainsi, en Allemagne, on a créé la spécialité de la technique des procédés (Verfahrenstechnik), plus vaste que la spécialité des ingénieurs de la chimie ou de la technologie de la chimie (Chemie-Ingenieur-Technik) (15), qui concerne plus spécialement la chimie industrielle. Les deux Allemagnes, l'Autriche, la Suisse et même l'U.R.S.S. ont adopté la doctrine des Verfahrenstechnik (15).

Pour les autres pays, et, en particulier, en France, le génie chimique désigne un ensemble très vaste de spécialités. La formation des ingénieurs est, de ce fait, très diversifiée dans les divers pays européens. On en donnera un bref aperçu ci-après.

Alors qu'aussitôt après la première guerre, on avait reconnu que l'association du chimiste et de l'ingénieur-mécanicien ne convenait plus pour la mise au point des fabrications de l'industrie chimique, ce qui avait donné lieu à la création du génie chimique aux Etats-Unis, on en est revenu, chez nos voisins du Continent à la conception première avec quelques modifications.

Ainsi, on admet maintenant en Allemagne et en Suisse, que l'ingénieur du génie chimique peut être remplacé par le couple chimiste et ingénieur-mécanicien. Toutefois, pour faciliter la collaboration entre ces deux spécialités, les Ecoles et Universités techniques se sont mises à former, d'une part, des chimistes avec quelques connaissances de technologie, et, d'autre part, des ingénieurs mécaniciens ayant suivi des enseignements de chimie et de chimie-physique. Les premiers, que l'on pourrait appeler techniciens chimiques (chemical technologists)* correspondent à nos ingénieurs-chimistes et les seconds sont les ingénieurs des procédés (process engineers ou verfahreningenieurs). L'équipe formée de ces deux spécialités serait équivalente et, dans quelques cas, supérieure à un chemical engineer américain (13).

En Allemagne, et dans les pays de l'Europe centrale, y compris la Suisse, les programmes d'étude des techniciens chimiques, correspondant à nos ingénieurs-chimistes comprennent surtout de la chimie et de la physique avec quelques notions sur les opérations fondamentales et la physico-chimie appliquée. Les études des ingénieurs des procédés comportent aussi quelques

(*) Ces techniciens chimiques ou technologues chimiques, correspondent en réalité, à nos ingénieurs-chimistes des Ecoles Nationales Supérieures de Chimie et non pas à la catégorie des techniciens-chimistes français dont le niveau d'études est inférieur à celui des ingénieurs.

notions de chimie mais surtout des développements importants dans la construction des appareils. En résumé, l'ingénieur des procédés est essentiellement un ingénieur-mécanicien, tout comme le technicien chimique ou l'ingénieur-chimiste reste un chimiste (13).

En France, la situation n'est pas tout à fait la même par le nombre et la diversité des études dans les écoles d'ingénieurs. Certaines n'ont pas voulu adopter une spécialisation étroite et préfèrent donner une culture générale de haut niveau en mathématiques, physique et chimie, laissant ensuite aux ingénieurs le soin de se former eux-mêmes, éventuellement dans l'industrie, aux techniques du génie chimique. D'autres ont choisi un schéma d'enseignement spécialisé en chimie, qui correspond à la formation actuelle d'ingénieur-chimiste. Enfin, quelques établissements, moins nombreux, préparent à des fonctions d'ingénieurs des procédés par une formation nettement orientée vers la mécanique, tandis que certains ont organisé un enseignement qui se rapproche du chemical engineering anglo-saxon.

En Europe, où les situations acquises ont une importance particulière, les voies conduisant à la formation des spécialistes de l'industrie chimique sont variées et il est probable que le système anglo-saxon ne sera pas appliqué dans son intégralité, les diverses écoles continuant à garder leur originalité (13).

Il est nécessaire, cependant, de connaître les principales méthodes du génie chimique qui sont applicables, quelle que soit l'échelle de production : produits de base ou produits finis. Néanmoins, l'importance de ces techniques ne peut être la même pour la fabrication des petits et des moyens produits, lesquels représentent, dans les pays européens, une part plus importante du chiffre d'affaires des sociétés que celle des produits de base. Concernant les premiers, la participation de l'ingénieur chimiste, visant à l'amélioration du rendement de réactions délicates, interviendra bien plus dans la fixation du prix de revient que dans la perfection-

nement de l'appareillage et de son automatisation éventuelle qui pourra se traduire, notamment, par des dépenses hors de proportion avec le but à attendre (13).

*

**

Vouloir dispenser un enseignement adapté aux connaissances exigées d'un ingénieur dans l'industrie chimique de demain est, à l'heure actuelle, rendu difficile par l'évolution rapide des techniques dans des voies incertaines. Aussi, l'unanimité semble-t-elle se faire pour donner la primauté à l'enseignement des matières de base, mathématiques, physique, chimie, ainsi qu'aux principes de la chimie industrielle, du génie chimique et de la construction des appareils (13) (15), quitte à en négliger la part trop spécialisée. En effet, les descriptions des techniques particulières à certaines industries, dans un cours ou même sous forme de conférences d'actualité, risquent d'être vite démodées, car lorsqu'elles sont connues, elles correspondent à des procédés déjà anciens que la nécessité du secret industriel impose de ne divulguer avec précision qu'au bout de délais parfois assez longs. Seules les généralités, dont la nature et l'ampleur varieront avec la spécialité de l'ingénieur constituent le vrai savoir scolaire indispensable, les connaissances particulières à la profession, acquises à l'école, risquant de faire très vite partie de la technique d'hier.

La véritable spécialisation ne pourra s'acquérir que dans les entreprises, au contact des réalités technologiques du monde industriel, soit pendant des stages de durée variable (six mois à deux ans), soit pendant une bonne partie de la carrière.

L'occasion est ainsi fournie de revenir sur l'intérêt de l'initiation à la recherche, consacrée ou non par la soutenance d'une thèse de doctorat dans une spécialité quelconque. Cette formation, complémentaire de celle de l'acquisition des connaissances, prépare, en effet, l'ingénieur à se perfectionner constamment, c'est-à-dire à se recycler, en lui ayant

montré la manière de trouver lui-même toutes les informations qu'il désire dans les livres, les périodiques et les revues diverses.

Enfin, on ne saurait méconnaître aussi la valeur formatrice de la rédaction et de la soutenance d'une thèse à une époque où les moyens d'expression audiovisuels risquent de faire perdre l'habitude et le goût, à bon nombre de personnes, de s'exprimer par écrit dans un langage correct, clair et précis.

Tant que subsistera notre civilisation, les livres et les périodiques resteront les moyens d'expression les plus efficaces de l'enregistrement et de la transmission des connaissances. Mais, devant l'abondance des publications, les écrits obscurs, à moins d'être d'un intérêt exceptionnel, seront délibérément laissés de côté et leurs auteurs n'en tireront pas le bénéfice qu'ils en attendent. Aussi, ne saurait-on assez recommander aux ingénieurs d'attacher la plus grande importance à la présentation de leurs travaux pour que ceux-ci puissent être appréciés et constituer l'une des garanties de réussite dans leur carrière.

Devant l'ampleur du développement des sciences et des techniques, la part de l'enseignement scolaire dans l'acquisition des connaissances nécessaires à l'exercice d'une profession est devenue assez faible et la participation du professeur de plus en plus modeste. Aussi le véritable rôle de celui-ci est-il surtout d'apprendre à apprendre à des hommes qui deviendront ensuite de véritables autodidactes capables de transmettre eux-mêmes à d'autres le fruit de leur activité par la communication verbale et écrite.

Devant l'ampleur du développement des sciences et des techniques, la part de l'enseignement scolaire dans l'acquisition des connaissances nécessaires à l'exercice d'une profession est devenue assez faible et la participation du professeur de plus en plus modeste. Aussi le véritable rôle de celui-ci est-il surtout d'apprendre à apprendre à des hommes qui deviendront ensuite de véritables autodidactes capables de transmettre eux-mêmes à d'autres le fruit de leur activité par la communication verbale et écrite.

BIBLIOGRAPHIE

1. Anny REICHL (interview). — *Chemical Age*, 99, n° 2689 (1969, july 18), 13.
2. ANONYME. — *Chimie & Industrie - Génie Chimique*, 101, n° 11 (juin 1969), 15.
3. Union des Industries Chimiques, note de conjoncture sur l'évolution de l'industrie chimique en 1969 (mars 1970)
4. Bernard RAULINE (interview). — *Nouvelles de la Chimie*, n° 1 (17 octobre 1968).
5. Bernhard TIMM (interview). — *Nouvelles de la Chimie*, n° 31 (15 mai 1969).
6. ANONYME. — *L'Industrie chimique*, mars 1969, 89. Union des I.C., note de conjoncture. *Nouvelles de la Chimie*, 6 mars 1969.
7. D. M. KIEFER. — *C. E., News*, 23 mars 1964, 88.
8. *Le Progrès Scientifique*, n° 126 (1969), 14, 18, 23, 44.
9. *Le Progrès Scientifique*, n° 127 (1969), 51.
10. *Comptes rendus des Journées d'études du Conseil National des Ingénieurs Français (C.N.I.F.)*, 15-16 novembre 1968, Paris. *Sciences et Techniques*, bulletin d'information I.C.F., 31 décembre 1968.
11. *Le Progrès Scientifique*, n° 128 (1969), 24, 40.
12. P. RAPIN. — *Les Ingénieurs de l'Automobile*, 10, 68, 489.
13. N. IBL. — *Chimia*, 22 (1968), 368.
14. G.V. JEFFREYS. — *Leçon inaugurale*, University of Aston, février 1966.
15. T. HOBLER. — *Génie chimique*, 93, n° 3 (1965), 65.

Quelques aspects de l'évolution des méthodes industrielles de synthèse organique

par FRANCIS WEISS,
*Ingénieur de Recherche,
Ugine Kuhlmann, 69 - Pierre-Bénite*

C'est la croissance prodigieuse de nos besoins en matériaux synthétiques de toute sorte — matières plastiques, fibres textiles, élastomères, etc. — qui a entraîné le développement rapide de l'industrie chimique organique. Mais ce développement a été rendu possible, avant tout, grâce aux possibilités immenses d'approvisionnement en matières premières offertes par l'industrie du pétrole. La quantité, la variété et le faible coût des matières premières pétrolières expliquent l'expansion de la pétrochimie, au détriment de la carbochimie.

Mais, en passant de la carbochimie à la pétrochimie, l'industrie chimique organique ne s'est pas simplement orientée vers une nouvelle source de matières premières. Elle a aussi, dans bien des cas, changé de style et de méthode.

De style, en généralisant la construction de grandes unités de production continues, plus ou moins automatisées, utilisant largement la technologie développée à l'origine par l'industrie pétrolière en matière de catalyse, de distillation, etc., pour réduire les coûts d'exploitation.

De méthode, en développant des pro-

cédés de plus en plus directs, utilisant des matières premières de moins en moins élaborées, donc moins coûteuses, pour la synthèse de la plupart des grands intermédiaires organiques.

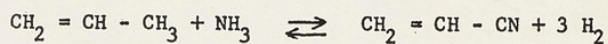
A cet égard, il semble que l'un des aspects majeurs de l'évolution des méthodes industrielles de synthèse organique ait été le développement spectaculaire des techniques d'oxydation directe des hydrocarbures par l'oxygène moléculaire, techniques qui sont maintenant à la base des procédés de fabrication de nombreux produits organiques, parmi les plus importants en tonnage.

L'intérêt économique de ces procédés d'oxydation est assez évident, puisque l'on y met en jeu des hydrocarbures peu coûteux et de l'oxygène, le plus souvent sous la forme de l'air atmosphérique, qui est gratuit, en première approximation. La mise au point d'un tel procédé pour la fabrication d'un produit fait donc en général figure d'événement, et constitue une menace immédiate, ou à court terme, pour les procédés existants, utilisant des matières premières et des cycles de transformation moins avantageux. Cette menace peut être d'une gravité variable, selon l'ampleur du progrès économique

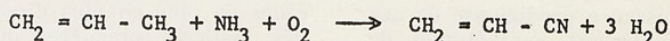
apporté par le procédé d'oxydation, ou la nature des facteurs pouvant maintenir les procédés en place en état de compétition — amortissement des installations, intégration dans un complexe de fabrication, etc. A l'extrême, elle peut provoquer la disparition rapide, et totale, des anciens procédés de fabrication.

Le cas le plus spectaculaire a sans doute été celui de l'acrylonitrile, où le procédé d'oxydation conjointe du propylène et de l'ammoniac présentait un avantage économique décisif vis-à-vis des procédés de synthèse à partir d'acide cyanhydrique et d'acétylène, ou d'oxyde d'éthylène, et les a totalement remplacés en l'espace de quelques années. D'autres débouchés de l'acétylène ont subi un sort semblable.

Les réactions d'oxydation par l'oxygène ont aussi un intérêt plus fondamental, d'une part parce que le problème est, bien souvent, de préparer des composés oxygénés — alcools, aldéhydes, cétones, acides, esters, etc. —, d'autre part parce qu'elles sont thermodynamiquement favorisées par leur forte exothermicité. Cette énergie interne au système d'une réaction d'oxydation peut d'ailleurs être mise à profit pour préparer des molécules non oxygénées par déshydrogénation. Ainsi, par exemple, c'est la formation de l'eau qui permet à la réaction d'oxydation du propylène et de l'ammoniac en acrylonitrile d'être exothermique, alors que la formation du nitrile par déshydrogénation serait fortement endothermique :



$$\Delta H_r = + 54 \text{ kcal}$$



$$\Delta H_r = - 119 \text{ kcal}$$

Il n'a pas suffi toutefois de constater l'intérêt intrinsèque de l'oxygène par rapport à des oxydants plus coûteux comme le chlore, ou l'acide nitrique, ni de disposer de matières premières pétrolières bon marché, pour que les procédés d'oxydation par l'oxygène se soient imposés d'une manière générale. D'une part parce que le progrès économique qu'ils apportent n'est pas toujours décisif, d'autre part parce que les difficultés rencontrées dans leur mise au point ont pu être telles qu'ils n'ont pas encore réussi à faire leurs preuves industrielles. C'est le cas des synthèses de l'oxyde de propylène et de l'acide acrylique par oxydation du propylène, par exemple.

Ces difficultés tiennent en grande partie au fait que les réactions d'oxydation par l'oxygène ne sont ni plus ni moins que des combustions partielles. Les problèmes qu'il faut résoudre pour la mise au point des procédés d'oxydation sont donc à la fois d'ordre chimique, pour rechercher la sélectivité dans des réac-

tions complexes, et d'ordre technologique, pour réaliser et pour contrôler des processus fortement exothermiques dans des conditions économiques et sûres. Ces difficultés se trouvent multipliées par la variété des matières premières disponibles — hydrocarbures saturés, oléfiniques, aromatiques, etc. — et des produits de réaction souhaités. Il en résulte une assez grande variété de techniques d'oxydation — catalytiques ou non, en phase liquide ou gazeuse, homogène ou hétérogène — qui se justifie par la nécessité de se placer dans des conditions optimales de réaction, dépendant de la nature des réactifs et des produits, en relation étroite avec les mécanismes fondamentaux des réactions d'oxydation.

Il est sans doute peu de domaines de la synthèse organique où la technique industrielle soit aussi intimement dépendante des mécanismes des réactions, où il soit aussi nécessaire de bien connaître ces derniers pour assurer le succès industriel des procédés, et où par conséquent

les études fondamentales et appliquées soient aussi solidaires. La découverte de la plupart des procédés d'oxydation a certes été empirique, selon une règle très générale, mais leur mise au point a souvent été subordonnée à un énorme effort de recherche fondamentale et aux progrès de la connaissance scientifique des phénomènes d'oxydation. C'est un peu pour cela que beaucoup de ces procédés sont apparus aussi tardivement sur la scène industrielle.

C'est pour cela aussi que j'ai choisi de passer en revue les principales méthodes industrielles d'oxydation par l'oxygène en les considérant sous l'angle des mécanismes, ou quelquefois simplement des modes de réaction impliqués. C'est d'ailleurs une manière commode de classer les procédés dans un certain ordre logique, souvent peu apparent sous d'autres points de vue, mettant en évidence des liens de parenté entre des procédés très dissemblables par leur objet.

Les différents processus d'oxydation peuvent être classés dans trois groupes que nous examinerons successivement :

1) les réactions d'autoxydation, les seules où l'oxygène moléculaire agisse directement sur le substrat organique. Ces réactions sont effectuées la plupart du temps en phase liquide, à des températures ne dépassant pas 180° environ, quelquefois sous pression ;

2) les réactions d'oxydation que l'on pourrait dire différées, où l'on utilise un peroxyde, préparé par autoxydation

selon 1), pour effectuer l'oxydation d'une autre molécule, généralement en solution ;

3) les réactions d'oxydation catalytiques, par catalyse hétérogène en phase gazeuse à haute température, jusqu'à 500° environ, ou par catalyse homogène en solution.

1. — MÉTHODES BASÉES SUR DES RÉACTIONS D'AUTOXYDATION.

Le phénomène de l'autoxydation nous est familier par son universalité, puisqu'il est responsable de la dégradation naturelle à l'air de nombreux produits de la vie courante — oxydation des lubrifiants, rancissement des matières grasses, dégradation du coton à la lumière, vieillissement des caoutchoucs, etc. et qu'il est utilisé de longue date en peinture avec les huiles siccatives.

Son application à des synthèses industrielles a commencé il y a près de quarante ans avec l'oxydation des paraffines supérieures, oxydation complexe qui n'est sans doute plus pratiquée aujourd'hui. Les principales fabrications basées actuellement sur des réactions d'autoxydation sont indiquées dans le *tableau I*, et leur diversité se passe de longs commentaires. Cette diversité n'est toutefois que la conséquence des divers effets de structure des réactifs et des produits dans un mécanisme commun d'autoxydation, comme nous allons le voir en discutant les grandes lignes de ce mécanisme.

TABLEAU I. — Procédés d'autoxydation

isobutane	→	hydroperoxyde de t-butyle		époxydations
éthylbenzène	→	hydroperoxyde de phényléthyle		époxydations + styrène
cumène	→	hydroperoxyde de cumyle		phénol + acétone
n-butane	→	acide acétique + méthyléthylcétone		
essence légère	→	acide acétique		
cyclohexane	→	cyclohexanol + cyclohexanone		polyamides 6 et 66
cyclododécane	→	cyclododécanol + cyclododécانون		polyamide 12
toluène	→	acide benzoïque		caprolactame, phénol
xylènes	→	acides phtaliques		résines et fibres
acétaldéhyde	→	acide acétique et acide peracétique		polyester
isopropanol	→	acétone + peroxyde d'hydrogène		époxydations
hydroanthraquinones	→	anthraquinones + peroxyde d'hydrogène		

L'oxygène moléculaire est à peu près inerte vis-à-vis des molécules organiques, mais sa structure de diradical $^{\circ}O-O^{\circ}$ lui permet de réagir avec des radi-

caux libres. Cette propriété est à la base du phénomène de l'autoxydation, qui est une réaction radicalaire en chaîne (figure 1).

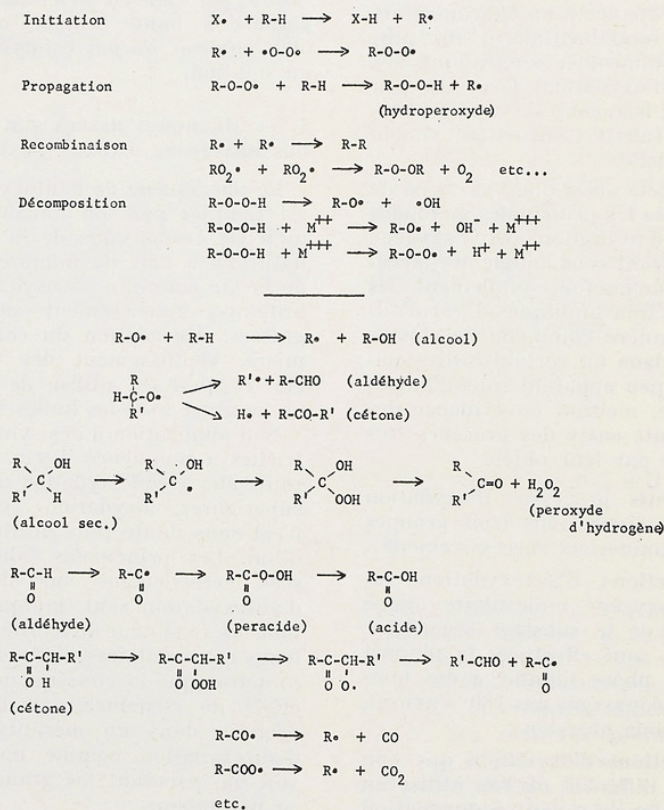


Schéma général de l'autoxydation

Figure 1

Dans l'étape d'initiation, un initiateur, qui peut être un radical libre $X^{\bullet}$, ou un photon, attaque la molécule organique $R-H$ sur une liaison $C-H$ et lui soustrait un atome d'hydrogène pour former un radical $R^{\bullet}$. L'oxygène réagit rapidement avec ce radical pour donner un radical peroxydique $RO_2^{\bullet}$, et celui-ci attaque à son tour une molécule $R-H$ pour former un hydroperoxyde, premier terme isolable de l'autoxydation, et un nouveau

radical $R^{\bullet}$, ce qui permet la propagation de la réaction en chaîne. Mais de nombreuses évolutions concurrentes viennent compliquer ce schéma simple.

Des réactions de recombinaison de deux radicaux en produits inactifs provoquent l'arrêt du processus en chaîne, tandis que la décomposition de l'hydroperoxyde l'accélère en créant de nouveaux radicaux. Cette décomposition peut être spontanée, due à l'instabilité thermi-

que de l'hydroperoxyde (l'énergie de dissociation de la liaison RO-OH est très faible, de l'ordre de 30 kcal/mole) : c'est le phénomène autocatalytique auquel l'autoxydation doit son nom. Mais on peut aussi catalyser la décomposition des hydroperoxydes, et par-là l'oxydation, par des sels métalliques (Co, Mn, V, etc.) agissant en système redox ; cette catalyse est souvent nécessaire dans la pratique industrielle (1).

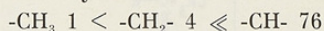
Les radicaux alcoxy RO[•] provenant de cette décomposition réagissent avec une molécule R-H pour former un alcool. Mais ils peuvent aussi, selon leur structure, subir des isomérisations ou des fragmentations, donnant par exemple un aldéhyde ou une cétone, avec formation d'un nouveau radical. Enfin, et surtout, l'autoxydation peut se poursuivre, selon les mêmes mécanismes, aux dépens de ces produits d'oxydation intermédiaires. Ainsi l'oxydation d'un alcool secondaire donnera une cétone et du peroxyde d'hydrogène, l'oxydation d'un aldéhyde donnera un peracide, puis un acide carboxylique, et une cétone, attaquée sur une liaison C-H voisine du groupe carbonyle, sera finalement dégradée en un aldéhyde et un radical acyle RCO[•], etc., jusqu'à l'oxydation complète.

Pour y voir un peu plus clair, pour comprendre pourquoi tel intermédiaire peut être isolé avec de bons rendements dans un cas, et pas dans un autre, il

nous faut examiner sommairement l'effet de la structure des molécules sur leur réactivité, ou sur leur stabilité.

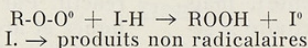
L'attaque d'une molécule R-H par un radical peroxydique RO₂[•], qui est l'étape essentielle de l'autoxydation, se fait sur la liaison C-H la plus faible, dont la rupture donnera le radical le plus stable (2). La hiérarchie des réactivités suit donc, qualitativement, celle des énergies de dissociation des liaisons C-H, la réactivité croissant au fur et à mesure que diminue l'énergie de dissociation. On peut ainsi prévoir quel site, dans une structure, ou quelle molécule, dans un mélange, seront attaqués préférentiellement.

Toutes autres choses égales, ce sont les hydrogènes tertiaires qui sont les plus faiblement liés (*tableau II*), et de ce fait ils sont plus réactifs que les hydrogènes secondaires, ceux-ci étant à leur tour plus réactifs que les hydrogènes primaires. L'accroissement de la réactivité est d'ailleurs beaucoup plus fort que ne le suggère l'écart des énergies de dissociation. Ainsi, pour les hydrocarbures saturés, les vitesses d'attaque relatives dans l'autoxydation sont les suivantes :



et la sélectivité de l'attaque d'un site tertiaire est donc très grande, en général (3). L'activation allylique dans les oléfines, ou benzylique dans les alcoyl-

(1) C'est au niveau de ces réactions de propagation et de décomposition qu'il faut agir lorsque l'autoxydation, au lieu d'être recherchée comme un moyen de synthèse, est un phénomène indésirable de dégradation à combattre. On peut neutraliser l'effet néfaste d'impuretés métalliques par complexation des ions gênants. Mais l'action principale consiste à empêcher la propagation de la chaîne, en ajoutant un composé I-H très réactif vis-à-vis des radicaux libres R[•] ou RO₂[•], mais donnant un radical I[•] inactif, incapable de réagir avec O₂ ou d'attaquer une nouvelle molécule R-H :



C'est, très schématiquement, le principe de l'inhibition de l'autoxydation par des phénols ou des amines aromatiques, jouant le rôle de I-H.

(2) Si la molécule possède plusieurs sites de réactivité équivalente l'attaque se fera indifféremment sur chacun de ces sites, et il n'y aura aucune sélectivité dans l'oxydation. C'est ce qui se passe avec les n-paraffines, dont tous les CH₂ sont touchés de manière à peu près égale.

(3) Cette sélectivité n'implique pas nécessairement qu'un hydrocarbure tertiaire soit plus vite oxydé, globalement. Dans le cas des paraffines notamment c'est tout le contraire : ce sont les n-paraffines qui s'oxydent le plus vite, car les hydroperoxydes secondaires qui en dérivent sont moins stables que les hydroperoxydes tertiaires que donnent les iso-paraffines, et ils accélèrent le processus en chaîne en se décomposant beaucoup plus vite.

Caractère de la liaison	Primaire	Secondaire	Tertiaire
<u>Hydrocarbures saturés</u>			
$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{—H}$	98		
$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \diagdown \\ \text{CH—H} \\ \diagup \\ \text{CH}_3 \end{array}$		95	
$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_3\text{—C—H} \\ \\ \text{CH}_3 \end{array}$			92
<u>Oléfines</u>			
$\text{CH}_2=\text{CH—CH}_2\text{—H}$	89		
$\begin{array}{c} \text{CH}_2=\text{CH—CH—H} \\ \\ \text{CH}_3 \end{array}$		83	
<u>Aromatiques</u>			
$\begin{array}{c} \text{C}_6\text{H}_5\text{—CH}_2\text{—H} \end{array}$	85		
$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{C}_6\text{H}_5\text{—C—H} \\ \\ \text{CH}_3 \end{array}$			74
<u>Alcool secondaire</u>			
$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \quad \text{OH} \\ \diagdown \quad \diagup \\ \text{C} \\ \diagup \quad \diagdown \\ \text{CH}_3 \quad \text{H} \end{array}$			91
<u>Aldéhyde</u>			
$\begin{array}{c} \text{CH}_3\text{—C—H} \\ \\ \text{O} \end{array}$			87
$\text{CH}_2=\text{CH—H} \quad \gg \quad 108$			
$\text{C}_6\text{H}_5\text{—H} \quad 112$			

Tableau II. - Energies de dissociation de liaisons C—H en kcal/mole

benzènes, affaiblit considérablement les liaisons C-H, et accroît leur réactivité (de l'ordre de 1 000 fois par rapport à celle d'une liaison C-H dans un hydrocarbure saturé de structure équivalente), mais on retrouve une hiérarchie tertiaire > secondaire > primaire analogue dans ces séries. On observe également que l'hydrogène placé en α du groupe hydroxy

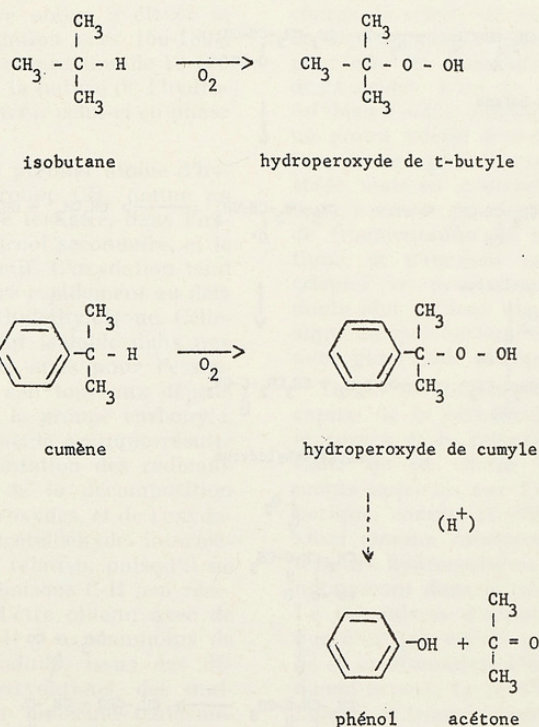
d'un alcool secondaire possède un caractère tertiaire comparable à celui de l'isobutane, et que l'hydrogène d'un groupe aldéhyde est faiblement lié, donc très réactif. Par contre les hydrogènes vinyliques et aromatiques sont très fortement liés et, de fait, ils ne sont jamais attaqués dans un processus d'autoxydation (4).

(4) L'énergie de dissociation de la liaison ROO-H étant d'environ 88-90 kcal/mole, indépendamment de R, il faut en gros que l'énergie de dissociation de la liaison R-H ait une valeur voisine ou inférieure pour que la réaction de propagation
 $\text{ROO}^\bullet + \text{R-H} \rightarrow \text{ROO-H} + \text{R}^\bullet$
 puisse avoir lieu dans de bonnes conditions.

Ce grand écart de réactivité des atomes d'hydrogène, selon leur position, a des conséquences capitales sur l'évolution des réactions d'oxydation et on y trouve, schématisée à l'extrême bien entendu, l'explication de la variété des pro-

cédés d'autoxydation énumérés dans le tableau I, que nous allons reprendre maintenant dans le détail.

L'oxydation d'un hydrocarbure tertiaire, l'isobutane ou le cumène par exemple (figure 2), fait disparaître la



Autoxydation d'hydrocarbures tertiaires

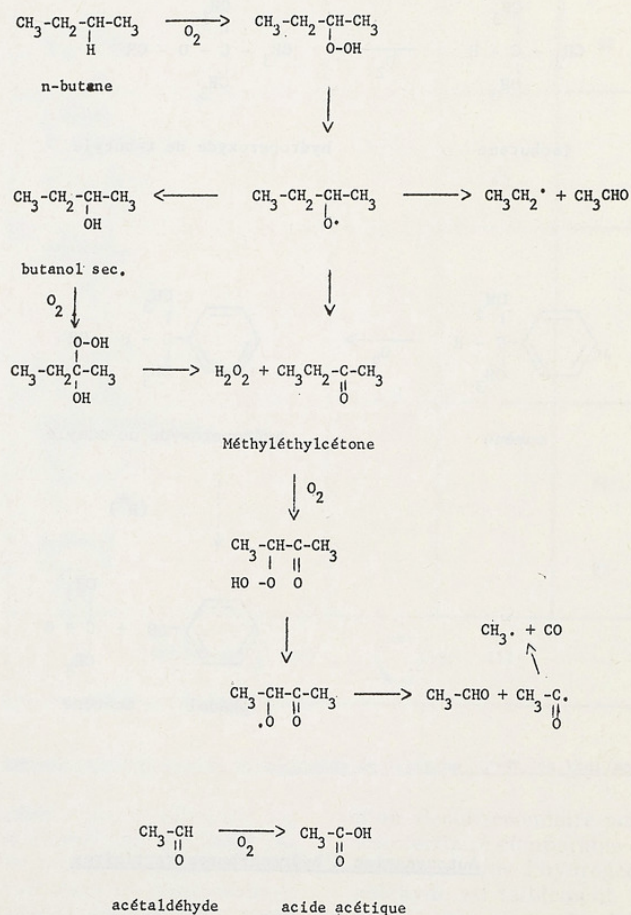
Figure 2

liaison C-H la plus réactive de la molécule, ce qui signifie que les premiers termes de l'oxydation, l'hydroperoxyde (ou l'alcool tertiaire, non figuré), seront moins oxydables que l'hydrocarbure initial. Comme les hydroperoxydes tertiaires sont relativement stables, aux températures modérées de 70-120° où l'on

peut opérer, ils peuvent être obtenus avec de bons rendements, même avec des taux de conversion relativement élevés de l'hydrocarbure. L'hydroperoxyde de cumyle est produit ainsi à gros tonnage, au cours de la fabrication bien connue du phénol et de l'acétone, à partir de benzène et de propylène, qui a pris

très largement la première place dans les procédés de production du phénol (5). L'hydroperoxyde de t-butyle également est produit depuis peu à grande échelle, comme agent d'époxydation du propylène. Nous y reviendrons tout à l'heure.

Lorsque l'on attaque une liaison C-H secondaire l'oxydation prend un tour plus complexe, illustré par l'exemple de l'oxydation du n-butane en acide acétique (*figure 3*), qui est pratiquée à très grande échelle aux Etats-Unis, ainsi



Autoxydation d'hydrocarbures secondaires

Schéma abrégé de l'oxydation du n-butane

Figure 3

(5) Dans l'Europe de l'Ouest (Marché Commun + Grande-Bretagne) 79 % des 533 000 t de phénol consommées en 1968 ont été produites à partir de cumène.

qu'en Allemagne. L'oxydation des essences légères en acide acétique, qui est plutôt pratiquée en Europe, notamment en France, obéit à un mécanisme similaire, de même que, d'une façon générale, l'oxydation des paraffines. La moindre réactivité des hydrogènes secondaires à l'attaque radicalaire oblige à élever la température d'oxydation vers 150-180°, et l'on opère sous une pression de 10-100 bars environ, selon la nature de l'hydrocarbure, pour maintenir celui-ci en phase liquide.

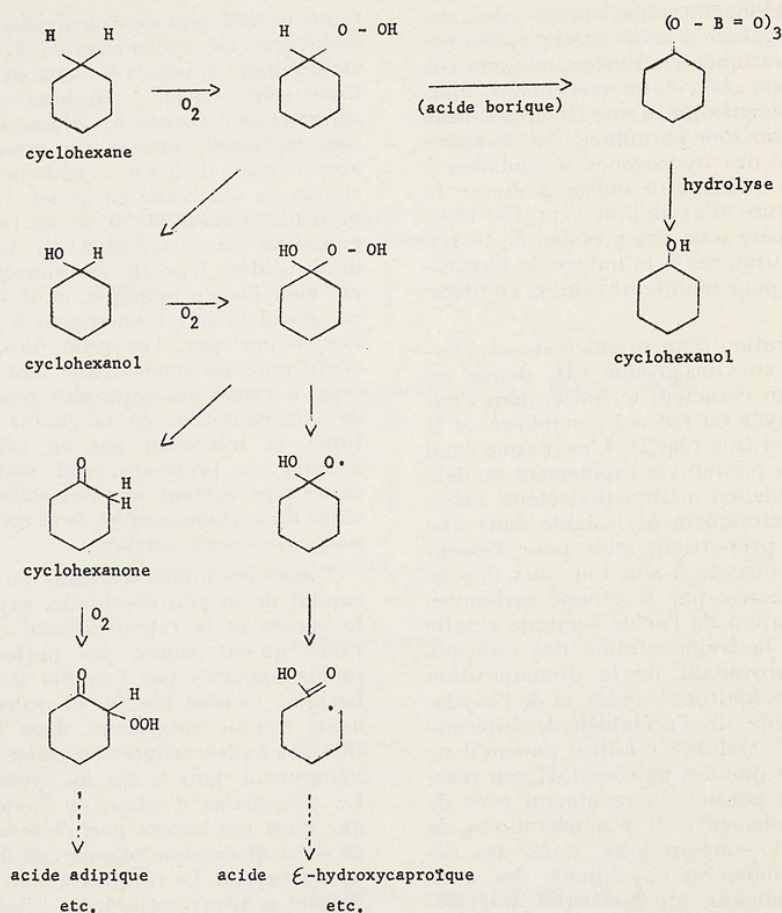
L'oxydation d'un premier atome d'hydrogène sur un groupe CH_2 donne au second un caractère tertiaire, dans l'hydroperoxyde ou l'alcool secondaire, et le rend ainsi très réactif. L'oxydation tend donc à se poursuivre rapidement au-delà de ce stade, en méthyléthylcétone. Celle-ci est techniquement isolable dans une certaine proportion, mais pour l'essentiel elle s'oxyde à son tour aux dépens du CH_2 activé par le groupe carbonyle. La formation de l'acide acétique résulte enfin de la fragmentation des radicaux alcoxy provenant de la décomposition des divers hydroperoxydes, et de l'oxydation rapide de l'acétaldéhyde intermédiaire. Sa stabilité relative, puisqu'il ne comporte que des liaisons C-H peu réactives, lui permet d'être obtenu avec de bons rendements. Il y a néanmoins de nombreux sous-produits, issus des décompositions, ou oxydations, des multiples radicaux ou molécules intermédiaires, dont le schéma abrégé ne fait pas état.

Si l'on désire s'arrêter à un stade intermédiaire, alcool secondaire ou cétone, la réaction d'autoxydation ne permet que difficilement de le faire avec une bonne sélectivité, pour les raisons que nous venons de voir. La condition impérative pour avoir un rendement convenable est de maintenir très faible la concentration en alcool ou en cétone, pour éviter que leur oxydation devienne prépondérante, et pour cela il faut d'abord limiter considérablement le taux de conversion de l'hydrocarbure. Cela impose, sur le plan technique, l'emploi de réacteurs volumineux et le recyclage coûteux de l'excès d'hydrocarbure mis en jeu. C'est

toute la difficulté de l'oxydation du cyclohexane en cyclohexanol et en cyclohexanone, produits de base de la synthèse de l'acide adipique et du caprolactame (figure 4). Même en limitant la transformation du cyclohexane aux environs de 5 à 6 % seulement de la charge, la sélectivité en alcool + cétone ne dépasse guère 60-70 %, du fait de la poursuite de l'oxydation en sous-produits acides. L'un de ces sous-produits est bien l'acide adipique, et il y aurait un grand intérêt économique à pousser l'oxydation par l'oxygène jusqu'à ce stade, mais les rendements sont médiocres, à cause des multiples possibilités de fragmentation de la chaîne aliphatique, et n'incitent pas en général à adopter ce processus, qui reste sans doute plus coûteux que l'oxydation classique du cyclohexanol et de la cyclohexanone par l'acide nitrique.

Toutes ces difficultés, dans un secteur capital de la pétrolochimie, expliquent le succès et le retentissement considérable qu'ont connu les perfectionnements apportés par l'emploi de l'acide borique, comme réactif et sans doute aussi comme catalyseur, dans l'oxydation des hydrocarbures en phase liquide, notamment dans le cas du cyclohexane. Le mécanisme d'action de l'acide borique n'est pas encore parfaitement élucidé et sa discussion déborderait du cadre de cet exposé. Le résultat net en est que l'alcool se trouve combiné à l'état d'ester borique, beaucoup plus stable que lui vis-à-vis de l'oxydation, et que l'on peut ainsi pousser la transformation du cyclohexane à des taux nettement plus élevés, de l'ordre de 12 %, environ le double du taux optimum du procédé précédent, tout en obtenant un rendement plus élevé, approchant de 90 % en alcool + cétone, après hydrolyse des esters boriques. Un autre aspect de l'amélioration de la sélectivité avec l'acide borique apparaît dans le fait que près de 90 % du mélange de cyclohexanol et de cyclohexanone produit est constitué par l'alcool, alors que l'oxydation classique produit des quantités voisines d'alcool et de cétone.

Avec de tels résultats cette voie d'ac-

Oxydation du cyclohexaneFigure 4

cès aux intermédiaires des polyamides fait une concurrence acharnée à la voie habituelle passant par le phénol, concurrence qui joue ici entre deux voies partant d'une même matière première, le benzène, et comportant toutes deux une étape d'oxydation.

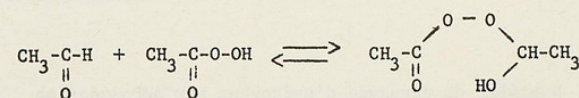
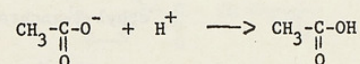
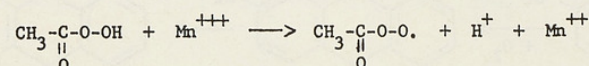
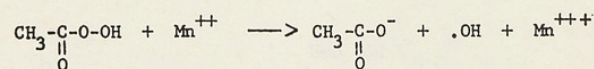
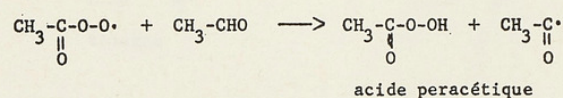
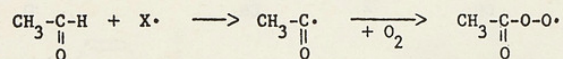
D'une manière tout à fait similaire on effectue l'oxydation du cyclododécane en

cyclododécanol et en cyclododécانون, ce qui donne accès au polyamide 12, à partir du cyclododécatriène que l'on obtient par trimérisation catalytique du butadiène. Ce processus est industrialisé depuis quelques années en Allemagne, et, depuis peu, en France.

L'oxydation facile des intermédiaires — alcool secondaire ou aldéhyde — peut

évidemment être mise à profit en partant directement de ces produits, indépendamment de leur origine; il n'est pas nécessaire d'entamer l'oxydation au niveau de l'hydrocarbure. La fabrication classique de l'acide acétique par oxydation de l'acétaldéhyde en phase liquide en est un exemple connu de longue date, qui reste important malgré la concurrence

des procédés d'oxydation directe des hydrocarbures (6). Dans cette oxydation on opère avec des sels de Co ou de Mn comme catalyseurs, dont l'effet est d'accélérer la réaction en décomposant l'acide peracétique intermédiaire (figure 5). Mais en limitant l'effet de catalyse, et en opérant à basse température, il est possible de s'arrêter sélectivement au



"peracétate d'acétaldéhyde"

Oxydation de l'acétaldéhyde

en acide acétique (catalysée)

en acide peracétique (non catalysée)

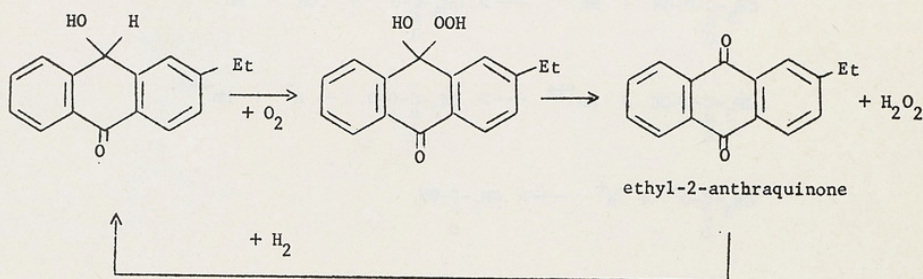
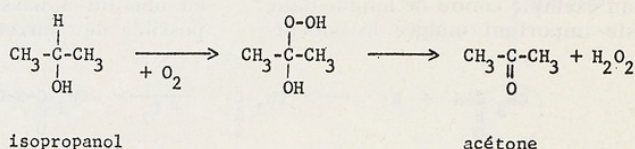
Figure 5

(6) Plus de la moitié de l'acétaldéhyde fabriqué dans le monde est encore utilisé pour la fabrication de l'acide acétique.

stade de l'acide peracétique. Celui-ci forme en effet, dans ces conditions, un produit d'addition avec l'acétaldéhyde en excès. La dissociation thermique ultérieure de ce produit, en conditions non radicalaires, libère l'acide peracétique,

qui est un agent d'oxydation sélectif, notamment d'époxydation, que nous retrouverons tout à l'heure.

L'oxydation d'un alcool secondaire conduit, nous l'avons vu, à la cétone correspondante et au peroxyde d'hydrogène.



Synthèse du peroxyde d'hydrogène par autoxydation

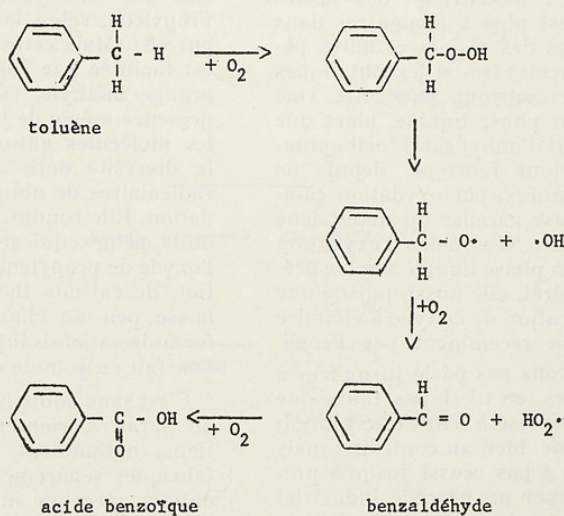
Figure 6

En choisissant convenablement l'alcool on peut arrêter le processus à ce stade, et en faire un procédé sélectif de production de peroxyde d'hydrogène (*figure 6*). Il faut pour cela que la cétone issue de la réaction soit suffisamment stable pour échapper à une oxydation plus poussée. L'hydrogénation subséquente de la cétone en alcool permet alors, si l'on veut, de rendre le procédé

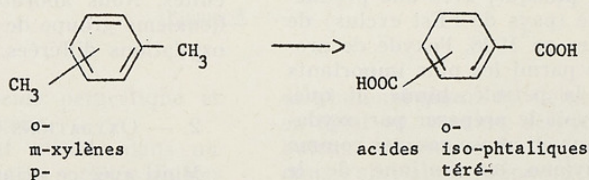
cyclique et de fabriquer en fait le peroxyde d'hydrogène par oxydation différée de l'hydrogène. Le procédé bien connu à l'anthraquinone (on utilise en général l'éthyl-2 anthraquinone) ainsi que l'oxydation de l'isopropanol en acétone et H_2O_2 sont basés sur ce principe, et ils ont entièrement supplanté les anciens procédés de fabrication de H_2O_2 par la voie électrolytique.

Lors de l'oxydation de groupes méthyles, dont les hydrogènes sont primaires, l'évolution découle d'une situation analogue à celle que nous avons commentée pour les dérivés à hydrogènes secondaires. Les liaisons C-H deviennent plus réactives dans les stades successifs de l'oxydation en acquérant un caractère secondaire puis tertiaire, de sorte que

l'oxydation se poursuit rapidement jusqu'au stade de l'acide carboxylique. Industriellement ce processus est mis en jeu dans l'oxydation, en phase liquide, du toluène en acide benzoïque, et des ortho-, méta- et paraxylènes en acides ortho-, iso- et téréphtaliques (figure 7). L'acide benzoïque est un intermédiaire dans un procédé de fabrication du ca-



De la même manière :



Autoxydation de groupes méthyles

Synthèse des acides aromatiques

Figure 7

prolactame à partir de toluène, mis au point en Italie par Snia Viscosa, il y a quelques années, ainsi que dans un procédé de fabrication du phénol, utilisé industriellement par Dow, aux Etats-Unis et en Hollande. Dans les deux cas l'intérêt économique est lié surtout au prix relatif du toluène par rapport à celui du benzène, qui est la matière première traditionnelle de ces produits.

L'importance industrielle des acides phthaliques n'est plus à démontrer dans les fabrications des résines et fibres polyester. Les acides iso- et téréphtaliques sont fabriqués surtout par cette voie d'oxydation en phase liquide, alors que l'acide (en fait l'anhydride) orthophtalique est surtout fabriqué, depuis de nombreuses années, par oxydation catalytique en phase gazeuse du naphthalène ou de l'o-xylène. Néanmoins l'oxydation de l'o-xylène en phase liquide semble présenter de l'intérêt, elle aussi, puisqu'une unité de fabrication de ce type a été mise en exploitation récemment par Progil.

Si nous n'avons pas parlé jusqu'ici du cas des oléfines, ce n'est pas faute que l'on se soit intéressé à leur autoxydation en phase liquide, bien au contraire, mais parce qu'on n'a pas réussi jusqu'à présent à développer un procédé industriel compétitif de ce type. Des efforts importants ont pourtant été faits dans ce domaine pour mettre au point une oxydation sélective du propylène en oxyde de propylène. L'enjeu est en effet considérable, puisque, avec une production mondiale (pays de l'Est exclus) de 800 000 tonnes en 1968, l'oxyde de propylène figure parmi les plus importants produits de la pétrochimie, et que, faute de pouvoir le préparer par oxydation catalytique en phase gazeuse comme l'oxyde d'éthylène, on continue de le fabriquer par l'intermédiaire de la chlorhydrine du propylène, mobilisant ainsi en pure perte une capacité annuelle de 1 200 000 tonnes de chlore.

Les recherches d'un procédé d'oxydation directe en phase liquide avaient été stimulées par le fait que l'on obtient effectivement de l'oxyde de propylène par autoxydation, mais fort peu, de l'ordre de 20-30 % seulement. Même en

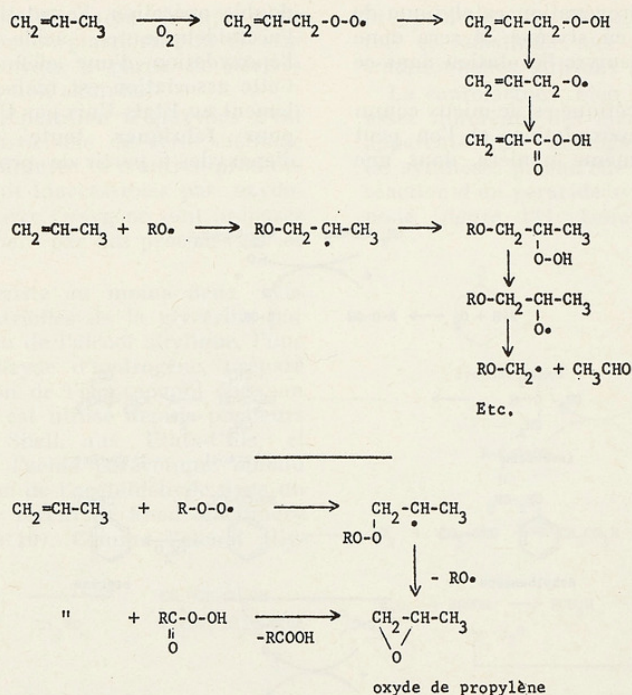
tenant compte du propylèneglycol et de ses esters sous-produits, le rendement ne dépasse jamais 50-60 %. L'examen du mécanisme d'autoxydation des oléfines explique fort bien cet échec.

En effet, l'oxygène moléculaire n'est pas un agent d'époxydation; il faut pour cela disposer d'une espèce peroxydique, un radical peroxy ou un peracide, espèce qu'il faut nécessairement produire *in situ* par autoxydation d'une partie du propylène, selon le schéma habituel (*figure 8*). Mais cette autoxydation, si elle est facilitée par l'activation allylique du groupe méthyle, est compliquée par la présence même de la double liaison dans les molécules autoxydées, qui ajoute à la diversité déjà grande des réactions radicalaires de nouvelles voies de dégradation. Elle conduit de plus à divers produits acides qui tendent à réagir avec l'oxyde de propylène. Bref, cette conjonction de raisons théoriques et pratiques laisse peu de chances de trouver une formule satisfaisante, dans une voie où l'on fait en somme deux choses à la fois.

C'est sans doute la raison pour laquelle on paraît s'orienter vers d'autres solutions, notamment celle qui consiste à fabriquer séparément un agent d'époxydation, avec une molécule qui s'y prête bien, pour le faire réagir ensuite avec le propylène, avec toute latitude de choisir là aussi les meilleures conditions de réaction. On obéit ainsi à un principe bien cartésien de séparation des difficultés. Nous abordons avec cela notre deuxième groupe de méthodes, celui des oxydations différées.

2. — OXYDATIONS DIFFÉRÉES.

Mais, avec ce principe, on oxyde deux produits différents, et on fait donc simultanément deux produits d'oxydation. Le choix de la matière première que l'on peroxyde dépend donc du sort du produit d'oxydation qui en est issu, selon que celui-ci peut être vendu, recyclé ou considéré comme perdu. En fonction de ces considérations on peut alors choisir parmi les trois catégories de peroxydes que nous avons rencontrés : les hydroper-

Autoxydation des oléfines

Exemple de la formation non sélective

de l'oxyde de propylène dans l'oxydation directe.

Figure 8

oxydes tertiaires, l'acide peracétique et le peroxyde d'hydrogène.

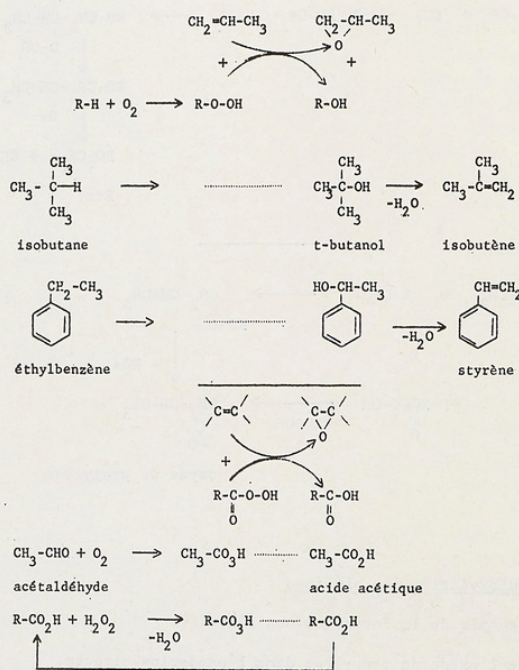
Les premiers sont utilisés dans un procédé développé par les sociétés Halcon et Atlantic Richfield pour la fabrication de l'oxyde de propylène, et une grosse unité commerciale de ce type (75 000 t/an) a été mise en route cette année aux Etats-Unis. L'époxydation se fait, en présence de sels de molybdène comme catalyseur, avec l'hydroperoxyde de t-butyle, préparé par oxydation de l'isobutane, ce qui conduit donc à la production simultanée d'oxyde de propylène et

de t-butanol (figure 9). Celui-ci est vendu en l'état ou, surtout, déshydraté en isobutène qui trouve de larges débouchés dans l'alkylation. Dans un autre projet, dont la réalisation serait envisagée en Espagne, on produirait de la même manière de l'oxyde de propylène et du styrène, en utilisant l'éthylbenzène comme vecteur d'oxygène. Si le succès commercial d'un procédé couplé de ce genre se confirmait, il permettrait de concurrencer simultanément un procédé au chlore, la méthode actuelle de fabrication de l'oxyde de propylène, et le procédé habi-

tuel de déshydrogénation catalytique de l'éthylbenzène en styrène. Il sera donc intéressant de suivre l'évolution dans ce domaine.

L'acide peracétique est le mieux connu des agents d'époxydation, et l'on peut associer de la même manière, dans une

double opération, l'oxydation à l'air de l'acétaldéhyde en acide acétique et l'époxydation d'une oléfine (figure 9). Cette association est réalisée industriellement aux Etats-Unis par Union Carbide, pour fabriquer toute une gamme d'époxydes à partir de produits oléfini-



Epoxydation du propylène par les hydroperoxydes.

Epoxydation des oléfines, en général, par les peracides.

Figure 9

ques variés, époxydes utilisés comme intermédiaires pour des résines synthétiques notamment. D'autres aldéhydes pourraient être utilisés de la même manière, et la facilité de la peroxydation des aldéhydes permettrait de cumuler les deux opérations, en traitant un mélange d'aldéhyde et d'oléfine par l'oxygène, évitant ainsi l'isolement intermédiaire du peracide.

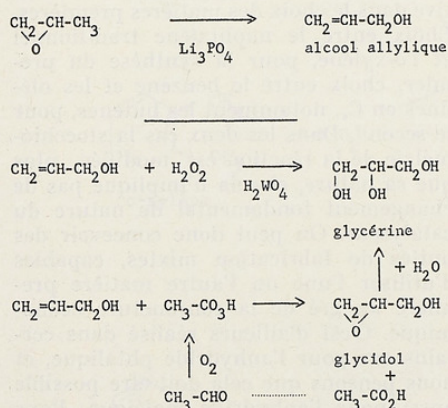
La troisième possibilité est donnée par

l'utilisation du peroxyde d'hydrogène, où le co-produit est l'eau, ce qui évite les aléas économiques que comporte la fabrication simultanée de deux produits. La préparation de peracides par réactions de H₂O₂ avec des acides, acétique ou formique, entre autres, est facile et c'est par ce biais que l'on effectue habituellement les époxydations d'oléfines avec H₂O₂ (figure 9). Cette méthode est couramment pratiquée, car elle est sim-

ple, et nous le faisons par exemple pour la préparation de plastifiants et de stabilisants époxydés à partir de dérivés d'acides gras non saturés.

Mais la préparation d'époxydes n'est pas seule justifiable de cette méthode d'oxydation différée et d'autres produits techniquement inaccessibles par oxydation directe avec l'oxygène sont préparés industriellement par des procédés de ce genre.

Ainsi il existe au moins deux synthèses industrielles de la glycérine par hydroxylation de l'alcool allylique, l'une avec le peroxyde d'hydrogène, préparé par oxydation de l'isopropanol dans un procédé qui est utilisé depuis plusieurs années par Shell, aux Etats-Unis, et l'autre avec l'acide peracétique obtenu par oxydation de l'acétaldéhyde dans un procédé tout récent de Food Machinery Corp. (figure 10). Comme l'alcool ally-



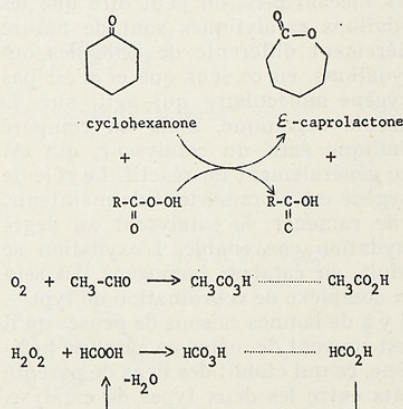
Synthèse de la glycérine

Figure 10

lique peut être obtenu par isomérisation catalytique de l'oxyde de propylène les conditions techniques seraient donc maintenant réunies pour la synthèse industrielle totale de la glycérine avec du

propylène et de l'oxygène, qui pourrait se substituer aux multiples voies traditionnelles utilisant le chlore.

La caprolactone, bien que de nature assez différente des époxydes, leur est apparentée par l'analogie des conditions de synthèse, puisqu'elle se prépare par réaction d'un peracide avec la cyclohexanone (figure 11). Union Carbide, qui



Synthèse de l'ε-caprolactone

Figure 11

vient de mettre en route une unité industrielle de fort tonnage il y a quelques mois, utilise l'acide peracétique, produit par une unité centrale qui alimente à la fois la fabrication des époxydes et celle de la caprolactone. Dans notre société, nous avons opté pour un procédé utilisant le peroxyde d'hydrogène, avec l'acide performique comme agent réactif, procédé que nous exploitons à l'échelle semi-industrielle. La caprolactone est un produit assez nouveau sur le plan technique, et ses débouchés sont encore surtout potentiels; il est probable toutefois qu'elle a un bel avenir comme intermédiaire pour la fabrication de certains types de polyuréthanes, notamment. Cet exemple de la caprolactone montre

que les procédés d'oxydation ne sont pas simplement des substituts de procédés plus coûteux, mais qu'ils peuvent aussi enrichir la technique de nouveaux produits, qui leur sont propres.

3. — OXYDATION CATALYTIQUE HÉTÉROGÈNE ET HOMOGÈNE.

Sans entrer dans le détail complexe de leurs mécanismes, on peut dire que les oxydations catalytiques sont de nature entièrement différente de celle des autoxydations, en ce sens que ce n'est pas l'oxygène moléculaire qui agit sur la molécule organique, mais un composé métallique actif du catalyseur, qui est donc généralement un réactif. Le rôle de l'oxygène est alors surtout de maintenir, ou de ramener, le catalyseur au degré d'oxydation convenable. L'oxydation se produit, en catalyse homogène, au sein d'un complexe de coordination de type π , et il y a de bonnes raisons de penser qu'il en est souvent de même en catalyse hétérogène, ce qui établit des liens de parenté étroits entre les deux types de catalyse.

Ce type d'oxydation est donc réservé aux molécules capables de donner des complexes métalliques, avec les métaux de transition qui constituent le gros de la troupe des éléments catalytiques, et il s'applique en pratique aux produits oléfiniques et aromatiques; mais il ne convient d'autre part que pour la synthèse de molécules qui soient elles-mêmes stables vis-à-vis de l'oxydation catalytique, ou même de l'autoxydation, aux hautes températures utilisées en catalyse hétérogène.

Nous rencontrons d'abord dans ce chapitre quelques vétérans de l'oxydation à l'air des hydrocarbures, avec les procédés bien connus de fabrication de l'oxyde d'éthylène, de l'anhydride phtalique et de l'anhydride maléique, tous exploités industriellement depuis de nombreuses années. L'évolution touche donc moins, ici, aux méthodes qu'à leur mise en œuvre, et ces produits figurent un peu pour mémoire dans cette discussion (*figure 12*).

On peut quand même, au passage, relever un échec de l'oxydation directe par l'oxygène moléculaire, échec dont

nous avons déjà mesuré l'importance : l'époxydation directe de l'éthylène sur un catalyseur à l'argent n'a en effet jamais pu être transposée au cas du propylène, ou de toute autre oléfine, et elle reste ainsi un cas singulier. Ceci avant tout, bien qu'il y ait aussi des raisons proprement catalytiques, parce que l'éthylène est une oléfine singulière par l'absence de substituants, donc par l'absence de liaisons C-H allyliques aisément oxydables, ce qui la prédispose à une réaction sélective sur la double liaison. Cet échec explique que l'on se soit orienté dans d'autres voies pour la synthèse de l'oxyde de propylène par oxydation, voies que nous avons déjà commentées.

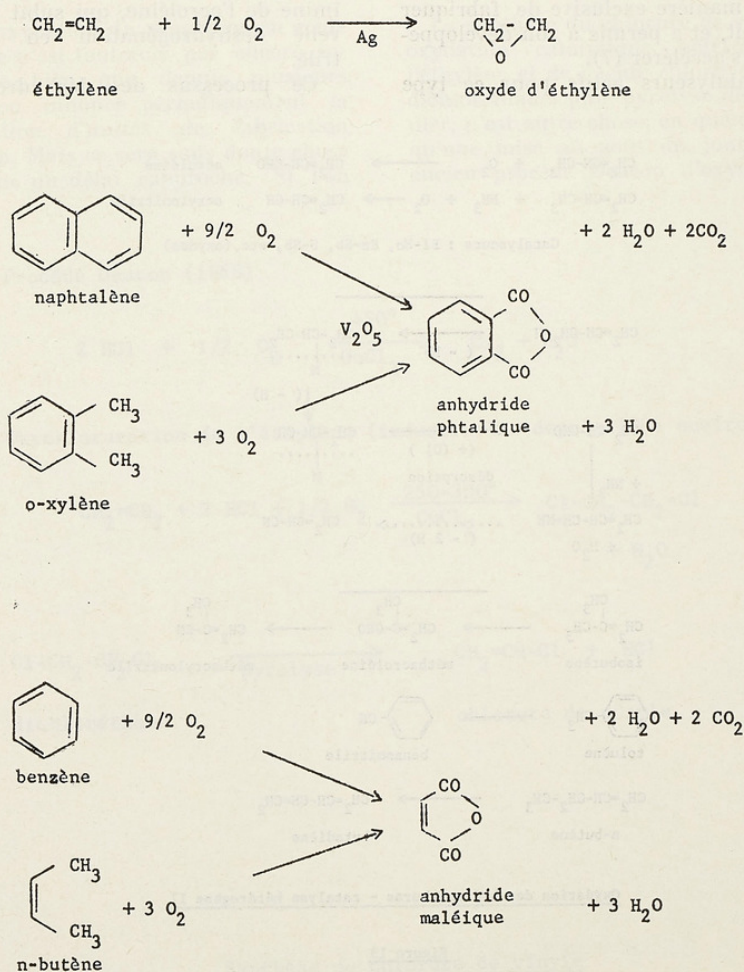
Pour les synthèses de l'anhydride phtalique et de l'anhydride maléique par oxydation catalytique hétérogène sur des catalyseurs au vanadium, l'avènement de la pétrochimie permet une alternative dans le choix des matières premières. Choix entre le naphthalène traditionnel et l'o-xylène, pour la synthèse du premier, choix entre le benzène et les oléfines en C_4 , notamment les butènes, pour le second. Dans les deux cas la stoechiométrie de la réaction est modifiée, plus que sa nature, et cela n'implique pas de changement fondamental de nature du catalyseur. On peut donc concevoir des unités de fabrication mixtes, capables d'utiliser l'une ou l'autre matière première au gré de la conjoncture économique. C'est d'ailleurs réalisé dans certains cas pour l'anhydride phtalique, et nous pensons que cela doit être possible aussi pour l'anhydride maléique. Pour l'anhydride phtalique la disponibilité d'o-xylène permet aussi un choix nouveau de procédé, puisque nous avons vu qu'il pouvait être obtenu en phase liquide, par un processus relevant de l'autoxydation et applicable aux trois xylènes isomères. Progil en a développé récemment une version industrielle.

Mais d'autres procédés d'oxydation catalytiques sont apparus récemment, qui introduisent, eux, un changement de méthode plus radical dans la synthèse des produits concernés. Il s'agit principalement de la synthèse des produits

acryliques — l'acrylonitrile, l'acroléine, et l'acide acrylique, par oxydation du propylène en phase gazeuse, et des synthèses de l'acétaldéhyde, du chlorure de vinyle et de l'acétate de vinyle par oxydation de l'éthylène, en catalyse homogène ou hétérogène. Ces nouveaux procédés mettent dans certains cas un terme, sans doute définitif, aux débou-

chés de l'acétylène dans la synthèse de produits organiques de fort tonnage.

Dans la synthèse des produits acryliques l'oxydation du propylène a maintenant pour objectif de transformer le groupe méthyle en laissant intacte la double liaison (figure 13). L'oxydation en acroléine, sur des oxydes de cuivre, de même que l'oxydation de l'acroléine et



Oxydation des hydrocarbures - catalyse hétérogène I

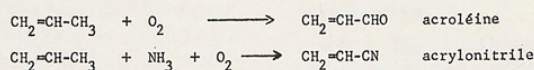
Figure 12

de l'ammoniac en acrylonitrile, sur des catalyseurs à base d'oxyde de molybdène, sont connues depuis une vingtaine d'années. Mais l'évolution décisive, sur le plan industriel, s'est produite il y a une dizaine d'années, lorsque la société Sohio, aux Etats-Unis, puis les sociétés Ugine et Distillers, en Europe, mirent au point la synthèse directe de l'acrylonitrile par oxydation du propylène et de l'ammoniac, ce qui est devenu rapidement la manière exclusive de fabriquer ce produit, et a permis à son développement de s'accélérer (7).

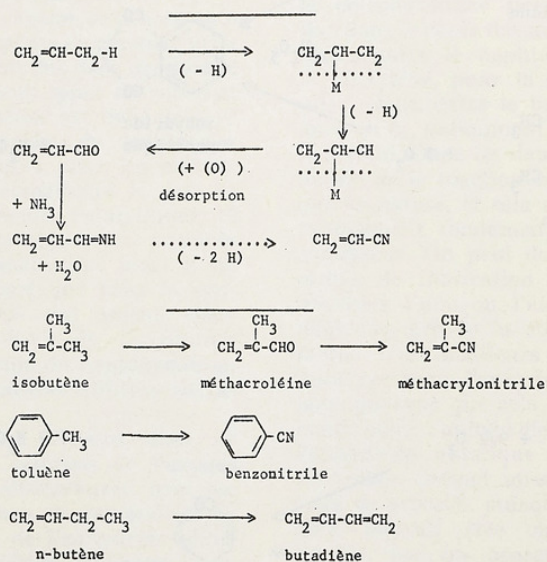
Les catalyseurs actifs pour ce type

de transformation, qui sont à base d'oxydes de bismuth, de molybdène, d'antimoine et d'étain, au moins pour les principaux, agissent par déshydrogénation. On produit d'abord une espèce allylique, liée à un atome métallique par coordination, espèce à laquelle un deuxième atome d'hydrogène est soustrait avant l'addition d'oxygène pour former l'acroléine. En présence d'ammoniac on pense qu'il se forme ensuite une imine de l'acroléine, qui subit une nouvelle déshydrogénation en acrylonitrile.

Ce processus de déshydrogénation



Catalyseurs : Bi-Mo, Sn-Sb, U-Sb, etc. (oxydes)



Oxydation des hydrocarbures - catalyse hétérogène II

Figure 13

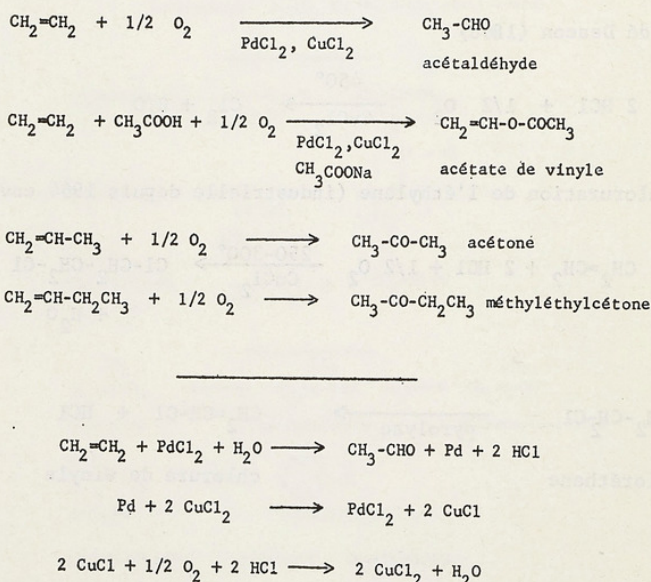
(7) Ce développement est considérable dans le secteur des fibres acryliques qui absorbe jusqu'à 80 % de la production d'acrylonitrile. La production mondiale de fibres acryliques a été de 541 000 t en 1967 et de 728 000 t en 1968, soit 35 % de plus d'une année à l'autre. La production d'acrylonitrile a dépassé 1 000 000 t en 1968.

l'acide chlorhydrique en chlore (figure 14). Le catalyseur est d'ailleurs resté le même, c'est le chlorure cuivrique, qui est en fait l'agent de chloruration direct de l'éthylène, puisqu'on ne détecte jamais de chlore libre aux températures où s'effectue l'oxychloruration de l'éthylène, à 250-300°. L'oxygène a simplement pour rôle de réoxyder les sels cuivreux.

Ce procédé, qui est industrialisé depuis cinq ans environ, et dont le développement est foudroyant, doit, lui aussi, son succès à la compétition économique à laquelle se livrent l'éthylène et l'acétylène, et il me semble qu'il se substituera très largement au procédé classique d'addition de l'acide chlorhydrique sur l'acétylène, malgré la simplicité de celui-ci.

Nous restons au cœur de cette compétition en abordant, pour finir, les synthèses de l'acétaldéhyde et de l'acétate de vinyle par oxydation de l'éthylène (figure 15). Nous abordons en même temps, avec ces exemples, le domaine de la catalyse homogène, qui a trouvé là sa consécration industrielle la plus importante, et pour le moment encore une des rares. Nous y verrons enfin une démonstration intéressante de la proche parenté des catalyses hétérogène et homogène.

On savait depuis longtemps que l'éthylène était oxydé quantitativement en acétaldéhyde par les sels de palladium, en solution aqueuse. C'est sur cette base que les sociétés Wacker et Hoechst ont mis au point leur procédé industriel bien



Catalyse homogène - Oxydation des oléfines par les sels de palladium

Figure 15

connu, utilisé maintenant dans le monde entier et assurant, dix ans à peine après son apparition, plus de la moitié de la production mondiale d'acétaldéhyde : 850 000 t en 1967, sur un total de l'ordre de 1 600 000 t. Dans le procédé industriel on opère avec une solution contenant du chlorure cuivrique, chargé de réoxyder le palladium métallique formé dans la réaction principale, et l'oxygène intervient, ici aussi, en réoxydant les sels cuivreux.

Lorsque le milieu contient de l'acide acétique et de l'acétate de sodium il se forme directement de l'acétate de vinyle, par un mécanisme similaire, et on peut adapter le procédé à cette fabrication. Il n'est toutefois pas spécifique, car il donne simultanément de l'acétaldéhyde et de l'acétate de vinyle, par compétition des deux réactions. Par contre on a trouvé que cette synthèse de l'acétate de vinyle pouvait être réalisée de manière entièrement spécifique par catalyse hétérogène sur du palladium métallique, en phase liquide ou gazeuse sous pression. Il semble que ce soit donc plutôt dans cette voie que l'on s'oriente pour la réalisation d'unités industrielles. Comme c'est l'acide acétique qui représente le plus gros poste des dépenses dans la fabrication de l'acétate de vinyle, que l'on parte d'éthylène ou d'acétylène, la position de ce dernier est peut-être moins menacée ici que dans les fabrications du chlorure de vinyle ou de l'acétaldéhyde.

Ajoutons enfin que le procédé d'oxydation par les sels de palladium en phase homogène a été étendu aux synthèses directes de l'acétone et de la méthyléthylcétone à partir des oléfines, mais l'impact économique de ces nouveaux procédés est moins fort, puisqu'il n'y a pas de changement de matières premières par rapport aux procédés traditionnels d'hydratation des mêmes oléfines en

alcools, isopropanol et butanol secondaire, et de déshydrogénation de ces derniers en cétones.

CONCLUSIONS

Cette revue rapide des méthodes industrielles d'oxydation par l'oxygène moléculaire est très incomplète puisqu'elle passe sous silence des méthodes aussi importantes que celles de la synthèse de l'acide cyanhydrique, de la synthèse de l'acétylène même par combustion partielle des hydrocarbures, des diverses synthèses avec l'oxyde de carbone, en quelque sorte des oxydations différées elles aussi. C'est que nous avons voulu nous limiter assez arbitrairement aux cas où l'apparition des procédés d'oxydation par l'oxygène était un facteur d'évolution récent des méthodes de synthèse industrielles.

Même ainsi le panorama reste d'ailleurs incomplet (8), mais il nous a permis de constater l'ampleur du développement de ces procédés d'oxydation, tant par leur nombre que par l'importance quantitative des secteurs où ils ont pu s'imposer face aux procédés traditionnels. L'évolution, jusqu'à présent, a surtout été caractérisée, en somme, par cette conquête des principaux secteurs de la grande synthèse organique industrielle. Les principales positions sont maintenant prises, ou sur le point de l'être.

Il nous reste, pour conclure, à risquer un jugement sur le sens de cette évolution dans l'avenir. Il est certain qu'avec la variété et le bas prix des matières premières pétrolières, et sous la pression de la compétition économique, l'évolution que nous venons commenter est irréversible. Il est non moins certain que l'attrait des méthodes d'oxydation par l'oxygène de l'air se paie encore, bien souvent, par une sélectivité imparfaite

(8) Il y manque notamment, comme il est apparu durant la discussion, sur une question d'un auditeur, les processus d'oxydation biochimiques, dont l'exemple récent de la fabrication de protéines à partir de paraffines pétrolières montre l'intérêt.

et par des investissements élevés, donc par un certain gaspillage de ressources. La prochaine étape sera donc une étape de consolidation, à la recherche d'une meilleure efficacité des procédés actuels. C'est un problème d'expérience industrielle, de perfectionnements technologiques, et de recherches de base

— sur les catalyseurs, la cinétique, etc. A plus long terme, c'est peut-être dans les méthodes de la catalyse homogène, dont la sélectivité est souvent incomparable, que l'industrie de la synthèse organique puisera les éléments de son renouvellement. C'est là un problème de recherche tout court.

*ACTIVITÉS DE LA SOCIÉTÉ D'ENCOURAGEMENT
POUR L'INDUSTRIE NATIONALE*

ACTIVITÉS DE LA SOCIÉTÉ D'ENCOURAGEMENT
POUR L'INDUSTRIE NATIONALE

Fin de la liste des Prix et Médailles

décernés par la Société d'Encouragement pour l'année 1968

VIII. Médailles des Ouvriers, Contremaîtres et Cadres d'exécution

1°) Au titre de l'Ancienneté

MM. DERVIEUX, VILLARD, SABATHIÉ, VERGEZ (Alsthom) ; BOURSIN, GRIGNON (Chantiers de l'Atlantique) ; PIEL (Babcock-Atlantique) ; M^{me} VIGNERON (J.-J. Carnaud et Forges de Basse-Indre) ; GARCIN, BOURRELLY, CAPUS, DELEUIL, JULLIEN, PUGGELLI, TURCONI (Péchiney) ; CHOLET, LHOMME, MICHEL (Régie Nationale des Usines Renault) ; BRUXELLE, HENNEBELLE, LABOUREUR, MARQUET, ANTOINE, BROUILLARD, LÉONIDÈS, FÊTIVEAU, SOUCIL, BREMOND, MORRELEC, POURRIAS (S.N.C.F.) ; DILLIES, DURIEUX, FOS-SART, RAMETTE, SMAGGHE, VANDEVOORDE (Sté des Usines Chimiques Ugine-Kuhlmann).

2°) Au titre mixte

MM. DECAMPS, HENRY, SIAUD, BENTUE (Alsthom) ; GRATEAU (Antar-Pétroles de l'Atlantique) ; GALIAY, HARISTOY, LABAT, MORIO, MOULIGNE (Sté Nle des Pétroles d'Aquitaine) ; DESBOIS, MOYON, ROUE, LE TERRIER (Chantiers de l'Atlantique) ; MAGRE (Babcock-Atlantique) ; CAMUS, SANTINI (C^{ie} Française des Pétroles, Algérie) ; SORTON, BIROS (C^{ie} Française de Raffinage) ; DUBOIS, BLANC (Péchiney) ; BLONDY, BOUYSSOU, BRUNET, DUREAU, FACON, HAREL, HAVET, LEBARBIER, LERICOLAIS, LOQUET, MORVAN, POULLET, TERRADE, VAESKEN (Régie Nationale des Usines Renault) ; FLANDRIN, POISSON (Saint-Gobain), DESVAUX, LABRUGE, MONTÈS, BOURGES, CARO, ARINA (Schell) ; MARMET, BERNARD, CHALUMEAU, COLAS, SERVEL, JAHIER, POIRIER, DANCIE (S.N.C.F.) ; QUATERMONT, VANDERHAEGE, DEPRAETER, BROSSARD (Sté des Usines Chimiques Ugine-Kuhlmann) ; DAMAMINS, FRANÇOIS (Unelec), GAITE (Laboratoire Central de l'Armement).

TABLES DES MATIÈRES

Année 1969

1°) Conférences

- Problèmes de corrosion et moyens d'étude dans une grande industrie, par M. Claude CABRILLAC n° 1, p. 5
- Les progrès de la science et des techniques photographiques, par M. P. CLEMENT n° 2, p. 3
- Les métaux réfractaires et leurs alliages, par J.-P. LANGERON .. n° 2, p. 17
- La D.S. 1970, par M. Jean CADIOU n° 3, p. 3
- La fluidique,
 - Introduction, par M. J. BERTIN n° 3, p. 21
 - Historique des premières recherches, par M. KADOSCH .. n° 3, p. 26
 - Les recherches expérimentales, par M. C. PAVLIN n° 3, p. 32
- L'industrie chimique et la formation de ses ingénieurs, par M. André ETIENNE n° 4, p. 3
- Quelques aspects de l'évolution des méthodes industrielles de synthèse organique, par M. Francis WEISS n° 4, p. 33

2°) Divers

- Rapports sur les Prix et Médailles décernés au cours de la séance du 21 septembre 1968 (première partie) n° 1, p. 37
- Rapports sur les Prix et Médailles décernés au cours de la séance du 21 septembre 1968 (deuxième partie) n° 2, p. 43
- Liste des Prix et Médailles décernés pour l'année 1968 n° 3, p. 42
- Fin de la liste des Prix et Médailles pour l'année 1968 n° 4, p. 59

INDEX DES AUTEURS

DES CONFÉRENCES PUBLIÉES

Année 1969

BERTIN (Jean). — La Fluidique	n° 3, p. 21
CABRILLAC (Claude). — Problèmes de corrosion et moyens d'étude dans une grande industrie	n° 1, p. 5
CADIOU (Jean). — La D.S. 1970	n° 3, p. 5
CLEMENT (P.). — Les progrès de la science et des techniques photo- graphiques	n° 2, p. 3
ETIENNE (André). — L'industrie chimique et la formation de ses ingénieurs	n° 4, p. 3
KADOSCH (M.). — La Fluidique	n° 3, p. 26
LANGERON (J.-P.). — Les métaux réfractaires et leurs alliages	n° 2, p. 17
PAVLIN (C.). — La Fluidique	n° 3, p. 32
WEISS (Francis). — Quelques aspects de l'évolution des méthodes industrielles de synthèse organique	n° 4, p. 33

INDEX DES AUTEURS DES COMMUNICATIONS PUBLIÉES

Année 1969

ABRAHAM (Jean) -- La fluidité	n. 1, p. 21
ABRAHAM (Jean) -- Problèmes de corrosion et moyens d'étanchéité dans une grande industrie	n. 1, p. 5
ABRAHAM (Jean) -- La D.S. 1970	n. 2, p. 5
ABRAHAM (Jean) -- Les progrès de la science et des techniques photocopieuses	n. 2, p. 9
ABRAHAM (Jean) -- L'industrie chimique et la formation de ses ingénieurs	n. 1, p. 9
ABRAHAM (Jean) -- La fluidité	n. 1, p. 21
ABRAHAM (Jean) -- Les progrès de la science et des techniques photocopieuses	n. 2, p. 9
ABRAHAM (Jean) -- La fluidité	n. 1, p. 21
ABRAHAM (Jean) -- Les progrès de la science et des techniques photocopieuses	n. 2, p. 9
ABRAHAM (Jean) -- La fluidité	n. 1, p. 21
ABRAHAM (Jean) -- Les progrès de la science et des techniques photocopieuses	n. 2, p. 9

Le Président de la Société, Directeur de la publication : J. TRÉFOUËL, D.P. n° 1.080

I.T.Q.A.-CAHORS. — 00 424 — Dépôt légal : IV-1970

