

Introduction à la chimie industrielle *

par, **Henri Guérin**

(Professeur à l'Université Paris-Sud 91405 Orsay)



La chimie industrielle a pour objet d'étudier la fabrication d'une façon économiquement et socialement satisfaisante des produits chimiques qui répondent aux besoins de l'Homme, y compris les besoins nouveaux qu'elle s'efforce de créer.

Parmi les problèmes que la chimie industrielle aura à résoudre, nous citerons :

1. l'accroissement de production d'une usine,
2. la modernisation d'une installation existante par suite de la mise au point de certains appareillages plus perfectionnés ou de l'opportunité de changer de matières premières,
3. la valorisation des sous-produits,
4. la question de savoir lorsqu'on prépare un produit dont la demande diminue, si l'on doit arrêter ou poursuivre la fabrication,
5. la fabrication d'un *produit nouveau* nécessitant la création d'un nouvel atelier ou d'une nouvelle usine. C'est le cas le plus complexe, présentant le plus d'aléas et de risques, le seul que nous examinerons, d'une façon d'ailleurs très schématique.

Le produit nouveau

Mais qu'est-ce qu'un produit nouveau ?

Cette expression couvre, en fait, à côté de produits chimiques effectivement nouveaux comme l'ont été le carbure de calcium, le nylon, le rilsan, les composites, etc..., de nouvelles formes de produits existants : cyanamide huilée, poudre de savon, lait en poudre, café soluble ou même de nouveaux modes de présentation changeant l'aspect du produit, son mode d'utilisation : bombes d'insecticides, ou de conditionnement : aliments surgelés.

Aux U.S.A. en 1960, 47 % seulement des produits de grande consommation avaient été lancés avant 1950. Entre 1960 et 1965, 5 à 20 % du chiffre d'affaires des produits chimiques correspondaient à des produits de moins de cinq ans.

Récemment, chez Hoechst, 20 % des produits vendus avaient moins de cinq ans, 40 % moins de dix ans.

Pour la firme, le produit nouveau est celui qu'elle ne fabriquait pas jusqu'ici.

Il peut s'agir d'un produit vraiment nouveau, c'est-à-dire découvert à la suite de recherches exploratoires : cas du nylon dont la synthèse a été réalisée par Carothers en 1931, ou du téflon, polymère du tétrafluoroéthylène, caractérisé par hasard par Plunkett, en 1938.

Une nouvelle fabrication peut également porter sur un produit isolé depuis longtemps, mais non utilisé jusqu'alors. Ce fut le cas du chlorure

(*) Conférence faite à Sherbrooke (Québec) en mai 1976.

de vinyle préparé par Regnault en 1835 et polymérisé, dès 1912, par Ostromislensky, mais dont les premiers plastiques n'ont été préparés qu'en 1927; ce furent aussi celui de l'hexachlorocyclohexane et celui du D.D.T. caractérisés en 1825 et en 1872 et qui n'ont été fabriqués qu'après 1940, quand on eut mis l'accent sur leurs propriétés insecticides.

Alors que dans le cas du nylon on était en présence d'un produit nouveau qui devait révolutionner le secteur textile, la plupart des mises en route seront moins spectaculaires puisqu'il s'agira souvent de produits finis déjà lancés sur le marché par d'autres firmes et dont on prévoit l'extension des débouchés ou de produits intermédiaires, qui passent inaperçus, mais qui pourront constituer une intégration intéressante vers l'amont.

Tandis que l'idée de fabriquer un produit intermédiaire vient spontanément à l'esprit, on peut se demander comment surgissent celles relatives aux produits nouveaux?

D'aucuns estiment que l'idée créatrice des produits nouveaux revient dans 50 % des cas aux laboratoires de recherches, 25 % aux services commerciaux, 15 % aux ateliers de fabrication et 10 % à la direction et au service d'étude des marchés.

Très fréquemment, le produit dont on envisage de lancer la fabrication a été isolé et étudié au cours de recherches exploratoires entreprises pour trouver des composés répondant à une certaine utilisation : détergent, médicament, parfum, matière colorante et auxquels on impose certaines caractéristiques.

On ne doit toutefois pas écarter la possibilité de la découverte faite au hasard, c'est-à-dire au cours de recherches ayant un autre objectif. Solvay a redécouvert la réaction de base du procédé à l'ammoniaque en cherchant à récupérer au mieux l'ammoniac dans le gaz d'éclairage, mais il a eu le génie de voir l'importance de cette réaction qu'il ne prévoyait pas.

Supposons qu'une firme envisage d'entreprendre la fabrication d'un produit entièrement nouveau dont des recherches ont donné l'idée ou d'un produit fabriqué déjà par des firmes concurrentes, mais sur lequel on a peu de connaissances pratiques.

Avant de mettre en route le processus que nous allons décrire, il convient de s'assurer de son opportunité en soumettant le nouveau produit à un examen préalable.

Cet examen consiste à considérer d'une part le produit en lui-même, d'autre part vis-à-vis de la firme.

1. Le produit en lui-même

- Le produit répond-il à un besoin sérieux?
- A quelle classe de consommateurs s'adresse-t-il?
- Sur combien d'acheteurs peut-on compter dès son lancement?
- Sera-t-il facile à concurrencer et quelle sera sa durée de vie?
- Sa distribution soulève-t-elle des problèmes quant au stockage, à la publicité, au service après-vente?
- Sa fabrication aura-t-elle une influence favorable sur le développement des autres produits fabriqués?

2. Le produit vis-à-vis de la firme

- La fabrication répond-elle à la stratégie de la firme, à sa vocation, à ses dispositions héréditaires?
- Est-on à même de conduire les recherches qui s'imposent et la mise au point de la fabrication?
- Quand peut-on espérer réaliser celle-ci?
- Si le produit en question est déjà fabriqué sous licence, doit-on acheter tout simplement la licence ou entreprendre le processus de fabrication, processus qui, lorsqu'il ira à son terme, comportera quatre phases :
 - Phase d'exploration ou mise au point d'un avant-projet.
 - Phase d'évaluation,
 - Phase de construction,
 - Phase d'exploitation.

I. Phase d'exploration

On réunit la documentation la plus complète possible :

- caractéristiques physiques, chimiques et biologiques,
 - procédés d'obtention connus, compte tenu de la préparation éventuelle des matières premières,
 - brevets ayant protégé ou protégeant encore telle phase de la fabrication,
- et on procède, éventuellement, au laboratoire de recherches, à des recherches exploratoires.

Un groupe de travail ou de coordination est constitué; dirigé par un chef de produit, il comporte un représentant des divers services : finances, recherches et développement, construction, fabrication, relations commerciales; il devra présenter au Directeur un rapport

sur la « faisabilité » du projet à partir duquel celui-ci, éclairé par le groupe de travail, prendra la décision de poursuivre ou d'interrompre l'étude.

On insistera essentiellement :

- sur le plan technique, quant à la validité de l'opération,
- sur le plan économique, quant à la rentabilité prévisionnelle globale de l'investissement compte tenu des risques inhérents au projet.

II. Phase d'évaluation

Il s'agit, par des recherches documentaires exhaustives, de connaître toutes les antériorités susceptibles de gêner soit la libre fabrication, soit la prise de brevets et, par des déterminations expérimentales, d'évaluer, avec de plus en plus d'exactitude, le prix de revient probable du produit.

a. Compte tenu d'essais de laboratoire ayant permis de choisir éventuellement entre divers procédés ou différentes matières premières et qui ont fourni des données sur les rendements, sur les sous-produits, b. compte tenu aussi des renseignements rassemblés par le service commercial sur les conditions d'acquisition possible des matières premières et d'écoulement des sous-produits,

- on constituera un dossier comportant :
 - les bilans provisoires matières et utilités,
 - le schéma de fabrication,
 - l'énumération des matériaux et du matériel qui semble s'imposer,
 - les problèmes particuliers d'hygiène et de sécurité que pose la fabrication,
 - la décision de monter ou non un atelier pilote,
 - et, point essentiel, le prix de revient approximatif, tenant compte d'une part d'une capacité de production, fonction des possibilités du marché et d'autre part des évaluations du service construction.

Ce prix de revient doit être, en effet, minimal et, s'il s'agit d'un produit déjà sur le marché, il doit être inférieur au prix de vente courant de façon à permettre un certain profit.

Pour mieux appréhender ce prix de revient, on est amené à diviser celui-ci en plusieurs facteurs dont nous donnons des ordres de grandeur, dans deux cas particuliers :

Tableau I.

	NH ₃ ex-essences légères %	HNO ₃ %
1. Matières premières	20	37
2. Utilités	30	10
3. Main-d'œuvre	5	4
4. Entretien	10	5
5. Amortissements	23	35
6. Frais généraux	6	4
7. Charges financières	6	5

Sans insister sur ces divers facteurs, nous les passerons en revue en soulignant que les plus importants dans l'industrie chimique sont les matières premières, les utilités et les amortissements.

Les matières premières sont, soit très souvent, des produits naturels, d'origine minérale : air, eau, houille, pétrole, minerais; d'origine végétale : bois, caoutchouc, huiles, betteraves, cannes à sucre; d'origine animale : graisses, os, urines de jument grvide, soit, des produits fabriqués : sel, acides, éthylène, etc... qu'on nomme produits de base ou grands intermédiaires.

Quelles qu'elles soient, on tente, dans tous les cas, de les obtenir au prix minimal.

Il convient de souligner, après une période de stabilité assez longue, l'augmentation récente et importante de diverses matières premières généralement détenues par le tiers monde qui, d'une part, se rend compte de son pouvoir et, d'autre part, semble vouloir en modérer l'épuisement. C'est ainsi que le prix des phosphates marocains a triplé en 1973.

La stabilité générale des prix n'est pas en contradiction avec la fluctuation de certains d'entre eux; lorsque la production d'un produit répond à peu près à la demande, il suffit que celle-là progresse de 10 % pour que les prix s'effondrent ou, qu'elle baisse de 10 %, pour qu'une spéculation en élève considérablement les cours. Ceci est particulièrement net dans le cas de produits autoconsommables (ou captifs, c'est-à-dire utilisés par les fabricants) qui donnent lieu à peu de transactions.

Ainsi, en France, l'anhydride maléique, surtout utilisé pour la préparation de polyesters, a vu son prix passer de 1,03-1,05 F le kg en 1966 à 2,70 pour les clients sous contrat, alors que les autres devaient le payer jusqu'à 12 F et plus, les prix des produits importés suivant la même tendance.

Lorsqu'il s'agit d'une matière première comme le soufre, les fluctuations de prix se manifestent sur le plan mondial avec des amplitudes et des périodes plus ou moins longues. Ainsi, alors que les États-Unis, principal producteur de soufre élémentaire, avaient favorisé le développement de son emploi dans divers pays pour la production d'acide sulfurique, la guerre de Corée les a conduits à limiter leurs exportations pour protéger leurs stocks et le prix du soufre, exprimé en dollars par tonne (franco of board à Galveston), est passé de 17 en 1945 à 32 en 1958. La mise en exploitation des gisements du Mexique, la découverte de soufre en Pologne et l'apparition sur le marché du soufre récupéré à Lacq, ramènent le prix à 17-15 entre 1960 et 1965. Entre 1964 et 1968, la demande progresse à un taux de 9 %, supérieur à celui de la production, et une pénurie relative porte le prix à 38 \$; mais, dès 1968, l'offre accrue par la désulfuration du gaz naturel de l'Alberta et l'exploitation des gisements polonais, dépasse la demande et le prix retombe à 15 \$.

Le prix du cuivre a manifesté, entre 1964 et 1970, des fluctuations encore plus grandes et des périodicités plus courtes, mais le marché de ce métal a toujours donné lieu à d'importantes spéculations de telle sorte que les producteurs de sulfate de cuivre ont toujours eu le souci d'acheter leur matière première au moment opportun.

Le choix des matières premières fait intervenir non seulement leur prix mais le coût des investissements inhérents à leur utilisation. Ainsi, le soufre, relativement plus cher que les pyrites et beaucoup plus que l'anhydrite, exige un appareillage beaucoup plus simple et moins coûteux que les pyrites et surtout que l'anhydrite. L'importance de ce facteur nécessite d'utiliser au mieux les matières premières, d'où la préoccupation du rendement, celle de l'utilisation des sous-produits, mais aussi le souci de les acquérir au prix minimal, ce qui amène des firmes à devenir *propriétaires des gisements*. Ce fait, ainsi que l'utilisation des sous-produits, favorisent un phénomène caractéristique de l'industrie chimique : celui de la concentration verticale ou *intégration*. N'oublions pas que le prix des matières premières fait intervenir *le coût des transports* et, par suite, *l'implantation de l'usine*, de même que celui de leur *enrichissement et du stockage*.

Sous le nom d'*utilités*, on désigne essentiellement *l'énergie* mais aussi l'eau qui n'est pas gratuite, et des fluides tels que l'azote, nécessaire dans certaines fabrications comme celle du nylon.

L'importance du facteur « utilités », notamment en électrochimie, a conduit certaines firmes à produire elles-mêmes l'« énergie totale » dont elles ont besoin. C'est ainsi qu'à Pont-de-Claix une centrale thermique d'une puissance de 120 à 140 MW (photo) est capable de fournir de l'ordre de 1 milliard de kilowatts-heure par an et simultanément les 3 millions de tonnes de vapeur qu'exigent les diverses fabrications du complexe.



Centrale thermique de Pont-de-Claix.
(Photo Progil).

La mécanisation et l'automatisation diminuent l'importance du facteur *main-d'œuvre* mais conduisent toutefois à substituer à des manœuvres, des ouvriers de plus en plus spécialisés.

L'entretien, sans être dispendieux, est essentiel dans l'industrie chimique, source de corrosion.

Aux appareils, de capacité de plus en plus grande, par suite du gigantisme : tubes de 1 000 t/j d'ammoniac, caisses de catalyse de SO₂ de 1 700 t/j, souvent en matériaux coûteux, correspondent des *amortissements* très importants.

Les frais généraux qui couvrent les dépenses relatives à la recherche, aux services commerciaux, au service social, etc... ne sont pas négligeables. Les investissements considérables exigent des capitaux qu'il faut rémunérer.

Compte tenu des conclusions du groupe de travail, la direction décidera si l'on doit mettre fin au projet ou bien le poursuivre et, dans ce cas, si l'on doit procéder à l'installation d'un *pilote*, dont on aura évalué le coût et la durée des essais.

Le passage direct du laboratoire à l'atelier de fabrication est très rare : si le génie chimique permet de calculer les dimensions des appareils, l'extrapolation directe des essais de laboratoire, opérés le plus souvent dans des appareils en verre ou en porcelaine et sur des quantités trop faibles, ne fait pas assez apparaître les difficultés pratiques inhérentes à l'emploi d'autres matériaux et à la mise en œuvre de quantités importantes; ils ne fournissent que des données incomplètes quant *aux échanges de chaleur*; l'adoption de matériaux soumis à quelques essais de corrosion peut entraîner des surprises et l'on conçoit l'opportunité de passer du montage de laboratoire à l'appareil industriel par un stade intermédiaire qui constitue *l'atelier pilote*. Celui-ci permettra aussi de disposer des échantillons nécessaires pour prospecter le marché.

En révélant les points délicats de la fabrication, le pilote doit permettre d'aborder, sans aléas notables, la fabrication, d'où l'importance essentielle de l'échelle adoptée pour son montage : en général de 250 kg à quelques t/j pour des fabrications continues. Le pilote coûte cher d'où la tendance, dans toute la mesure du possible, à monter des pilotes les plus réduits possibles, dits micropilotes.

L'exploitation de l'atelier pilote, construit avec les mêmes matériaux que les appareils définitifs et qui aura fait appel au laboratoire de recherches pour résoudre certaines difficultés inhérentes aux phénomènes de corrosion et aux méthodes de contrôle permettra de disposer de nouvelles données et de déterminer :

- des bilans matières et utilités, plus exacts. Exemple : dans le cas du carbonate de sodium, on comptera pour une tonne de produit : 1 600 kg de sel (5,5 m³ de saumure), 50 kg de carbonate de sodium pour l'épuration, 1 300 kg de calcaire, 2 à 3 kg d'ammoniac, 100 kg de coke, 350 kg de houille à 7 th/kg, 60 à 70 m³ d'eau, 70 à 80 kWh. On obtient simultanément 8 m³ d'eaux résiduaires (contenant tout le chlore mis en jeu).
- le schéma de fabrication définitif, y compris les contrôles,
- les conditions optimales d'exploitation, les incidents susceptibles de se produire et les moyens d'y remédier, notamment au point de vue *hygiène et nuisances*,
- les caractéristiques du produit commercial, ce qui permettra de préparer le dossier de lancement,
- compte tenu des renseignements fournis par le service commercial sur le marché, *la capacité* de production optimale, le coût des appareils et des investissements nécessaires et, par suite, *le prix de revient prévisionnel*.

Si plusieurs lieux d'implantation de l'usine sont possibles, on déterminera celui qui apparaît le plus favorable.

L'implantation régionale ou à longue distance doit répondre à des impératifs techniques contribuant à réaliser la production à un prix de revient minimal.

Il convient de disposer de quantités d'eau suffisantes, de moyens de communication ou de télécommunication nombreux, d'un exutoire, de débit suffisant, pour les eaux résiduaires et de se soucier des facilités d'embauche.

En ce qui concerne les transports, il est rare qu'on puisse à la fois éviter de transporter les matières premières et les produits finis. Aux industries *liées*, auxquelles l'implantation s'impose pour limiter le transport de matières premières et de produits finis pondéreux comme l'industrie des engrais, s'opposent les industries *indépendantes* comme celles des produits pharmaceutiques.

En France, les usines de superphosphates installées initialement dans les ports d'importation des pyrites et des phosphates : Rouen,

Nantes, Bordeaux, ont été également montées par la suite, au sein de régions agricoles : Voves, Nevers, Landerneau.

La carbochimie s'est installée sur le carreau des mines.

L'industrie pétrolière s'est développée initialement dans les ports d'importation puis, après la seconde guerre mondiale, la pratique des oléoducs a conduit à l'installation de nombreuses raffineries continentales : Feyzin, Nangis, Vernon, Strasbourg, etc...

Si les oléoducs et les gazoducs délocalisent ainsi quelque peu les industries pétrolières et pétroléochimiques, la baisse des *frêts maritimes* contribue à accentuer l'attraction qu'exercent les ports sur les industries chimiques : d'où le développement de la chimie *au bord de l'eau* : Rotterdam, Anvers, Dunkerque, Fos, Tarente, etc...

La plus ou moins grande facilité avec laquelle on peut disposer d'énergie joue également un rôle essentiel.

L'électrochimie, grosse consommatrice d'énergie électrique, s'est localisée en France près des chutes d'eau, alors que le transport du courant coûtait cher.

Le choix de l'implantation est quelquefois complexe et peut être confié à des ordinateurs... (cas de la raffinerie de Feyzin).

La localisation dans une région donnée, à courte distance, exige de prendre en considération les caractéristiques du terrain, l'approvisionnement en eau, les possibilités d'évacuation des eaux résiduaires, les réseaux de communication, l'environnement et les risques de pollution accidentelle, les moyens de transport et d'habitation dont disposera la main-d'œuvre.

Le dossier résultant de la phase évaluation devra conduire le Directeur à prendre la décision de construire ou non l'atelier.

III. Phase de construction

Le bureau d'études qui aura déjà étudié les appareils, réalise généralement une maquette à l'échelle choisie : 1/33 à 1/15, qui permet, mieux que les plans, de s'assurer de la position des vannes, des possibilités d'accès et répond aux préoccupations d'ergonomie.

Il prépare la passation des marchés et entreprend la construction. Celle-ci fait appel au génie civil et, par conséquent, à diverses entreprises extérieures; elle a pour corollaire la vérification du matériel, son installation, les essais de garantie, puis la formation du personnel.

S'il s'agit d'un procédé nouveau mis au point par la firme, celle-ci peut entreprendre la construction de l'usine, lancer la fabrication et la mettre au point.

Son expérience dans ces diverses étapes lui permettra ensuite, lors de la vente des licences, de faire profiter les licenciés de son savoir-faire (know-how); à la simple concession d'une licence, on substitue de plus en plus la vente d'un procédé ou, mieux, celle de l'usine appliquant celui-ci.

Cette pratique tend à s'étendre au montage d'usines complètes selon diverses variantes parmi lesquelles celle de l'achat d'une *usine clefs en main*.

La construction d'une usine chimique étant souvent délicate pour le fabricant, celui-ci s'adresse de plus en plus à une *Société d'Ingénierie* qui en fait l'étude, calcule les investissements, règle les problèmes financiers, de transport, passe les marchés avec les sous-traitants, fixe les délais de livraison, établit le plan de marche. Elle procède aux essais et ce n'est qu'une fois le contrat exécuté qu'elle remet l'usine à l'acheteur.

Certains contrats prévoient la formation du personnel et même une assistance durant 1 ou 2 ans pour le fonctionnement. On réceptionne alors l'*usine produits en main*.

Notons que certains produits doivent, pour être homologués, satisfaire à des tests toxicologiques, écologiques, etc... dont les formalités

doivent être entreprises dès qu'on prépare des produits corrects qui permettent d'obtenir les autorisations légales.

IV. Phase d'exploitation et de commercialisation

Le démarrage de l'installation constitue une phase délicate, notamment quand on innove.

Il s'agit, en premier lieu, de faire tourner l'installation *sans se préoccuper d'atteindre la production prévue*, objectif d'une seconde étape, et ce n'est qu'une fois la production prévue atteinte, qu'on essaie d'améliorer successivement les rendements des diverses phases du procédé.

Le démarrage et l'exploitation feront vraisemblablement apparaître certaines lacunes qui pourront être comblées avec la collaboration du laboratoire et du pilote; la présence de faibles impuretés dans les matières premières qui n'étaient pas gênantes au stade précédent, pourra entraîner alors de grosses difficultés.

La mise en route de la fabrication permettra de vendre des licences relatives aux brevets que l'on aura pris.

Le service technico-commercial qui dispose généralement d'un laboratoire d'applications, procédera au lancement du produit, notamment en convainquant les utilisateurs éventuels des qualités du produit et de ses possibilités d'emploi; les ingénieurs technico-commerciaux du Service Après-Vente tiendront compte des observations recueillies pour suggérer des améliorations du produit et adapter celui-ci aux diverses utilisations dont il est l'objet.

Le schéma forcément théorique que nous présentons avait pour objet essentiel, d'une part, de montrer comment se succèdent normalement les quatre phases du processus, d'autre part, d'insister sur la préoccupation essentielle du prix de revient qu'on tente de connaître de façon de plus en plus exacte afin d'interrompre éventuellement, lorsque cela s'avère nécessaire, un processus qui apparaît conduire à une fabrication non rentable.

Nous avons souligné la nécessité, avant d'aborder une nouvelle phase, d'évaluer non seulement le coût, mais la durée probable des phases ultérieures.

Divers auteurs ont donc préconisé de tracer un diagramme P.E.R.T. (Program, Evaluation and Review Technique) représentant les diverses phases du projet et indiquant, pour chaque phase, le temps d'exécution nécessaire et soulignant l'ordre dans lequel ces phases seront effectuées.

Le diagramme ci-dessous (fig. 1) montre comment interviennent la direction, le service documentation et brevets, le service des recherches, celui du développement, le bureau d'études et le service commercial.

Bien entendu, le temps total correspond à la somme des temps maximaux dans chaque phase.

Avant de conclure, il convient d'insister sur le fait qu'une firme n'a pas un projet de produit nouveau mais plusieurs dont la fabrication est compatible avec sa stratégie et que le problème se pose souvent de savoir à quel ou quels projets on donnera la préférence en se basant sur l'examen dont nous avons parlé.

La fabrication d'un produit nouveau ou la mise en œuvre d'un nouveau procédé reposent essentiellement sur la connaissance et la maîtrise des réactions chimiques. Elles n'en constituent pas moins des réalisations pluridisciplinaires auxquelles sont amenés à participer le documentaliste, le spécialiste des brevets, l'économiste, l'ingénieur de génie chimique, l'ingénieur de génie civil, l'hygiéniste, les ingénieurs technico-commerciaux, les spécialistes du Service commercial, etc... Il en résulte qu'à leur formation de base indispensable, de nombreux chimistes sont conduits à acquérir des connaissances supplémentaires leur permettant de se spécialiser dans les divers secteurs que leur offre la chimie industrielle.

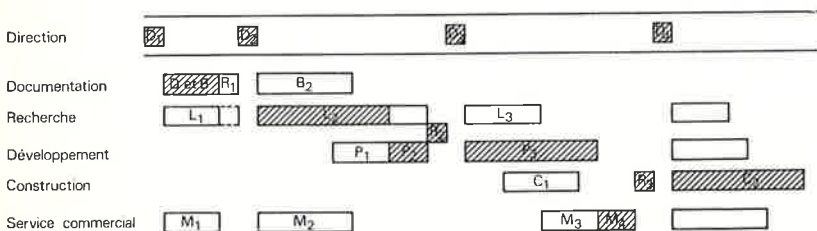


Figure 1. Diagramme genre P.E.R.T., schématisant l'évolution, en fonction du temps, des diverses phases du lancement d'un produit. On trouvera un diagramme plus détaillé dans *Chimie-Actualités* du 25 septembre 1970.