

1.1 Introduction

La machine asynchrone, de par sa simplicité de conception et d'entretien, a la faveur des industriels depuis son invention par Nikola Tesla à la fin du siècle dernier, quand il découvrit les champs magnétiques tournants engendrés par un système de courants polyphasés. Cette simplicité s'accompagne toutefois d'une grande complexité physique, liée aux interactions électromagnétiques entre le stator et le rotor. D'autre part, à la différence du moteur à courant continu où il suffit de faire varier la tension d'alimentation de l'induit pour faire varier la vitesse, le moteur asynchrone nécessite l'utilisation des courants alternatifs de fréquence variable. L'un des principaux blocages était constitué par l'onduleur devant fonctionner en commutation forcée. La machine asynchrone a donc longtemps été utilisée essentiellement à vitesse constante, faute de pouvoir maîtriser convenablement la dynamique de l'ensemble moteur_charge, [1].

Dans ce chapitre on présentera des généralités sur la machine asynchrone, ainsi que sa conception assistée par ordinateur.

1.2 Généralités sur les machines asynchrones

Historiquement le dix- neuvième siècle fût l'époque des grandes découvertes en Electrotechnique dont les bases fondamentales ont été établies (1820--1830) par des hommes de science parmi lesquels on peut citer, OERSTED, AMPERE, BIOT, SAVART, LAPLACE, OHM, FARADAY; Plus tard en (1873) MAXWELL formalisa les lois de l'électromagnétisme moderne dans son ouvrage fameux; " Treatise on Eelectricity and Magnétisme ".

Mais ce n'est qu'à partir de (1870) que l'électrotechnique industrielle s'affirma notamment grâce a la production d'énergie électrique par les génératrices a courant continu (dynamos) de gramme et de siemens. Ensuite, dans les années (1880), furent conçus les alternateurs et les transformateurs polyphasés. Les premiers devaient concurrencer et détrôner les dynamos pour la production de l'électricité, enfin les travaux du yougoslave TESLA et de l'italien FERRARIS complétèrent les systèmes a courants alternatifs polyphasés par la conception et la construction des machines d'induction ou asynchrones en (1888).

Les machines asynchrones couvent actuellement l'essentiel de besoins de la transformation d'énergie électrique en énergie mécanique, A titre d'exemple, elle sont utilisées pour la quasi-totalité des fonction auxiliaires d'une centrale de production

électrique ; il sont généralement de même dans les procédés industrielles. L'étude de ces machines acquit donc une grande importance, [2].

1.3 Constitution des machines asynchrone

Les moteurs asynchrones, ou moteurs à induction, sont pratiquement tous des moteurs triphasés. Ils sont basés sur l'entraînement d'une masse métallique par l'action d'un champ tournant. Les moteur asynchrone, comportent une partie fixe constituée d'une carcasse à l'intérieur de laquelle sont logés le circuit magnétique et le bobinage du stator d'une part et une partie mobile appelée rotor d'autre part, [3].

a) Le stator

Précisément constitué d'un bobinage polyphasé, il est appelé inducteur ou primaire, car c'est au champ tournant qu'il se développe, il en résulte un courant induit dans le rotor.

b) Le Rotor

Le rotor n'est lié électriquement à aucune source d'énergie. (Ni continue, ni alternative) ce qui simplifie beaucoup sa construction on distingue deux type de rotor, [3].

b. 1. Rotor à bagues

Ce rotor à pôle lisse comporte dans ces rainures un enroulement identique à celui du stator, les trois phases sont branchées en étoile ce qui permet d'insérer un rhéostat dans leur circuit, ce rhéostat qui est mise en marche normale et permet d'assurer des meilleures conditions de démarrage.

Signalons que, si le nombre des pôles du rotor est obligatoirement le même, que celui de stator, le nombre de phases peut être déférent. Cependant, il n'est pas intéressant pour un moteur a bagues d'augmenter le nombre des phases du rotor car il faudrait augmenter le nombre des bagues et des balais, [2].

b. 2. Rotor à cage

L'enroulement est remplacé par des barres de cuivre ou d'aluminium logées dans des encoches, et réunie à leurs extrémités par deux couronnes de cuivre ou d'aluminium. Ces cages comportant généralement des barreaux décalés afin de réduire les harmoniques d'encoches, il en résulte une légère diminution de la $F.E.M$ induite par le champ tournant

statorique dans ces barreaux. Un tel rotor est très robuste, depuis sa construction est particulièrement économique.

La cage étant généralement réalisée avec l'aluminium que l'on coule dans les encoches préparées à l'avance. En effet il n'est pas nécessaire d'isoler les barres et la masse du rotor, car les courants induits s'établissent surtout dans les barres, et leur étude théorique est identique à celle des moteurs à bagues.

Si N désigne le nombre des barres d'une cage, les extrémités des barres, étant en court-circuit par les flasques. Un rotor à cage est assimilable à un rotor à bagues qui aurait $q=N$ phases si la cage tourne dans un champ bipolaire alors qu'il a $q=N/p$ phases si la cage tourne à un champ $2p$ pôles.

Par comparaison avec les moteurs à bagues, les moteurs à cage ont l'avantage d'être robustes et du coût plus faible. Il n'est pas possible de faire varier la résistance de leur rotor. Ce qui rend défavorable les conditions de démarrage quand on l'alimente à tension et à fréquence constantes. On remédie cet inconvénient en utilisant soit des rotors à double cages, soit des moteurs à encoches très profondes : barres " lames de sabre ", [2].

1.4 Schéma équivalent de la machine asynchrone

La machine asynchrone est présentée par plusieurs modèles, le schéma équivalent de la machine asynchrone à simple cage d'écureuil sans pertes fer le plus proche du modèle physique est celui du type transformateur ramené au stator dans lequel les fuites statoriques et rotoriques sont représentées séparément, comme illustré par la figure (1.1), [4] :

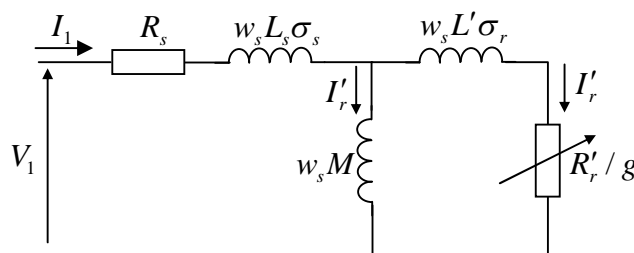


Figure.1.1 schéma équivalent de type transformateur

Ce schéma est obtenu grâce à une transformation de Park de l'ensemble des grandeurs électriques du système triphasé (réelle), composé de deux circuits couplés électromagnétiquement en grandeurs équivalentes en système biphasé, sous les hypothèses simplificatrices suivantes, [4] :

- ❖ Le circuit magnétique n'est pas saturé ;

- ❖ Les inductances mutuelles entre deux enroulements varient sinusoïdalement, en fonction de l'angle entre les axes magnétiques ;
- ❖ L'entrefer est constant.

Où $I_{\sigma s} = L_s - M$: Inductance de fuite statorique ;
 $I'_{\sigma r} = L'_r - M$: Inductance de fuite rotorique ramenée au stator ;
 L_s : Inductance statorique totale ;
 L'_r : Inductance rotorique totale ramenée au stator.

Les réactances correspondantes sont :

$$X_s = I_{\sigma s} \omega_s = (L_s - M) \omega_s \quad (1-1)$$

$$X'_r = I'_{\sigma r} \omega_s = (L'_r - M) \omega_s \quad (1-2)$$

$$X_m = M \omega_s \quad (1-3)$$

Où X_s : Réactance de fuite de stator ;
 X'_r : Réactance de fuite du rotor ramenée au stator ;
 X_m : Réactance de magnétisation.

L'impédance du rotor exprimée par :

$$\bar{z}'_r = \frac{R'_r}{g} + jX'_r \quad (1-4)$$

L'impédance d'entrée est :

$$\bar{Z}_{eq} = R_s + jX_s + \frac{jX_m Z'_r}{jX_m + Z'_r} \quad (1-5)$$

Puisque :

$$I_1 \angle(-\varphi) = V_1 \angle(0) / Z_{eq} \angle(+\varphi) \quad (1-6)$$

Le courant statorique est représenté par ces deux composantes : active (I_{act}) et réactive (I_{rec}) comme suite :

$$I_{act}(R_s, L_s, R'_r, L'_r, M) = I_1 \cos(\varphi) \quad (1-7)$$

$$I_{rec}(R_s, L_s, R'_r, L'_r, M) = I_1 \sin(\varphi) \quad (1-8)$$

1.5 Introduction au CAO

La recherche actuelle est orientées vers des nouvelles techniques, parmi les quelles nous avons pris une technique très demandée dans l'industrie, c'est la conception assistée par ordinateur (CAO).

Généralement l'existence de l'être humain dans l'industrie exige l'ingénieur comme un cœur de cet objet sans oublier la machine de production et l'ordinateur. On peut aussi dire que la conception assistée par ordinateur est un ensemble d'actions bien définies pour donner des solutions exactes, à partir d'un processus itératif, à condition dans une durée limitée et rapide, [5].

1.6 Historique

La conception assistée par ordinateur a très souvent été confondue en France avec la notion de dessin assisté par ordinateur (DAO), sans doute parce que l'activité de conception se passait souvent à la planche à dessin et que l'on a d'abord essayé d'automatiser la production de tracés, qui en termes de recopie des solutions existantes représente à peu près 80% de l'activité des projeteurs de bureaux d'études. Cependant, la CAO est beaucoup plus que la fonction de dessin qu'elle inclut ; elle doit, pour être vraiment efficace, intervenir au niveau même du travail de réflexion du concepteur lorsqu'il pense un nouveau produit ou qu'il modifie le produit existant pour l'adapter à un nouveau cahier des charges.

La CAO est une technique dans laquelle l'homme et l'ordinateur sont rassemblés pour la solution des problèmes techniques en une équipe qui allie étroitement les meilleures qualités de chacun d'eux, de telle manière que l'équipe travaille mieux que chacun séparément. En d'autres termes, la CAO est l'ensemble des outils et procédures utilisant l'informatique et permettant d'établir une synergie entre l'homme et l'ordinateur en mettant au mieux à profit leurs qualités complémentaires :

- D'une part, en confiant à l'ordinateur les travaux de stockage d'information et d'analyse routinière fastidieux et automatisables, comme l'établissement de nomenclatures, la mise en place et la consultation de catalogues, la cotation de plans, l'analyse d'effets de tolérance, la résolution de grands systèmes d'équations ...etc.
- D'autre part, en laissant à l'homme les travaux de synthèse créatrice.

Toutefois, on notera que l'expression conception assistée par ordinateur peut être trompeuse, car elle peut laisser croire que l'ordinateur supplante pratiquement le concepteur.

L'observation immédiate permet de constater que l'ordinateur peut manier un très grand nombre de données quantitatives ou logiques, les traitements à grande vitesse, et cela sans erreur, alors que l'homme excelle dans l'appréhension qualitative des spécifications, des structures et des résultats. Pour obtenir cette synergie, plusieurs générations d'outils se sont succédées, [6].

1.7 Définitions

1.7.1 La conception

La conception est un exercice plutôt futile, et nous avons préféré une explication plus proche du travail de l'ingénieur. Il s'agit d'imaginer, de formuler des solutions pour remplir des fonctions bien définies à l'intérieur d'un ensemble de contraintes. Généralement, l'atteinte d'une solution (d'un design) n'est pas directe sauf pour des problèmes extrêmement simples. Le processus est plutôt itératif tel qu'illustré sur la Fig. 1.2 d'une façon simple, on distingue d'abord le choix d'un modèle représentant le phénomène physique du problème. Ensuite, un premier design est élaboré et on vérifie si les contraintes sont satisfaites.

On peut décrire la conception ou le design comme un processus itératif au cours duquel un objet est conçu et modifié afin qu'il puisse remplir des fonctions bien définies et se conformer à un ensemble de contraintes.

On identifie plusieurs étapes dans cette démarche :

- Création d'un modèle de l'objet ;
- Analyse, essais et simulation ;
- Construction de prototypes ;
- Modification ;
- Réalisation de l'objet.

A quelques variantes près dans l'enchaînement de ces étapes, la méthodologie est la même que l'objet, soit un circuit électrique, une pièce mécanique, [6].

Autres caractéristiques communes à l'ensemble des activités de conception sont les moyens ou médias utilisés par le concepteur :

1.7.1.1 Outils analytiques

Formules empiriques et équations issues de modèles mathématiques. Ceux-ci sont utilisés aussi bien lors de la création d'un modèle, lors de son analyse, ou des modifications, [6].

1.7.1.2 Information

Propriétés et caractéristiques de toutes sortes, design antérieurs. Ces informations auxquelles l'ingénieur fait appel sont contenues dans des manuels, dans des plans, etc. leurs formes sont variées : chiffrées, textuelles. On a recours aux informations également à toutes les phases du processus de conception, [6].

1.7.1.3 Communication

L'ingénieur doit communiquer ou consacrer les résultats de son travail à l'une ou l'autre des phases par exemple, il lui faut communiquer la forme du modèle pour la réalisation d'un prototype, ou bien les résultats d'un calcul de contraintes pour réaliser certaines modifications. Les modes de communication sont graphiques, chiffrés ou bien textuels, [6].

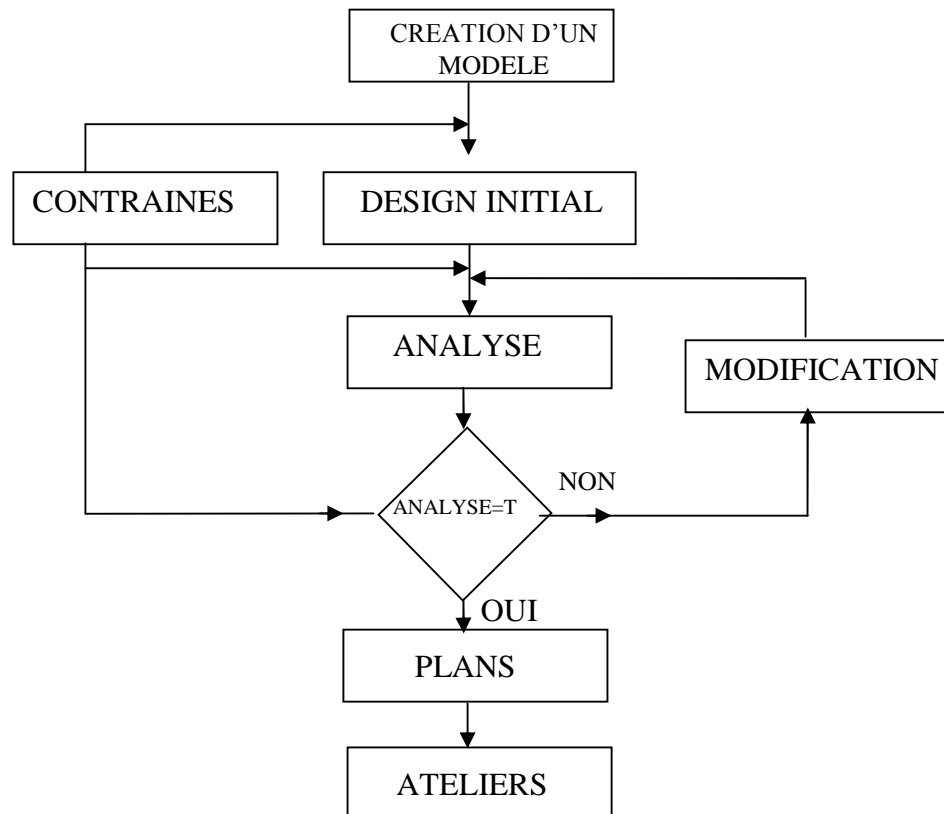


Figure.1.2 Organigramme de conception

Pris séparément, ces aspects donnent lieu à des activités quantitatives (ou non créatives) et des activités qualitatives (créatives). L'aspect créatif de l'activité de design se manifeste évidemment lors de la création d'un modèle, mais également tout au long du cheminement c'est-à-dire dans le choix d'une méthode de calcul plutôt qu'une autre, l'appel à

telle information ou l'interprétation d'un calcul, l'élaboration d'une modification à la suite d'une simulation. La coordination de toutes ces activités en fonction d'un objectif et menant à une réalisation des processus de design.

1.7.2 La conception assistée

A mesure que l'envergure et la complexité des projets augmentent, chacune des étapes et des moyens mis en œuvre deviennent plus élaborés et nécessitent une certaine spécialisation. Ainsi le concepteur ne peut plus communiquer avec un technicien à l'aide d'un dessin fait rapidement à main levée au-delà du stade préliminaire. La réalisation des pièces est telle que beaucoup d'informations doivent être transmises de façon complète et non équivoque.

Donc à chacune des étapes, le concepteur fait appel à des "intermédiaires" qui restreignent, ralentissent et augmentent le temps et le coût d'un design. On atteint donc le point où la coordination de ces activités dépasse la capacité d'un seul cerveau, et ceci en grande partie à cause de certaines fonctions secondaires à caractère non créatif. Heureusement, ces fonctions sont de nature quantitatives et peuvent être confiées à des auxiliaires (dessinateurs, programmeurs) et libérer le concepteur pour les tâches qualitatives qui sont du niveau de ses aptitudes et de sa formation. On atteint ainsi la conception assistée dont la nature n'a pas changé. Seulement certaines modalités ont été modifiées, [6].

1.7.3 La conception assistée par ordinateur

Les exigences technologiques donnent lieu à des projets complexes et qui résultent en un morcellement du travail. L'industrie se trouve vis-à-vis ses travailleurs intellectuels dans la même situation qu'au début du siècle avec les travailleurs manuels. Le pari des entreprises est que la CAO permettra une hausse semblable de la productivité des ingénieurs.

Les progrès dans le domaine de l'électronique mettent à la disposition de l'ingénieur une puissance de calcul, de mémoire et de traitement énorme et ceci bon marché. D'autre part, la création de logiciels extrêmement évolués permet d'informatiser de nombreuses tâches quantitatives du processus de conception tout en libérant l'esprit utilisant au mieux les qualités de l'homme et de l'ordinateur. La façon dont le cerveau humain combine des données et fait appel à des ressources en fonction certains objectifs sont complexes et loin d'être clairs. La réalisation de cet objectif constitue un des domaines d'avenir et sa maîtrise sera l'équivalent de la révolution industrielle pour le travail intellectuel.

On utilise la capacité de calcul de stockage et de traitement de l'ordinateur, alliés aux capacités de reconnaissances de formes, d'évaluation, de jugement de situation complexe (conflituelles) et les possibilités de l'intuition de l'humain pour imaginer de nouvelles solutions, [6].

1.8 Objectifs et fonctions

Nous allons essayer de cerner de plus près la notion de CAO dans ses objectifs, ses utilisateurs et ses applications.

L'objectif essentiel est à coup sûr l'accroissement de la productivité, qui peut être obtenu de plusieurs façons suivent l'application et les potentialités de l'entreprise, [5].

1.8.1 Augmenter la créativité

Cet objectif est atteint en permettant l'investigation d'un nombre plus élevé de solutions sans recourir à une expérimentation longue ou à des réalisations coûteuses la CAO permet au concepteur de commettre des erreurs économiquement, en lui donnant le moyen de les corriger rapidement et le plus tôt possible, [5].

1.8.2 Améliorer la qualité des produits

La CAO permet d'agir sur la qualité d'un produit en mettant à la disposition du concepteur des moyens perfectionnés d'analyse des caractéristiques de fonctionnement du produit. De façon générale, les outils de CAO influent sur la qualité et la fiabilité des produits en permettant la vérification du bien-fondé de la conception par le biais de modèles et de simulations, une meilleure compréhension de la conception en obligeant à des descriptions formelles analysables automatiquement, la vérification du respect de normes et de standards, et l'élimination d'erreurs matérielles de copie inévitables lors du passage d'une opération à une autre, [5].

1.8.3 Réduire les délais et les coûts de conception des produits

Il est évident que, pour toute entreprise commerciale, « le temps c'est de l'argent ». Un gain de temps se répercute sur les différents postes de dépenses liés à un projet et, quelquefois, raccourcir les délais permet de gagner des marchés qui peuvent représenter des carnets de commandes de plusieurs mois pour une même entreprise. Cette réduction des coûts et des délais porte le plus souvent sur les tâches mécaniques comme la création des données

de fabrication ou les contrôles lors des phases de conception, de préparation des documents de fabrication ou de fabrication proprement dite, [5].

1.8.4 Vaincre la complexité technique

Il peut être exagère de prétendre que beaucoup de problèmes ne peuvent être résolus que par la technique de la CAO. Néanmoins, dans la pratique, cette affirmation se vérifie dans la conception de produits très complexes (circuits intégrés à très grande échelle, avions...).

La CAO est très importantes ; elle permet, à ses utilisateurs, d'accroître leur compétence technique et, par conséquent, à l'entreprise d'améliorer sa compétitivité, [5].

1.8.5 Pallier le manque de main-d'œuvre

Il est banal de constater aujourd'hui que le manque de certaines catégories de personnel qualifié est de plus grand (dessinateurs, techniciens, spécialistes, de circuits intégrés...). Cette carence amène souvent les entreprises à abandonner des projets innovateurs ou l'extension de produits existants, par manque de personnel qualifié.

1.8.6 Faciliter l'archivage et la circulation de l'information

Dans tous les domaines industriels, on assiste à une automatisation de plus en plus importante des différentes opérations de fabrication d'un produit, or ces opérations donnent lieu à la création et à l'entretien d'une masse considérable de données descriptives qui sont stockées en mémoire d'ordinateur pour permettre leurs accès, mise à jour et modification. On peut citer, par exemple, les dessins industriels, la cartographie en génie civil, les plannings de transport en urbanisme, les études d'environnement qui nécessitent la manipulation d'une somme importante de données. Ces données, une fois introduites dans un système de CAO, peuvent, de manière sélective, être triées par attributs, par sections, par fenêtres sur un dessin particulier, par recouvrement, par couches ou par un ensemble très diverses options, [5].

1.9 CAO dans l'industrie

1.9.1 Mécanique

Dans la conception d'un appareil électrique, les aspects mécaniques apparaissent essentiellement sous trois formes différentes.

- La définition des formes de l'appareil s'apparente à la conception géométrique. Elle est traitée à l'aide d'outils d'aide à la conception géométrique.

On rencontre, de plus, des problèmes vibratoires dans la plupart des machines tournantes ou statiques. Les outils d'analyse vibratoire permettent de vérifier que les fréquences de la structure ne se trouvent pas à l'intérieur du spectre des fréquences possibles d'excitation mécanique ou électromécanique ou, le cas échéant, permettent de modifier les caractéristiques de l'appareil pour les éloigner de ce domaine, [5].

1.9.2 Schématique

Dans la construction électrique, on doit très souvent réaliser des armoires d'alimentation et de commande ou des cartes de commande pour des convertisseurs ou pour l'ensemble d'une chaîne de régulation électrique d'un procédé chimique ou métallurgique. Le câblage de telles armoires ou la fabrication de ces cartes ou des dispositifs associés aux appareillages de coupure ou de contact entraînent la réalisation de schémas complexes élaborés sous forme de liasses qui représentent chacune une petite partie du dispositif, [5].

1.9.3 Machines et appareillage électriques

Ce domaine est très vaste ! Il va, en ce qui concerne les machines, des moteurs et générateurs jusqu'aux transformateurs et inductances et pour ce qui est de l'appareillage des appareils de coupure ou de sectionnement jusqu'aux dispositifs de protection.

1.9.4 Electronique de puissance

L'électronique de puissance consiste à réaliser des circuits électriques appelés convertisseurs qui relient des éléments de puissance. Ces circuits conditionnent l'énergie électrique en transformant la nature (DC /AC) ou la fréquence du courant ou de la tension à l'aide de composants semi-conducteurs de puissance [Transistor, Thyristor ouvrable par la gâchette (GTO)].

La conception de tels circuits se fait à partir de leur classification fonctionnelle (Redresseur, Onduleur, Hacheurs) et des propriétés électriques propres à la commutation des semi-conducteurs (Commutation Naturelle ou Forcée, Résonance). Lorsque le circuit est défini à partir de ces caractéristiques, il faut alors choisir parmi les semi-conducteurs disponibles sur le marché, ceux qui correspondent au schéma retenu, puis réaliser les divers circuits de protection de ces éléments sensibles aux à-coups de courant ou de tension, [5].

1.10 Choix d'un système de CAO

L'installation dans une entreprise d'un système de CAO est un événement qui va peu à peu transformer profondément la vie et le fonctionnement d'une partie de cette entreprise. C'est pour cela que les choix qui vont prélude à l'installation de ce système doivent être faits en fonction des objectifs spécifiques qui ont motivé cette décision. En effet ces choix ne seront pas les mêmes pour une petite entreprise que pour une société importante, pour un système destiné à résoudre un problème particulier que pour un système destiné à accroître à terme la compétitivité globale de l'entreprise, [6].

1.10.1 Stratégie d'installation de la CAO

La question fondamentale à laquelle il faut répondre est la suivante : que recherche-t-on à travers la CAO ?

Deux types de réponses à cette question. Si la CAO est requise pour résoudre un problème particulier (automatisation d'un atelier de conception de schémas, de dessins...) la démarche ultérieure conduit à appréhender les différents types de systèmes adaptés à cette application. Si le but recherché est d'accroître les potentialités de l'entreprise, mais sans qu'une application immédiate et urgente soit particulièrement envisagée, il faut alors mettre en œuvre toute une démarche destinée à créer les conditions les plus favorables d'introduction de la CAO dans l'entreprise, [6].

1.11 Evolution des outils

Les outils de la première génération ne contribuaient qu'un aspect précis et étroit du processus de conception (simulation du régime permanent d'un circuit électronique. Évaluation du court-circuit d'une machine électrique, calcul de vitesses critiques d'un Rotor, détermination de la propagation de rayons lumineux dans un système optique).

A cette époque, le mode d'utilisation des ordinateurs le plus répandu était le traitement par lots chaque programme opérant de façon autonome et exécutant une tâche unique plus ou moins complexe.

Le processus de conception faisait généralement appel à une collection de programmes n'ayant aucun lien entre eux. Or, il est fréquent que le rapprochement d'informations provenant d'étapes différentes de la conception s'avère nécessaire dans le but de vérifications ou de calculs plus précis. Ces informations étaient alors transmises d'un programme à un autre par transcription manuelle.

Ce mode de transcription, fastidieux et source d'erreurs, ne permet pas un enchaînement fiable des traitements spécifiques de chaque étape de la conception.

Le développement de systèmes de traitement en temps partagé et le désir d'améliorer les échanges d'informations ont alors conduit au développement des outils de la deuxième génération.

La caractéristique essentielle d'un tel outil de CAO est de se présenter sous la forme d'un programme intégré utilisable en mode conversationnel. Il réunit un ensemble de procédures de traitement concourant à la résolution d'une classe de problèmes spécifiques d'une étape du processus de conception.

Pour éviter les inconvénients liés à l'utilisation des langages de programmation, des langages simples, appelés langages de commande, ont été introduits. Ceux ci comportent généralement peu d'instructions ou commandes (de l'ordre d'une trentaine), dont l'enchaînement permet d'ordonner l'exécution des opérations souhaitées, [5].

1.12 Avantages

Sous l'effet de fortes pressions provenant de la compétition, de la conjoncture économique de diverses contraires du public et des organismes gouvernementaux pour de meilleurs produits (et à meilleur marché), l'industrie et forcée de hausser la productivité du personnel technique. Il est vite apparu qu'à l'aide de l'informatique, des économies appréciables sont possibles pour chacune des différentes phases du processus de design, [6].

- 1-Création d'un modèle ;
- 2-Analyse ;
- 3-Modification.

1.13 Conclusion

Il est évident que la CAO n'est qu'un outil, mais un outil qui modifie l'exercice de la profession de l'ingénieur et permet de faire un meilleur travail. Par exemple, dans le domaine des structures, les programmes d'analyses sont devenus très précis et complets de manière à ce que le comportement d'éléments telles les poutres, peut être analysé avec beaucoup plus de fiabilité et de détails qu'avec les formules empiriques utilisées auparavant. Il est alors envisageable d'optimiser un design par l'utilisation itérative de ces outils et de déceler des Comportements qui ne seraient apparus que lors de la réalisation du prototype (ou pire, lors du produit fini), [6].