



Université Sidi Mohamed Ben Abdellah
Faculté des Sciences et Techniques de Fès
Département de Génie Industriel



Mémoire de Projet de fin d'étude

Préparé par

ES-SAIDI ABDELHAK

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat

Spécialité : Ingénierie en Mécatronique

Intitulé

Sujet du PFE :

**Conception d'une machine outil à commande
numérique pour perçage des brides**

Lieu : Exper-Energy
Réf : 12 /IMT2015

Soutenu le 1 Juillet 2015 devant le jury :

- **Pr M.CHERKANI HASSANI** (Encadrant FST)
- **Mr A.ACHA** (Encadrant Société)
- **Pr A.Chamat** (Examinateur)
- **Pr B.Rzine** (Examinateur)



DÉDICACES

Que ce travail témoigne de mes respects :

A mes parents :

Grâce à leurs tendres encouragements et leurs grands sacrifices, ils ont pu créer le climat propice à la poursuite de mes études. Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon respect, ma considération et mes profonds sentiments envers eux.

Je prie le bon Dieu de les bénir, de veiller sur eux, en espérant qu'ils seront toujours fiers de moi.

A mes sœurs et à mon frère :

Ils vont trouver ici l'expression de mes sentiments de respect et de reconnaissance pour le soutien qu'ils n'ont cessé de me porter.

A tous mes professeurs :

Leur générosité et leur soutien m'oblige de leurs témoigner mon profond respect et ma loyale considération.

A tous mes amis et mes collègues:

Ils vont trouver ici le témoignage d'une fidélité et d'une amitié infinie.

REMERCIEMENTS

A l'occasion de ce travail j'adresse mes sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué à l'accomplissement de ce projet.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance et toutes mes pensées de gratitude à **Mr A.ACHA**, qui m'a accompagné de près durant tout ce travail, pour sa disponibilité, pour la confiance qu'il a su m'accorder et les conseils précieux qu'il m'a prodigués tout au long de la réalisation de ce projet.

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements pour **Mr M.CHERKANI Hassani** pour l'encadrement et le soutien qu'il m'a apporté le long de la préparation de ce projet.

De même, Je tiens à remercier notre coordonnateur de la filière **Mr L. HAMEDI** et les membres du jury **Mr A.CHAMAT** et **Mlle B.RZINE** qui nous ont honorés par leur présence.

Finalement, un grand merci pour tous les enseignants de la filière « **Mécatronique** » qui ont contribué à notre formation pendant toutes ces années et aussi pour toute l'équipe de la société « **Exper-Energy** » pour leurs conseils et leurs aides.

Liste des figures

Figure 1: Exemple de bride en Acier	13
Figure 2 : diagramme APTE du projet	16
Figure 3: Diagramme GANTT du projet.....	26
Figure 4: Diagramme des affinités	31
Figure 5: Processus d'identification des fonctions.....	33
Figure 6: Méthode de l'environnement de la machine utilisée pour trouver les fonctions....	36
Figure 7: Arbre fonctionnel de la machine « Percus_ProV1 »	39
Figure 8: Structure fonctionnelle globale de la machine « Percus_ProV1 »	41
Figure 9: première configuration physique pour la machine « Percus_ProV1 ».....	42
Figure 10: Première Configuration physique de la machine sous le logiciel de conception « Catia ».....	43
Figure 11 : Moteurs pas à pas de marque AMP	58
Figure 12 : Courbe de couple en fonction de vitesse de rotation d'un moteur pas à pas.....	59
Figure 13: Servomoteur électrique brushless / AC de marque Schneider Electric.....	60
Figure 14: modélisation d'entraînement par moteur électrique.....	61
Figure 15: Système pignon-crémaillère	62
Figure 16: architecture d'entraînement pour l'axe X.....	63
Figure 17: Système de transformation de mouvement : vis à billes.....	64
Figure 18 : fiche de consultation des prix d'un fournisseur national.....	72
Figure 19 : Fiche de consultation des prix pour matériel mécanique.....	73
Figure 20 : Fiche « Proforma Invoice » pour moteurs	75
Figure 21: Fiche « Proforma Invoice » pour matériels mécanique	76
Figure 22 : vue isométrique de la structure réalisable	78
Figure 23 : vue de structure avec le pont en profilé « IPE 360 »	81
Figure 24 : vues de la structure finale de la machine « Percus_ProV1 »	82
Figure 25: vue de quelques pièces de la structure finale.....	83

Liste des tableaux

Tableau 1: Dimensions de quelques brides normalisées	14
Tableau 2: Liste de vérification des techniques critiques du projet	21
Tableau 3: Equipe de projet	22
Tableau 4: Liste de vérification de budget préliminaire	24
Tableau 5: Analyse de risque du projet.....	27
Tableau 6: Mesures de prévention des risques du projet	28
Tableau 7: Liste de quelques besoins de projet.....	30
Tableau 8 : Liste des fonctions retenues par la conversion des besoins de client	35
Tableau 9: Liste des fonctions retenues pour la création de l'arbre fonctionnel.....	37
Tableau 10: Liste des fonctions complémentaires trouvées en créant l'arbre fonctionnel	38
Tableau 11 : Liste des spécifications fonctionnelles dérivées de l'arbre fonctionnel	45
Tableau 12: Liste des spécifications fonctionnelles dérivées des besoins du client et des notes à la conception	48
Tableau 13: Notes à la conception.....	49
Tableau 14: Structure de la matrice morphologique du projet Percus_ProV1	52
Tableau 15: Vues de la structure préliminaire de la machine « Percus_ProV1 ».....	54
Tableau 16: Estimation de charge maximale a déplacé par l'axe Y	65
Tableau 17 : Estimation de charge maximale a déplacé par l'axe Z	66
Tableau 18 : synthèse de dimensionnement moteur d'axes.....	68
Tableau 19 : Liste de matériels nécessaires au projet « Percus_ProV1 ».....	71
Tableau 20 : liste de consultation des prix pour la partie commande.....	74
Tableau 21 : Autres vues de la structure réalisable	79
Tableau 22 : configurations du pont	80

Sommaire

DÉDICACES	2
REMERCIEMENTS	3
Liste des figures.....	4
Liste des tableaux.....	5
Introduction générale	9
Chapitre I : Etude Préliminaire du projet	10
Introduction	11
1. Présentation de l'entreprise.....	11
2. Présentation de contexte du projet	13
2.1. Les brides en acier	13
2.2. La problématique	15
2.3. L'idée du projet	15
3. Formulation préliminaire du projet.....	16
3.1. Énoncé fonctionnel du besoin.....	16
3.2. Désignation.....	16
3.3. Validation du besoin.....	17
3.4. Matrice SWOT du projet.....	18
3.5. Spécifications d'ingénierie préliminaires	19
4. Définition des ressources	20
4.1. Les ressources techniques.....	20
4.1.1. Les connaissances scientifiques	20
4.1.2. Les techniques	20
4.2. Les ressources humaines.....	22
4.3. Les ressources financières.....	23
5. Échéancier	25
6. Analyse des risques et mesures de prévention.....	27
Conclusion	28

Chapitre II : Analyse Conceptuelle	29
Introduction	30
1. Analyse des besoins.....	30
1.1. Identification des besoins.....	30
1.2. Diagramme des affinités.....	31
2. Analyse fonctionnelle	33
2.1. Recherche des fonctions	34
2.1.1. Les fonctions retenues par la conversion des besoins	34
2.1.2. La Méthode RESEAU.....	35
2.2. Création de l'arbre fonctionnel	38
2.3. La Structure fonctionnelle du projet	40
3. Configuration physique du système.....	42
4. Cahier des charges fonctionnel (CdCF).....	44
5. Notes à la conception.....	49
6. Emergence et sélection des concepts	51
6.1. Génération de concepts	52
6.2. Révision de la configuration physique du projet.....	54
Conclusion	55
Chapitre III : Note de calculs système	56
Introduction	57
1. Moteurs usuels des applications CNC	58
1.1. Moteurs pas à pas	58
1.2. Les servomoteurs	59
1.3. Grandeurs caractéristiques d'un entraînement avec moteur électrique	61
2. Choix de moteur pour l'axe X.....	62
2.1. Calcul du couple moteur pour un système pignon-Crémaillère.....	62
2.2. Architecture d'entraînement pour axe X	63
3. Choix de moteur pour l'axe Y	64
3.1. Architecture du système vis a bille.....	64
3.2. Calcul des paramètres vis à billes.....	65
3.3. Calcul du couple moteur nécessaire pour déplacer l'axe Y.....	65
4. Choix du moteur pour l'axe Z	66
4.1. Calcul du couple moteur nécessaire pour déplacer l'axe Z.....	66

5. Synthèse note de calcul : dimensionnement moteurs et systèmes de transformation de mouvement	68
Conclusion	68
Chapitre IV : commande de matériel	69
Introduction	70
1. Liste initiale de matériels nécessaires	71
2. La recherche de fournisseurs	72
2.1. Fournisseur national.....	72
2.2. Fournisseur International.....	73
2.2.1. Matériel mécanique	73
2.2.2. Moteurs et commande machine	74
3. Commande de matériels	75
Conclusion	76
Chapitre V : Conception et plans de détail	77
Introduction	78
1. Conception d'une structure rigide et réalisable.....	78
1.1. Configurations proposées pour le pont de la structure	80
2. Conception finale et mise au plan de la structure	81
Conclusion	83
Conclusion générale	84
Références	85
Annexe A : Technique de perçage d'aciers	85
Annexe B : Note de calculs système	93
Annexe C : Plans de détail	103

Introduction générale

Une CNC (*Computer Numerical Control*) ou MOCN (*Machine-outil à Commande Numérique*) est tout d'abord une machine-outil : elle permet selon ses caractéristiques d'effectuer diverses opérations (percer, scier, rectifier, découper, fraiser, plier, graver, etc.) nécessitant des gestes précis et répétitifs, sur des matériaux divers. Dans le cas d'une CNC, ces opérations seront donc commandées par un ordinateur ou un dispositif numérique.

En tant que spécialiste dans la construction mécanique et chaudronnerie, la société « **Exper-Energy** » a besoin de plusieurs produits pour bien mener ses travaux et ses projets, parmi lesquelles il y a **les brides plates en acier** de différentes tailles;

La problématique se résume en général par les contraintes liées à l'usinage et le perçage de ces brides (Repérage et pointage manuel, déplacements et manutentions nécessaires des brides, Machines conventionnelles lentes...)

Pour cette raison, j'ai été affecté au service bureau d'études de la société pour concevoir et réaliser une MOCN sous forme d'un portique mobile animé de trois mouvements de translation pour faire des opérations de perçage automatiques de ces brides.

Le présent travail consiste à concevoir la structure de la machine en tenant compte de plusieurs contraintes imposées : Rigidité, précision, utilisation des ressources disponibles de la société et intégrable sur la table d'une autre MOCN qui existe déjà dans l'atelier mécanique de la société;

Dans le premier chapitre, il y a l'étude préliminaire du projet qui consiste à bien définir le besoin, identifier les ressources et élaborer le planning du projet ;

Le deuxième chapitre, présente les différentes phases de l'analyse conceptuelle qui permettent de recenser, caractériser et ordonner les fonctions de la machine afin de construire l'arbre fonctionnel et déduire les sous-systèmes du projet ;

Le troisième chapitre, résume les résultats de la phase de dimensionnement et calculs afin d'estimer les besoins en termes des efforts d'entraînement des axes et pour commander les moteurs adéquats pour le bon fonctionnement de la machine ;

Le quatrième chapitre, présente les étapes de commande de matériel pour la réalisation du projet ;

Le cinquième chapitre présente la phase de conception de la structure et les plans de détail réalisés avec le logiciel de conception « Catia » ;

Finalement, une conclusion sur les résultats du projet ;

Chapitre I : Etude Préliminaire du projet

Introduction

Ce premier chapitre résume toute la phase préliminaire afin de voir la faisabilité du projet et pour avoir une vision claire des objectifs et contraintes liées à sa réalisation ;

1. Présentation de l'entreprise



Exper-Energy SARL est une société située à la zone Industrielle Bir Rami de Kénitra, elle est spécialisée dans plusieurs domaines :

Fabrication, Fourniture, Installation et maintenance de matériel Hydro-électromécanique destinés aux :

- Stations de pompage,
- Stations de relevage,
- Assainissement,
- Agriculture.

Activités principales de l'entreprise

⇒ **Industrie mécanique et métallique**

- Ingénierie et réalisation des projets industriels dans les domaines de la construction métallique et mécanique.
- Construction métallique et chaudronnerie.
- Fabrication d'équipements électromécaniques.
- Montage et maintenance des équipements hydro électromécaniques.

⇒ **Equipement hydromécanique**

- Etude technique des équipements hydromécaniques.
- Fourniture et installation du matériel hydromécanique.
- Fabrication de tuyauterie, et pièces spéciales (joint de démontage, joints Gibault, Tés, manchettes etc. ...) en acier toute nuances, acier inox...

⇒ **Electricité et Automatismes**

Depuis l'année 2000, la société procède à la réalisation et à l'installation d'équipements électriques et automatismes pour stations de pompage d'eau, stations de surpression, stations d'épuration et poste de relevage.

- Poste de distribution HT/BT.
- Montage et câblage de tableaux et pupitres
- Armoires électriques
- Eclairage industriel, prises de courants
- Cheminement de câbles
- Pose et raccordement sur site
- Automatismes et automate de télégestion
- Supervision et gestion de données et défauts
- Régulation : pression, débit, thermique et vitesse...

2. Présentation de contexte du projet

2.1. Les brides en acier

Afin de bien mené ses travaux et ses projets, la société « Exper-Energy » a besoin de plusieurs produits parmi lesquelles il ya **les brides plates en acier** de différentes tailles pour le raccord mécanique ;

- **Exemple : Bride libre en acier non galvanisé**

Matière de Bride : Acier non galvanisé

Références nominatives Conformes aux normes NF EN 1092 et ISO 7005 AFNOR-NFE

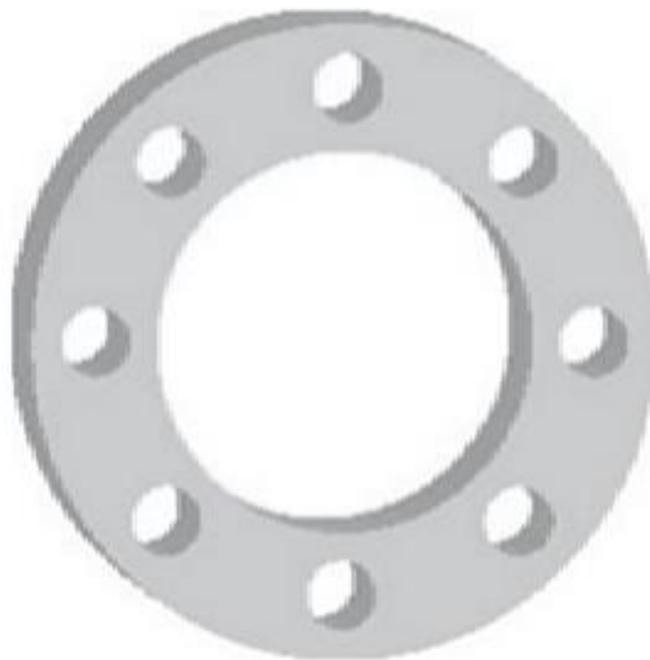
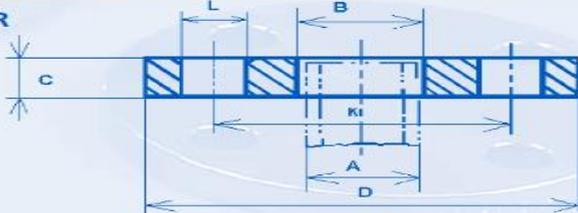


Figure 1: Exemple de bride en Acier

Tableau 1: Dimensions de quelques brides normalisées

DIMENSIONS DES BRIDES AFNOR

**BRIDES PLATES A SOUDER
Type 01.A**



PN 10

Diamètre DN	A	D	K	L	Trous de fixation		B	C
					Nb	Diam.		
200	219.1	340	295	22	8	M20	222	24
250	273	395	350	22	12	M20	276.5	26
300	323.9	445	400	22	12	M20	327.5	26
350	355.6	505	460	22	16	M20	359.5	28
400	406.4	565	515	26	16	M24	411	32
450	457	615	565	26	20	M24	462	36
500	508	670	620	26	20	M24	513.5	38
600	610	780	725	30	20	M27	616.5	40

- **Domaines d'application**

Les brides sont utilisées pour Raccords électro-soudables pour les systèmes de canalisations en polyéthylène (PE) dans le domaine de l'alimentation en eau destinée à la consommation humaine, y compris le transport des eaux brutes avant traitement, et leurs assemblages avec des composants en PE et d'autres matériaux destinés à être utilisés sous pression et à une température de service de 20 °C comme température de référence, pouvant atteindre un maximum de 40°.

- **processus de fabrication des brides en acier**

Il existe plusieurs processus pour la fabrication des brides en acier, ceci dépend des besoins de chaque société ainsi que les machines disponibles; Pour la société « Exper-Energy » le processus de fabrication passe par les étapes suivantes :

- ✓ Réception de la matière première sous forme de tôles rectangulaires en acier E24 ;
- ✓ Découpage des tôles en forme des arcs par une machine d'oxycoupage a commande numérique,
- ✓ Soudage manuelle de plusieurs arcs pour obtenir une bride circulaire creuse,
- ✓ Rectifications par moules et usinage par des tours conventionnels,
- ✓ Repérage et pointage manuel des trous par coups de pointeaux,
- ✓ Finalement, Perçage des brides sur un tour vertical conventionnel;

2.2. La problématique

Etat actuel (la problématique)	Etat souhaité (cahier des charges)
<ul style="list-style-type: none"> Rectifications manuelles : nécessite <u>Beaucoup de déplacements</u> et <u>manutentions</u> des brides qui ont des grandes masses (sécurité, énergie...) 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ intégration des opérations de rectifications+ perçage+ usinage sur la même machine
<ul style="list-style-type: none"> Repérage et pointage <u>manuels</u> sont des opérations qui prennent beaucoup de temps et peuvent entraîner des défauts de précision, 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Repérage et pointage automatique>>>>>gain en productivité et réduction des défauts de Précision
<ul style="list-style-type: none"> Perçage avec des machines conventionnelles lentes 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Utilisation d'une machine à commande numérique plus rapide

2.3. L'idée du projet

- ✓ Réaliser une MOCN sous forme d'un portique mobile pour perçage de l'acier;
- ✓ Intégrer le portique sur la table de la machine d'oxycoupage qui existante dans l'atelier de l'entreprise ;

3. Formulation préliminaire du projet

3.1. Énoncé fonctionnel du besoin

Une fois le besoin est identifié, Il faut normalement l'énoncer clairement : il s'agit d'exprimer avec rigueur le but et les limites de l'étude. L'outil utilisé pour cela est « la bête à cornes » (diagramme APTE).

Pour remplir le diagramme, il faut répondre aux questions suivantes (par rapport au produit)

- À qui rend-il service ?
- Sur qui agit-il ?
- Dans quel but ?

On obtient ainsi le diagramme suivant :

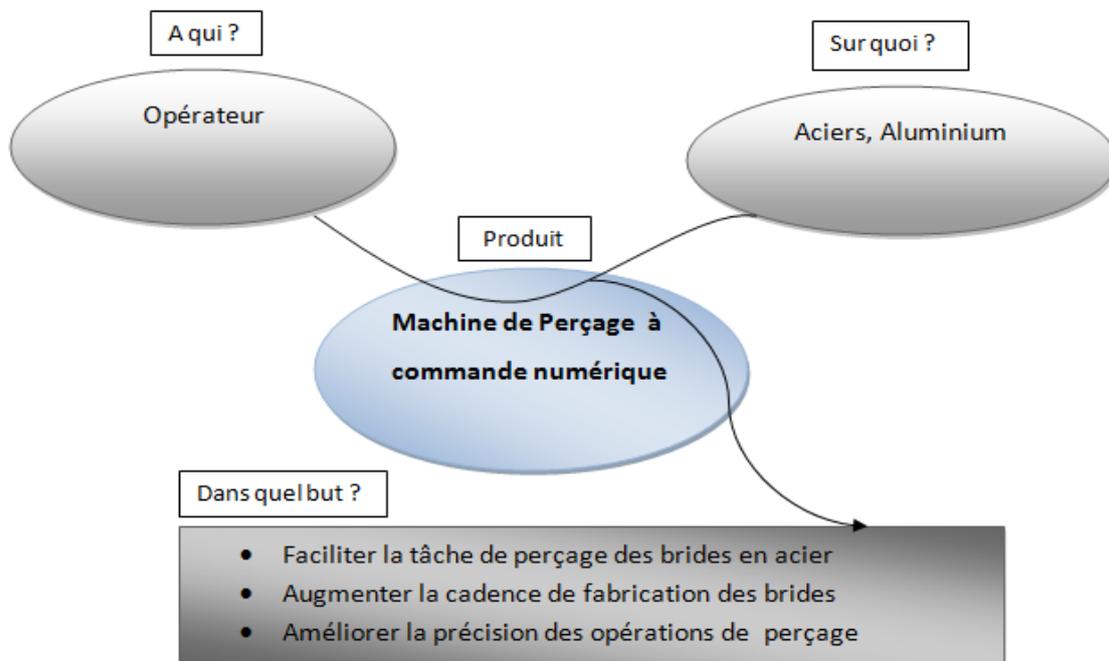


Figure 2 : diagramme APTE du projet

3.2. Désignation

Nom du projet : « Percus_ProV1 »

(Pour perçage-usinage Professionnel Version1)

3.3. Validation du besoin

En se posant les questions suivantes :

⇒ **Pourquoi le besoin existe-t-il ? (à cause de quoi ?)**

- Le perçage des brides en acier demande parfois une vingtaine de trous de gros diamètre avec précision ce qui entraîne des centrages manuels fastidieux ;
- L'usinage des brides prend beaucoup de temps.

⇒ **Quel est le risque de disparaître/évoluer de besoin?**

- La disparition des opérations d'usinage/perçage (impossible, puisque c'est parmi les fonctions principales de la société)
 - L'achat d'une MOCN de perçage (encombrement, coût élevé)
 - L'achat des brides usinés n'est pas rentable pour la société ;
- ⇒ Le risque est faible >>>>**Le projet est stable.**

3.4. Matrice SWOT du projet

	Positif	Négatif
Interne	Forces	Faiblesses
	<ul style="list-style-type: none"> • La machine permettra d'éliminer les étapes de repérages et pointages manuels • Gain très important en temps d'usinage et précision de perçage. 	<ul style="list-style-type: none"> • Réglages de précision nécessaires • Besoin d'une structure lourde pour résister aux efforts de perçage d'acier
Externe	Opportunités	Menaces
	<ul style="list-style-type: none"> • Pas d'encombrement (intégration de la machine sur une table existante) • Les déplacements et manutentions des brides seront réduits • Gain en main d'œuvre 	<ul style="list-style-type: none"> • Nécessité d'un investissement dans le projet (moteurs, commande, pièces...) • Adaptions nécessaires de la structure pour l'opération de perçage • Contrainte de temps • Manque de ressources humaines pour la fabrication • Contraintes d'intégration avec la machine d'oxycoupage

3.5. Spécifications d'ingénierie préliminaires

L'analyse de l'environnement de la machine par rapport à la table de la machine existante ainsi que les études de préféabilité ont permis d'établir de façon préliminaire certaines spécifications d'ingénierie globales, elles sont établies afin d'orienter et d'accélérer le développement du projet.

❖ Courses maximales

Définition : Déplacement maximal de l'outil de coupe

- Niveau :
 - course axe X : 2500 mm
 - course axe Y : 2500 mm
 - course axe Z : 500 mm
- Flexibilité : +/- 100 mm sur chaque dimension

❖ Puissance de la broche (système de rotation de l'outil de coupe)

Dans un premier temps nous avons pris comme broche la carotteuse (perceuse) « HILTI DD 160 »

- Niveau : 2.2KW
- Flexibilité : +/-20%

❖ Résolution de positionnement

Distance théorique entre deux points consécutifs sur un axe pouvant être localisés par l'outil ;

- Niveau souhaité : 0.02mm
- Flexibilité : +/- 0.001 mm

4. Définition des ressources

4.1. Les ressources techniques

Pour savoir si un projet est faisable, il faut évidemment se convaincre que les objectifs de conception du produit sont raisonnables et techniquement réalisables compte tenu des ressources de l'équipe. Quand on parle de ressources, il est question notamment des connaissances scientifiques et techniques essentielles pour créer le produit. Voici donc brièvement en quoi consistent ces ressources.

4.1.1. Les connaissances scientifiques

Dépendamment du domaine auquel le produit appartient (mécanique, travaux d'usinage, etc.), il existe des connaissances qu'il faut identifier et documenter par exemple :

- ✓ Les calculs des couples et puissances des moteurs électriques,
- ✓ Les efforts engendrés dans une opération de perçage,
- ✓ La modélisation par éléments finis des structures,
- ✓ Etc ;

Il est important dès cet instant de prendre l'habitude d'archiver les informations dans un Bloc-notes personnel et si possible de faire des résumés sous format informatique pour communiquer les informations aux membres de l'équipe par écrit.

En conclusion, dans l'absence d'informations scientifiques et techniques pertinentes, un projet ne doit pas être entrepris surtout s'il est d'un niveau technique trop complexe pour les connaissances de l'équipe de projet.

4.1.2. Les techniques

Les techniques représentent des solutions concrètes éprouvées pour résoudre divers problèmes d'ingénierie simples ou complexes. Voici quelques exemples de techniques pour notre projet :

- ✓ Technique de perçage d'acier,
- ✓ Le roulement à billes et guidage linéaire,
- ✓ La commande numérique,
- ✓ Système de transformation de mouvement (vis à bille, pignon crémaillère..)
- ✓ Les moteurs électriques (pas à pas et servomoteurs);
- ✓ Etc.

Tout projet de conception vise à intégrer plusieurs techniques. La nature de celles-ci dépend du projet. Les techniques sont fortement liées aux connaissances scientifiques discutées préalablement. Une recherche approfondie des techniques envisagées s'avère primordiale au début de tous projets de conception. Dans le cadre de cette recherche, on vise à identifier par-dessus tout quelles sont les **techniques critiques** qui risquent d'entraver la réussite du projet.

Voici une liste de vérification qui facilite l'identification des techniques critiques du projet :

Tableau 2: Liste de vérification des techniques critiques du projet

No	Éléments à vérifier
1.	<p>Quelles sont les techniques qui sont susceptibles d'entrer dans les concepts du produit?</p> <p><i>Il faut considérer toutes les possibilités en s'inspirant des produits différents sur le marché ainsi que les idées préliminaires qui motivent le projet (innovations, opportunité de marché).</i></p>
2.	<p>Est-ce qu'il y a suffisamment d'informations disponibles sur une technique donnée pour la mettre en œuvre (dimensionner, faire des calculs d'ingénierie, etc.)?</p>
3.	<p>Quelles sont les difficultés et contraintes liées à chacune des techniques envisagées?</p>
4.	<p>Est-ce que des calculs préliminaires ont été réalisés pour valider les techniques critiques envisagées (ex. estimation de la puissance motrice requise?)</p> <p><i>Documenter ces calculs et donner les références. Ils seront raffinés par la suite lors du dimensionnement des concepts. Il n'est évidemment pas nécessaire de faire des calculs préliminaires pour évaluer certaines techniques génériques au moment de l'étude préliminaire (ex. résistance des boulons de fixation d'un châssis).</i></p>
5.	<p>Est-ce que certaines techniques sont inaccessibles pour diverses raisons (complexité, manque d'informations, manque de temps, coûts trop élevés, disponibilité restreinte, etc.).</p> <p><i>Dans ce cas, il faut écarter ces techniques dans le processus de conception ou encore évaluer les risques associés au choix de ces dernières. Pour chaque risque, il faut évaluer la valeur de ce dernier et trouver des mesures de prévention appropriées).</i></p>

4.2. Les ressources humaines

De la même façon que les ressources techniques, il est très important de connaître la disponibilité des ressources humaines ainsi que quelques détails importants dès la mise en route du projet.

Les personnes impliquées dans le projet et leur fonction principale dans l'équipe sont indiqués au tableau suivant :

Tableau 3: Equipe de projet

Nom & prénom	Statut	Fonction
Mr. Abdelali ACHA	Chef de projet	Encadrement de projet, Réunions périodiques Validations finales
Mr. Johrati Mustafa	Chef d'atelier	Validation de structures mécaniques et choix technologiques, Assistance dans les différents travaux de réalisation
Mr. Es-saidi Abdelhak	Ingénieur en Mécatronique	Chargé de conception, réalisation et assemblage de l'axe de perçage, Dimensionnement des moteurs, systèmes de réduction et guides linéaires
Mr. Hatim	Ingénieur en génie électrique	Chargé de paramétrage et configuration de la communication entre les différents organes de la partie commande
(1 à 5)	techniciens	Assistance dans les travaux de réalisation du projet

4.3. Les ressources financières

À ce stade du projet, il n'est pas facile de se faire une idée précise des coûts qui seront engendrés par la réalisation du prototype.

Afin d'estimer les coûts de l'ensemble du projet et de dresser un budget préliminaire, plusieurs approches peuvent être utilisées séparément ou en combinaison pour estimer les coûts :

- **Approche détaillée (bottom-up)**

De bas en haut : On évalue les coûts associés à toutes les composantes importantes du produit séparément lorsqu'on peut les identifier et trouver les prix correspondants (grâce à des soumissions préliminaires ou finales par exemple). *À noter qu'à cette étape ci du projet, cette approche s'avère impossible.*

- **Approche globale (top-down)**

Par expérience : On sait par expérience quels sont les prix associés pour mettre en œuvre une technique donnée, un concept préliminaire ou encore un ensemble de caractéristiques d'un produit (matériaux, pièces, méthodes de fabrication, etc.).

Par similarité : Il est possible d'estimer le prix d'un produit ou de ses composantes principales en le comparant avec un produit similaire existant sur le marché.

L'objectif de l'analyse économique à cette étape est de faire ressortir le coût des éléments critiques qui sont généralement associés aux spécifications et techniques critiques discutées préalablement. Ce sont généralement ces aspects du projet qui constitueront la majeure partie du budget, du moins à l'étape de l'étude préliminaire. En complétant l'analyse économique par une approximation globale des éléments communs du budget (boulons, structure, matériaux conventionnels, roulements, vis à billes etc.) par expérience ou similarité, on obtient finalement un budget préliminaire global qui servira à l'approbation du projet.

Voici donc une liste de vérification qui permet d'identifier les éléments à considérer pour le budget préliminaire:

Tableau 4: Liste de vérification de budget préliminaire

No	Éléments à vérifier
1.	Quel est le coût des pièces (mécaniques, électriques, informatiques, etc.) dictées par les contraintes techniques associées aux spécifications et techniques critiques identifiées pour le projet? <i>Il faut demander des soumissions dès l'étude préliminaire pour les pièces qui seront nécessairement intégrées à notre concept.</i>
2.	Quel est le coût des matériaux spécialisés nécessaires pour la fabrication du prototype (traitements thermiques, céramiques techniques, polymères, etc.)? <i>Pour le reste des matériaux, il est suffisant de dresser un estimé des coûts en matériaux du projet en vérifiant le prix des matières brutes auprès des fournisseurs locaux</i>
3.	Est-ce que le salaire de professionnels ou de personnes spécialisées est à prévoir dans le budget (ex. consultants, machinistes spécialisés, etc.)?
4.	Est-ce que des outils spécialisés devront être achetés pour réaliser certaines pièces critiques (mèches au diamant, tarauds de grandes dimensions, perceuses, etc.)

Il est important de mentionner qu'on ne cherche pas nécessairement une évaluation de tous les coûts. Cependant, il est important d'être en mesure de fixer les marges budgétaires appropriées pour les aspects du projet pour lesquels il pourrait subsister des doutes. Les facteurs de sécurité sont influencés évidemment par la complexité du projet et les incertitudes qui en découlent.

Pour notre projet l'approche détaillée est utilisée, et la somme préliminaire des composants a acheté est d'environ **3385 dollars** ;

- 1565 dollars pour l'achat des moteurs ;
- 1820 dollars pour les pièces mécaniques ;

5. Échéancier

Évidemment, on ne peut pas non plus parler de projet sans prendre en compte l'échéancier. Comme toutes les autres ressources du projet, elles sont malheureusement limitées. Il faut par conséquent évaluer combien de temps il faudra consacrer aux diverses activités du projet et par-dessus tout, il faut savoir de combien de temps on dispose pour réaliser le projet. Il est aussi d'usage d'identifier les événements critiques qui pourraient survenir et causer des délais importants dans l'une ou l'autre des phases du projet. On utilise ces événements lors de l'analyse de risques.

Lorsqu'on connaît l'ensemble des données temporelles du projet, il est nécessaire de faire un échéancier (*Gantt_Poject*) aussi sommaire soit-il. Il pourra et devra être mis à jour et détaillé pendant l'avancement du projet pour être certain que les phases du projet et leurs livrables puissent être complétés avant les dates limites (dates de remise des rapports, revue de conception, exposition des prototypes, etc.).

Les étapes nécessaires a la réalisation du projet « Percus_ProV1 » sont représentées sur le diagramme Gantt de la figure suivante :

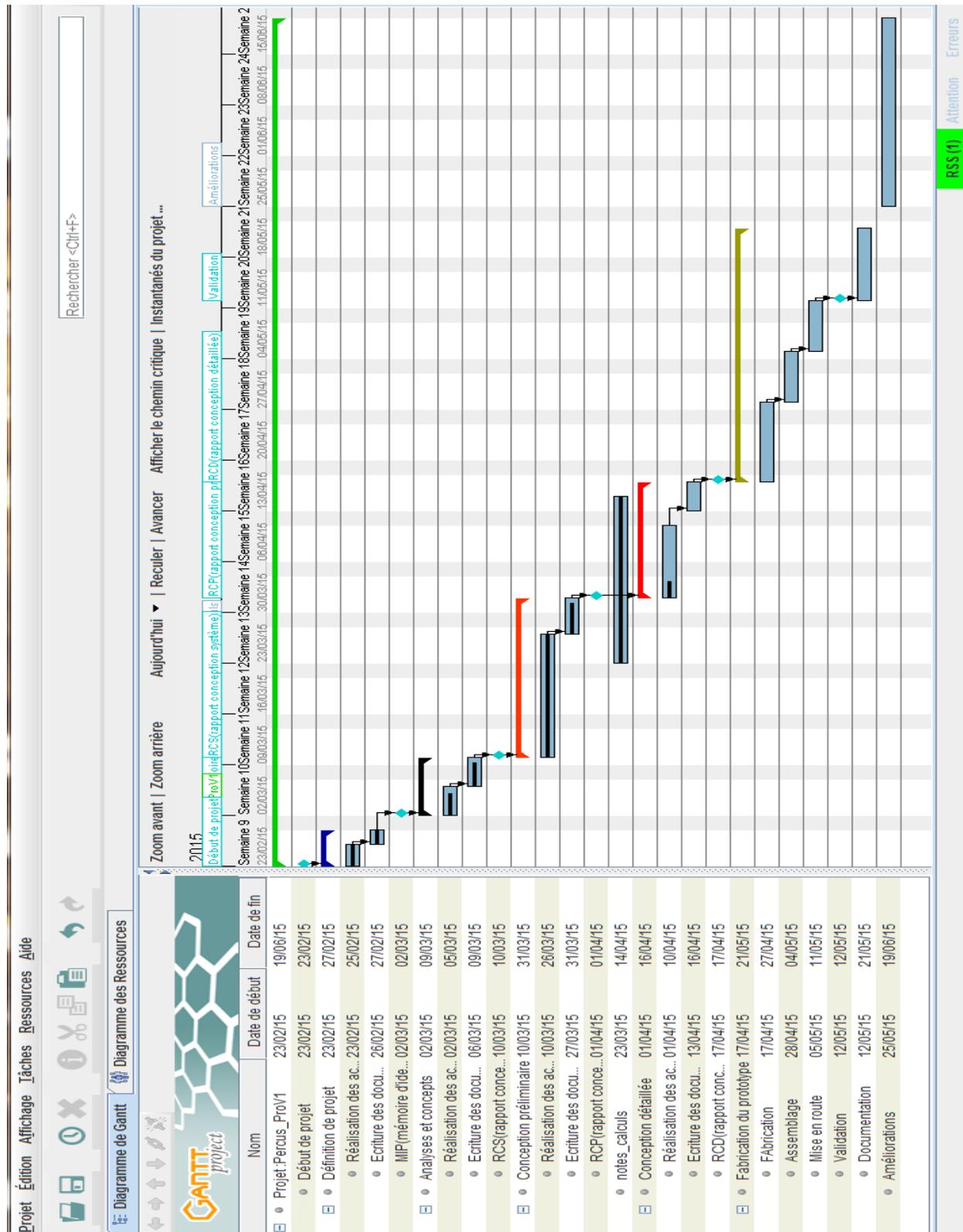


Figure 3: Diagramme GANTT du projet

6. Analyse des risques et mesures de prévention

Maintenant que le projet est défini et que les ressources disponibles sont identifiées, il est désormais possible de mettre en lumière les risques du projet.

Le risque est défini comme une *Menace pour le succès d'un projet générée par une situation susceptible de se produire*.

Ainsi, les risques représentent les événements critiques susceptibles de se produire pendant le projet qui sont nécessairement liés aux ressources techniques (difficulté particulière), aux ressources humaines (manque de main d'œuvre), à l'échéancier (délais importants de livraison) ou encore aux ressources financières (coûts élevés de fabrication spécialisée).

Lors de l'analyse de risque, il faut identifier **la gravité de l'impact** des risques potentiels. De plus, il est essentiel de connaître ou d'évaluer la **probabilité** que ces risques surviennent.

Le niveau d'un risque qui peut être utilisé pour prioriser les risques entre eux se définit comme suit :

Niveau de risque = Probabilité d'occurrence de la situation X gravité de l'impact sur le projet

La participation des techniciens au projet se fait en surplus de leurs tâches habituelles il est possible qu'ils ne soient disponibles qu'à 20% de leur temps ;

Le tableau suivant synthétise une analyse de risque du projet « Percus_ProV1 » :

Tableau 5: Analyse de risque du projet

Risque	a. Probabilité [0-5]	b. Gravité de l'impact [0-5]	Niveau de risque $c = a \times b$	Priorisation
Délais de commande et livraison de matériels importantes	4	5	20	1
Manque de ressources humaines pour la fabrication	3	5	15	2
Imprévus financiers	3	3	9	3

Mais l'analyse de risque ne s'arrête pas ici. Évidemment, quand nous avons un problème, il faut trouver moyen de le résoudre pour revenir à une situation désirée. Les solutions potentielles aux risques sont appelées **mesures de prévention**.

Par définition c'est : *l'action ou décision permettant de réduire la probabilité d'occurrence ou la gravité de l'impact de l'événement sur le projet ;*

Le tableau suivant montre un exemple où des mesures de prévention sont proposées pour l'analyse de risque du projet :

Tableau 6: Mesures de prévention des risques du projet

Risque	Mesure de prévention	Impacts sur			Mise en œuvre
		risque	délais	Coût	
Imprévus financiers	Acheter l'essentiel	OK	--	OK	S'il y a lieu
Manque de ressources humaines pour la fabrication	devancer la fabrication	--	OK	OK	S'il y a lieu
	Sous-traiter la fabrication de certaines pièces	--	--	↑	S'il y a lieu
Retard dans la réception de pièces	Changer de fournisseur	--	--	--	S'il y a lieu
	Commandes externes effectuées par l'équipe	--	↓	OK	

Conclusion

Une fois que cet exercice a été réalisé et que la *définition du projet* s'harmonise avec *les ressources disponibles* en mettant en place des *mesures de préventions* efficaces pour minimiser les *risques* s'il y a lieu, une décision peut être prise sur la mise en route du projet.

la phase de l'étude préliminaire est probablement la plus critique des phases de développement du projet puisqu'elle permet d'établir la définition, une solution préliminaire, les ressources nécessaires et les risques de notre projet.

Chapitre II : Analyse Conceptuelle

Introduction

L'étude préliminaire réalisée dans le premier chapitre ayant présenté clairement le but de ce projet, la phase conceptuelle a pu être amorcée. Ce chapitre décrit l'essentiel de la démarche suivie pour l'analyse conceptuelle du projet « Percus_ProV1 ».

1. Analyse des besoins

1.1. Identification des besoins

Le tableau suivant représente des besoins identifiés pour le projet « Percus_ProV1 » classé selon l'échelle de Kano :

B : Base **P : Performance**
I : Innovation **c : contrainte**

Tableau 7: Liste de quelques besoins de projet

No	Besoin	Classe
B1	Usine/perce des pièces en acier	B
B2	Intégrable sur la table de la machine d'oxycoupage	B
B3	Est sécuritaire	B
B4	Peut être entretenu facilement par les techniciens	B
B6	Possède un arrêt d'urgence	C
B7	Utilise des matériaux disponibles	B
B8	Permet l'accès facile au plateau	C
B9	Facilite le ramassage des copeaux	B
B10	Utiliser un contrôleur commercial	C
B11	Conforme aux normes	C
B12	Peut être fabriqué	C
B13	Utilise les sources électriques de l'atelier	C
B14	Protège la mécanique en cas de collision	B
B15	Inclut un mécanisme de mise hors tension sous verrou	C
B16	Utilise le maximum de pièces standards	B
B17	Modifiable	B
B18	Possible d'interrompre et de reprendre l'usinage	P
B19	Ergonomique	B
B20	Arrêt automatique en cas de bris	
B21	Garanti une température acceptable des pièces électriques et mécaniques	P
B22	Maintient les pièces de plusieurs dimensions sur le plateau	P
B23	Usine avec précision	P
B24	Est peut coûteux	C
B25	Longue durée de vie	B

1.2. Diagramme des affinités

Après la phase d'identification des besoins, celles-ci seront organisés et structurés dans le diagramme suivant :

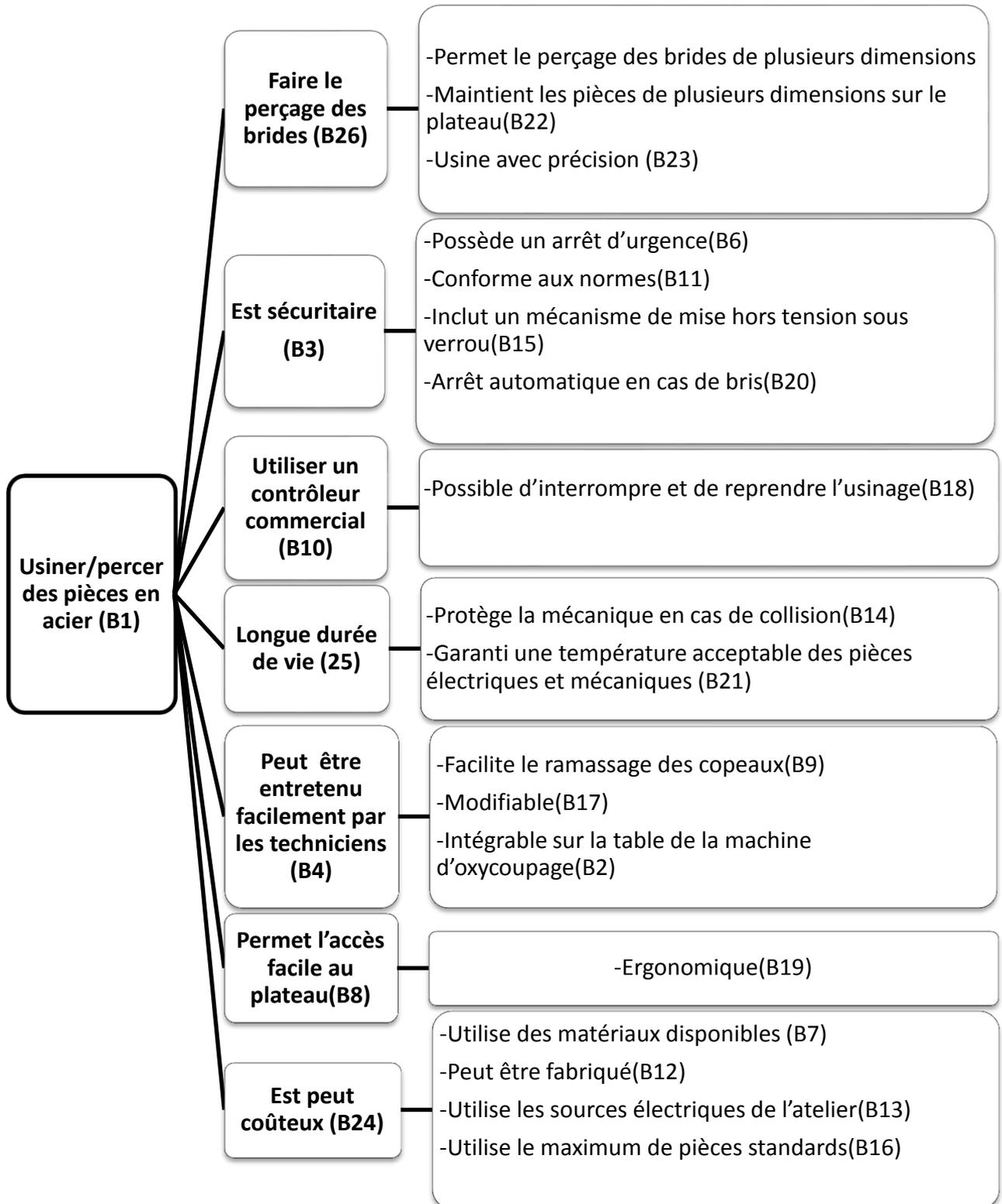


Figure 4: Diagramme des affinités

On remarque que 8 affinités principales apparaissent:

1. **Usiner/perçer des pièces en acier**: besoin primaire énoncé par le client ;
2. **Faire le perçage des brides** : utilité première de la machine ;
3. **Est sécuritaire** : aspect important pour les utilisateurs ;
4. **Utilise un contrôleur commercial** : contrainte issue des études complémentaires ;
5. **Longue Durée de vie**: rentabilisation de l'investissement ;
6. **Peut être entretenue facilement par les techniciens** : ce seront les principaux Responsables de la machine et tout bris à la CNC devra être réparé en peu de temps ;
7. **Permet l'accès facile au plateau de la machine** : on veut faciliter la vie des utilisateurs ;
8. **Est peu coûteux** : une contrainte de conception importante.

Evidemment, il y a peu de besoins qui ont trait aux aspects logiciels et Contrôleur de la machine à commande numérique. Ceci résulte que c'est une partie a traité séparément par mon binôme de stage ;

On peut donc omettre pour l'instant tous les besoins qui s'y rapportent et mettre d'avantage d'effort sur les aspects coût, mécanique, sécurité et précision de la machine. C'est d'ailleurs ce que reflète le diagramme des affinités.

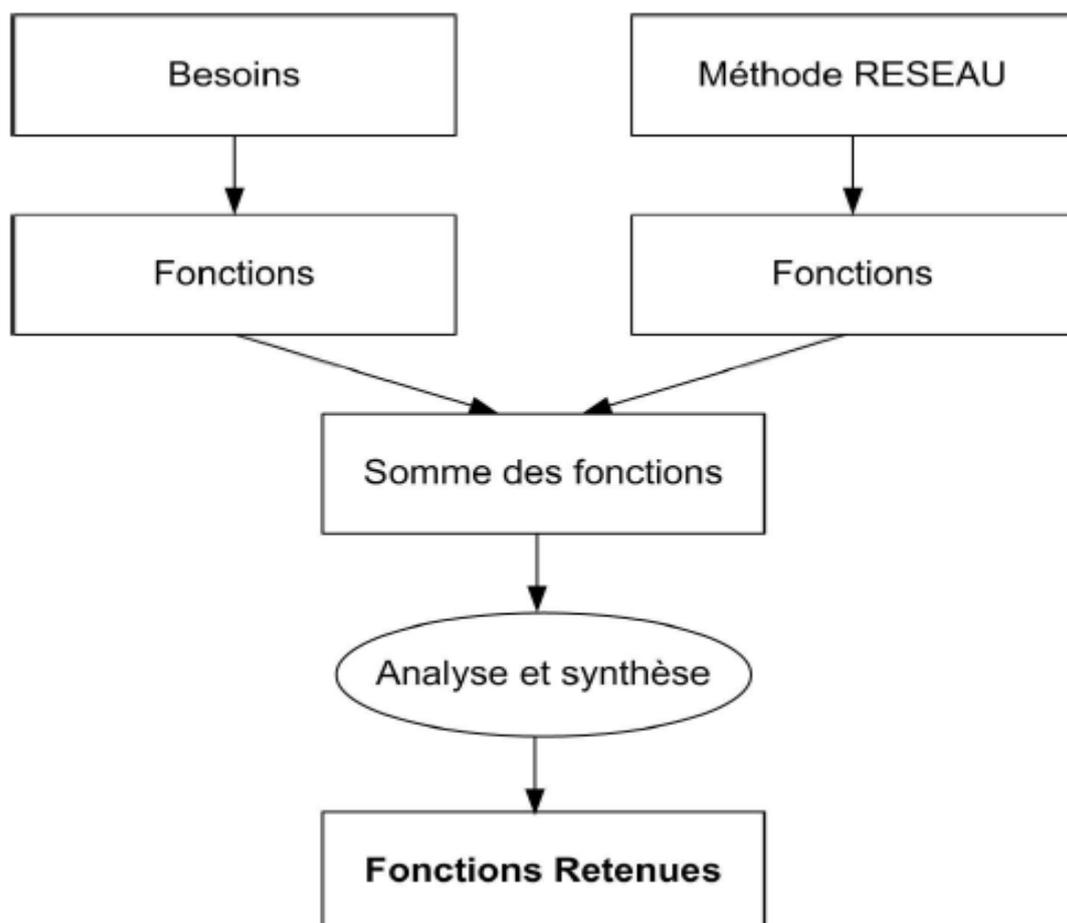
Tous les besoins contenus dans le diagramme des affinités serviront à l'analyse fonctionnelle.

2. Analyse fonctionnelle

L'analyse fonctionnelle consiste à **recenser, caractériser, ordonner, hiérarchiser** et **valoriser** les fonctions d'un produit. À partir de cet instant, le besoin est traduit en termes de fonctions.

L'analyse fonctionnelle a pour but de recenser les fonctions du produit de deux manières :

- ✓ **La conversion des besoins du client en fonctions;**
- ✓ **La recherche de fonctions complémentaires par la méthode RÉSEAU.**



[Figure 5: Processus d'identification des fonctions](#)

Toutes les fonctions trouvées sont triées pour créer l'arbre fonctionnel. Ce dernier sert à faire la synthèse des fonctions et à identifier les liens entre les fonctions de manière à définir la fonction principale du produit ainsi que ses fonctions secondaires et tertiaires.

Bien entendu, comme nous le verrons après, les fonctions secondaires mènent à l'identification des sous-systèmes du produit. Lorsque les fonctions importantes du produit seront relevées, il ne restera plus qu'à les convertir en spécifications fonctionnelles* pour obtenir les critères pour la sélection des concepts.

(* **Spécification fonctionnelle** : spécification qui découle d'une fonction à réaliser du produit et qui ne dépend pas d'un concept ou d'une solution technique précise)

❖ **Remarque**

Il est à noter que les fonctions conservées sont identifiées par trois caractéristiques pour en faciliter le tri :

- Le type de fonction : service (usage ou estime), technique ou de contrainte;
- L'échelle de Kano : échelle de classement selon le diagramme de KANO qui comporte quatre classes soit : Base (B), Performance (P), Innovation (I) ou Contrainte (C).
- la méthode de classement suggérée par l'AFNOR : Il s'agit d'une façon supplémentaire suggérée pour classer les fonctions par ordre d'importance. Les niveaux de classement sont les suivants : Indispensable (IND), Importante (IMP), Intéressante (INT), Accessoire (ACC).

Une fois ce tri effectué, les **fonctions retenues** devraient permettre en général de tracer un portrait global du produit.

2.1. Recherche des fonctions

2.1.1. Les fonctions retenues par la conversion des besoins

Le tableau suivant représente les fonctions converties des besoins du client (F100-F107)

Tableau 8 : Liste des fonctions retenues par la conversion des besoins de client

No	Fonction	Méthode	Méthodes de classement		
			Type	Kano	AFNOR
F100	Usiner/Perçer des en acier avec précision	Besoins	usage	P	IMP
F101	Usiner sur une grande course	Besoins	usage	P	IMP
F102	Usiner rapidement	Besoins	usage	P	INT
F103	Être durable	Besoins	estime	P	IMP
F104	Être abordable	Besoins	contrainte	C	IND
F105	Permettre l'utilisation de l'alimentation électrique disponible	Besoins	estime	B	IMP
F106	Permettre l'installation sur la table de la machine d'oxycoupage	Besoins	contrainte	B	IND
F107	Résister aux copeaux	Besoins	usage	P	IMP

Dans un deuxième temps, la méthode RESEAU est utilisée pour trouver les autres fonctions de projet ;

2.1.2. La Méthode RESEAU

Rappelons que la méthode RESEAU propose les outils de recherche de fonctions suivants :

R : Recherche Intuitive

E : Examen de l'environnement (méthode des interacteurs)

S: Sequential Analysis of Functional Element (SAFE)

E : Examen des efforts et des mouvements

A : Analyse d'un produit de référence

U : Utilisation des normes et des règlements

La formulation des fonctions est très importante. Pour l'analyse fonctionnelle, on considère majoritairement les **fonctions de service** (usage, estime). Pour les fonctions d'usage, on utilise toujours un verbe d'action suivi d'un complément. Pour la majorité des **fonctions d'estime**, on utilise un verbe d'état qui exprime le caractère passif de la fonction (ex. faciliter l'installation, être sécuritaire, être peu coûteux, etc.).

Après la **Recherche Intuitive**, la **méthode des interacteurs** fut utilisée comme deuxième outil.

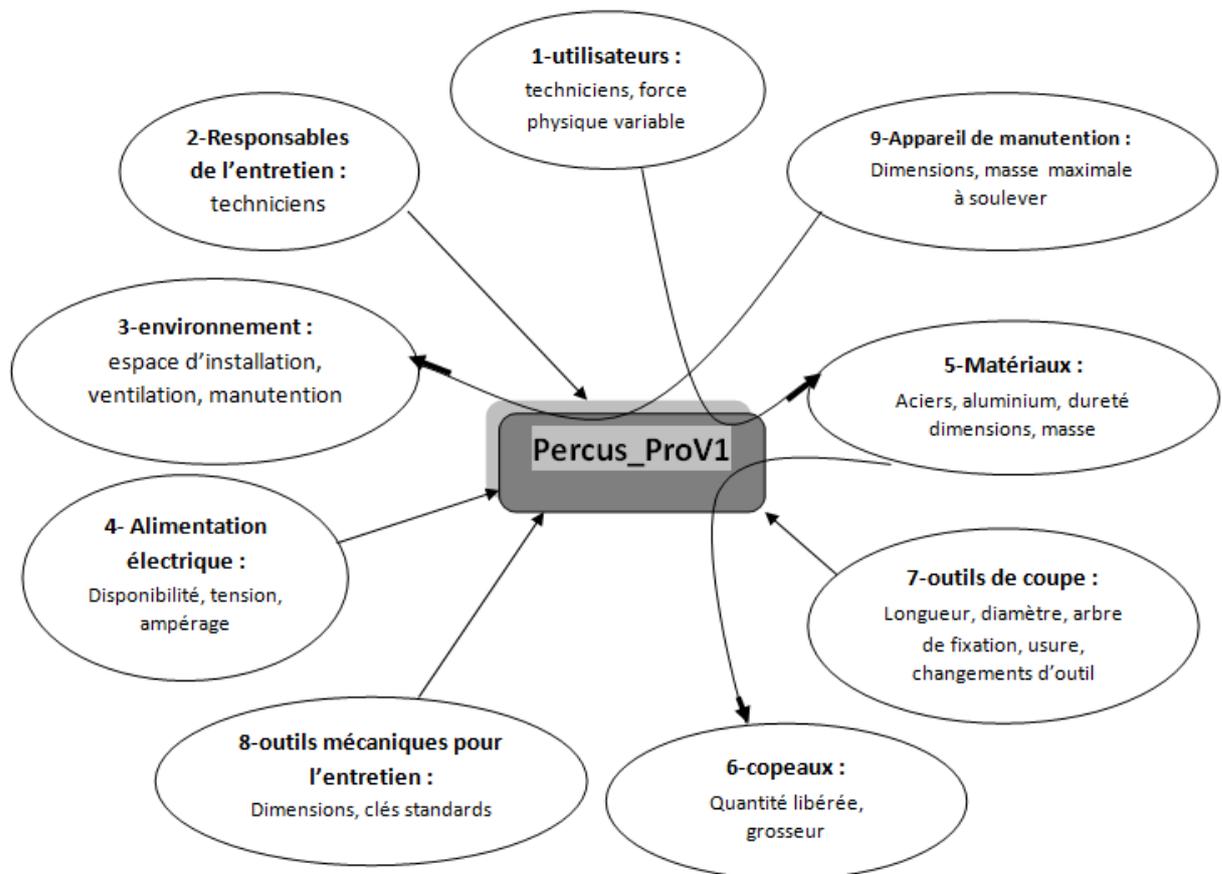


Figure 6: Méthode de l'environnement de la machine utilisée pour trouver les fonctions

La troisième méthode utilisée pour trouver les fonctions de la machine de perçage est **la méthode SAFE** qui consiste à analyser les étapes d'utilisation normales du produit séquentiellement et d'essayer d'en tirer les fonctions correspondantes.

Évidemment, plus le scénario d'utilisation est complet et plus grandes sont les chances de trouver des fonctions complémentaires du produit oubliées. Cependant, on remarque qu'après deux techniques, plusieurs fonctions sont déjà redondantes. Donc, au fil des techniques, l'emphasis devrait être mise sur l'identification des nouvelles fonctions à priori.

Maintenant que toutes les fonctions sont trouvées en apparence, ces dernières doivent être triées, reformulées, voir éliminées selon le cas. Les opérations suivantes permettent généralement de faire le ménage dans les fonctions :

- On commence évidemment par repérer les **fonctions redondantes**. On conserve la meilleure expression pour chacune d'elle et on élimine les autres.
- Par la suite, on tente de repérer les fonctions à **caractère technique** qui réfèrent à des concepts et non à une fonction du produit. Elles peuvent être soit éliminées ou

encore mises de côté pour être utilisées subséquentement pour expliciter des fonctions d'usage de l'arbre fonctionnel. On les archive généralement dans les **notes à la conception**.

- Aussi, on tente d'isoler au maximum les **fonctions d'estime** du produit. Ces fonctions interagissent **parfois** dans la construction de l'arbre fonctionnel selon la nature du produit. Certaines sont d'ailleurs essentielles pour la satisfaction du client (ex. être esthétique, être sécuritaire, être peu coûteux, permettre le rangement facile, être compact, faciliter l'entretien).

D'ailleurs, autant que possible, les fonctions d'estime ne devraient servir que pour établir des spécifications d'ingénierie complémentaires pour la sélection des concepts.

On passe par la suite à la création de l'arbre fonctionnel pour l'identification des sous-systèmes.

Le tableau suivant présente finalement la liste des fonctions retenues après la méthode RESEAU pour la création de l'arbre fonctionnel ;

Tableau 9: Liste des fonctions retenues pour la création de l'arbre fonctionnel

No	Fonction	Méthode	Méthodes de classement		
			Type	Kano	AFNOR
F1	Permettre l'alignement de la matière brute	Interacteurs	estime	B	IMP
F2	Limiter la course de l'outil	Interacteurs	usage	B	IMP
F3	Permettre l'installation facile de la matière	Interacteurs	estime	P	IMP
F4	Usiner/perçer des brides en acier	Interacteurs	usage	B	IND
F5	Maintenir les pièces en place	Interacteurs	usage	B	IND
F6	Tenir un outil de coupe	Interacteurs	usage	B	IND
F7	Déplacer l'outil de coupe en X, Y et Z	Interacteurs	usage	B	IND
F8	Usiner de l'acier ou autre matière moins dur	Interacteurs	usage	B	IND
F9	Usiner avec un outil à des vitesses de rotation variables	Interacteurs	usage	B	IND
F10	Supporter la matière première	combinée	usage	B	IND
F11	Générer des déplacements (1D, 2D, 3D)	Interacteurs	usage	B	IND
F12	Récupérer les débris d'usinage	Interacteurs	usage	P	INT

2.2.Création de l'arbre fonctionnel

Afin d'avoir une vue globale structurée des fonctions, on construit ensuite l'arbre fonctionnel. Ceci permet de mettre en évidence les principaux sous-systèmes du produit

Evidemment, certaines fonctions étaient toujours manquantes même après la méthode RESEAU. La construction de l'arbre fonctionnel et de la structure fonctionnelle du produit a permis cependant de corriger la situation et de s'assurer de la cohérence de l'arbre fonctionnel.

Tableau 10: Liste des fonctions complémentaires trouvées en créant l'arbre fonctionnel

No	Fonctions	Provenance
F12	Récupérer les débris d'usinage	Structure fonctionnelle
F14	Protéger (utilisateurs, sous-systèmes, composantes, etc.)	Structure fonctionnelle
F15	Restreindre l'accès à la zone de coupe	Analyse fonctionnelle
F57	Refroidir l'outil de coupe	Analyse fonctionnelle

❖ **Remarque**: évidemment, on conserve en tout temps le numéro des fonctions (ex F10) pour faire le suivi de ces dernières et de leurs modifications

Les étapes essentielles suivies pour construire l'arbre fonctionnel sont :

- ✓ **1**-Trouver la fonction principale qui indique le plus précisément et le plus simplement ce que le produit devra réaliser;
- ✓ **2**-Trouver les fonctions secondaires qui répondent à la question « **comment** » le produit sera en mesure de réaliser la fonction principale. Ces fonctions secondaires sont très importantes puisqu'elles définissent les sous-systèmes du produit. On ordonne aussi ces fonctions séquentiellement pour répondre au « **quand** » du haut en bas;
- ✓ **3**- À l'aide de flèches **plus épaisses**, les fonctions critiques ou principales d'une branche de l'arbre fonctionnel doivent être reliées pour visuellement établir le chemin critique de conception.
- ✓ **4**-Aussi, les fonctions liées au contrôle, souvent présentes dans les divers systèmes, doivent être reliées en parallèle avec l'aide de **flèches pointillées** de la même façon qu'une boucle de rétroaction ;
- ✓ **5**- La dernière branche du bas de l'arbre doit être réservée pour les **fonctions de protection** (environnement, utilisateurs, composantes internes, etc.) d'un produit qui sont communes à tous les produits.

Ceci est d'ailleurs illustré sur l'arbre fonctionnel de la machine « Percus_ProV1 » en prenant bien soin d'indiquer la nature technique des fonctions concernées ;

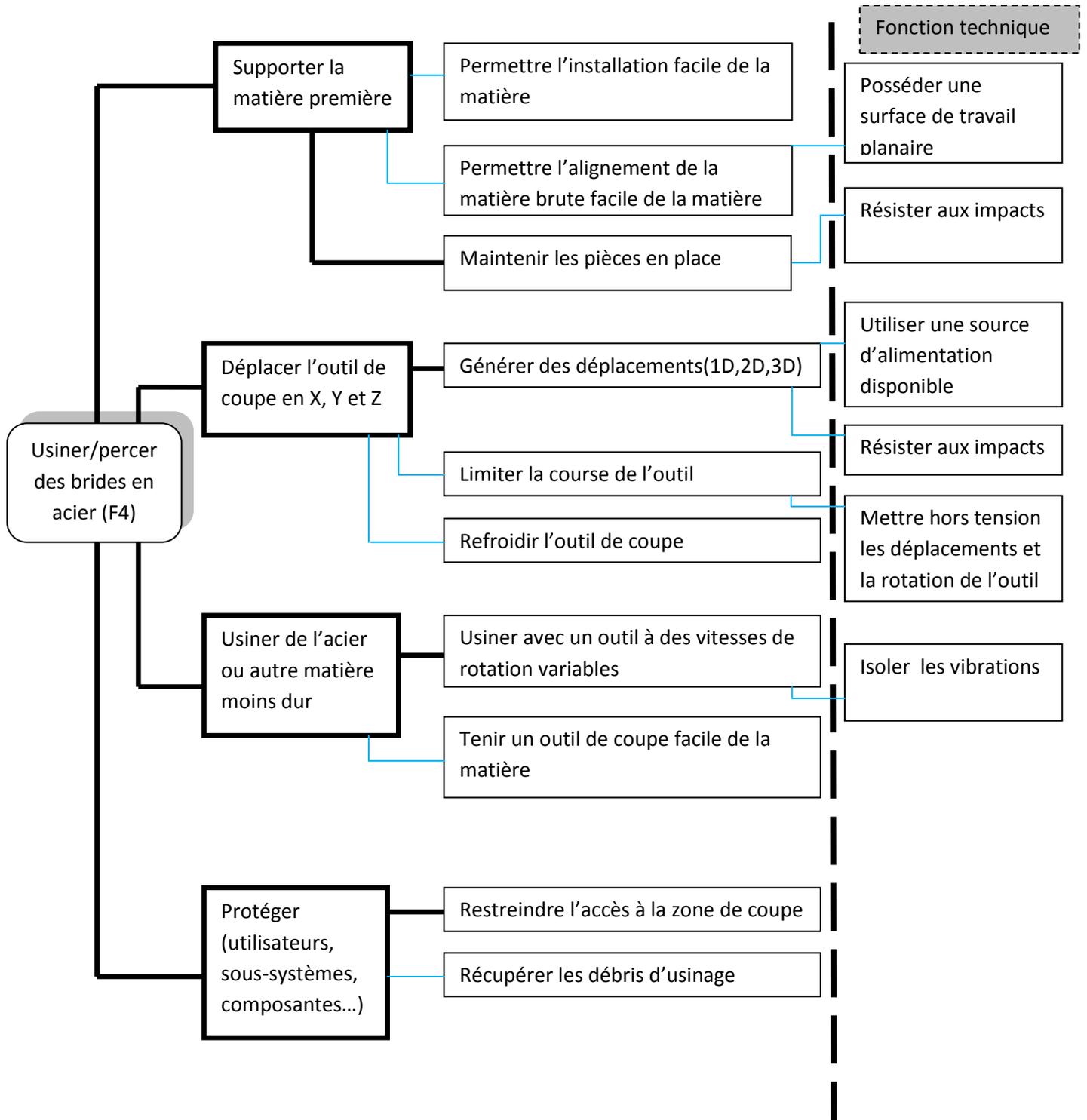


Figure 7: Arbre fonctionnel de la machine « Percus ProV1 »

Une fois que l'arbre fonctionnel est complété, il doit être une représentation intuitive, claire et sans ambiguïté des fonctions que le produit doit remplir.

Pour vérifier l'exactitude de l'arbre fonctionnel, on peut parcourir l'arbre de gauche à droite en posant séquentiellement la question « comment **fonction**? » (Ou de la droite vers la gauche en utilisant « pourquoi **fonction**?») Et en vérifiant si les fonctions secondaires et tertiaires permettent d'y répondre clairement.

Ici le terme **fonction** est remplacé par l'expression complète d'une fonction. Pour ce qui est du « quand », on peut se demander quel serait l'ordre d'exécution des fonctions du produit de haut en bas de l'arbre fonctionnel.

Il est très important de remarquer qu'après la réalisation de l'arbre fonctionnel, les sous-systèmes du produit apparaissent.

Pour la machine « Percus_ProV1 », ils sont les suivants :

- Sous-système de support de la matière première
- **Sous-système de déplacement de l'outil**
- Sous-système d'usinage de la matière première
- Sous-système de protection

Ces quatre sous-systèmes couvrent tous les aspects de conception sur lesquels il faudra travailler pendant la phase de recherche des concepts. Encore une fois, on remarque qu'aucun aspect de contrôle n'est mentionné puisque la configuration du sous-système de commande est dictée par les résultats du MIP. On ne considère donc plus ce sous-système pour le moment. On sait toutefois que la machine possède réellement **cinq sous-systèmes**.

2.3. La Structure fonctionnelle du projet

Suite à cet exercice de synthèse des fonctions, une dernière étape de l'analyse fonctionnelle permet de valider et de compléter s'il y a lieu la liste des fonctions de l'arbre fonctionnel. Cette étape consiste à construire **la structure fonctionnelle** du produit.

Cette dernière est un schéma bloc incorporant majoritairement ou exclusivement des fonctions d'usage (selon le produit), les intrants et extrants du produit ainsi que les flux de matières, d'énergie et d'informations.

Par cet exercice, on est en mesure de vérifier la classification des fonctions en sous-système et l'interaction entre les fonctions qui les composent.

Évidemment, si des incohérences sont présentes dans le système (défini par l'arbre fonctionnel), il sera difficile de tracer les flux entre les fonctions. Dans ce cas, certaines fonctions de sous-système pourront être reformulées, éliminées ou ajoutées. Il faut par

conséquent mettre à jour l'arbre fonctionnel lorsque des modifications sont nécessaires en regard de la structure fonctionnelle.

Les intrants et extrants du système sont définis. Les flux généraux entre les sous-systèmes sont représentés par des flèches (matière, énergie, informations).

La Figure suivante montre la structure fonctionnelle générale de la machine « Percus_ProV1 ». Une légende indique le type de ligne pour chacun des flux.

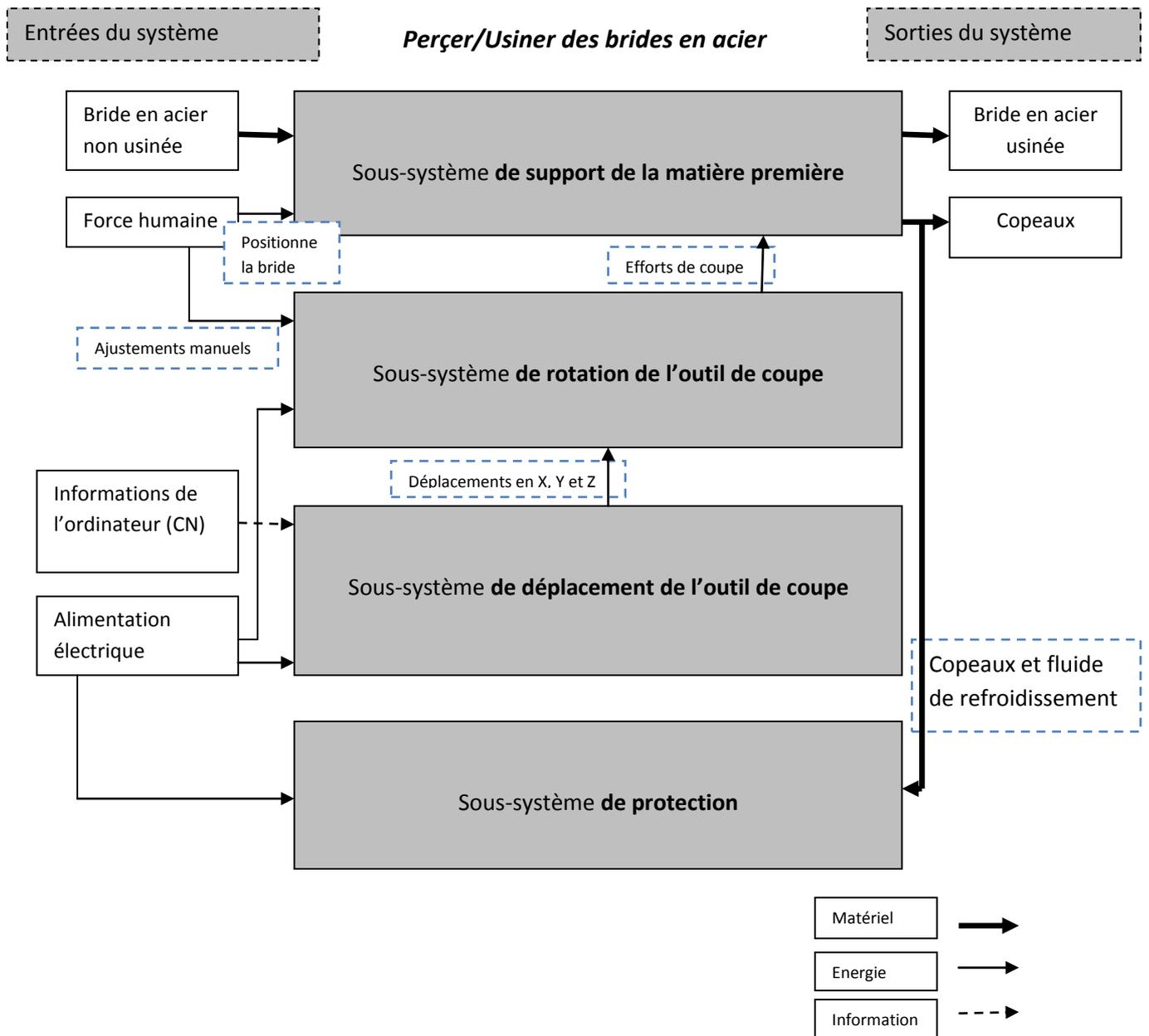


Figure 8: Structure fonctionnelle globale de la machine « Percus_ProV1 »

3. Configuration physique du système

Grâce à la structure fonctionnelle, il est maintenant possible de créer la première configuration physique du produit. Cette première configuration est un schéma simple de la disposition des sous-systèmes dans l'espace qui permet d'établir les interfaces entre ces derniers.

Il est possible de faire plusieurs configurations physiques. Évidemment, la configuration changera de forme au fil des étapes de développement projet, pour tendre vers une représentation plus géométrique (ex. croquis à main levé) des sous-systèmes après la phase de recherche et sélection des concepts.

La configuration physique de la machine « Percus_ProV1 » est montrée sur la Figure suivante ;

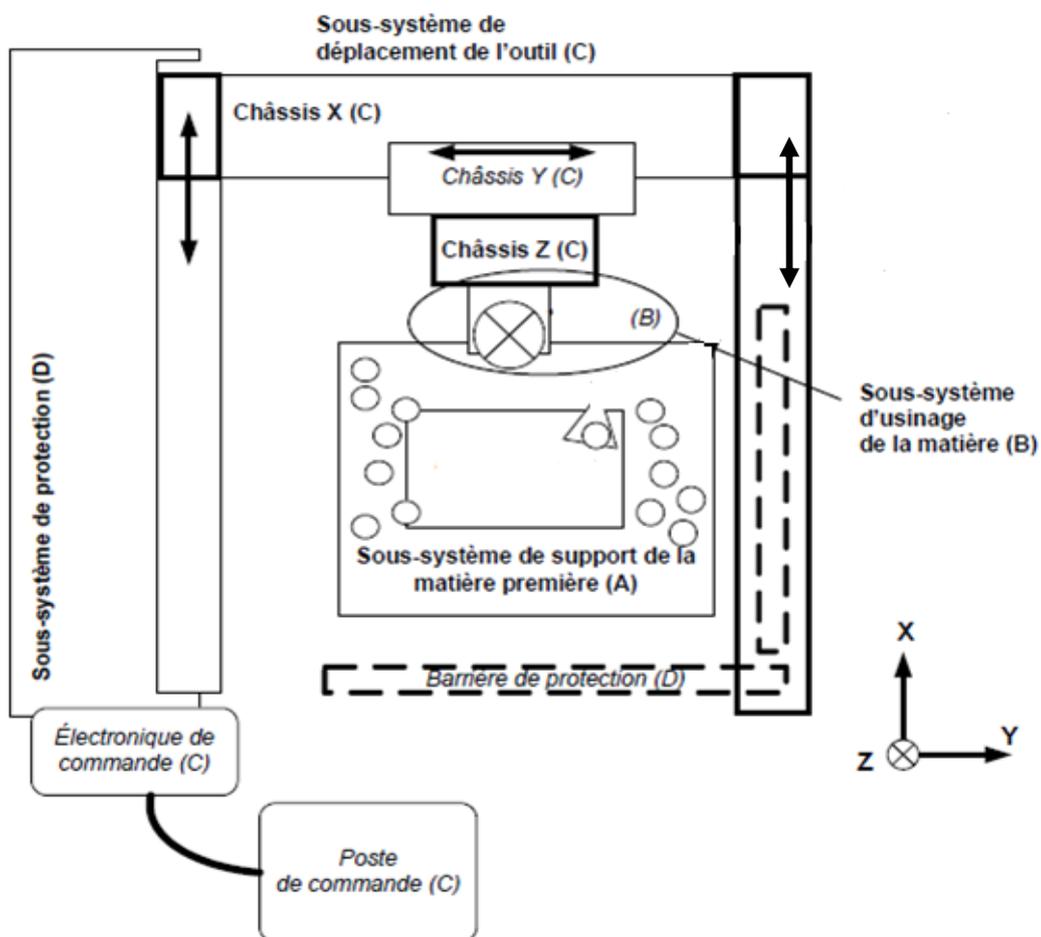


Figure 9: première configuration physique pour la machine « Percus_ProV1 »

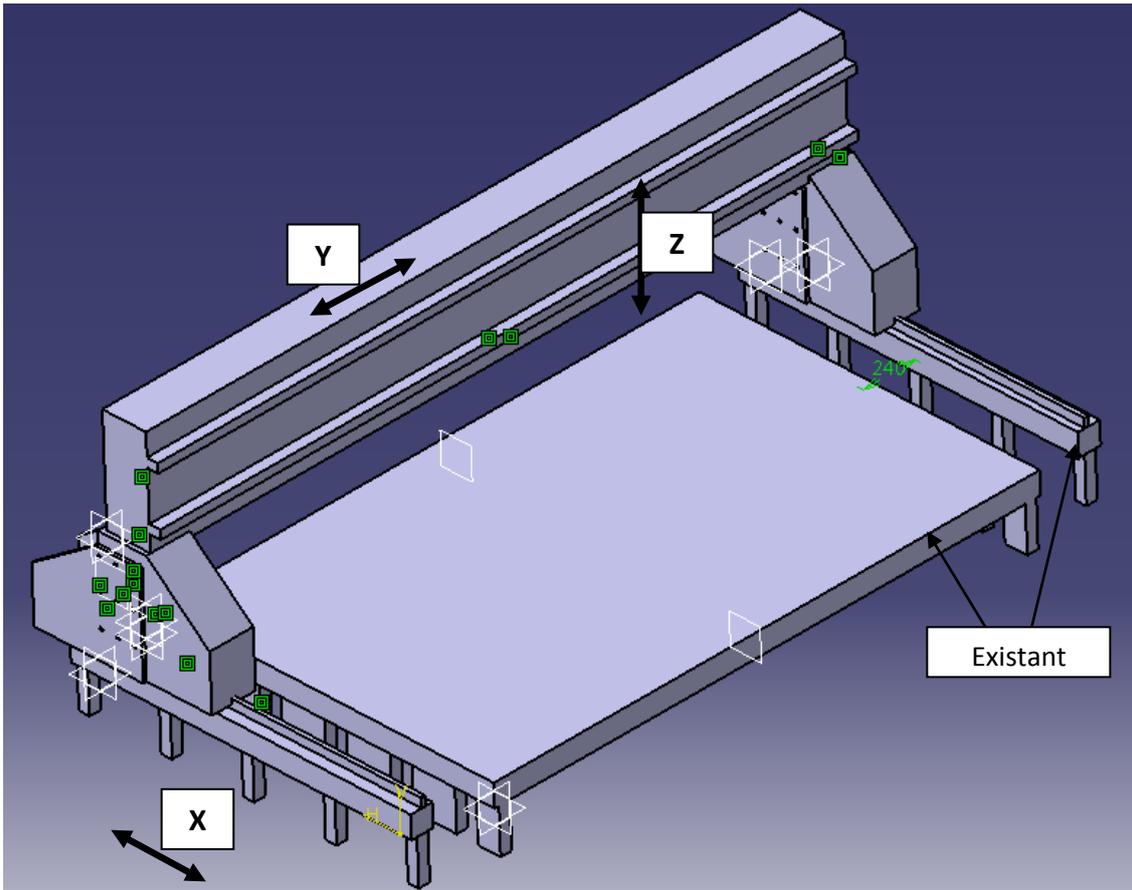


Figure 10: Première Configuration physique de la machine sous le logiciel de conception « Catia »

4. Cahier des charges fonctionnel (CdCF)

La première étape pour la création du « CdCF » est de convertir les fonctions en spécifications fonctionnelles. À noter que généralement les fonctions menant aux spécifications fonctionnelles proviennent en partie des besoins du client eux-mêmes convertis en fonctions.

Pour chaque fonction, on trouve une ou plusieurs spécifications Ce sont ainsi des critères de conception pour chaque fonction.

Ces dernières expriment des **objectifs de conception mesurables** qui permettent de vérifier « **concrètement** » si une fonction en question est réalisée par le produit. Évidemment, toute spécification qui ne peut être **mesurée ou observée**, selon le cas, est totalement **inutile** et par conséquent n'a pas sa place dans le « CdCF ».

On définit pour chaque spécification les éléments suivants :

- Fonction d'origine et son type (usage, estime ou contrainte);
- Expression de la spécification d'ingénierie ;
- Définition de la spécification fonctionnelle indiquant la méthode de mesure si nécessaire;
- Le niveau de la spécification fonctionnelle;
- La flexibilité sur le niveau.

Les spécifications fonctionnelles sont indépendantes des concepts qui seront choisis pour la suite. La première partie du CdCF contient l'ensemble des fonctions d'usage avec leurs spécifications fonctionnelles associées. La deuxième partie du CdCF concerne les spécifications pouvant être dérivées des fonctions d'estime de l'analyse fonctionnelle.

La balance des fonctions d'estime, techniques et de contrainte du produit conservées à la suite de l'analyse fonctionnelle sont archivées dans le Tableau des « **Notes à la conception** ».

Les tableaux 8 et 9 montrent les informations importantes qui composent les deux sections du corps du CdCF.

Tableau 11 : Liste des spécifications fonctionnelles dérivées de l'arbre fonctionnel

No	Fonctions	Type	Spécifications d'ingénierie	Définition	Mesure	Niveau	Flexibilité
F10	<i>Supporter la matière première</i>	usage	Masse de la matière première	Masse maximale admissible pour la manutention			Max
			Longueur de la matière première	Longueur maximal de la table support	ruban à mesurer	2,00 m	Min
			Largeur de la matière première	Largeur maximal de la table support	ruban à mesurer	2,00 m	Min
			Epaisseur de la matière première	Hauteur maximal de brides normalisées	ruban à mesurer	100 mm	Min
F3	<i>Permettre l'installation facile de la matière brute</i>	estime	Temps de fixation de la matière première	Temps requis pour deux personnes à fixer solidement la matière première sur la table de la machine	Chronomètre	Ne devra pas dépasser 5 min	Max
F1	<i>Permettre l'alignement de la matière brute</i>	estime	Précision d'alignement du bord de la matière brute	Précision avec laquelle un bloc d'acier peut être aligné avec les axes de déplacement de la machine	pieu à coulisse (vernier)	0,5 mm	±0,2 mm
		-	Rectitude de la surface d'appui	Écart vertical entre les points de la surface d'appui du moules mesuré avec un indicateur à cadran	pieu à coulisse (vernier)	±0,25 mm	Max
F5	<i>Maintenir la pièce en place</i>	usage	Force de retenue du bloc	Force pouvant être exercée sur le bloc fixé sans que celui-ci ne bouge	peser déposés sur le bloc et application d'effort de coupe sur la pièce	Estimée à 2000 N	Min
			Nombre de degrés de liberté après fixation	-	Aucun mouvement ou vibration ne doit être ressentie durant l'usage	0	-

TABLEAU 11 : Liste des spécifications fonctionnelles dérivées de l'arbre fonctionnel (suite)

No	Fonctions	Type	Spécifications d'ingénierie	Définition	Mesure	Niveau	Flexibilité
F8	<i>Usiner de l'acier ou un autre matériau moins dur</i>	usage	Puissance à la broche	Puissance nécessaire pour permettre les vitesses d'usinage en fonction des efforts de coupe	Spécification de la broche	4 kW	-25 %
F6	<i>Tenir un outil de coupe</i>	usage	Diamètre nominal de la broche	Diamètre nominal de la queue de l'outil pouvant être fixé à la broche	pied à coulisse (vernier)	Selon le trou de perçage	-
F9	<i>Usiner avec un outil à des vitesses de rotation variables</i>	estime	Plage de vitesse variable	Plage de vitesse sur laquelle l'outil de coupe peut tourner selon les ajustements de la broche	Spécifications du fabricant	0 à 24 000 rpm	-6000 rpm
F7	<i>Déplacer l'outil de coupe en (X, Y et Z)</i>	usage	Course en X	Déplacement relatif de l'outil par rapport à la pièce	ruban à mesurer	2,50 m	-0,2 m
			Course en Y	Déplacement relatif de l'outil par rapport à la pièce	ruban à mesurer	2,50 m	-0,2 m
			Course en Z	Déplacement relatif de l'outil par rapport à la pièce	ruban à mesurer	0,50 m	-0,1 m
			Erreur de positionnement	Déviations maximales de la position pour une opération d'usinage continue	Mesure de la distance entre le zéro pièce initial et final résultant de la déviation de la position, pied à coulisse ou tête de la machine munie d'une pointe	-	-

TABLEAU 11 : Liste des spécifications fonctionnelles dérivées de l'arbre fonctionnel (suite)

No	Fonctions	Type	Spécifications d'ingénierie	Définition	Mesure	Niveau	Flexibilité
F11	Générer des déplacements (1D /2D / 3D)	usage	Précision d'usinage des surfaces	Différence entre les dimensions géométriques virtuelles (CAD) et les dimensions réelles	ped à coulisse (vernier)	-	-
			Précision de la position de l'outil	Erreur de position de l'outil lorsque les 3 axes sont à leur extrémité par rapport au "zéro machine"	Usinage d'une pièce aux extrémités des axes et vérification dimensionnelle	-	-
			Résolution de positionnement	Distance théorique entre 2 points consécutifs sur les 3 axes	Spécification des variateurs de vitesse et des moteurs choisis	souhaité 0,01 mm	+0,01 mm
			Vitesse d'avance bi ou tridirectionnelle	Vitesse d'avance de l'outil selon 2 ou 3 axes simultanément	Indicateur du contrôleur ou ruban à mesurer et chronomètre	Max possible	-
			Vitesse de déplacement rapide	Vitesse de déplacement rapide (sans usinage)	Indicateur du contrôleur ou ruban à mesurer et chronomètre	Max possible	-
F2	 limiter la course de l'outil	usage	Charge de disjonction de l'outil	Charge limite que peut prendre l'outil pour éviter une surcharge à l'outil ou aux dispositifs de déplacement en X, Y et Z.	Mesure de courant lors de la disjonction avec un multimètre	Disjoncteur approprié	-
F15	Restreindre l'accès à la zone de coupe	usage	Distance de sécurité	Distance sécuritaire minimale à laquelle un utilisateur peut s'approcher de la zone d'usinage	ruban à mesurer	2 m	Min.

Tableau 12: Liste des spécifications fonctionnelles dérivées des besoins du client et des notes à la conception

No	Fonctions	Type	Spécifications d'ingénierie	Définition	Mesure	Niveau	Flexibilité
F103	<i>Être durable</i>	estime	Temps d'occupation machine annuel	Temps requis pour usiner le maximum de pièces en heures)	Estimé	Selon la durée de vie des composants	-
F104	<i>Être abordable</i>	contrainte	Coût du prototype	Coût d'achat des composantes qui entrent dans la fabrication et l'installation de la machine. Sont exclus: les salaires, les coûts de fabrication	Somme initiale de composants	-	-
F119	<i>Permettre l'installation dans l'atelier sur la table de la machine d'oxycoupage</i>	contrainte	Surtout pour la course suivant l'axe X	La machine ne doit pas interférer avec l'axe d'oxycoupage	ruban à mesurer	-	Max.
			Longueur de la plus grosse pièce	pouvoir déplacer la plus grosse pièce par les palans	ruban à mesurer	3 m	Max.

5. Notes à la conception

Bien entendu, on conserve tout de même le reste des fonctions qui ont été retenues à la suite de l'analyse fonctionnelle et qui ne peuvent être traduites par des spécifications. Ces dernières sont répertoriées dans les notes à la conception, un tableau annexé au cahier des charges fonctionnel (CdCF). Ces fonctions (d'estime, de contrainte, technique ou même d'usage) traduisent des critères de conception intéressants qu'il est souhaitable de garder en mémoire.

Les notes à la conception sont des critères complémentaires pour sélectionner les meilleurs concepts.

Le tableau suivant montre l'essentiel de l'information des notes à la conception du projet « Percus_ProV1 ».

Tableau 13: Notes à la conception

Fonction	Type	Kano	AFNOR	Description/justifications
Permettre la mise hors tension pendant le changement d'outils	contrainte	C	IND	Lors du changement d'outil, un mécanisme de verrouillage doit empêcher le déplacement des axes et le fonctionnement de l'outil rotatif.
Posséder un panneau de commande	contrainte	C	IND	La machine Percus_ProV1 doit être munie d'un panneau de contrôle standard similaire aux machines outils de l'atelier d'usinage. Des boutons poussoirs démarrer, arrêt, arrêt d'urgence sont à prévoir. Aussi, il ne doit pas être possible de redémarrer tant que le bouton d'urgence n'est pas remis en position neutre.
Arrêter en cas d'urgence	contrainte	C	IMP	Utiliser un disjoncteur approprié pour que la machine cesse de fonctionner en cas de surcharge de la mécanique
Permettre l'installation dans le local de la société	contrainte	C	IND	...
Faciliter le déplacement des pièces de la machine	contrainte	C	ACC	...
Faciliter le remplacement des pièces usées	estime	B	IMP	...
Faciliter la lubrification	estime	B	IMP	...
Permettre l'utilisation d'outils de coupe standards	estime	B	IND	...

Permettre la visualisation de la zone d'usinage	estime	P	IMP	...
Être modulaire	estime	P	INT	...
Limiter l'utilisation d'appareil de levage	estime	P	INT	...
Permettre l'utilisation d'un appareil de levage	estime	P	IMP	...
Faciliter l'accès aux attaches reliant les composantes à entretenir (boulons, rivets, vis, etc.)	estime	P	INT	...
Permettre l'assemblage/désassemblage des pièces sujettes à l'usure	estime	P	IMP	...
Favoriser la durabilité des outils	estime	P	INT	...
Interrompre l'alimentation électrique	technique	B	IND	...
Résister aux impacts	technique	B	IND	...
Empêcher les surcharges de puissance	contrainte	C	IND	Un disjoncteur et ou des fusibles permettront de protéger tout le système électrique en cas de surcharge.
Isoler les vibrations	technique	P	IMP	...
Posséder une surface de travail plane	technique	P	IND	...
Minimiser l'alignement des pièces à assembler	technique	P	INT	...
Permettre la mise sous tension	technique	B	IND	la machine doit posséder un bouton de démarrage.
Mettre hors tension les déplacements et la rotation de l'outil	technique	B	IND	...
Protéger certaines composantes des appareils de levage	usage	P	IMP	...

6. Emergence et sélection des concepts

Avant d'entreprendre la recherche de concepts, voici un résumé des choix technologiques qui s'imposent à l'heure actuelle:

- Les tôles en acier seront la matière principale pouvant être usinée par l'axe.
- Une broche commerciale permettra d'usiner l'acier.
- le logiciel commercial CAO « Catia » sera la base du procédé de conception.
- Les tables de translation en X, Y et Z seront actionnées par des moteurs électriques (pas à pas ou servomoteurs) ;
- Un système de rails avec roulements linéaires à recirculation de billes seront utilisé pour les déplacements des axes X, Y et Z en translation ;
- Des vis à billes avec reprise de jeu seront aussi utilisées pour transmettre le mouvement des moteurs aux axes de translation Y et Z ;
- Système à pignon-crémaillère double sera utilisé pour transmettre le mouvement des moteurs pour l'axe X

Avec les informations techniques progressivement recueillies dans les phases précédentes de conception, il est maintenant possible de converger au niveau de certains concepts.

En effet, les contraintes dictées par le projet ainsi que les orientations technologiques permettent la détermination d'une série de concepts. Le sous-système de commande est presque entièrement déterminé avant même d'aborder la phase conceptuelle. C'est d'ailleurs pour cette raison qu'aucune fonction ne faisait référence à ce dernier dans l'arbre fonctionnel.

Par conséquent, l'étude conceptuelle portera presque exclusivement sur les autres sous-systèmes de projet et surtout le sous-système de déplacement de l'outil (partiellement définis par les contraintes sur le choix des composantes mentionnées ci-dessus).

6.1. Génération de concepts

L'étape suivante de la démarche de conception consiste à générer des concepts afin de définir les sous-systèmes pour lesquels il n'y a pas eu de concepts dictés jusqu'à maintenant. Cette étape est une activité de divergence puisqu'on souhaite maximiser la quantité de concepts trouvés sans se soucier nécessairement de leur valeur.

Evidemment, il faut structurer la recherche de concepts pour obtenir des résultats efficacement. Pour ce faire, on utilise la méthode de la matrice morphologique (Les fonctions utilisées dans la matrice sont exactement les fonctions de l'arbre fonctionnel final. Ces dernières définissent donc des parties ciblées (ou thèmes) pour la recherche de concepts.

La structure de la matrice morphologique du projet « Percus_ProV1 » est illustrée dans le tableau suivant :

Tableau 14: Structure de la matrice morphologique du projet Percus_ProV1

Fonctions		Précisions	concept 1	...
F10 - Supporter la matière première	F3 - Permettre l'installation facile de la matière brute	partie 1 : Fixation et support de la matière première		
	F1 - Permettre l'alignement de la matière brute			
	F5 - Maintenir la pièce en place			
	F9 - Usiner avec un outil à des vitesses de rotation variables			
F11 - Déplacer l'outil de coupe en (X, Y et Z)	F43 - Générer des déplacements (1D /2D / 3D)	partie 2 : Configuration des axes		
		partie 3 : Support des axes X et Y		
		partie 4 : Cadre		
		partie 5 : Pont		
	F2 - Limiter la course de l'outil	solution retenue : capteurs de fin de course		
Protéger	F15 - Restreindre l'accès à la zone de coupe	solution retenue : barrière autour de la machine		

Les méthodes traditionnelles de créativité (brainstorming...) permettent de générer une quantité intéressante de concepts pour chacune des lignes de la matrice morphologique.

La matrice morphologique indique donc qu'il faut trouver des concepts pour les cinq parties suivantes:

- parties 1 - Cadre (support de la matière première)
- parties 2 - Fixation de la matière première
- parties 3 - Configuration des axes
- parties 4 - Support des axes Y et Z
- parties 5 - Pont

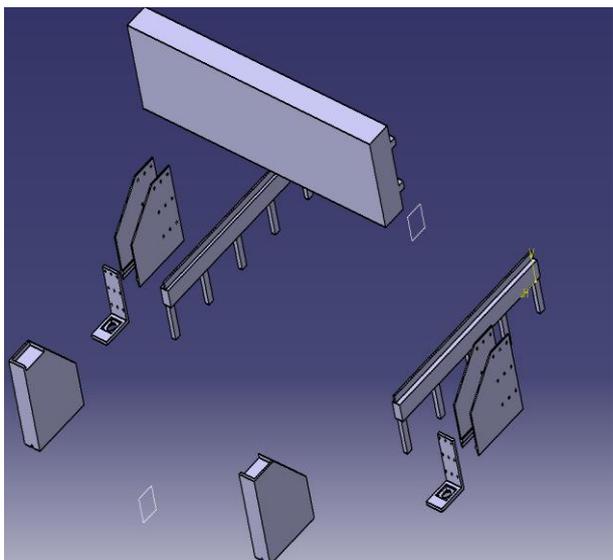
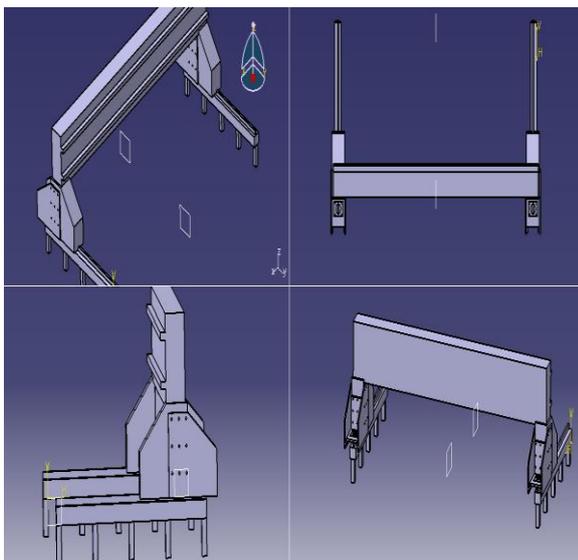
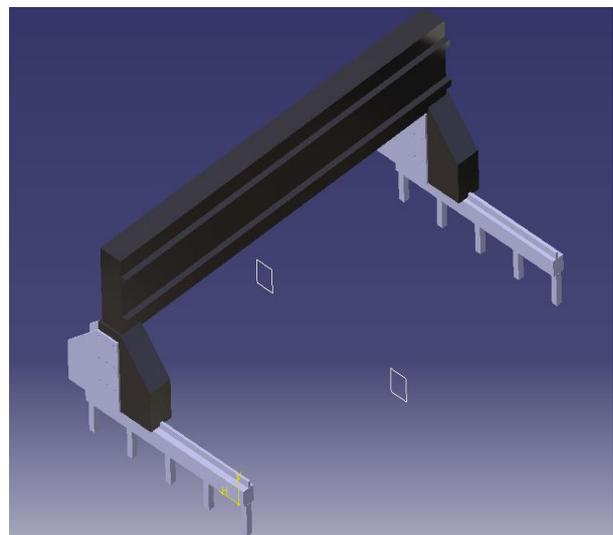
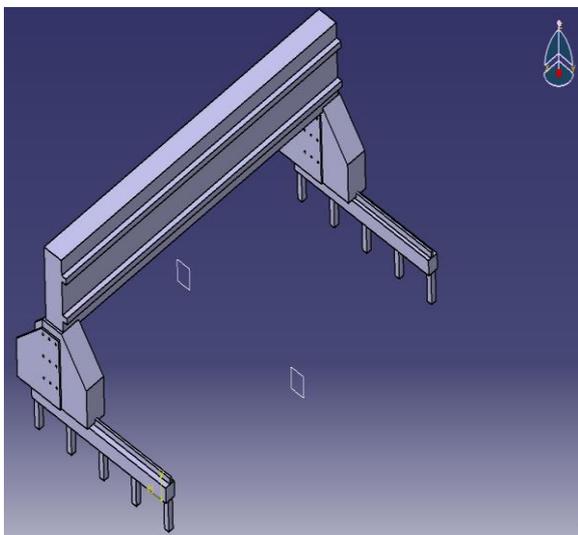
On constate dans la structure de la matrice morphologique qu'il est parfois inutile de faire une recherche exhaustive de concepts pour des aspects simples d'un produit, C'est le cas, entre autre, de la fonction « **F15 - Restreindre l'accès a la zone de coupe** » qui sera accomplie par une simple barrière installée autour de la machine.

6.2. Révision de la configuration physique du projet

A la suite de la convergence dans la recherche de concepts, on peut maintenant construire une représentation 3D grossière de la machine « Percus_ProV1 » avec le logiciel de conception « Catia ».

Dans un premier temps nous avons essayé de trouver une forme globale de la structure, une forme rigide qui respecte les dimensions de la table de la machine existante, sur laquelle il sera intégrer sans prendre en compte les contraintes de réalisations.

Tableau 15: Vues de la structure préliminaire de la machine « Percus ProV1 »



Conclusion

Maintenant que nous avons une représentation concrète de la machine, la phase de conception préliminaire peut être amorcée. C'est dans cette phase que l'on approfondira les calculs et la représentation mécanique concrète du système présenté et de ses sous-systèmes.

Chapitre III : Note de calculs système

Introduction

Chaque fois que l'on conçoit une machine automatique se pose le problème du choix et du dimensionnement des motoréducteurs d'axes. L'actionneur est rotatif, le transformateur de mouvement peut être du type vis-écrou, poulie-courroie ou pignon-crémaillère, et la loi de commande tout ou rien, trapézoïdale ou en sinus.

Et, dans tous les cas, la motorisation doit réaliser un déplacement donné dans un temps maximal, fixé par une cadence imposée.

Cette étape est assez délicate surtout dans le cas de perçage, puisque l'effort de coupe dépend de nombreux paramètres comme:

- Profondeur des passes
- Vitesse de rotation de la broche
- dureté de matière à usiner
- Usure de l'outil

La poussée que devra développer les axes va donc dépendre de ces paramètres mais aussi de la vitesse d'avance. Si on choisi mal le rapport de transmission, nous aurons soit une machine inutilement puissante car extrêmement lente (qui ne sera donc jamais utilisée au maximum de ses capacités), soit une machine inexploitable car pas assez puissante.

Déterminer le type de moteurs, leur puissance et le rapport de réduction de la transmission nécessite donc de comprendre l'ensemble de la machine.

Le présent rapport résume les résultats essentiels de la phase de dimensionnement afin d'estimer les besoins en termes des efforts d'entraînement des axes et pour pouvoir faire une consultation puis une commande de moteurs adéquats pour le bon fonctionnement de la machine « **Percus_ProV1** » ; plus de détails sur la note de calculs sont présentés dans les annexes (*Technique de perçage d'acier* et *note de calculs systèmes*)

Le choix des moteurs est essentiellement basé sur une comparaison avec des systèmes industriels, ensuite sur les besoins en termes de couple pour le bon fonctionnement de la machine et finalement par les contraintes de coût et disponibilité des moteurs sur le marché.

1. Moteurs usuels des applications CNC

Il existe deux types majeurs de moteurs électriques utilisés dans les systèmes à commande numérique : les moteurs pas à pas (stepper) et les servomoteurs DC (Direct Current) ou AC (Alternative current).

Les deux types de moteur ont des modes de fonctionnement différents et ils utilisent d'ailleurs des variateurs de vitesse (drive) différents.

1.1. Moteurs pas à pas

La figure suivante montre des moteurs pas à pas de marque Applied Motion Products (AMP)

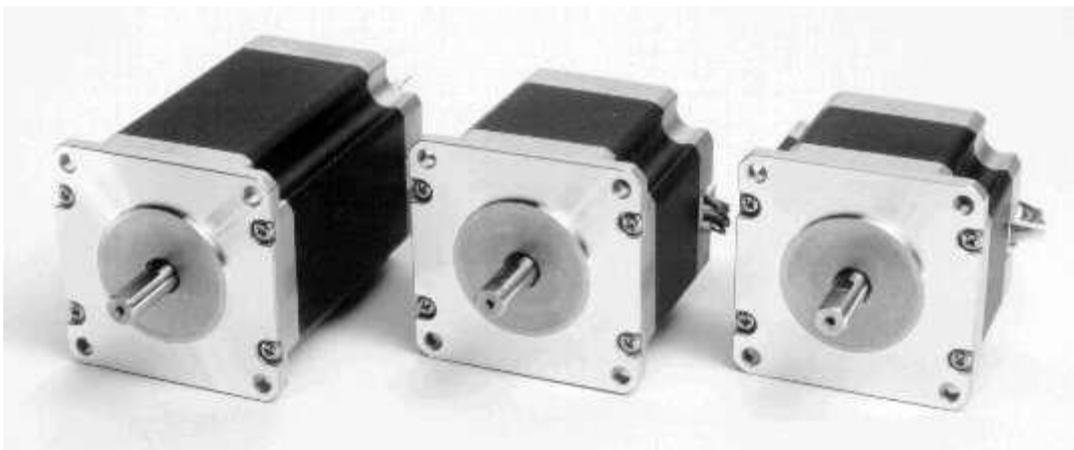


Figure 11 : Moteurs pas à pas de marque AMP

Les moteurs pas à pas fonctionnent avec un signal de direction 0-5V et un autre signal en onde carrée pulsé à une certaine fréquence. Le signal de direction dicte le sens de rotation et, le signal pulsé détermine les déplacements du rotor et la vitesse selon la fréquence. Chaque pulse correspond au déplacement du rotor d'un pas.

La Majorité des moteurs pas à pas ont une résolution de 200 pas par tour (Full Stepping). Les variateurs de vitesse pour moteur pas à pas positionnent le rotor sur ou entre les pas du stator. Ceci permet d'obtenir une résolution plus élevée que 200 pas par tour (exemple: 400 pas/tour [Half-stepping], plus de 400 pas/tour [Microstepping]) et donc un positionnement plus fin. Les moteurs pas à pas développent leur couple maximal à basse vitesse comme le témoigne la figure suivante ;

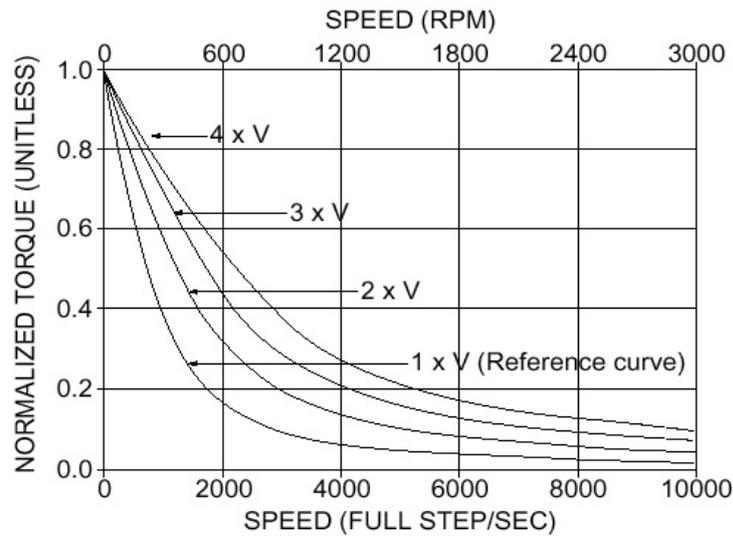


Figure 12 : Courbe de couple en fonction de vitesse de rotation d'un moteur pas à pas

Les moteurs pas à pas et leur variateur de vitesse sont moins coûteux que les servomoteurs. Ce type de moteur pas à pas ne requiert pas de rétroaction par encodeur en raison des pas qui permettent de suivre le positionnement directement. Par contre, il est possible que le moteur saute des pas si le couple sur l'arbre est plus élevé que la puissance disponible ou encore si le signal est bruité ou déphasé momentanément en fréquence. Des encodeurs optiques peuvent être ajoutés pour éliminer la perte de la position si les options du contrôleur le permettent.

❖ Avantages

- ✓ Positionnement avec une certaine immobilisation
- ✓ Peu dispendieux
- ✓ Robuste et fiable
- ✓ Précision de positionnement relativement bonne
- ✓ Asservissement simple (pas de boucle d'asservissement requise)
- ✓ Pas d'ajustement requis

1.2. Les servomoteurs

En ce qui concerne les servomoteurs DC, il s'agit de moteurs électriques qui n'ont pas de références de position comme les moteurs pas à pas. Une tension est appliquée pour les mettre en mouvement. Pour faire du positionnement de précision, un encodeur optique est habituellement monté sur l'arbre. Ce moteur doit être absolument utilisé en boucle fermée. Un contrôle en boucle fermée signifie que la position est mesurée en tout temps par un capteur. Par la suite, des consignes de position peuvent être atteintes en incluant un PID (à effets proportionnel, intégrateur et dérivateur) dans le variateur de vitesse ou dans le contrôleur lui-même qui utilise le signal du capteur.

Ce type de moteur asservit à l'avantage d'avoir un couple constant en fonction de la vitesse. Ceci permet d'utiliser des moteurs de plus petite taille que l'équivalent pas à pas pour une application donnée. La rétroaction enlève la possibilité d'une perte de position éventuelle au détriment d'un ajustement des paramètres du correcteur PID.

Ce type de moteur coute environ le double d'un moteur pas à pas de puissance équivalente et les variateurs de vitesse sont beaucoup plus chers (de l'ordre de 2 fois plus).

La figure suivante montre un servomoteur de marque Schneider Electric.



Figure 13: Servomoteur électrique brushless / AC de marque Schneider Electric

❖ **Avantages**

- ✓ Les Servomoteurs utilisent un circuit en boucle fermée pour transférer des informations à la machine à commande numérique,
- ✓ Les servomoteurs ont une grande précision et résolution grâce à l'encodeur capteur fixe,
- ✓ plus rapides
- ✓ plus puissant pour la même puissance consommée (rendement de >70%)
- ✓ L'alimentation n'est pas vraiment plus compliquée que pour un moteur pas à pas

❖ **Inconvénients**

- ✓ servomoteurs sont généralement plus coûteux que les moteurs pas à pas et plus compliqué à utiliser.
- ✓ Comme la puissance maximale de fonctionnement ne se développe à grande vitesse et le système de ventilation est facilement contaminé ;
- ✓ Les servomoteurs sont plus sensibles aux dommages dus à la surchauffe et la surcharge.

En résumé, les moteurs pas à pas sont faciles à intégrer au contrôleur étant donné qu'ils peuvent être utilisés sans rétroaction. C'est évidemment ce qui sera utilisé dans la machine « Percus_ProV1 ».

Cette option est la seule qui permette de demeurer dans le budget initial du projet. Ces moteurs seront d'ailleurs faciles à installer et à calibrer comparativement à des servomoteurs.

Une économie de temps pourra être réalisée sur cette étape de montage du prototype.

1.3. Grandeurs caractéristiques d'un entraînement avec moteur électrique

La figure suivante résume les principales grandeurs à prendre en compte pour le choix d'un moteur et la modélisation de l'entraînement :

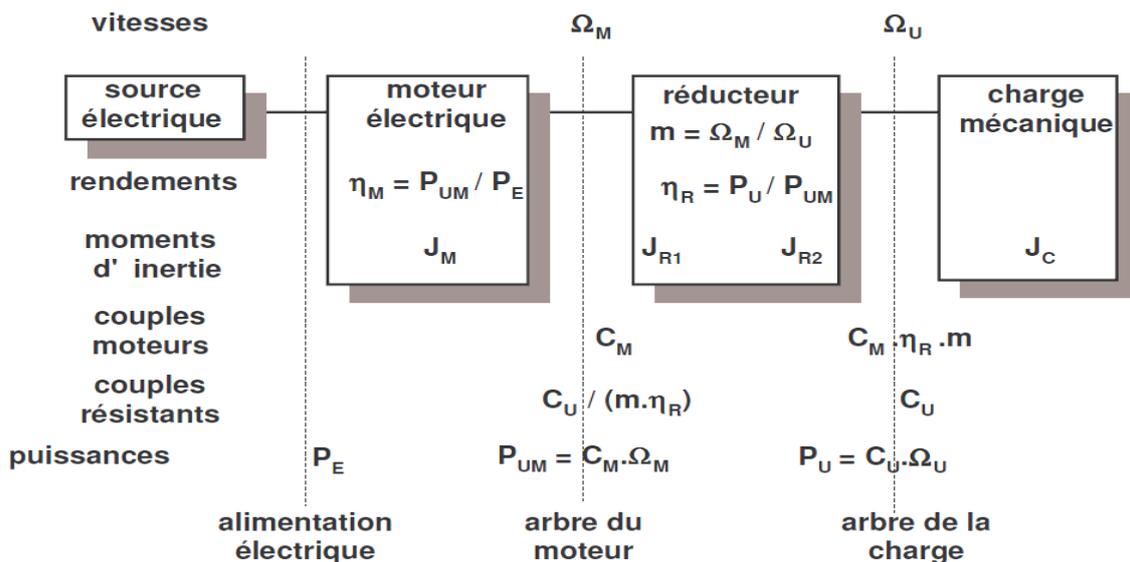


Figure 14: modélisation d'entraînement par moteur électrique

Vitesses, couples, puissances permettent de choisir moteur et réducteur, mais les moments d'inertie ne sont pas à négliger si on souhaite de bonnes performances dynamiques.

Dans un premier temps avoir une grande vitesse n'est pas important, par contre un très bon positionnement est primordial pour le perçage des trous, une précision d'ordre 0.02mm.

2. Choix de moteur pour l'axe X

2.1. Calcul du couple moteur pour un système pignon-Crémaillère

Puisque la machine de perçage va être intégrée sur la table de la machine d'oxycoupage, il est nécessaire de conserver le système qui est basé sur un entraînement par pignon-crémaillère ;

- Crémaillère de module $m=1.5\text{mm}$
- Pignon de même module et de 26 dents

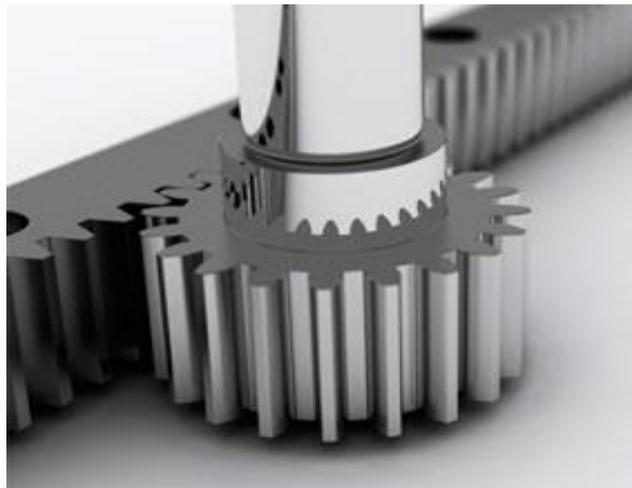


Figure 15: Système pignon-crémaillère

D'après la note de calculs système nous avons :

$$C = F * R$$

- ✓ C : couple moteur en (N.m)
- ✓ F : force linéaire engendrée par le couple en (N)
- ✓ R : rayon de pignon en (m)

Pour un pignon de module 1.5mm de $Z=26$ dents, nous avons le diamètre primitif de pignon « d » est :

$$d = m * Z$$

$$d = 1.5 * 26 = 39 \text{ mm} \text{ donc } R = d/2 = 19.5 \text{ mm}$$

D'autre par la note de calculs système montre que le système pignon-crémaillère de module 1.5mm ne peut déplacer qu'une charge maximale de 500 Kg ;

Par sécurité nous avons choisi de réduire la masse totale du prototype à **400 Kg** ;

Donc on aura besoin d'une Force de :

Poids = masse × accélération g

$$F = m \cdot g = 400 \cdot 9.8 = 3920 \text{ N}$$

Pour $g = 9.8 \text{ m/s}^2$

D'où le couple nécessaire est : $C = F \cdot R = 3920 \cdot 0.0195 = 76 \text{ N.m}$

C'est un couple théorique d'où la nécessité d'une majoration de sécurité de 20% donc

$$C = 76 \cdot (1.2) = 91 \text{ N.m}$$

Remarque :

Couple important d'où le besoin d'utilisation des réducteurs et deux moteurs, le couple nécessaire pour chaque moteur sera donc : **$C = 91/2 = 45 \text{ N.m}$**

Pour des raisons de commande et disponibilité de matériel, le choix final des moteurs pour l'axe X est :

- ✓ **deux moteurs pas à pas de 8.5 N.m**
- ✓ **deux réducteurs de rapport (1 : 5)**

2.2. Architecture d'entraînement pour axe X

Le choix du système d'entraînement pour l'axe X est imposé par la table existante, l'architecture d'un tel système est présentée sur la figure suivante :

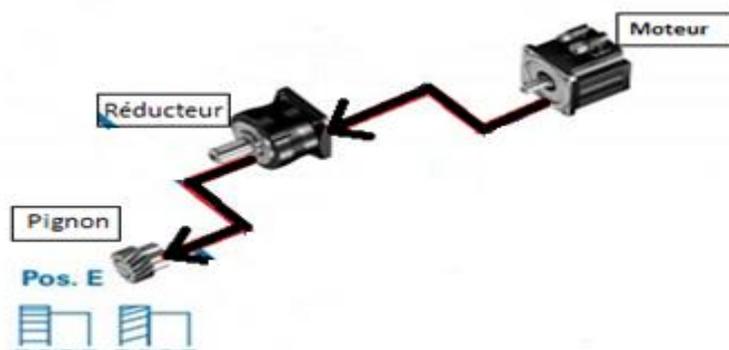


Figure 16: architecture d'entraînement pour l'axe X

3. Choix de moteur pour l'axe Y

3.1. Architecture du système vis à bille

Le choix du système d'entraînement pour les axes **Y** et **Z** est le système vis à billes le plus utilisé dans les applications CNC, il présente beaucoup d'avantages (un bon rendement, une bonne précision...) l'architecture d'un tel système est présentée sur la figure suivante

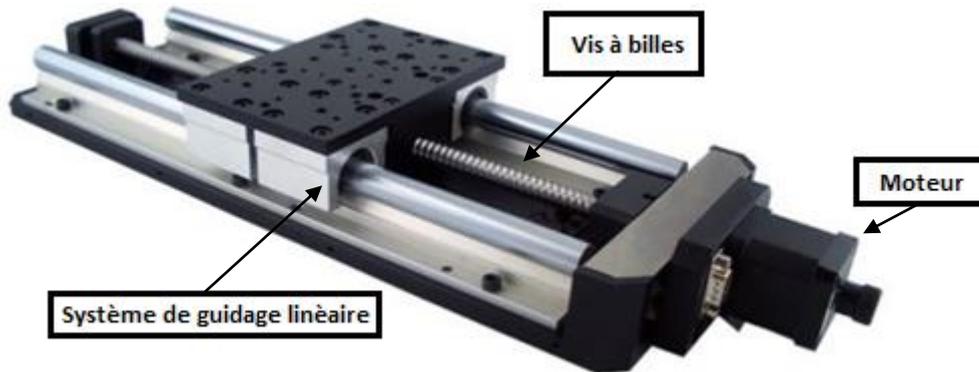


Figure 17: Système de transformation de mouvement : vis à billes

❖ Avantages

- ✓ Rendement élevé : 98% contre 50% pour un filet trapézoïdal classique,
- ✓ vitesses de déplacement élevées,
- ✓ grande précision de guidage (position axiale, répétabilité ...), pas de jeux à rattraper,
- ✓ Échauffement réduit.

❖ Inconvénient

- ✓ prix élevé,
- ✓ montage complexe,
- ✓ moins rigide : guidage moins long et flexions plus grandes,
- ✓ lubrification généralement indispensable.

3.2. Calcul des paramètres vis à billes

Pour trouver le couple minimal du moteur pour un système vis à billes, on devra donc calculer :

- ✓ le couple correspondant à la poussée finale sur l'objet, en tenant compte du frottement vis/écrou, c'est pour un système vis/écrou classique.
- ✓ le couple demandé par le frottement de la collerette d'appui de la vis, sous l'effort axial utilisé ci dessus (si c'est un roulement, voir constructeur)
- ✓ le couple pour vaincre les éventuels frottements de la tige dans ses paliers surtout si l'objet à pousser est décalé par rapport à l'axe de poussée
- ✓ si c'est vertical en remontant, il faut ajouter le poids de l'outil à la poussée nécessaire

⇒ Le couple minimal sera égal à la somme des ces couples + une majoration par sécurité

Pour calculer ce rapport entre le couple et la force d'appui il faut connaître les divers éléments dont nous avons parlé car cela peut varier énormément selon les dispositions prises, Il faut donc modéliser le système pour avoir une approche correcte.

Pour notre cas la modélisation prendra beaucoup de temps donc nous avons choisi de majorer le couple théorique trouver par une marge sécuritaire de 40 % ;

3.3. Calcul du couple moteur nécessaire pour déplacer l'axe Y

Selon un guide constructeur, nous avons choisi une vis à bille :

- ✓ De pas=5mm
- ✓ De diamètre 32mm
- ✓ Et de longueur L=3000mm

Le rendement en général plus de 90%

Tableau 16: Estimation de charge maximale a déplacé par l'axe Y

Axe	Tôles/visserie	Moteurs/ composants	Masse totale sur l'axe
Y	1 Tôle 20 de 750*540mm = 50 Kg (support axe Z)	Estimation maximale de 100 Kg	50+100= 150Kg Par sécurité on prend 200Kg

D'après la note de calcul système, pour déplacer une charge de **200 Kg nous avons** besoin d'une force de **2000 N** ;

D'où le couple moteur nécessaire M_a :

$$M_a = 2000 * 5 / (2000 * \pi * 0.9) = 1.77 \text{ N.m}$$

Remarque :

C'est un couple théorique, il faut une majoration de sécurité pour les frottements, l'inertie...

Par exemple 40% d'où $M_a = 3.54 * 1.4 = 4.96 \text{ N.m}$

Pour des raisons de commande et disponibilité de matériel, le choix final des moteurs pour l'axe Y est :

- ✓ Un moteur pas à pas de 8.5 N.m

4. Choix du moteur pour l'axe Z

De même, le système vis à billes est aussi choisi pour la transformation de mouvement de l'axe Z, avec les mêmes paramètres :

- ✓ De pas=5mm
- ✓ De diamètre 32mm
- ✓ Et de longueur L=750mm

4.1. Calcul du couple moteur nécessaire pour déplacer l'axe Z

Pour l'axe Z deux cas différents se présentent :

- ❖ Pendant la montée

Tableau 17 : Estimation de charge maximale a déplacé par l'axe Z

Axe/ composants en acier	tôles	Moteur/ composants	Masse totale sur l'axe
Z	1 Tôle = 30 Kg	Estimation maximale de 50 Kg (broche inclue)	50+ 30 = 80 Kg On prend 100 Kg

L'axe doit déplacer une charge de **100 Kg** c'est-à-dire **une force de 1000 N**, d'où le couple nécessaire **Ma** :

$$Ma=1000*5/ (2000*\pi*0.9)= 0.88 \text{ Nm}$$

❖ Pendant la descente

L'axe doit convaincre les efforts de perçage de l'acier (voir Annexe Technique de perçage d'acier) d'où une **force de 6400 N** ;

$$Ma=6400*5/ (2000*\pi*0.9)= 5.66 \text{ Nm}$$

Pour une majoration de sécurité de 40% on aura : **Ma= 5.66*(1.4)= 7.9 N.m**

Pour des raisons de commande et disponibilité de matériel, le choix final des moteurs pour l'axe Z est :

- ✓ **Un moteur pas à pas de 8.5 N.m**

5. Synthèse note de calcul : dimensionnement moteurs et systèmes de transformation de mouvement

Dans le but de faire une commande de matériel, une synthèse des résultats est présentée dans le tableau suivant :

Tableau 18 : synthèse de dimensionnement moteur d'axes

axe	Course max (mm)	Type de moteur	Couple Nominal Nécessaire sans réducteur (N.m)	Choix final du couple moteur en (N.m)	réducteur	Système de transformation de mouvement	Charge maximale à déplacer (Kg)
X (solution a Deux moteurs)	~3000	Pas à Pas	8.5 (pour chaque moteur)	8.5	Oui (réducteur planétaire de rapport 1 :5)	Pignon-crémaillère (module 1.5mm) 26 dents	400
Y	~3000	Pas à Pas	4.96	8.5	non	Vis à bille ✓ Ø= 32mm ✓ L= 3000 mm ✓ Pas=5mm	200
Z	~750	Pas à Pas	5.66	8.5	non	Vis à bille ✓ Ø= 32mm ✓ L= 750mm ✓ Pas=5mm	100

Conclusion

Pour des raisons budgétaires, disponibilité de matériel, contraintes de commande, etc. Le choix des moteurs est orienté vers des moteurs Pas à Pas similaires de 8.5N.m avec modification selon le système de transformation de mouvement de chaque axe (avec réducteur ou sans réducteur) ;

Chapitre IV : commande de matériel

Introduction

Parmi les phases critiques qui entraîne dans la plupart du temps, des délais et des retards importantes dans le déroulement du projet il y a la recherche et la commande de matériels nécessaires à la réalisation ;

La commande de matériel passe par plusieurs étapes :

- Identification technique des pièces nécessaires,
- La recherche des fournisseurs et consultation des prix,
- Choix de fournisseur et lancement de la commande ;

Durant cette phase des compétences techniques, de communication ainsi qu'un sens de patience sont indispensables ;

❖ Jugement des offres

Le choix de l'offre économiquement la plus avantageuse est appréciée en fonction des critères suivants :

- ✓ Prix : 50%
- ✓ Valeur technique : 40%
- ✓ Délai de livraison : 10%

1. Liste initiale de matériels nécessaires

Tableau 19 : Liste de matériels nécessaires au projet « Percus ProV1 »

Description	Référence produit	Exemple de produit	Quantité	fonction
Guides à billes	HIWIN HGH 20 CA		12	Patins de guidage linéaire
Rails	Hiwin HGR20 R		(3000mm *4+750mm*2) Ou (1500mm*8+750mm*2)	rails
Système vis à billes	1-Vis a bille (750mm Diamètre 32mm Pas : 5mm) 1- écrou à bille 1- Support d'extrémité BK20/ BF20 1-accouplement flexible 1-cage de l'écrou		1	Système de transformation de mouvement de rotation en translation
Système de commande	Carte de commande		1	Motorisation et commande de la machine
	Moteurs pas à pas Nema 34 de 8.5 N.m		4	
	Drivers des moteurs		4	
	alimentations		2	
	Réducteurs planétaires pour moteurs PAP (rapport de 1 :5)		2	

2. La recherche de fournisseurs

2.1. Fournisseur national

D'après des recherches approfondis dans le marché national, il apparait que les pièces de rechange pour des systèmes CNC sont presque indisponibles, un seul fournisseur trouvé (société d'importation) mais qui ne possède pas tout les pièces nécessaires ;

STE ORASCI
STE ORASCI

devis	N°51559
DATE	13/05/2015

CLIENT :	EXPER ENERGY
----------	--------------

QTE	DESIGNATION	PRIX UNIT	MONTANT	TTC
12	GUIDES ABILLES	290,00	3480,00	
1	RAILS	600,00	600,00	
1	SYSTEME VIS A BILLE COMPLET	650,00	650,00	
1	SYSTEME PIGNON CREMAILLERE	160,00	160,00	
1	SYSTEME PIGNON	250,00	250,00	
1	REFROIDISSEMENT A EAU	2900,00	2900,00	
1	CARTE DE COMMANDE	900,00	900,00	
4	MOTEURS PAS A PAS	900,00	3600,00	
4	DRIVERS DES MOTEURS	600,00	2400,00	
2	ALIMENTATIONS	250,00	500,00	
3	REDUCTEURS PLANETAIRES	1300,00	3900,00	
			HT	16116,67
			TVA 20%	3223,33
			TTC	19340,00



MERCI DE VOTRE CONFIANCE ET FEDILITE

Siège social : mag n° 5 situé au R/c e el oufouk angle khalid ibn el oualid et med zerkoun./Patente n° 13232085;
RC n° 29273; CNSS n° 2638437; IF n° 40163539.GSM 0668645328;
TEL 0535943942; 0535660532.COMPT E:022270000052000509305668/SGMB/FES ATLAS

Figure 18 : fiche de consultation des prix d'un fournisseur national

2.2. Fournisseur International

Une recherche sur un site international de vente des équipements divers « **Aliexpress** », nous a permis de définir deux fournisseurs :

2.2.1. Matériel mécanique

Name	Countries / Brand	Model No.	Quantity	discount Price	Total	Net Weight (kg)
Linear Guide Rail	Taiwan / HIWIN	HGR20R1500C	9	\$73.53	\$661.74	29.84
Linear Guide Block	Taiwan / HIWIN	HGH20CAZAC	2	\$15.30	\$30.61	0.60
Linear Guide Block	Taiwan / HIWIN	HGH20CAZAC	10	\$20.20	\$201.95	3.00
ballscrews	Taiwan / TBI	SFUR3205-4-D-F-C7-750-P1	1	\$124.50	\$124.50	5.53
Ball screw support	China / NL	BK25/BF25	2	\$44.27	\$88.54	4.28
Nut bracket	Taiwan / SYK	HD32	1	\$16.64	\$16.64	0.91
Flexible coupling	China / NL	D40L66-12*20	2	\$6.24	\$12.48	1.00
CTN (Packaging cartons)			6	\$0.00	\$0.00	7.00
Shipping by	HK-DHL	7~12 days to arrive Morocco			\$683.60	
Total:					US\$1,820	52.16

Figure 19 : Fiche de consultation des prix pour matériel mécanique

2.2.2. Moteurs et commande machine

Tableau 20 : liste de consultation des prix pour la partie commande

Item Name	Model	Qte	Price	Remark
Gearbox	NEMA 34 motor 86HS85 with 1:5	2	\$270/set	Leadshine stepper motor 86HS85 With 1:5 reducer ,install together .2 pcs
Leadshine stepper motor	NEMA 34 motor 86HS85	2	\$120/pcs	only a NEMA stepper motor 2 pcs
Leadshine stepper driver	DMA860H	4	\$75/pcs	work at 24-80VDC or 18-70VAC need 4 pcs driver
Leadshine power supply	SPS608	2	\$85/pcs	input 220VAC output 68VDC 8A current 500W
Mach3 control card	V5	1	\$25/set	a brakout board and two pcs cables
All the items in a package, it will have about 24KG, ship with DHL .the shipping costs is \$300, take about 5-7 days can arrive your address.				

❖ Détails du contact

Contact personnel:	Mr. he ction
Adresse de la rue:	3/F, Block 2 Nanyou Tianan Industrial Park
ville:	Shenzhen
Province / État:	Guangdong
Pays / Région:	China (Mainland)
Code postal:	518052
Département:	Sales
Position:	Engineer
Site Web:	http://www.aliexpress.com/store/202210

Servo and step expert
Motion control pioneer

Hection Sales Manager
+86 13088818851

 **雷恩智能**
Leadshine

Leadshine Technology co., Ltd
Sales Dept: Q1A655, 1F, New Huaqiang Plaza,
Huaqiang North Road, Futian Shenzhen China
TEL: +86-0755-82716359
Fax: +86-0755-82716359
E-mail: zhengshun168@aliyun.com
Skype: hection518
Q Q: 51091685

3. Commande de matériels

❖ Fiche « Proforma Invoice » des deux fournisseurs :

Proforma Invoice					Hection-08(B)	
PI No.:	Hection-20150524-18(B)			Issuing Date:	25/05/2015	
CNO:						
Bill to:	Exper-energy			Ship to:	57, zone Industrial area Bir Rami	
Co:	□				14090 Kenitra- Morocco	
Add:	57, zone Industrial area Bir Rami					
Tel:	212 537370278					
Attn:	Exper-energy					
Payment Term		Trade Term		Shipping Way		Currency
Full T/T in advance		CIF		By Air		USD
Item No.:	Description of Commodity			Unit Price	Quantity	Amount
1	Leadshine power supply SPS608			\$85	2	170
2	Leadshine Stepper driver DMA860H			\$75	4	300
3	Leadshine Stepper Motor 86HS85			\$120	2	240
4	Leadshine 86HS85 with 1:5 Reducer			\$270	2	540
5	Mach3 breakout board a set			\$25	1	25
6	shipping cost with DHL			\$290	1	290
Grand total						1 565
Say total US dollar One thousand Five hundred and Sixty-five Only						
Warranty: 12 months for main unit, 6 months for accessories						
Delivery: Within 7 working days upon receipt of payment						
Validity: 7 days from the date of issuing this PI						
Transportation :DHL						
Pay way : with aliexpress.com				Western Union Receiver		
Banking Information (for T/T and L/C):				First Name: :ZHENGSHUN		
Beneficiary: HE ZHENGSHUN				Last Name: HE		
Bank Name: Bank of China, Shenzhen Branch						
Bank Add Honghua Yuan Branch						
Daxin Rd., Shenzhen, P. R. China						
Account No.: 6013 8220 0060 6947 292						
Swift Code: BKCHCNBJ45A						
For and on behalf of Hection's Store						

Figure 20 : Fiche « Proforma Invoice » pour moteurs

Proforma Invoice				
PI No.: PI-MA-15052202			Date: 22nd may. 2015	
1. Shipper Company: SHANGHAI NUOLEI CNC ROUTER EQUIPEMNT CO., LTD Address: No.1, Lane 338, Wen cheng Road, Song Jiang District, Shanghai 201600, China Phone number: +86 21 60517372, +86 18019121697 Contact person: Ada Tu Mail: ada@nolei.com			3. Consignee Company: Contact person: Exper-Energy Mobile: 212 614819605 Tel: 212-537370278 CONSIGNEES Address: 57,zone Industrielle Bir Rami Kenitra, Gharb-Chrarda-Benil Hssen, Morocco Zip code: 14090	
2. For account and risk of Contact person: ABDELHAK ES-SAIDI Phone number: 212 614819605 Mail: abdo_go12@hotmail.fr			6. Payment term T/T In advance 7. Transportation Hong Kong DHL 8. Price term CPT	
4. Final Destination Morocco			5. Shipment Time 9th Jun. 2015	
9. Model	10. Description	11. Qty & Unit	12. Unit Price	13. Total price
HGR20R1500C	Taiwan / HIWIN	9	\$73.53	\$661.74
HGH20CAZAC	Taiwan / HIWIN	2	\$15.30	\$30.61
HGH20CAZAC	Taiwan / HIWIN	10	\$20.20	\$201.95
SFUR3205-4-D-F-C7-750-P1	Taiwan / TBI	1	\$124.50	\$124.50
BK25/BF25	China / NL	2	\$44.27	\$88.54
HD32	China / NL	1	\$16.64	\$16.64
D40L66-12.7*20 with keyway	China / NL	2	\$6.24	\$12.48
			Hong Kong DHL cost:	US\$683.60
Total payment:				US\$1,820.00
Confirm the ball screw machining drawings by email.				
14. Please kindly remit the payment to following beneficiary's bank:				
Pay Way: allexpress				
The Buyer:			The Seller: Ada Tu SHANGHAI NUOLEI CNC ROUTER EQUIPEMNT CO., LTD	

Figure 21: Fiche « Proforma Invoice » pour matériels mécanique

Conclusion

De mon côté, la phase de commande de matériels se termine après l'obtention des fiches « Proforma Invoice » de chaque fournisseur, ensuite le département des achats doit se charger de faire le paiement et la phase de conception de détail peut être déclenchée.

Chapitre V : Conception et plans de détail

Introduction

La phase de conception de détail se résume en gros par la recherche d'une structure qui regroupe 3 contraintes principales :

- La rigidité (résister aux efforts de perçage),
- Faisabilité avec les ressources disponibles de la société,
- Intégrable sur la table d'une autre machine.

La conception est réalisée avec le logiciel de conception « Catia » ;

1. Conception d'une structure rigide et réalisable

Après une visite de l'atelier de l'entreprise, la deuxième phase de conception consiste à trouver une structure réalisable avec les ressources disponibles de la société (des profilés IPE, UPN, tôles en acier, tours, machine d'oxycoupage, presse....)

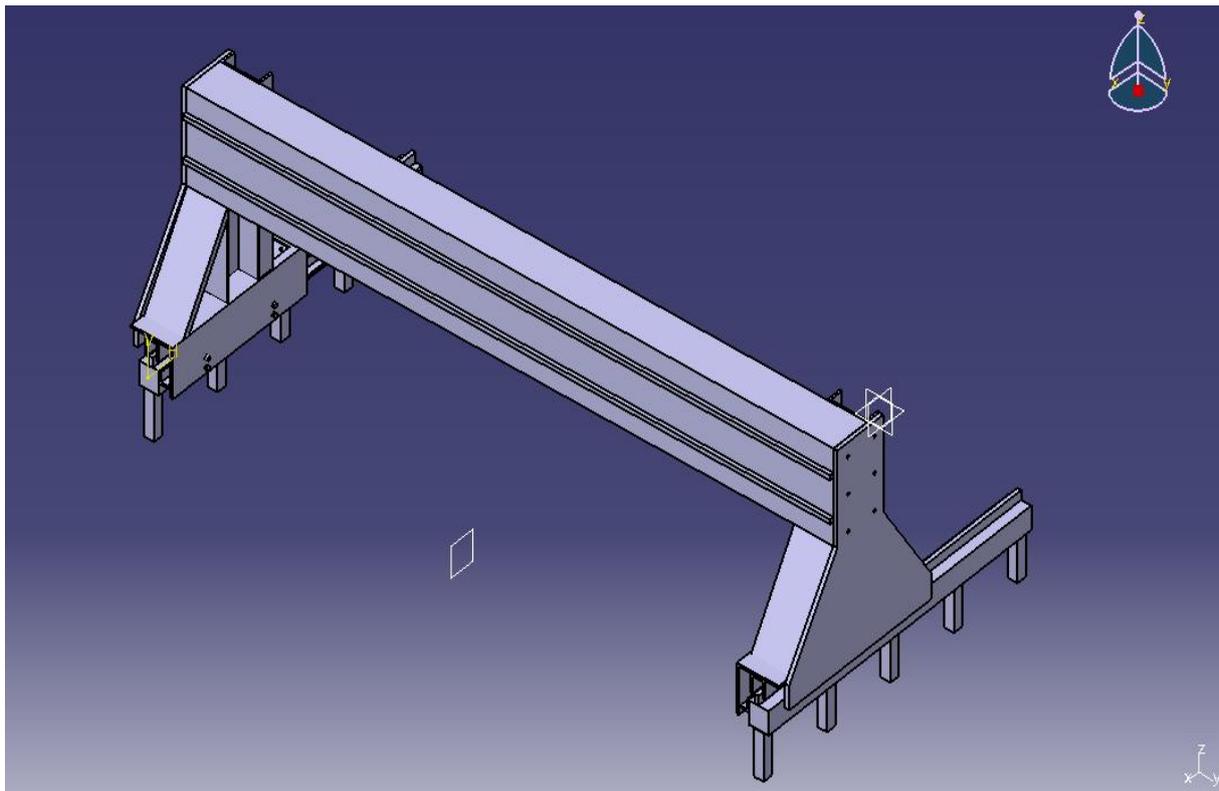
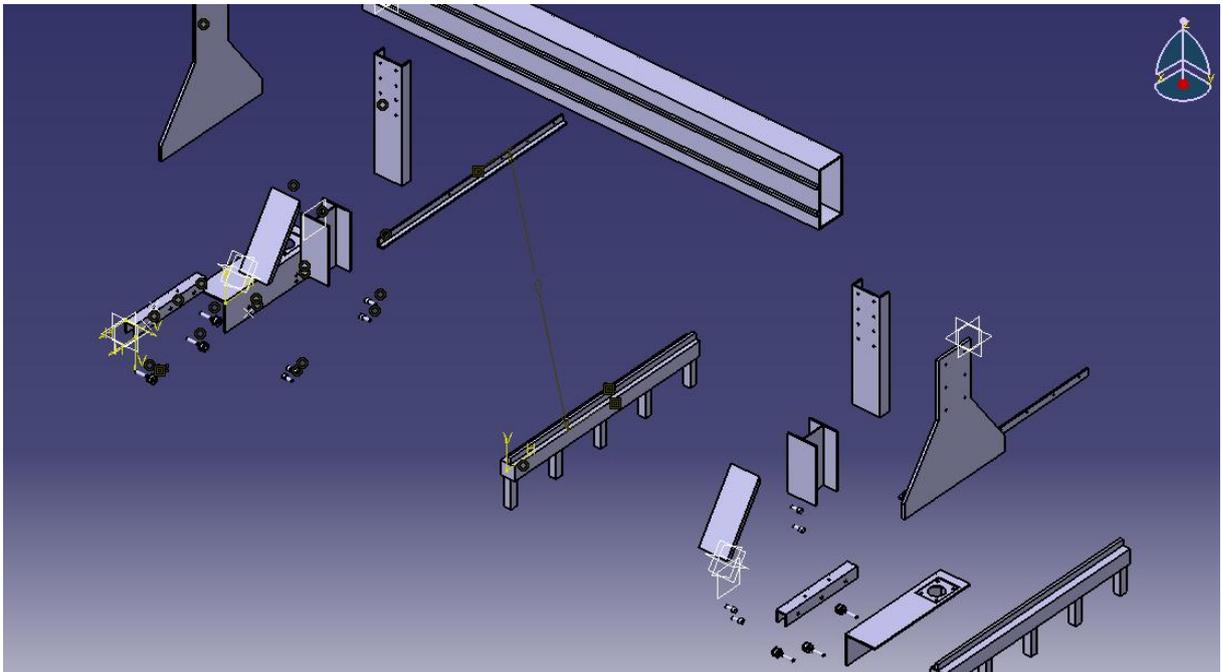
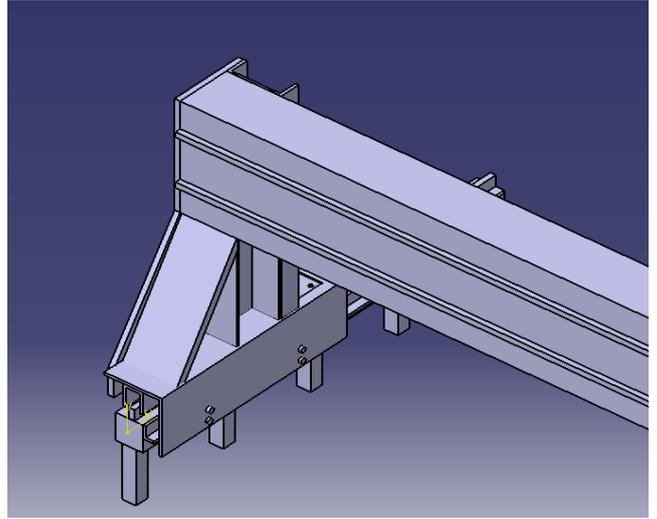
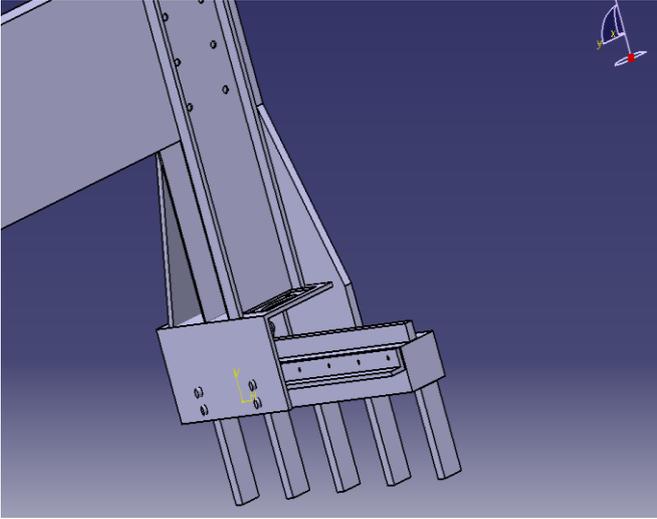


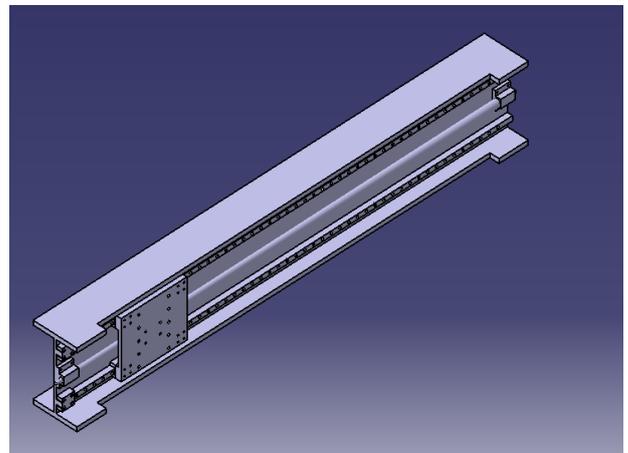
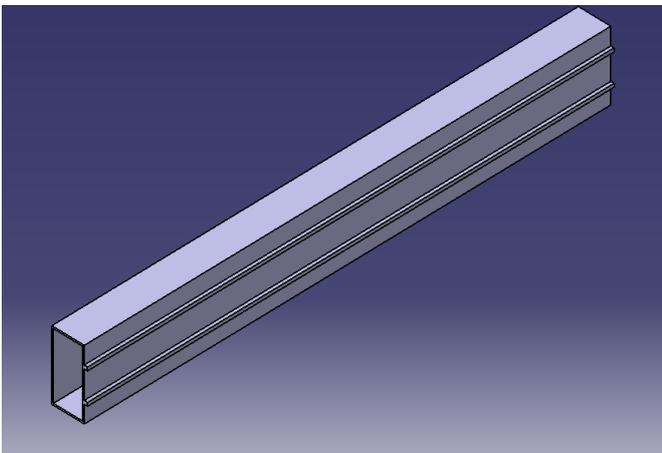
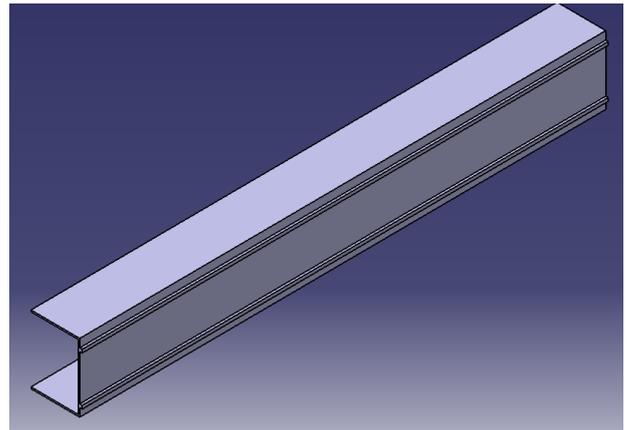
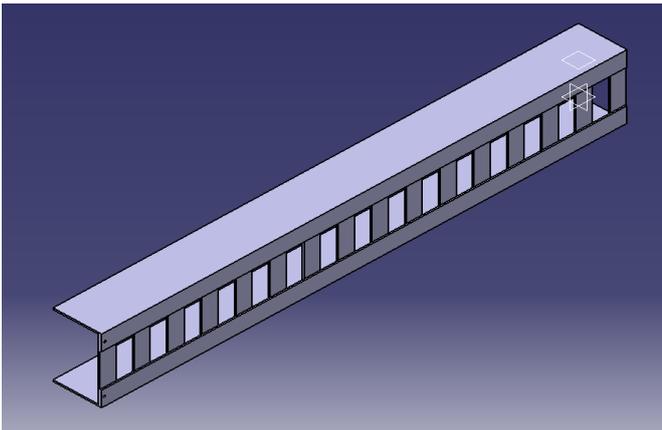
Figure 22 : vue isométrique de la structure réalisable

Tableau 21 : Autres vues de la structure réalisable



1.1. Configurations proposées pour le pont de la structure

Tableau 22 : configurations du pont



Même si tout les solutions proposées pour le pont ont été réalisables dans l'atelier, la difficulté de réalisation se diffère, finalement le choix pour le pont été fixé sur un profilé « IPE 360 » et la structure devient alors comme suit :

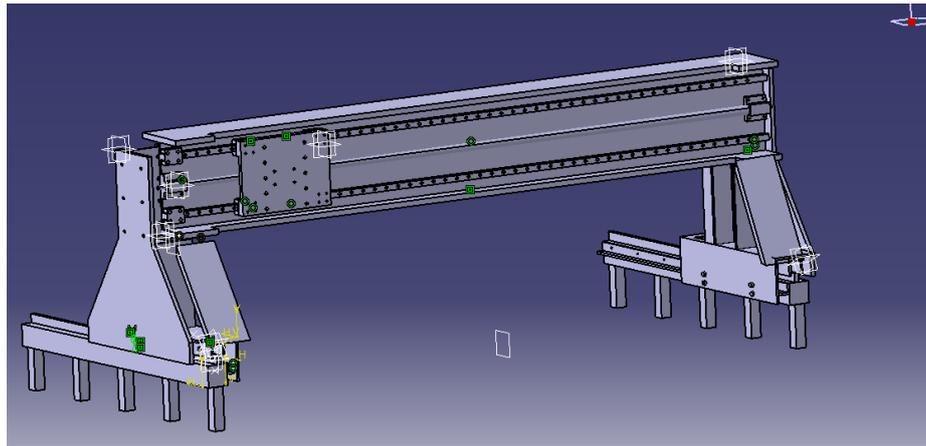
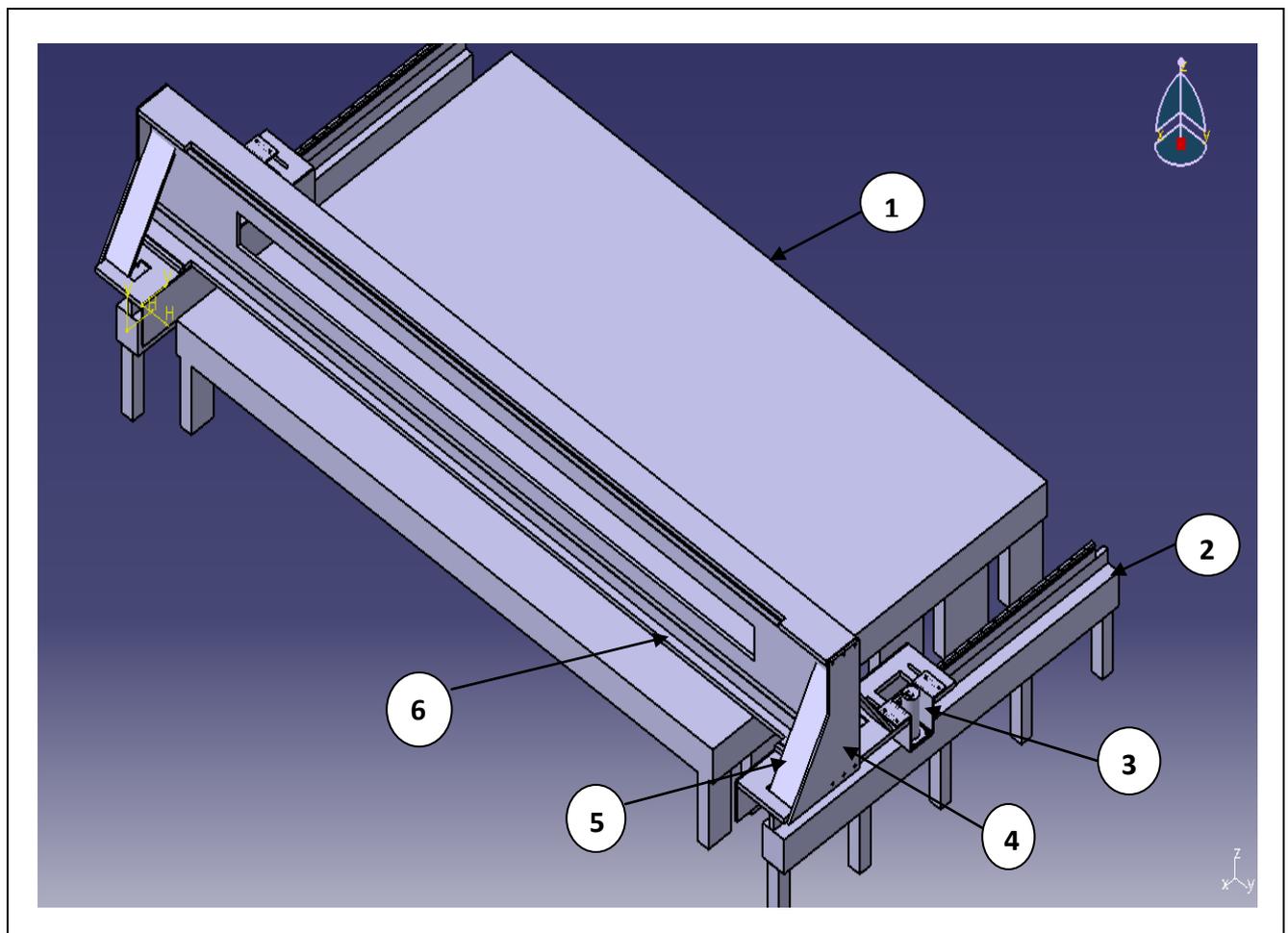


Figure 23 : vue de structure avec le pont en profilé « IPE 360 »

2. Conception finale et mise au plan de la structure

Finalement et par contraintes de poids imposés par les dents de la crémaillère (module 1.5) qui ne peuvent entrainer qu'une charge maximale de 400 Kg ; ainsi, le choix technologique des guides linières nous a abouti à la structure suivante :



No	Description	Remarque	Qté
1	Table existante	-	1
2	Support existant d'axe X	Contient une crémaillère	2
3	Système d'entraînement	Moteur+support de moteur+pignon	2
4	Couvercle	-	2
5	Tôle de triangulation	Pour donner plus d'équilibre à la structure	2
6	Pont de la structure	Profilé IPE 360	1

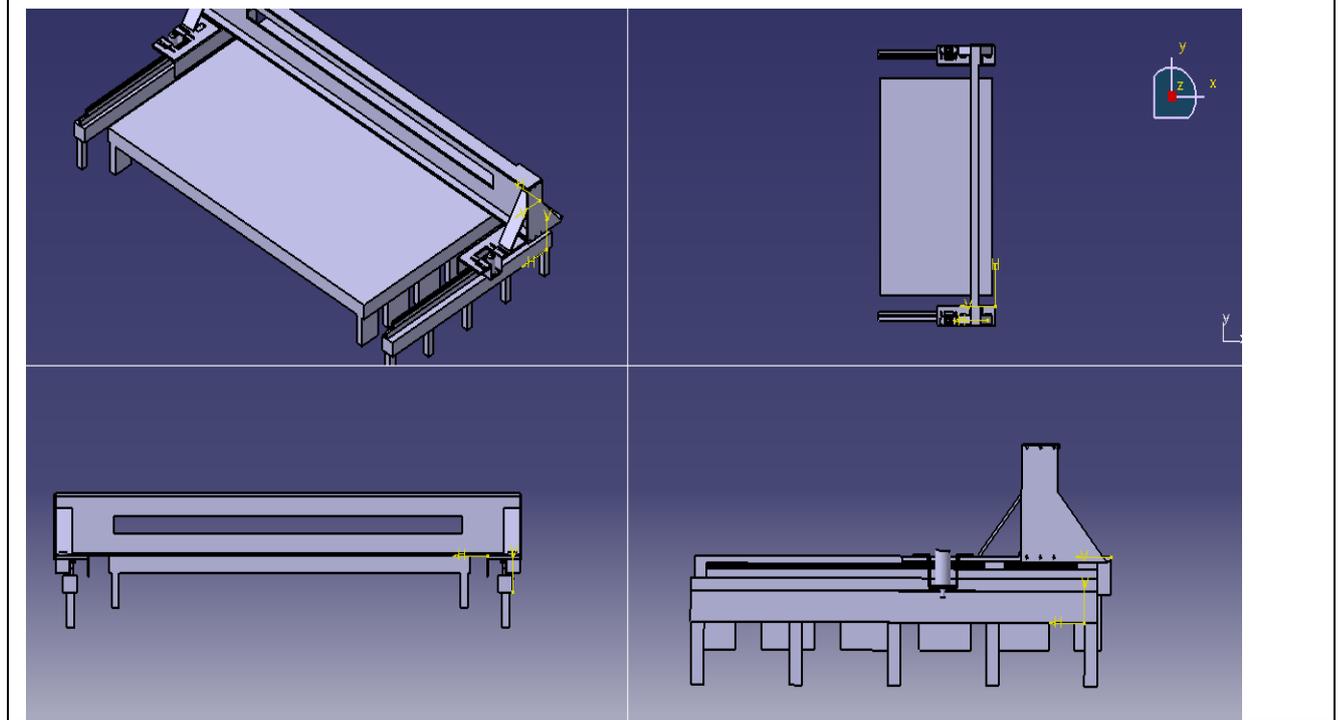
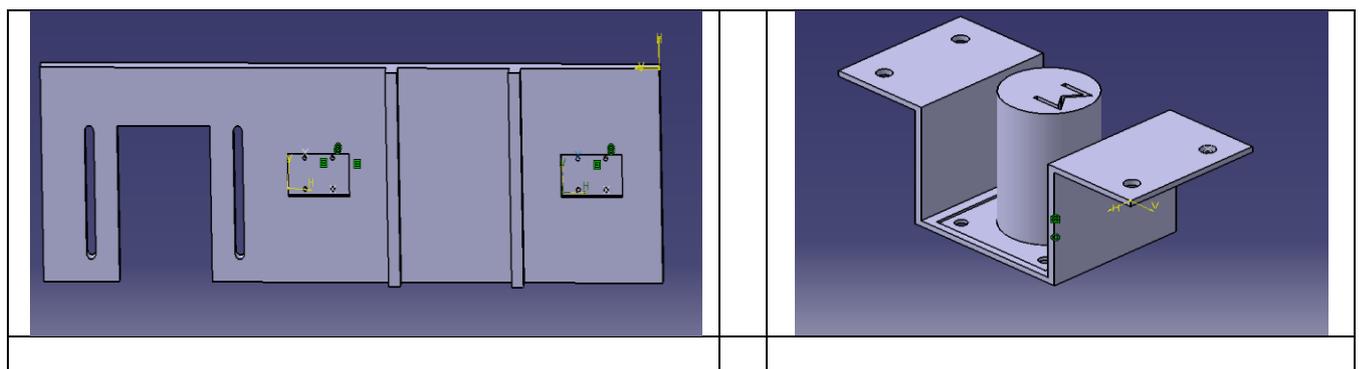
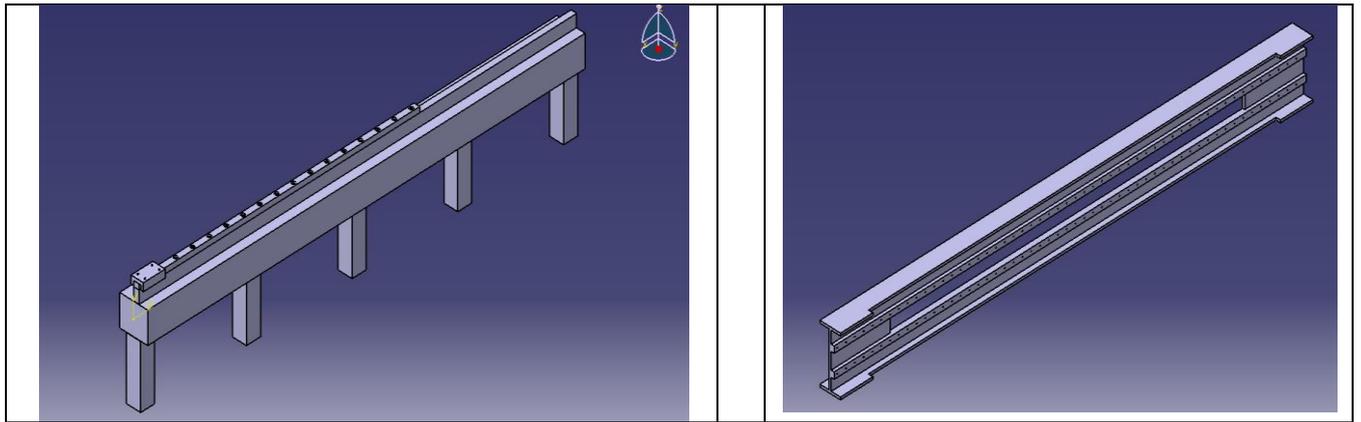


Figure 24 : vues de la structure finale de la machine « Percus ProV1 »





[Figure 25: vue de quelques pièces de la structure finale](#)

Conclusion

Après la confirmation de commande du matériel, les références de ces pièces sont prises comme base pour la mise au plan des pièces à fabriquer, l'annexe « Plans de détail » regroupe la mise au plan de quelques pièces de la structure finale.

Conclusion générale

L'objectif principal du projet était de concevoir une structure rigide, réalisable avec les ressources disponibles et intégrable sur la table existante dans l'atelier de l'entreprise.

Lors de l'étude préliminaire, les spécifications préliminaires sont élaborées afin de mieux cerner les performances attendues de la machine et pour définir le projet d'une façon claire; les contraintes (ressources, délais, risques..) sont également identifiées.

Dans l'analyse conceptuelle, les besoins du client sont identifiés, analysés et classés par affinité. Par la suite, les fonctions de la machine sont identifiées par différentes techniques d'analyse pour élaborer la structure fonctionnelle et déterminer les principaux sous-systèmes de la machine.

Dans la phase de dimensionnement, des calculs analytique des systèmes de transmission ont montré des limites d'utilisation de la machine (poids maximal de la structure, résistance des dentures de système pignon-crémaillère...) Ces derniers présentent des justifications suffisantes pour appuyer le choix de conception.

Lors de la phase de conception préliminaire, la modélisation géométrique des concepts est faite à l'aide d'un logiciel de conception assistée par ordinateur (Catia). Cette modélisation est développée à partir de la structure fonctionnelle et de la configuration physique de la machine. Les technologies des pièces mécaniques, les matériaux, les moteurs sont choisis en fonction des concepts retenus, des performances spécifiées dans le CdCF et des ressources disponibles.

Après la phase de conception préliminaire, la phase de conception détaillée est progressivement mise en route. Les activités de la conception détaillée permettent de préparer des plans de détail pour chaque pièce de la structure.

Finalement, la conception de la structure était réalisée avec succès mais pour la fabrication, trois contraintes majeures avaient été imposées au projet dès l'étude préliminaire, soit :

- Contrainte de temps,
- Indisponibilité du matériel mécanique spécial sur le marché national,
- Manque des ressources humaines pour la fabrication.

Références

- ✓ <http://aluminium.matter.org.uk/content/html/fre/default.asp?catid=129&pageid=2144416345>
- ✓ <http://www.tridistribution.fr/fr/spur-gears-and-racks/engrenage-module-1-5-avec-moyeu.html>
- ✓ <http://stielec.ac-aix-marseille.fr/cours/abati/synch.htm>
- ✓ <http://www.mesures.com/archives/765solcapteursbrushless.pdf>
- ✓ <http://files.iai.heig-vd.ch/Enseignement/Supports de cours/Systèmes électromécaniques/Systèmes électromécaniques I - Cours/Chap10 - Codeurs optiques de mesure de position.pdf>
- ✓ <http://files.iai.heig-vd.ch/Enseignement/Supportsdecours/Systèmes électromécaniques/Systèmes électromécanique s I - Cours/Chap09 - Capteurs inductifs de position.pdf>
- ✓ <http://www.des.pf/itereva/disciplines/sti/prod/ETC/05/C052/23/O5C05223POUTRE/RDM.htm?Flexionsimple8.html>
- ✓ http://iut.univ-lemans.fr/vdlogi/rdm_version_6.html
- ✓ <http://5xproject.dyndns.org/5XProject/tiki-index.php?page=LE%20Projet>
- ✓ http://catalog.item24.fr/fr/index.php?cat=c1000021846_Profil-s-8.html
- ✓ <http://www.hiwin.fr/index.php?scriptlet=HIWIN/Product&id=7&language=fr>
- ✓ <https://www.damencnc.com/fr/-el-ementshttps://www.damencnc.com/fr/-el-ements>
- ✓ <http://www.igus.fr/wpck/default.aspx?PageNr=2404>
- ✓ <http://www.mecsoft.com/freemill.shtml>

✓ <http://cnc25.free.fr/>

✓ <http://www.tgdrives.cz/en/reducers-and-linear-units/planetary-gearboxes/sg-090/>

Annexe A : Technique de perçage d'aciers



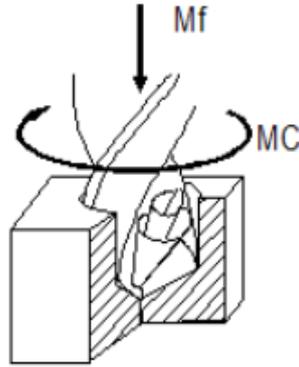
1. Définition

Le perçage est une des principales opérations axiales d'usinage par enlèvement de matière à l'outil coupant. Il permet la réalisation d'un trou cylindrique dans le plein à l'aide d'un foret animé d'un mouvement combiné de rotation autour de l'axe et d'avance suivant l'axe.

2. Principe

Le perçage est obtenu à l'aide d'un outil de coupe appelé foret. Il est animé d'un mouvement de rotation continue et d'un mouvement d'avance, c'est la combinaison de deux mouvements que l'on peut faire varier :

- Le mouvement de rotation (MC) : L'outil tourne sur lui-même, c'est la vitesse de rotation en tour par minute (tr/min).



- Le mouvement de descente (M_f) : L'outil pénètre dans la matière, c'est l'avance en mètre par minute (m/min)

3. Les paramètres de perçage

3.1. Paramètres de coupe

Paramètre	Signification	Unité métrique
D_c	Diamètre du foret	mm
v_c	Vitesse de coupe	m/min
n	Vitesse de broche	tr/min
Q	Débit copeaux	cm ³ /min
f_n	Avance par tour	mm/tr
V_f	Vitesse de d'avance	mm/min
T_c	Temps d'usinage	min
l_m	Longueur usinée	mm
P_c	Puissance nette	kW
M_c	Couple de perçage	Nm
F_f	Force d'avance	N

3.1.1. La vitesse de coupe

C'est le chemin parcouru en 1 minute par un point situé sur la périphérie (Le listel) du foret, elle s'exprime en mètre par minute (m/min).

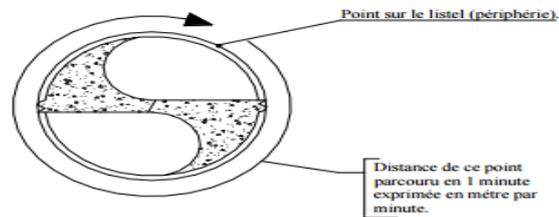


Tableau : valeurs usuelles Vitesses de coupe en fonction de matériau

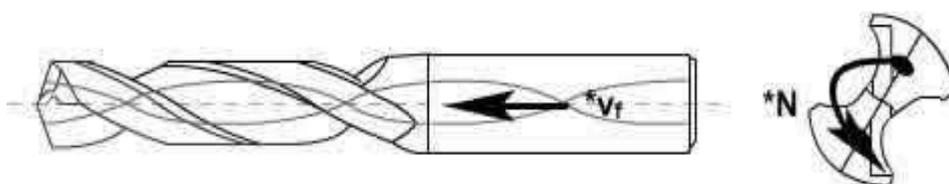
METEAUX	ACIER	ACIER INOX	CUIVRE	ALUMINIUM
Vitesse de coupe En m/min	20	10	30	100

Matériaux	Vitesse de coupe en m/mm	∅ du trou →	Avance en mm par tour				
			2 à 4	5 à 7	8 à 12	13 à 20	21 à 30
Aciers non alliés et faiblement alliés	$R_m < 450 \text{ N/mm}^2$	∠ = 118° hélice standard	0,08	0,12	0,17	0,26	0,32
			à	à	à	à	à
	$450 \leq R_m \leq 650$	∠ = 118° hélice standard	0,08	0,12	0,17	0,26	0,32
			à	à	à	à	à
	$650 \leq R_m < 900$	∠ = 120° hélice standard	0,05	0,10	0,12	0,15	0,25
			à	à	à	à	à
		0,08	0,12	0,15	0,20	0,30	

- Plus le matériau sera dur plus la vitesse de coupe pour ce matériau sera lente.

Pour garder une vitesse de coupe convenable pour chaque matériau, il faut donc régler la machine et sa vitesse de rotation. La vitesse de rotation varie selon le diamètre du foret et la vitesse de coupe du matériau.

3.1.2. La fréquence de rotation de l'outil



✓ d : diamètre de l'outil en (mm)

- ✓ V_c : vitesse de coupe (m/min)
- ✓ n : la fréquence de rotation de l'outil (tr/min)

$$n = 1000 * \frac{V_c}{\pi * d}$$

Le paramètre de performance qui en découle est :

3.1.3. La vitesse d'avance

$$V_f = f_n * n$$

- ✓ V_f : vitesse d'avance en (mm/min)
- ✓ f_n : avance par tour en (mm/tr)

En ce qui concerne la productivité c'est la vitesse d'avance qui en est un des facteurs principaux car elle conditionne :

3.1.4. le temps de coupe

$$T_c = \frac{I_m}{V_f}$$

- ✓ T_c : temps de coupe en (min)
- ✓ I_m : profondeur du trou en (mm)

4. Efforts et puissance perçage

4.1.Intérêt

L'évaluation des efforts de coupe permet :

- de dimensionner les outils et les portes-pièce,
- de déterminer les appuis du montage, en opposition à ces efforts,
- d'évaluer la puissance de coupe afin de choisir la machine-outil.

L'effort de poussée et la puissance de coupe sont des paramètres importants car ils permettent:

- de choisir ou d'investir dans une machine de caractéristiques adaptées à l'opération à réaliser
- de rechercher les conditions de coupe permettant d'utiliser au mieux la puissance de la machine pour assurer le meilleur débit de copeaux en tenant compte des capacités de l'outil utilisé.

4.2.Effort spécifique de coupe

L'effort spécifique de coupe, K_c (N/mm²) est fonction principalement :

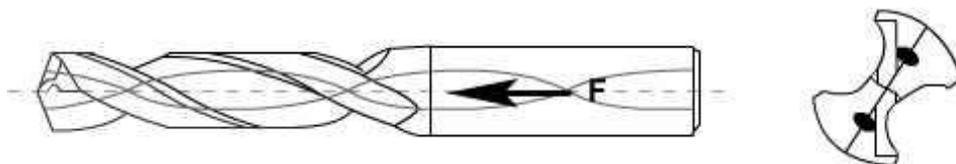
- du matériau usiné
- de l'avance
- de la géométrie de coupe
- de l'usure de l'outil (augmentation de 30 à 40%)

Le tableau suivant donne les valeurs de k_c pour une géométrie et une vitesse de coupe adaptée au matériau

MATÉRIAU USINÉ		Coefficient spécifique de coupe K_c (daN/mm ²)			
		0,1	0,2	0,4	0,8
Avance (mm) →					
Aciers d'usage général	S 185 – S 275	360	260	190	140
	S 355	400	290	210	150
	E 330	420	400	220	160
	E 360	440	315	230	165
Aciers alliés	Acier au manganèse	470	340	240	180
	Acier au nickel-chrome	500	360	260	180
	Acier au chrome-molybdène	530	380	270	200
	Acier inoxydable	520	370	270	190
Aciers non alliés	C 40	320	230	170	125
	C 50	360	260	190	140
	C 60	390	290	210	150
Fontes	FGL 150	190	140	100	70
	FGL 250	290	210	150	110
	Fonte alliée	320	230	170	120
	Fonte malléable	240	170	120	90
Alliages de cuivre	Laiton	160	110	90	60
	Bronze	340	240	180	130
Alliages d'aluminium	Rr<19	110	80	60	40
	19<Rr<27	140	100	70	50
	27<Rr<37	170	120	80	60

4.3.Effort de poussée

Exemple du perçage au foret hélicoïdal monobloc



La poussée axiale F (N) peut être estimée par la formule suivante:

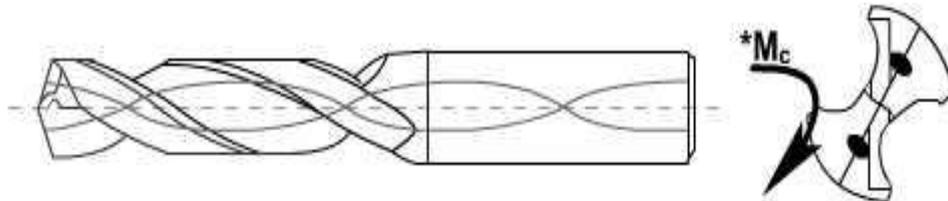
$$F = k' * K_c * f_n * \frac{d}{2}$$

- ✓ K_c : effort spécifique de coupe (N/mm²) dépendant principalement de la matière usinée. (voir tableau précédent)
- ✓ f_n : avance par tour en (mm/tr)
- ✓ d : diamètre d'outil (mm)

- ✓ K' : coefficient dépend de la géométrie de la pointe de l'outil (on peut considérer une valeur moyenne de 0.5)

4.4. Couple de perçage

Exemple du perçage au foret hélicoïdal monobloc carbure



L'expression du couple de perçage est:

$$M_c = K_c * f_n * \frac{d^2}{8000}$$

- ✓ M_c : couple de perçage en (N.m)
- ✓ K_c : effort spécifique de coupe en (N/mm^2)
- ✓ f_n : avance par tour en (mm/tr)
- ✓ d : diamètre d'outil en (mm)

4.5. Puissance de coupe

Exemple du perçage au foret hélicoïdal monobloc carbure, l'expression de la puissance de coupe est:

$$P_c = K_c * f_n * d * \frac{V_c}{240\,000 * \eta}$$

- ✓ P_c : puissance de coupe en (Kw)
- ✓ K_c : effort spécifique de coupe (N/mm^2)
- ✓ f_n : avance par tour (mm/tr)
- ✓ d : diamètre de l'outil (mm)
- ✓ V_c : vitesse de coupe (m/min)
- ✓ η : rendement du système

5. la lubrification pendant le perçage

Parmi la difficulté principale de perçage il y a l'évacuation des copeaux de la zone de coupe, donc de l'intérieur du trou, Pour y remédier, on utilise l'arrosage par aspersion et mieux l'arrosage par le centre de l'outil (sous pression).

La lubrification permet :

- de limiter les frottements entre le copeau et l'outil et entre l'outil et la pièce ;
- de refroidir l'outil afin d'éviter les chocs thermiques néfastes et l'apparition de copeaux adhérents ;
- de faciliter l'évacuation des copeaux.

6. Synthèse : calcul des efforts de perçage pour projet «Percus_ProV1 »

Avec le projet « Percus_ProV1 » on veut faire le perçage de l'acier, pour faire un trou de diamètre 20 mm et de longueur 40mm (la longueur de perçage ne doit pas dépasser 2 fois le diamètre de trou) ;

D'après les tableaux précédents on prend

- ✓ $V_c=20\text{m/min}$
- ✓ $f_n= 0.2 \text{ mm}$
- ✓ $K_c=2600 \text{ N/mm}^2$

Paramètre	désignation	Formule	résultats
Vitesse de broche tr/min	(n)	$n = \frac{v_c \times 1000}{\pi \times D_c}$	318 tr/min
Avance par tour mm/tr	(fn)	$f_n = \frac{v_f}{n}$	0.2 mm/tr

Vitesse de d'avance mm/min	(Vf)	$v_f = f_n \times n$	63.6 mm/min
Débit copeaux cm ³ /min	(Q)	$Q = \frac{D_c \times f_n \times v_c}{4}$	20 cm ³ /min
Temps d'usinage min	(T _c)	$T_c = \frac{l_m}{v_f}$	0.63 min
Puissance nette requis kW	(P _c)	$P_c = \frac{f_n \times v_c \times D_c \times k_c}{240 \times 10^3}$	0.86 Kw
Couple Nm	(M _c)	$M_c = \frac{P_c \times 30 \times 10^3}{\pi \times n}$	25.82 N.m
Force d'avance en (N)	(F _f)	$F_f \approx 0.5 \times k_c \times \frac{D_c}{2} \times f_n$	2600 N

Annexe B : Note de calculs systèmes

1. Système de transformation de mouvement : pignon-crémaillère

Puisque l'axe de perçage va être intégré sur la table de la machine d'oxycoupage, il est été nécessaire de conserver le système qui est basé sur un entraînement par pignon-crémaillère ;

- Crémaillère de module m=1.5mm
- Pignon de même module et de 26 dents

Pour un tel système on a :

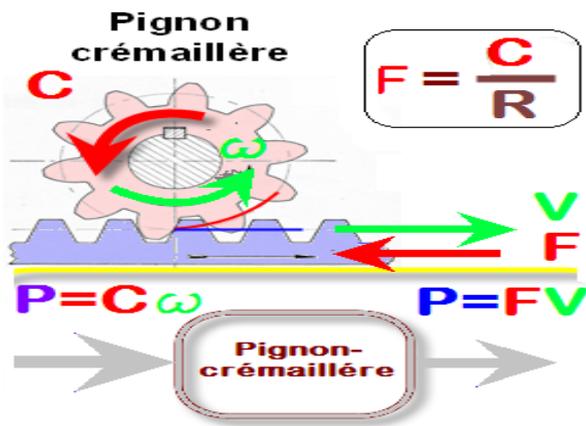


Figure 1 : système pignon-crémaillère

1.1. Conditions d'engrènement

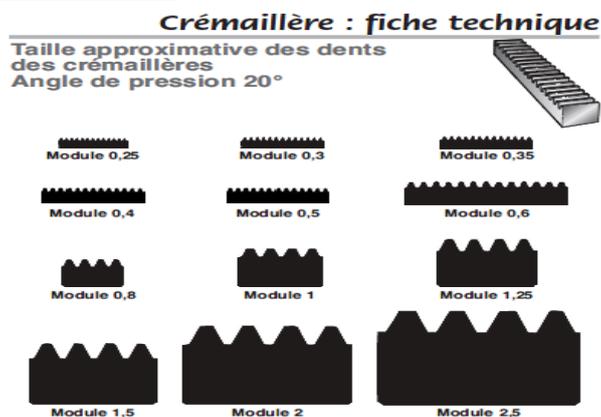
Les bonnes conditions d'engrènement limitent le choix du nombre de dents de chaque pignon. Parmi Les critères à considérer sont :

- ✓ Interférence entre les dents

Z_A	13	14	15	16	17
Z_B	de 13 à 16	de 13 à 26	de 13 à 45	de 13 à 101	de 14 à infini

Tableau 1 : Nombre minimal de dents (pour éviter l'interférence)

- ✓ Les modules sont normalisés



1.2. Modélisation des efforts pendant l'engrènement

Hypothèse : le frottement est négligé.

$F_{2/1}$ est portée par la ligne de pression Δ

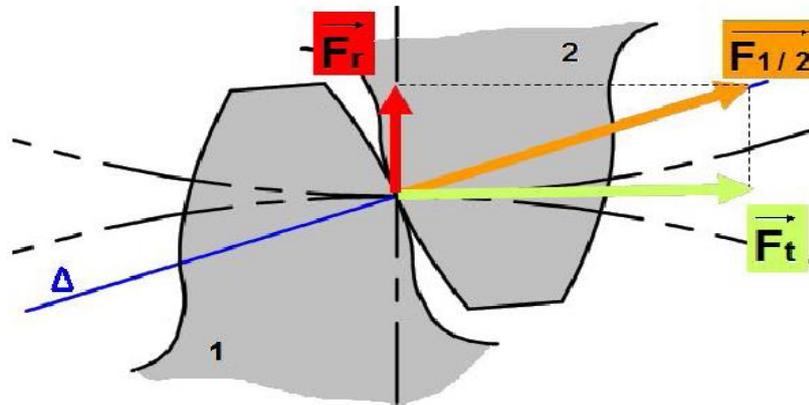


Figure 2 : schématisation d'engrènement entre deux dents

$$\vec{F}_{1/2} = \vec{F}_r + \vec{F}_t$$

F_t : Effort tangentiel, c'est l'effort « utile » à la transmission de mouvement et qui sollicite

La dent en flexion.

$$||\vec{F}_t|| = ||\vec{F}_{1/2}|| * \cos(\alpha)$$

F_r : Effort radial, c'est l'effort qui est transmis aux paliers et qui sollicite la dent en compression

$$||\vec{F}_r|| = ||\vec{F}_{1/2}|| * \sin(\alpha) = ||\vec{F}_t|| * \tan(\alpha)$$

1.3. Calcul de résistance de la denture

❖ La raideur

C'est la caractéristique qui indique la résistance à la déformation élastique d'un corps (par exemple un ressort). Plus une pièce est raide, plus il faut lui appliquer un effort important

pour obtenir une déflexion donnée. C'est une propriété extensive. Son inverse est appelée souplesse ou flexibilité.

$$k = \frac{F}{x}$$

La **raideur**, notée **k**, exprime la relation de proportionnalité entre la force **F** appliquée en un point et la déflexion **x** résultante en ce point, Elles s'expriment en (N/m)

❖ Les coefficients de sécurité

Se sont des paramètres permettant de dimensionner des dispositifs. Lorsque l'on conçoit un dispositif, il faut s'assurer qu'il remplisse ses fonctions en toute sécurité pour l'utilisateur. Il faut pour cela connaître la charge à laquelle il sera soumis. Le terme « charge » est utilisé de manière générale : puissance électrique pour un circuit électrique, force pour un dispositif mécanique, ... Cela mène au dimensionnement du dispositif : choix de la section du fil débitant le courant, section de la poutre supportant la structure, ...

Mais la connaissance des charges normales en utilisation ne sont pas suffisantes : il faut prévoir la possibilité d'une utilisation inadaptée : imprudence de l'utilisateur, surcharge accidentelle ou prévue, défaillance d'une pièce, événement extérieur imprévu, ... On utilise pour cela un **coefficient de sécurité**, noté habituellement « s »

Les coefficients de sécurité sont définis par les « règles de l'art » pour chaque domaine, éventuellement codifié dans des normes. S'il sert à diviser la résistance théorique, il est supérieur ou égal à 1, et est d'autant plus élevé que le système est mal défini, que l'environnement est mal maîtrisé.

✓ Application en mécanique : Valeurs du coefficient

En mécanique — au sens large : chaudronnerie, structures métalliques, génie mécanique (conception de mécanismes), automobile, on utilise typiquement les coefficients indiqués dans le tableau suivant.

Coefficients de sécurité typiques				
Coefficient de sécurité s	Charges exercées sur la structure	Contraintes dans la structure	Comportement du matériau	Observations
$1 \leq s \leq 2$	régulières et connues	connues	testé et connu	fonctionnement constant sans à-coups

$2 \leq s \leq 3$	régulières et assez bien connues	assez bien connues	testé et connu moyennement	fonctionnement usuel avec légers chocs et surcharges modérées
$3 \leq s \leq 4$	moyennement connues	moyennement connues	non testé	
	mal connues ou incertaines	mal connues ou incertaines	connu	

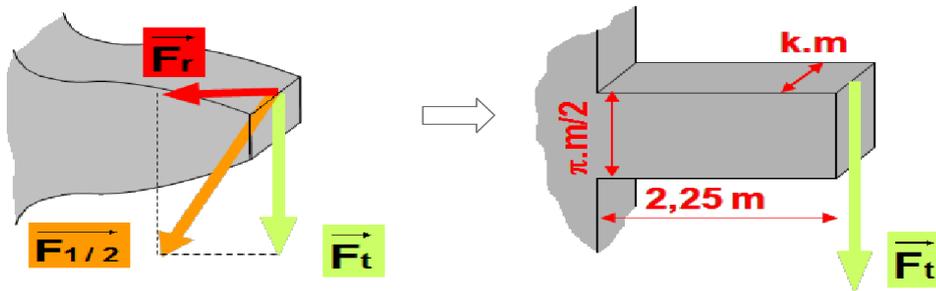
1.3.1. Méthode élémentaire

Cette méthode donne une valeur approchée et majorée du module, cependant sa facilité d'emploi permet de faire rapidement une prédétermination du module.

On calcule la contrainte due à la flexion au pied de la dent.

Hypothèses :

- ✓ Dent assimilée à une poutre encastrée, sollicitée en flexion.
- ✓ Effort exercé en bout de dent (début d'engrènement).
- ✓ Une seule dent en prise



Rpe : résistance pratique du matériau ;

La contrainte normale « σ » doit satisfaire à la condition de résistance : $\sigma \leq Rpe$

$$\sigma = \frac{Mf_{\max i}}{\frac{Igz}{v}} = \frac{2,25.m.F_t}{\left(\frac{b.h^3}{12}\right) \left(\frac{h}{2}\right)} = \frac{2,25.m.F_t}{k.m.\left(\frac{\pi.m}{2}\right)^3 \times \frac{2}{\left(\frac{\pi.m}{2}\right)}} = \frac{2,25.m.F_t}{\left(\frac{k.\pi^2.m^3}{24}\right)} \leq Rpe$$

$$\sigma = \frac{5,47.F_t}{k.m^2} \leq Rpe \Rightarrow m \geq 2,34 \sqrt{\frac{F_t}{k.Rpe}}$$

❖ Autres méthodes

- Méthode ISO : calcul de résistance à la pression de contact et de contrainte en flexion, cette méthode est normalisée (NF E 23-015) mais fastidieuse à mettre en œuvre.

1.3.2. Application de la méthode élémentaire

Pignon a moyeu de module 1.5mm et 26 dents

❖ calcul

On a la condition de résistance

La matière reste dans le domaine élastique tant que le cisaillement vérifie :

$$\sigma \leq Rpe$$

σ : contrainte en (Mpa)

Rpe : résistance pratique du matériau en (Mpa)

En déduit la condition sur le module

$$m \geq 2.34 * \frac{\sqrt{Ft}}{\sqrt{k * Rpe}}$$

m : module en (mm)

Ft : force tangentielle en (N)

Rpe :résistance pratique de matériau en (Mpa)

- facteur de largeur de dent k (sans unité)

$$k = \frac{b}{m}$$

K : facteur de largeur de dent (sans unité)

b : largeur de dent (mm)

m : module

- limite pratique du matériau

$$R_{pe} = R_e / s = 355 / 1.5 = 236.66 \text{ N/mm}$$

- Re : la limite élastique du matériau (acier pour la construction mécanique
Re=235Mpa et E= 210Gpa)
- s: coefficient de sécurité (on prend 1.5)

Donc on peut déduire la charge maximale supportée par une denture de module 1.5 mm

$$F_t \leq K * R_{pe} * \left(\frac{m}{2.34}\right)^2$$

❖ Les Résultats

$$K = b / m = 17 / 1.5 = 11.333$$

Nuance		R _e (MPa)	R _m (MPa)
EN 10027	NF A 35-573/4		
S185 (1.0035)	A33	185	420
S235 (1.0037)	E24	235	368
S275 (1.0044)	E28	275	450
S355 (1.0037)	E36	355	375

Paramètres de pignon

largeur de dent		module de dent	
17		1.5	
17		1.5	

force	facteur de largeur	résistance pratique
-------	--------------------	---------------------

	tangentielle	de dent	matériau
le module	Ft (N)	K	Rpe(N/mm)
1.5	437.760245	11.3333333	94
1.5	1094.40061	11.3333333	235

limite élastique matériau	coefficient de sécurité
Re(Mpa)	s
235	2.5
235	1

Force	Masse
F (N)	M (Kg)
1072.72602	107.272602
2681.81505	268.181505

❖ Conclusion :

Selon le coefficient de sécurité choisi en remarque que la charge maximale supportée par une dent de crémaillère est d'ordre : 268 Kg

Et puisqu'il ya deux rails de crémaillère, La charge maximale que nous pouvons déplacer avec le système pignon-crémaillère est : **536 Kg**

Pour des soucis de sécurité la charge totale de l'axe ne devra pas dépasser **400 Kg**

2. Choix technologique : Guidage linéaire

Le châssis de l'axe sera posé et guidé linéairement sur des guide a billes et rails;



❖ Points forts

- Capacités de charge élevées égales dans les quatre directions principales de la charge
- Niveau de bruit minimal et excellent comportement de fonctionnement

- Excellentes valeurs dynamiques : vitesse : v_{max} jusqu'à 10 m/s ; accélération : $a_{max} = 500 \text{ m/s}^2$
- Lubrification longue durée sur plusieurs années
- Système de lubrification minimale intégré pour la lubrification à l'huile
- Raccordements de lubrification de tous les côtés, avec taraudage métallique
- Rigidité du système

Taille	Dimensions (mm)										Masse (kg)	Cap. de charge ³⁾ (N)		Moments ³⁾ (Nm)			
	N_1	N_2	$N_6^{+0,5}$	S_1	S_2	S_5	S_9	T	V_1	C		C_0	M_t	M_{t0}	M_L	M_{L0}	
15	5,2	4,40	10,3	4,3	M5	4,4	M2,5x3,5	60	5,0	0,20	7 800	13 500	74	130	40	71	
20	7,7	5,20	13,2	5,3	M6	6,0	M3x5	60	6,0	0,45	18 800	24 400	240	310	130	165	
25	9,3	7,00	15,2	6,7	M8	7,0	M3x5	60	7,5	0,65	22 800	30 400	320	430	180	240	
30	11,0	7,90	17,0	8,5	M10	9,0	M3x5	80	7,0	1,10	31 700	41 300	540	720	290	380	
35	12,0	10,15	20,5	8,5	M10	9,0	M3x5	80	8,0	1,60	41 900	54 000	890	1 160	440	565	
45	15,0	12,40	23,5	10,4	M12	14,0	M4x7	105	10,0	3,00	68 100	85 700	1 830	2 310	890	1 130	

3. Système de transformation de mouvement : vis a billes

D'après la loi de conservation du travail on a :

Le travail d'une force F en (N) sur l'écrou se déplaçant de d en (m) sur sa ligne d'action est :

$$w1 (J) = F \times d$$

Le travail d'un couple C en(Nm) faisant tourner la vis de ϕ en (radians) est :

$$w2 (J) = C \times \phi$$

La relation Couple/Effort est donnée par :

couple C en(Nm) x angle ϕ de rotation (en radians) = force F (en N) x déplacement d (en m)

ϕ : étant l'angle de rotation de la vis faisant avancer l'écrou de

d'où :

$$C = (F \times d) / (\phi \cdot \eta)$$

Couple nécessaire pour déplacer un élément (transformation de rotation en translation)

En fonction du pas de filetage est :

$$M_a = F_a \cdot \frac{p}{2000 \cdot \pi \cdot \eta}$$

M_a : couple d'entraînement en (N.m)

F_a : force axiale souhaitée ou existante en (N)

p : pas du filetage en (mm)

η : rendement de vis en (%)

❖ Puissance d'entraînement

$$P = M_a \cdot \frac{n}{9550}$$

P : puissance d'entraînement en (Kw)

n : vitesse en (tr/min)

M_a : couple d'entraînement en (N.m)

Il est recommandé d'incorporer une marge de sécurité de 20% pour la sélection des entraînements

❖ Force de flambage admissible

Les vis longues et minces sont exposées au risque de flambage sous effort de compression.

Si la vis supporte une charge en compression, elle doit être vérifiée au flambage.

$$F_f = \frac{K_f}{S_f} \cdot \frac{d^4}{l_f^2} \cdot 10^3$$

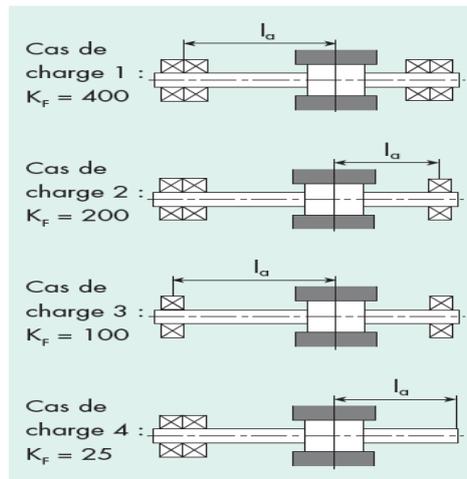
F_f : force de flambage admissible en (N)

K_f : constante caractéristique du cas de charge (voir figure suivante)

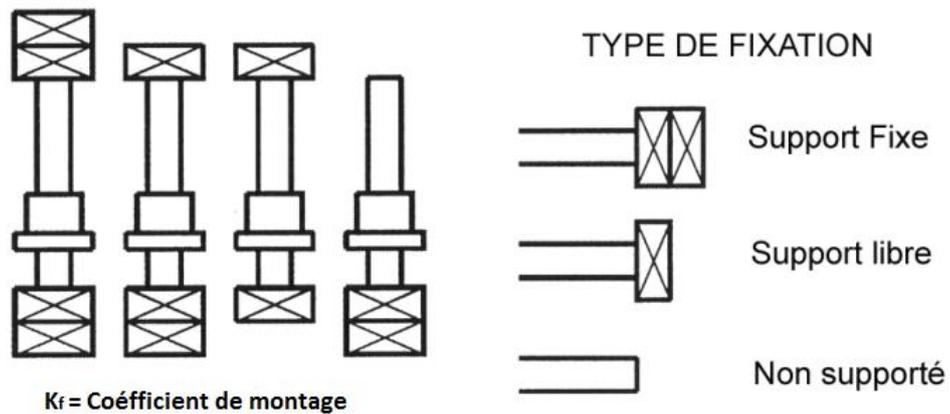
S_f : facteur de sécurité contre le flambage (2...4) est conseillé

d : diamètre du noyau de la vis (mm)

l_f : longueur de la vis de transmission (mm)



l_a = distance entre le centre de l'écrou et le centre du palier à vis (mm).;



Annexe C : plans de détail