

Conception et développement pour une fromagerie artisanale, d'une machine de retournement automatique des produits

Ing. M. Lemerancier
ECAM – Bruxelles

Nous commençons par développer l'environnement de production, en soulignant les possibilités de mécanisation et en établissant un cahier des charges de la machine. Ensuite, la phase de conception proprement dite expose les solutions retenues, en justifiant les choix qui ont été faits aux différentes étapes du raisonnement (tant du point de vue mécanique, que du principe et de la logique de commande).

Mots-clefs : machine, fromagerie, retournement, mécanisation, outil de production, développement, conception, agroalimentaire, sécurité.

We start developing the production environment, insisting on the possibilities of mechanization and establishing the specifications of the machine. Then, in the design stage, we expose the solutions, justifying the choices which have been made during the development (as well in mechanical point of view as in monitoring and logic control).

Keywords : machine, cheese dairy, reversal, mechanization, production equipment, development, design, agroalimentary, safety.

1. Introduction

La résolution d'un problème d'amélioration ou de création d'un outil de production dans l'agroalimentaire peut être scindée en quatre étapes clés :

- *la phase de définition* consiste à bien poser le problème à résoudre. D'abord en répertoriant l'ensemble des données de base immuables du projet (produit, procédés de fabrication, équipement, environnement), ensuite en répertoriant les objectifs quantitatifs pour l'outil et qualitatifs pour le produit.

- *la phase de conception* consiste à faire le choix entre différentes solutions techniques et économiques pour l'outil, son exploitation et son environnement. Ces choix s'effectuent en fonction d'une analyse des besoins et des contraintes exprimées par l'entreprise sous forme d'un cahier des charges fonctionnel.

- *la phase de réalisation* est la phase d'étude détaillée et de construction matérielle de l'outil de production. On y définit les procédures d'exploitation (intervention humaine, maintenance, arrêts accidentels, etc.).

- *la phase de mise en exploitation*, quant à elle, débute toujours par une validation des performances de l'outil de production et des procédures d'exploitation. Elle se poursuit par un suivi régulier des performances qualitatives et quantitatives.

Pour éviter des écueils dans le déroulement du projet, il est important de traiter successivement chacune des étapes, de manière explicite ou non. Ce texte présente la manière dont un tel projet a été traité jusqu'à la phase de réalisation.

2. Définition du projet

2.1 Objectifs

Les objectifs du projet visent à moderniser et améliorer l'outil de production de la fromagerie de lait cru Les Fromages Chaput INC installée en banlieue sud de Montréal au Québec.

Il a été convenu de réaliser une machine destinée à retourner les fromages. Afin de rentabiliser l'investissement, il fut décidé que la même machine devra pouvoir assurer différentes fonctionnalités secondaires intervenant à différentes étapes de la production.

2.2 Environnement

Industrie agroalimentaire

Les réglementations nationales et internationales imposent des règles de fabrication et de qualité des produits agroalimentaires. Ces règles visent principalement à assurer la protection et l'information du consommateur en tentant de garantir l'hygiène des produits et des outils de production, la conformité de l'étiquetage, des mentions obligatoires et de la publicité. D'autre part elles veillent à protéger l'environnement, par exemple, en classant les installations ou en définissant les types emballages autorisés.

En ce qui concerne la salubrité des aliments, l'entreprise dépend de l'ACIA¹ qui ne propose pas de norme relative à la fabrication des machines de production ou des matériaux utilisés. Leur mot d'ordre est le suivant : « Le matériel employé doit être dur, lisse et facilement lavable ». Cette directive peut sembler très qualitative lorsqu'il s'agit de guider les choix du concepteur dans la conception du matériel.

On peut alors être porté à se tourner vers des organismes tels le CEN² ou la NSF³ reconnus internationalement, qui attribuent des certifications pour le type de matériel et de machine qu'on souhaite développer pour l'industrie fromagère. Leurs critères de certification ainsi que les normes qu'ils éditent constituent une source d'informations complémentaires et fiables.

Interaction homme machine

En matière de sécurité et de confort des utilisateurs de machines, il faut respecter un certain nombre de règles qui découlent de la « Loi sur la santé et la sécurité du travail, L.R.Q. c. S-2.1, r.19.01 »⁴.

La Belgique a ses propres règles en matière de sécurité des machines, les normes NBN– EN292–1 et NBN– EN292–2, intitulées « Sécurité des machines – Notions fondamentales, principes généraux de conception », constituent de bons outils de travail pour le concepteur. De manière très simplifiée, voici la démarche que préconisent ces textes en matière de sécurité:

¹ Agence Canadienne d'Inspection des Aliments

² Comité Européen de Normalisation

³ National Sanitation Foundation (USA)

⁴ Loi canadienne (fédérale).

- Identifier les situations dangereuses
- Limiter les phénomènes dangereux en appliquant la prévention intrinsèque par :
 - des propriétés physiques bien pensées (forme, masse, matériau)
 - une application correcte des principes de la résistance des matériaux en tenant compte de phénomènes dynamiques tels que la fatigue, l'usure, etc.
 - proposer une ergonomie cohérente (posture, rythme de travail, bruit)
 - porter une attention particulière au système de commande
 - éviter à l'utilisateur la proximité avec le danger
 - proposer une machine fiable
 - disposer les points de maintenance hors des zones dangereuses (graissage, réglage, etc.)
- Si les phénomènes dangereux ne peuvent être évités, s'arranger pour limiter les risques pour l'utilisateur en :
 - signalant le danger
 - disposant des protections adaptées

Choix de matériel destiné au Canada

L'étude a été réalisée avec l'aide du logiciel CATIA (V5R13) et dans le système métrique pour faciliter le choix du matériel avec des intermédiaires en Belgique (tout en veillant à ce que ces derniers soient implantés au Québec). On notera qu'au Québec le système anglo-saxon côtoie le système métrique et qu'il est aisé de se procurer du matériel aux normes métriques. En outre, lors du choix du matériel, on se souviendra que les différents composants électriques et pneumatiques utilisés dans les machines au Canada doivent répondre aux normes CSA ou UL, ce qui la plupart du temps, est le cas pour le matériel proposé par les grandes marques.

Fabrication du fromage et organisation de la fromagerie

La fromagerie Chaput est installée dans un bâtiment industriel. L'aménagement des locaux est moderne et spécialement conçu pour l'activité. Celle-ci s'articule autour d'une pièce centrale entourée de la salle de production où l'on transforme le lait en caillé, des sales de moulage où le caillé est mis en forme, et enfin des salles d'affinage, de lavage, et de stockage.

Depuis son démoulage et jusqu'à son conditionnement pour livraison, le fromage repose sur des claies (grilles métalliques pourvues de pieds), ce qui

en facilite la manutention. On forme des piles pouvant contenir jusqu'à 14 claies, elles constituent un moyen de stockage compact et sont en outre facilement déplaçables dans les différentes salles grâce à un chariot. Ce matériel est standard et très répandu dans l'industrie fromagère.

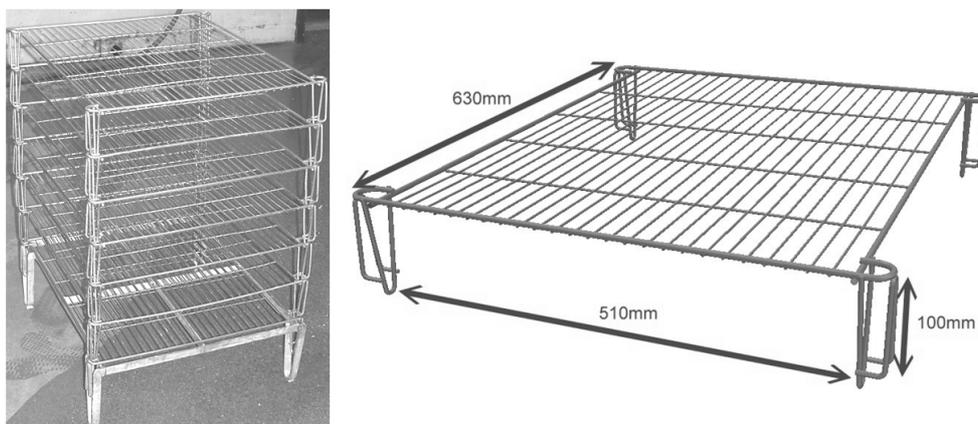


Figure 1: Photo d'une pile de claies et schéma d'une claie standard utilisée par la fromagerie Chaput.

La fromagerie produit une quinzaine de fromages, de textures, de formes et de dimensions fort différentes. Selon le type de fromage, les claies peuvent accueillir de 2 à 30 meules.

Cahier des charges

De nombreuses réflexions, en concertation avec l'entreprise, ont permis de résumer les caractéristiques de la machine sous forme d'un cahier des charges (présenté ici sous sa forme qualitative).

La machine devra être capable de remplir les fonctions suivantes :

- effectuer le retournement automatique de plusieurs piles se trouvant dans une même salle.
- s'adapter facilement aux caractéristiques des différents produits, comme le poids, la texture et les dimensions. Une adaptation automatique pourra être envisagée, et sera considérée comme un « must ». (Les lots sont déjà identifiés par des code-barres qu'on pourrait exploiter).
- ne pas détériorer le produit (le principal danger étant une détérioration mécanique du produit).
- être d'utilisation simple par du personnel non qualifié techniquement.

- être facilement et rapidement transportable, par une personne seule, d'un local à l'autre
- être facilement lavable et répondre aux exigences de l'industrie agroalimentaire en matière de salubrité.
- être sûr pour les utilisateurs et répondre aux réglementations en la matière.
- permettre une adaptation au retournement en phase d'égouttement (retournement avec les moules).
- permettre l'ajout, le plus aisé possible, de dispositifs de lavage, de salage et de démoulage automatique.

Parallèlement, les conditions d'utilisation impliquent les faits suivants :

- la machine doit pouvoir assurer le retournement de tous les produits de la fromagerie, mais aussi de tout type de fromages qu'il est raisonnable de stocker sur les claies de cette dimension.
- la hauteur des produits à retourner varie de 25mm à 100mm.
- utilisée tant en production qu'en affinage et éventuellement en présence de solution de saumure, la machine devra assurer un fonctionnement en milieu chaud, froid, humide et corrosif. Ajoutons à cela l'utilisation de puissants agents dégraissants lors des fréquents lavages du matériel. (Les températures sont comprises entre 4 à 35°C, avec un taux d'humidité relative de 55 à 100%).
- si les matériaux utilisés sont en contact effectif ou potentiel avec les aliments, ceux-ci ne doivent pas participer à la contamination toxicologique du produit.
- l'ensemble du matériel employé doit pouvoir subir sans dommage des lavages à grandes eaux. Un indice de protection égal ou supérieur à IP55 est donc à prescrire.
- retournement de 50 claies par heure.

3. De la phase de conception proprement dite à la phase de réalisation.

La phase de conception est sans doute celle qui fait le plus appel à la créativité et à l'esprit de synthèse. De nombreuses solutions techniques ont été envisagées pour répondre au cahier des charges mentionné. Elles ont fait l'objet de comparaisons. Pour choisir parmi les propositions satisfaisantes, il a fallu juger simultanément de critères comme la sécurité intrinsèque de la

solution, le potentiel d'adaptation aux lavage, salage et démoulage (fonctionnalités secondaires), l'estimation des coûts de réalisation, de maintenance et d'utilisation, le type d'actionneurs envisagés, la simplicité de la mécanique (dans un souci de fiabilité, de maintenance et d'économie). La description des démarches et des différentes étapes qui ont mené à la solution finale n'est malheureusement pas possible en quelques pages. C'est pourquoi, on s'efforcera si possible dans la suite du texte, à présenter brièvement les choix qui ont guidé le raisonnement vers les solutions proposées.

4. Présentation de la solution proposée

4.1 Choix du mode de retournement

Partant du point de vue que les fromages sont stockés sur des claies, le retournement lui-même a été envisagé de différentes façons. Il est possible de retourner un fromage à la fois, une claie à la fois ou une pile de claies à la fois. Avant d'effectuer un choix, il est important de rappeler que certains des fromages sont fragiles, ne peuvent être collés l'un à l'autre ni tirés ou glissés sur la claie sous peine d'être détériorés. Lors de la manipulation artisanale, ils nécessitent un grand soin ; il en sera de même lors du retournement mécanique.

Après examen des différentes solutions, on est venu à la conclusion que le retournement d'une claie à la fois, selon le principe utilisé actuellement de manière artisanale, s'avère le plus approprié. En effet, le retournement d'un fromage à la fois n'est pas intéressant puisqu'il demande un investissement conséquent pour une robotique complexe (à cause de la disparité des caractéristiques des fromages à retourner) à mettre en œuvre et à paramétrer, pour finalement n'offrir qu'un processus relativement lent. D'autre part, bien qu'il permette de très grandes cadences, le retournement d'une pile de claies à la fois imposerait le remplacement ou la modification des claies existantes (ce qui va à l'encontre des souhaits de l'entreprise). De plus il ne permet pas l'accès individuel à chacune des claies pour les opérations telles que le salage, le lavage ou le choix des meilleurs fromages pour la confection d'une commande. (Des machines exploitant ce principe de retournement sont en cours de développement pour des entreprises dont les volumes de production sont très supérieurs à celui de la fromagerie Chaput.)

4.2 Retournement d'une claie à la fois

Le principe de retournement envisagé est proche du mouvement réalisé jusqu'ici par les employés. Les fromages sont pris en étau entre une claie vide placée à l'envers (pattes vers le haut) et la claie sur laquelle ils reposent. L'ensemble des deux claies et des produits est alors retourné de 180° et posé sur une nouvelle pile. La claie initialement vide supporte maintenant les fromages ; l'ancienne claie du dessous se trouve maintenant au-dessus et peut-être retirée. Elle servira de claie vide au retournement de la claie suivante et ainsi de suite.

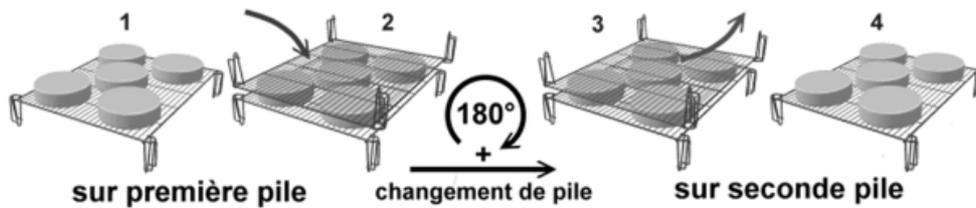


Figure 2 : Illustration du principe de retournement

La mécanisation d'une telle manipulation peut être réalisée par la combinaison de 5 actions illustrées sur la figure 3. Etant donné le nombre relativement important d'actionneurs nécessaires, il s'avère intéressant d'utiliser autant que possible la technologie pneumatique. Ce qu'on fera pour l'ensemble des mouvements à l'exception de la translation horizontale (pour laquelle un servomoteur asynchrone a été prévu).

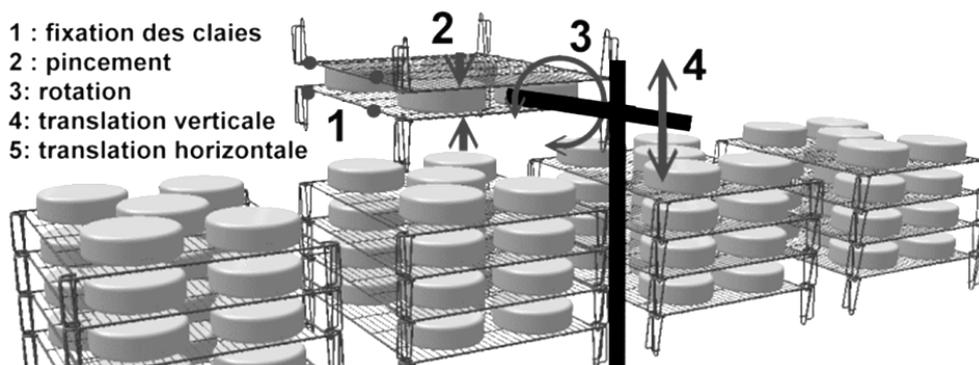


Figure 3 : décomposition du retournement en 5 actions simples

La fixation des claies sur la machine

Cette étape consiste à solidariser chacune des deux claies participant au pinçage à un organe mobile de la machine. Ces pièces, non représentées dans le schéma ci-dessus, se présentent sous forme de cadres rectangulaires de dimensions légèrement supérieures à celles d'une claie, nous les appellerons « cadres ». La fixation d'une claie se fait, en quatre points, par la rotation d'une came en matériau polymère.

Les cadres sont dotés de pièces métalliques qui guident progressivement la claie lors de l'approche du cadre afin d'effectuer un positionnement de la pile.

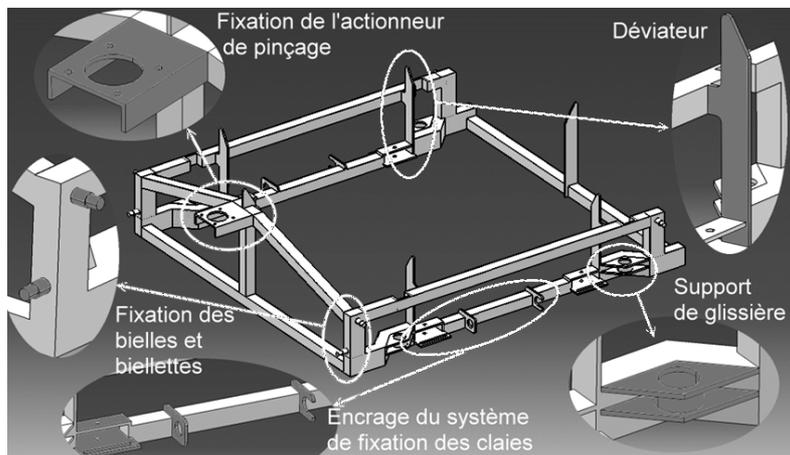


Figure 4 : détail des singularités d'un cadre

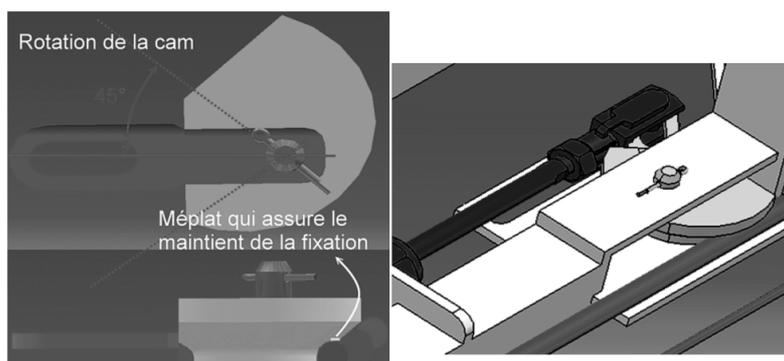


Figure 5 : came de fixation et implantation sur le cadre

Le pinçage des fromages

Indispensable à l'immobilisation des fromages lors des déplacements, le pinçage est obtenu en communiquant aux claies une force induite par le rapprochement des deux cadres (alors solidaires des claies).

Une translation précise des cadres lors du rapprochement des claies est nécessaire pour éviter la détérioration du fromage par friction. On l'obtient par un mécanisme relativement complexe de glissières et de bielles articulées sur les 2 cadres. L'étude de ce système a été réalisée sur base du modèle illustré à la figure 6, en tenant compte indépendamment et puis simultanément de la force de pinçage, de la masse des produits pincés et des différents organes, des accélérations subies, des forces de frottement aux glissières et aux paliers, de blocages accidentels, et enfin, des points d'application de ces différentes actions. L'analyse a été menée de manière itérative via une feuille de calcul Excel.

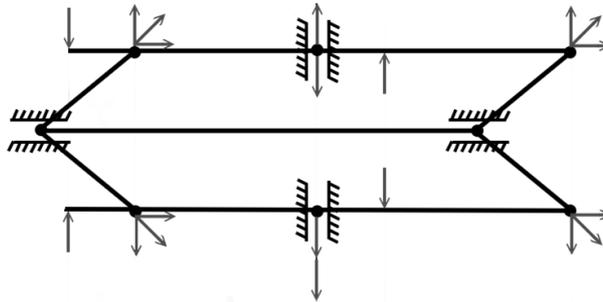


Figure 6 : modélisation du mécanisme de pinçage

Pour ce mécanisme, comme pour l'ensemble de la machine, le dimensionnement des organes tient compte des valeurs extrêmes des sollicitations, mais aussi des phénomènes de fatigue associés aux sollicitations nominales.

Le retournement

La pièce sur laquelle sont fixés les cadres et autour de laquelle ils effectuent leur mouvement de translation est appelée le « bras ». Il est prolongé par un axe horizontal le reliant au reste de la machine. Le retournement s'effectue par rotation à 180° autour de cet axe. L'ensemble de tous les organes qui accompagnent la rotation est baptisé « pince ». L'arbre du bras supporte le poids de toute la pince, avec un bras de levier non négligeable. Un

encastrement robuste de l'arbre sera obtenu par deux paliers suffisamment espacés.

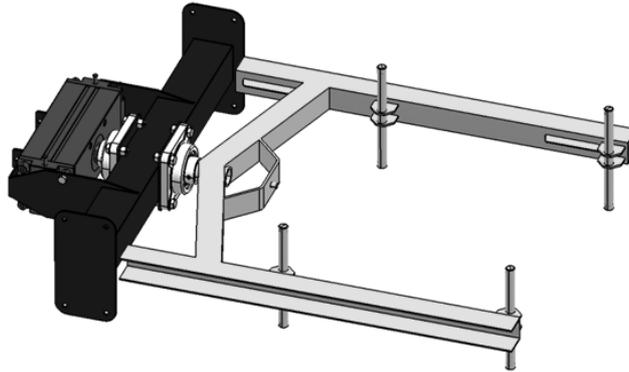


Figure 7 : mécanisme de rotation (bras, chariot et actionneur de rotation)

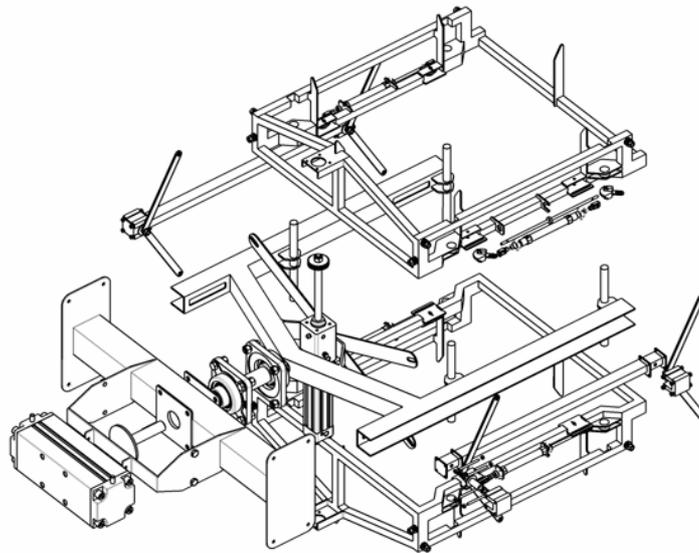


Figure 8 : vue explosée de la "pince"

On a veillé à choisir un actionneur de rotation (vérin rotatif à crémaillères) qui puisse absorber sans dommage l'énergie cinétique de la pince en butée.

Translation verticale

Les paliers supportant l'axe de la pince sont fixés sur une pièce appelée « chariot ». Le chariot se déplace verticalement le long du châssis de la

machine sur une hauteur supérieure à une pile de 14 claies. Ce mouvement est guidé par un robuste système de guidage, qui doit pouvoir assurer à la fois un glissement avec peu de frottement, une bonne précision et surtout la reprise des couples transmis par l'axe de la pince. On utilise des galets à billes sur des glissières. Le mouvement est assuré par un vérin sans tige qui offre une course pratiquement égale à sa longueur, limitant ainsi l'encombrement global de la machine.

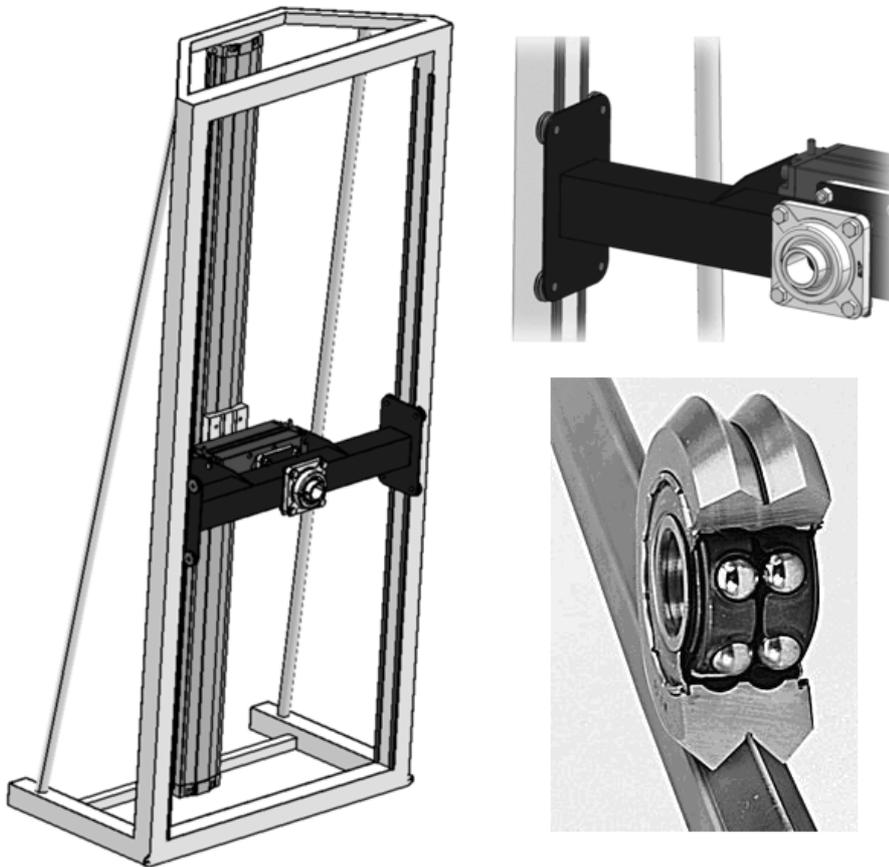


Figure 9 : Châssis de la machine, illustration du mécanisme de translation vertical

Translation horizontale

Le dernier mouvement à assurer est un déplacement de la pince face aux piles. Il a été décidé de déplacer toute la machine. Le châssis sur lequel se déplace le chariot est donc lui-même en déplacement dans le local. La plus

longue des rangées de piles mesure environs 6 mètres, c'est donc le déplacement maximal que la machine devra effectuer.

Les forces transmises par le châssis ont plusieurs directions, elles varient suivant le mouvement exécuté et la charge de la machine. On ne peut donc pas se contenter de la poser, ni de la suspendre, il faut réellement la guider. Pour ce faire, nous allons utiliser des rails de guidage. Pour la fixation des rails horizontaux, trois possibilités se présentent : au plafond, au mur, au sol. Pour différentes raisons, notamment de sécurité intrinsèque on a décidé de placer les rails au sol.

5. Automatisation et commande

A terme, on souhaite que la machine, lors du passage devant une pile, lise le numéro du lot, interroge la base de donnée pour savoir si une éventuelle intervention est nécessaire, laquelle serait alors exécutée automatiquement.

D'ici là, la première version qu'il est prévu de réaliser disposera d'une interface homme machine, permettant à l'utilisateur de définir quelle action effectuer sur chacune des piles.

La logique de commande s'articule autour d'un automate programmable, en interaction constante avec les différents capteurs de position, les distributeurs (électrovannes pneumatiques) qui commandent les mouvements des actionneurs pneumatiques et la carte de positionnement à laquelle est asservi le moteur asynchrone assurant le mouvement de translation horizontale. L'ensemble est illustré à la figure10.

6. Circuit pneumatique la machine

Le schéma ci-dessous (fig.11) illustre le circuit pneumatique de la machine, dans sa fonction principale de retournement. Il faudra anticiper son extension pour le développement des fonctionnalités secondaires.

Les choix qui ont été faits au niveau du matériel et du dimensionnement nous imposent de travailler avec deux niveaux de pression de service différents. On remarquera dans le schéma, les deux régulateurs de pression (respectivement à 4 [bar] et 6,5[bar]).

Pour des raisons de sécurité, on souhaite généralement que le circuit soit mis progressivement sous pression. A cette fin, nous avons placé une vanne spéciale de mise en pression progressive au début du circuit. La mise en pression peut donc être commandée par l'automate.

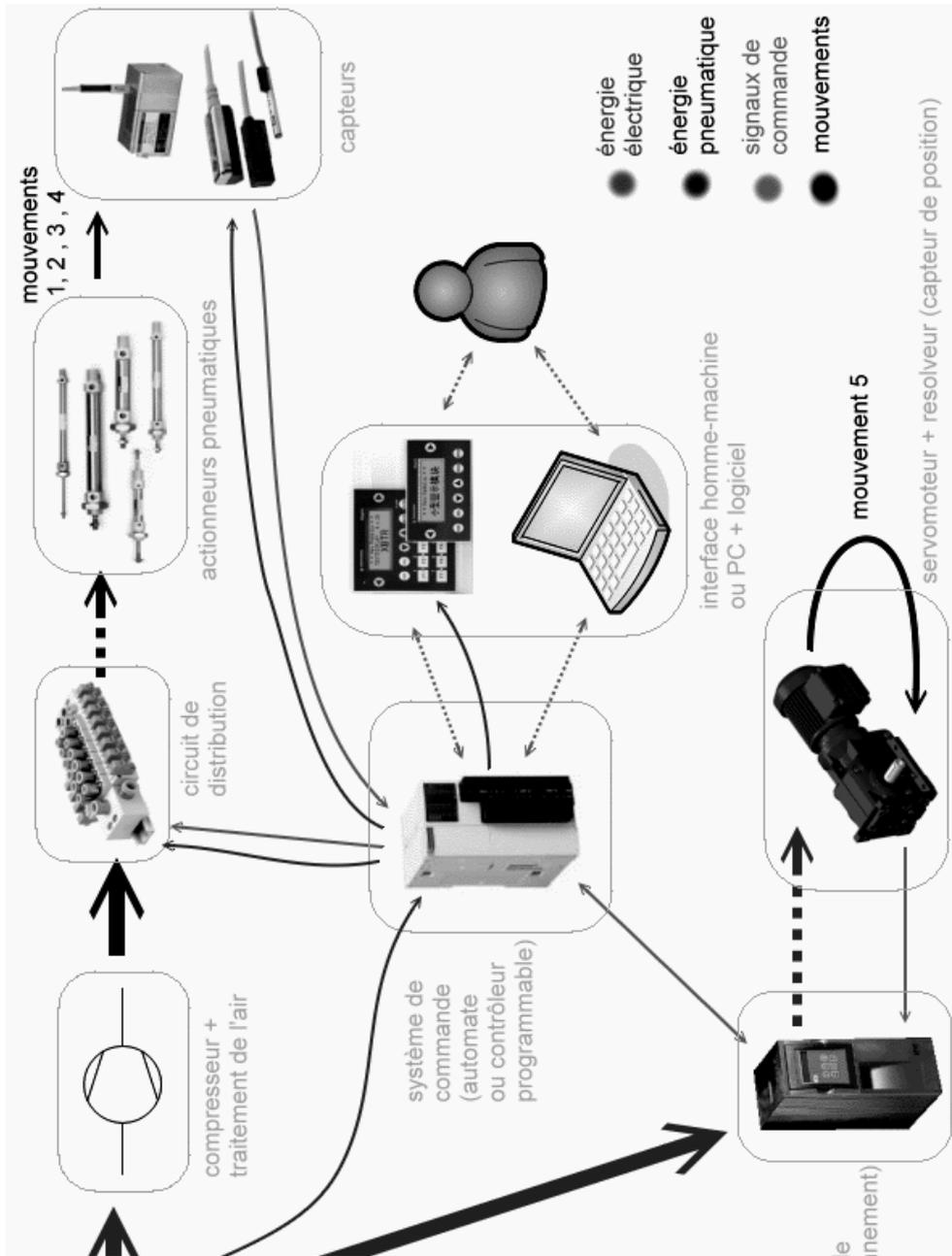


Figure 10 : Schéma général du circuit de commande

7. Conclusions

La construction de machines est une activité pluridisciplinaire, qui fait appel à de nombreuses notions théoriques et à un esprit de synthèse. Hors mis la créativité dont il faut parfois faire preuve, il s'agit de réaliser les meilleurs compromis entre les impératifs techniques et économiques et environnementaux.

Bien que nous n'ayons fait appel à aucune innovation technologique particulière, le développement de la machine que nous avons décrite est novateur, puisqu'à notre connaissance, il n'existe pas d'autres machines même du type. Il s'agit donc d'un bel exemple où l'innovation naît de l'exploitation judicieuse de technologies existantes et éprouvées.

8. Références bibliographiques

- [1] BAZERGUI A., *Résistance des matériaux*, Edition corrigée, Edition de l'école polytechnique de Montréal, 1987
- [2] GIECK K., GIECK R., *Formulaire technique*, 10ème édition française 1997, Giek
- [3] PIGNAULT J., SOHIER L., *Conception des unités de production ou de transformation*, Technique de l'ingénieur, traité Génie des procédés
- [4] CUNAT P.-J., *Aciers inoxydables. Critères de choix et structure*, Technique de l'ingénieur, Propriétés des matériaux
- [5] CUNAT P.-J., *Propriétés. Résistance à la corrosion*. Technique de l'ingénieur, Propriétés des matériaux
- [6] KOZLOWSKI A., *Alimentarité des matériaux*, Technique de l'ingénieur
- [7] CHEVALIER A., *Guide du dessinateur industriel*, Hachette Technique, édition 1998-1999.
- [8] FAISANDIER J., *Mécanismes hydrauliques et pneumatiques*, 8ème édition, Dunod Paris, 1999.
- [9] HOMERIN J.-P., *Présentation didactique du positionnement et des servomoteurs*, Travail de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur industriel, ECAM, 2004.
- [10] PYC, *Manuel technique des aciers inoxydables*, SEMA
- [11] IBN, Norme belge enregistrée NBN-EN 292-1, *Sécurité des machines - Notions fondamentales, principes généraux de conception* - Partie 1 et Partie 2, 1ère édition, 1992

Sites Internet

Agence Canadienne d'Inspection des Aliments – <http://www.inspection.gc.ca>

Institut canadien d'information juridique – <http://www.ijcan.org/qc/>

National Sanitation Foundation (USA) – <http://www.nsf.org>

SMC Pneumatics – <http://www.smc-pneumatics.be>

Festo – <http://www.festo.com>

Siemens – <http://www.siemens.com>

SEW Eurodrive – <http://www.sew-eurodrive.de>

Omron – <http://www.omron.ca/>

Télémécanique – <http://www.telemecanique.com>

Murtfeld – <http://www.murtfeldt.de>