

Équipe E223 :

BESNARD Camille

DUMERIL Clément

LACOMBE Nicolas

LE MARCHAND Arthur

LOZINGOT Audrey

**Réfrigérateur Low-Tech
Avant-projet**

015

020

025

035

040

Date de rendu final : 14/05/2025.



Table des matières

1.	INTRODUCTION	4
2.	MISE EN SITUATION.....	5
2.1.	OBJECTIF GENERAL DE L'ETUDE	5
2.2.	NIVEAU DE L'ETUDE : AVANT-PROJET SOMMAIRE.....	5
2.3.	PRESENTATION DES PARTIES PRENANTES	5
2.4.	CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL FOURNI PAR LE COMMANDITAIRE	5
2.5.	ENVIRONNEMENT DU PRODUIT (OU DU SERVICE) A CONCEVOIR ET A REALISER	6
2.6.	PRODUITS CONCURRENTS.....	9
3.	ORGANISATION DE L'AVANT-PROJET	9
3.1.	DEFINITION DE LA MATRICE SWOT.....	10
3.2.	DEFINITION DU PLANNING PREVISIONNEL	11
4.	DEFINITION DE L'ENVIRONNEMENT DU PRODUIT / DU SERVICE	16
4.1.	PRODUITS / SERVICES CONCURRENTS, VOIRE D'EVENTUELLES STARTUPS.....	16
4.2.	BREVETS SUR LE PRODUIT / SERVICE	16
4.3.	NORMES SUR LE PRODUIT / SERVICE.....	17
4.4.	REGLEMENTATIONS ET/OU LEGISLATIONS SUR LE PRODUIT / SERVICE	19
4.5.	RESSOURCES LIBRES DE DROIT	19
4.6.	ENVIRONNEMENT PHYSIQUE DU PRODUIT / SERVICE	21
5.	DEFINITION DU PERIMETRE DU PRODUIT / SERVICE.....	24
5.1.	CONSOLIDATION EVENTUELLE DU CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL	24
5.1.1.	Redéfinition éventuelle de la fonction de service	24
5.1.2.	Recherche de contraintes supplémentaires	25
5.1.3.	Cahier des charges fonctionnel consolidé	26
5.2.	DEFINITION DES EXCLUSIONS.....	28
6.	CONCEPTION PRELIMINAIRE EN AVANT-PROJET.....	28
6.1.	DETERMINATION DES SOLUTIONS ELEMENTAIRES	28
6.1.1.	Détermination des Fonctions techniques	29
6.1.2.	Recherche de l'existant (= état de l'art = benchmarking technique).....	34
6.1.3.	Choix des solutions	44
6.2.	DEFINITION DE L'ARCHITECTURE GENERALE.....	51
6.3.	DETERMINATION DES EFFORTS, DES VITESSES ET/OU DES PUISSANCES.....	51
6.3.1.	Définition de la méthode de calcul et du modèle associé	53
6.3.2.	Recherche des données	54
6.3.3.	Application de la méthode de calcul des efforts.....	56
6.3.4.	Conclusion	56
6.4.	DEFINITION DE LA STRUCTURE.....	59

6.5.	DEFINITION DE L'ARCHITECTURE AVEC TOUTES LES PIECES	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
6.6.	PREDIMENSIONNEMENT ET CHOIX DES COMPOSANTS.....	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
6.6.1.	Composant n°1.....	Erreur ! Signet non défini.
6.6.2.	Composant n°2.....	Erreur ! Signet non défini.
6.6.3.	Composant n°3.....	Erreur ! Signet non défini.
6.6.4.	Composant n°.....	Erreur ! Signet non défini.
6.7.	PREDIMENSIONNEMENT DE LA STRUCTURE	62
6.7.1.	Définition de la méthode de prédimensionnement et du modèle associé	62
6.7.2.	Recherche des données et formulation d'hypothèses	62
6.7.3.	Calcul de prédimensionnement	62
6.7.4.	Conclusion	62
6.8.	CROQUIS COMPLET DU SYSTEME.....	62
7.	CONCEPTION DETAILLEE (EN PROJET).....	63
8.	FINANCEMENT	64
9.	REALISATION	65
9.1.	APPROVISIONNEMENTS / ACHATS DE COMPOSANTS.....	65
9.2.	FABRICATION DE COMPOSANTS	65
9.3.	ASSEMBLAGE DES COMPOSANTS.....	65
10.	RETOURS D'EXPERIENCE TECHNIQUES ET MANAGERIAUX.....	66
10.1.	REX TECHNIQUES.....	66
10.2.	REX MANAGERIAUX	66
11.	CONCLUSION	68
12.	RESSOURCES EXTERNES.....	69

1. Introduction

Neuf, un réfrigérateur même petit peut coûter plusieurs centaines d'euros. C'est un prix qui n'est pas forcément accessible à tout le monde, notamment dans le cadre de la conservation d'un grand nombre d'aliments (pour une famille nombreuse par exemple). De plus, un réfrigérateur peut consommer entre 150kWh et 500kWh. Cette consommation d'énergie est à la fois coûteuse et mauvaise pour l'environnement. Le fréon est d'ailleurs un gaz important pour assurer le bon fonctionnement d'un réfrigérateur, mais il est en partie responsable du réchauffement climatique. Ainsi, un réfrigérateur low-tech pourrait être une solution plus accessible et durable.

L'objectif de cette étude est la réalisation d'un réfrigérateur low-tech, avec un coût réduit et un faible impact environnemental pouvant convenir pour un usage classique de conservation des aliments. Cet avant-projet sommaire, dont la date de rendu final est fixée au 14 mai 2025, permet d'estimer les solutions envisageables, de quantifier les coûts, les dimensions, etc. et de faire ressortir les difficultés du projet.

Guidé par Monsieur Salomon professeur en conception mécanique à l'ENSAM de Chalons en Champagne l'équipe poursuivra un avant-projet sommaire composé de différentes phases :

- Mise en situation du problème
- Définition du cahier des charges fonctionnel et du périmètre d'étude
- Recherche de l'existant
- Choix des solutions
- Définition de l'architecture et de la structure
- Dimensionnement de la structure
- Dimensionnement des composants

Il existe un réfrigérateur appelé zeer pot ou réfrigérateur du désert, qui permet de conserver les aliments plus longtemps qu'à l'air libre mais il n'est pas aussi efficace que le réfrigérateur classique. L'objectif de cet avant-projet et donc d'étudier la faisabilité d'un réfrigérateur low-tech efficace.

2. Mise en situation

2.1. Objectif général de l'étude

Un réfrigérateur low-tech est une alternative écologique et économique aux réfrigérateurs classiques. Il fonctionne avec peu d'électricité. Son but est de permettre la conservation des aliments tout en réduisant la consommation d'énergie. Il est fabriqué avec des matériaux simples, durables et faciles à réparer. Il limite son impact environnemental en réduisant l'utilisation des gaz polluants des réfrigérateurs classiques. Ce type de réfrigérateur aide aussi à réduire le gaspillage alimentaire. Il favorise l'autonomie et s'inscrit dans une démarche durable. Le réfrigérateur à concevoir s'inscrit dans une démarche de conception Low-Tech qui prône [en reprenant une partie des critères posés par l'Observatoire de l'Immobilier Durable en 2020] la fabrication de produits à la fois : efficaces, autonomes, sobres, résilients, durables, réparables et accessibles (plan en libre accès et coût faible). Le produit doit donc respecter des contraintes de performances, environnementales et économiques. Aussi le livrable final prendra la forme d'un plan d'ensemble du réfrigérateur, d'un circuit frigorifique et d'un schéma électrique.

2.2. Niveau de l'étude : avant-projet sommaire

Les objectifs de l'avant-projet sommaire sont de donner une ébauche d'architecture avec des solutions envisageables, en raisonnant à budget illimité. Il faudra ensuite quantifier grossièrement les coûts, les dimensions, les masses, les puissances... des solutions. Enfin, l'avant-projet sommaire fait ressortir les points durs, les données manquantes et les normes et réglementations à prendre en compte. Il s'agit de se faire un premier avis sur les faisabilités techniques et économique du produit. Lorsque l'avant-projet est détaillé, on raisonne cette fois avec un budget limité en prenant compte des analyses de valeur. Les ébauches et les quantifications sont plus précises que pour l'avant-projet sommaire. Si l'avant-projet est viable, il aboutira au projet.

2.3. Présentation des parties prenantes

Le commanditaire est C. Salomon, professeur de conception mécanique à l'école nationale supérieure des Arts et Métiers, dans le campus de Châlons-en-Champagne. Cette école d'ingénieur offre divers axes d'enseignement : bachelor, apprentissage, masters spécialisés, etc. L'École Nationale Supérieure des Arts et Métiers (ENSAM) est une prestigieuse école d'ingénieurs, spécialisée en sciences et technologies de l'ingénieur. Présente en France sur 11 campus, cette école se développe désormais à l'étranger avec l'ouverture en 2024 du campus de Rabat au Maroc. Fondé en 1806, le campus de Chalons en Champagne est le berceau historique des campus. Le campus propose des formations axées sur le génie mécanique, énergétique et industriel. L'apprentissage y combine théorie et pratique grâce à des laboratoires modernes et des ateliers bien équipés. Les étudiants bénéficient d'un enseignement basé sur des projets, des TP et des partenariats industriels. Ils ont également accès à diverses associations et activités extra-académiques. Son vaste réseau d'anciens élèves, les Gadz'Arts, facilite l'insertion professionnelle. Créée par le duc de Laroche Foucault, l'ENSAM a toujours joué un rôle clé dans l'innovation et la recherche en ingénierie. Elle a vu sortir de grand ingénieur ayant impacté le monde par leurs créations comme les tunnels les plus complexes du métro, le pot catalytique, les moteurs de l'Arc en ciel de Mermoz, des automobiles championnes du monde, le SPAD de Guynemer...

Le responsable du bureau d'étude est C. Salomon. La maîtrise d'œuvre est le bureau d'étude de l'ENSAM de Châlons-en-Champagne, il est constitué de Camille Besnard, Clément Dumeril, Nicolas Lacombe, Arthur Le Marchand et Audrey Lozingot, étudiants en première année à l'ENSAM de Châlons-en-Champagne.

C. Salomon est également expert dans les domaines techniques qui seront utiles à cet avant-projet sommaire.

2.4. Cahier des charges fonctionnel fourni par le commanditaire

Le réfrigérateur qui sera étudié dans cet avant-projet sommaire s'inscrit dans une démarche low-tech. Le low-tech désigne des solutions simples, durables et accessibles, utilisant peu de ressources et d'énergie, pour

répondre aux besoins du quotidien de manière écologique et résiliente. Ci-dessous se trouve le cahier des charges du produit à concevoir :

- Maintenir à environ 5°C la température à l'intérieur du réfrigérateur
- Contenir un volume de 50 à 150 L
- Réduire les coûts énergétiques en comparaison avec un réfrigérateur classique
- Être fabriqué et assemblé dans un lieu proche de la localisation du client
- Être fabriqué au moyen de matériaux proches du lieu d'assemblage
- Être facilement réparable et recyclable
- Posséder une durée de vie de 10 ans
- Résister à une utilisation domestique quotidienne
- Avoir un coût minimal
- Pouvoir être utilisé dans tout type d'habitation

2.5. Environnement du produit (ou du service) à concevoir et à réaliser

Le cadre de ce projet s'inscrit dans une démarche technologique nommée low-tech qui vise comme explicité précédemment à réduire les coûts énergétiques et technologique d'un système. De ce fait afin de réduire les coûts, il est nécessaire de définir l'environnement externe au système afin de s'adapter au mieux à celui-ci.

Tout d'abord, dans l'usage classique du réfrigérateur, c'est-à-dire tel qu'il est habituel de voir en France, celui-ci se trouve dans une pièce (généralement la cuisine) (figure 1). La pièce du logement est chauffée avec une humidité contrôlée. Ces différentes valeurs sont plus ou moins constante tout au long de l'année tel que la température $T=20^{\circ}\text{C}$, la pression $P=1$ bar. De plus pour fonctionner un réfrigérateur classique nécessite d'être alimenté au réseau EDF 220V, 50Hz.



Figure 1: Cuisine dans laquelle se situe le réfrigérateur

Par ailleurs il est courant que le réfrigérateur puisse se situer dans une cuisine équipée d'appareil électro-ménager dégageant eux même de la chaleur (fours, plaques de cuisson). (Figure 2)

Appareil de cuisson	Dégagements des appareils de cuisson électriques en mode normal/réduit*			
	Chaleur totale [W/kW]	Chaleur sensible [W/kW]	Chaleur latente [W/kW]	Vapeur [g/h.kW]
Secteur des appareils de cuisson				
Marmites	235/105	35/25	200/80	294/118
Cuiseurs automatiques	50/-	40/-	10/-	15/-
Cuiseurs à vapeur haute pression	225/25	25/25	200/0	294/0
Fours de cuisson à vapeur	300/170	120/70	180/100	265/147
Secteur grills et rôtissoires				
Sauteuses	950/400	450/250	400/150	588/220
Plaques de grills et rôtissoires	730/320	330/200	400/120	588/176
Salamandres et grills	975/875	800/700	175/175	257/257
Fours	510/410	350/250	160/160	235/235

Figure 2 : Dégagement des appareils de cuisson électriques en mode normal/réduit

Cependant dans le cadre d'une approche low-tech, il serait avantageux de prendre en compte l'environnement extérieur tels que les saisons et la température. En prenant en compte ces éléments, il est possible de quantifier l'humidité et la pression de l'air en plus de la température.

Ainsi, l'objectif du réfrigérateur est de refroidir les aliments afin de limiter le développement bactériologique, l'utilisation de l'air ambiant peut aider à refroidir les aliments tout en limitant l'utilisation d'énergie. Le réfrigérateur low-tech doit donc s'adapter aux fluctuations des températures (figure 3) afin d'apporter des solutions durables sur toute une année.

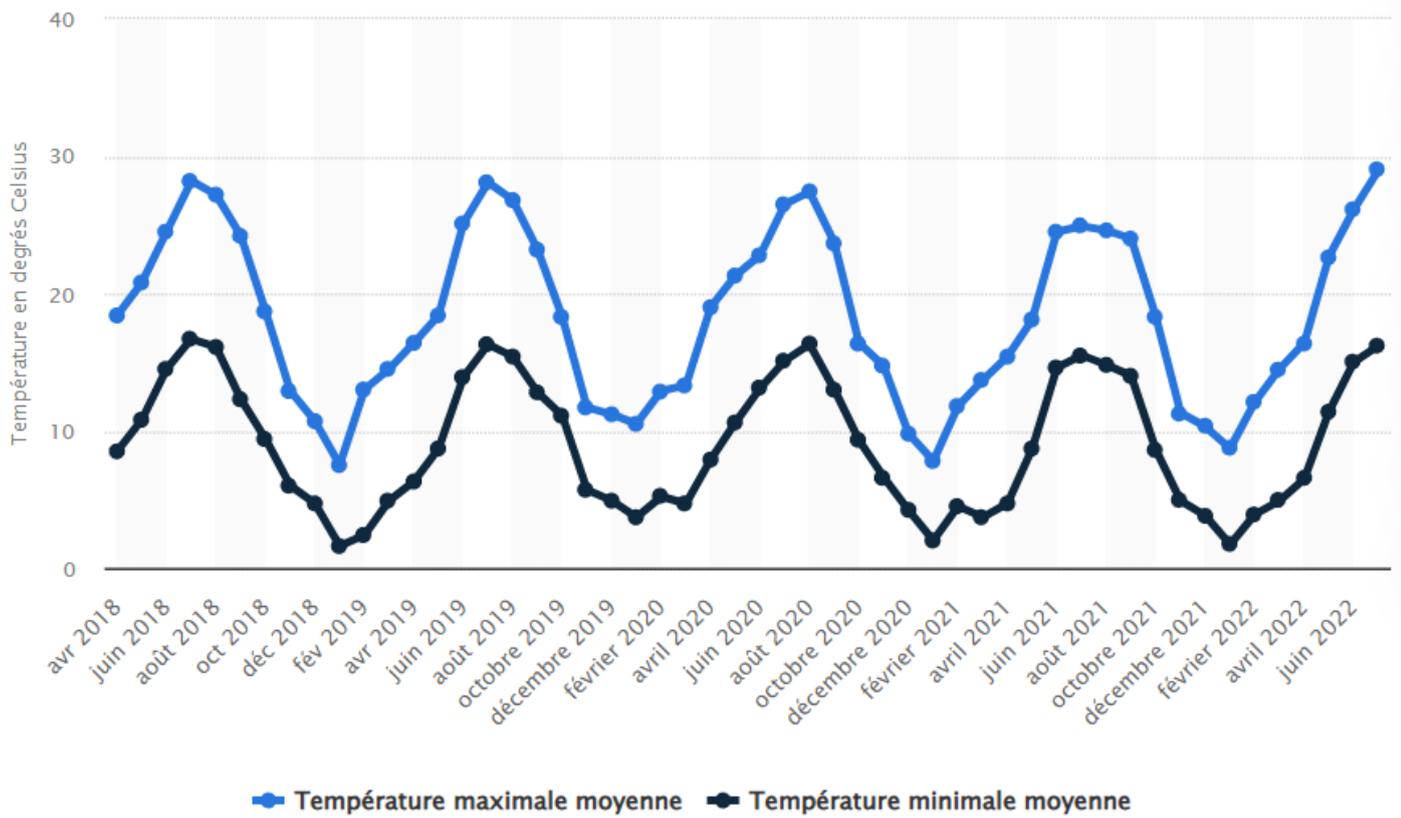


Figure 3 : Évolution mensuelle de la température maximale moyenne et température minimale moyenne en France entre avril 2018 et juillet 2022(en degrés Celsius), statista [1]

Finalement, le cas d'un réfrigérateur semi-enterré permet de profiter de la caractéristique isotherme donné par la profondeur des sols. Cela pourrait encore réduire la consommation énergétique et de ce fait, il faut considérer la température du sol en profondeur dans l'environnement (figure 4) du système.

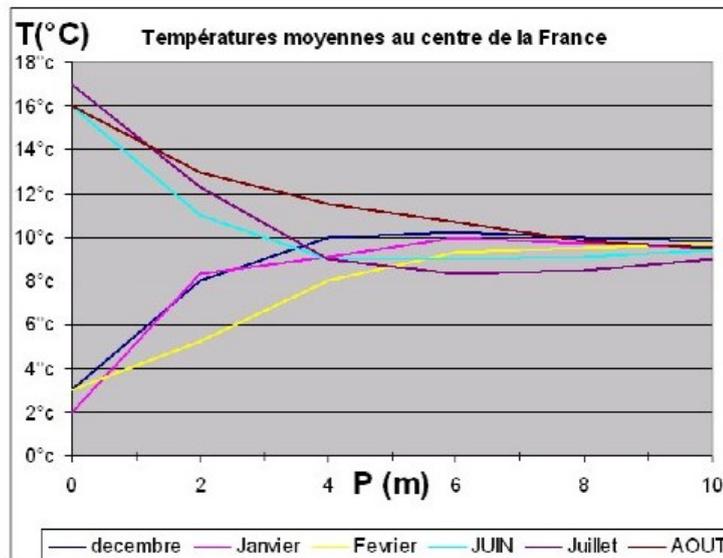


Figure 4 Températures moyennes des sols français en degrés Celsius

2.6. Produits concurrents

Né en Afrique du Nord, le zeer pot est un composé de deux pots en terre cuite, séparés par du sable et de l'eau. Il est recouvert par un linge humide. Son principe repose sur l'évaporation de l'eau contenue dans le sable. Lors de ce processus, de la chaleur est extraite du pot intérieur (figure 4).

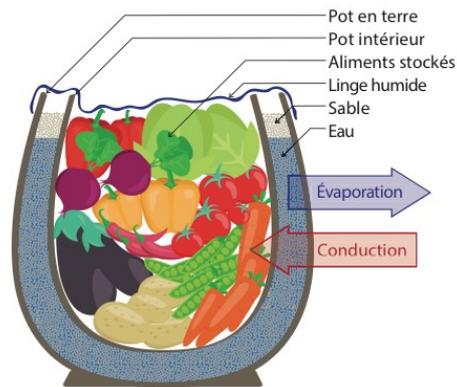


Figure 5: Zeer Pot

Cependant, la conservation des aliments dans ce réfrigérateur dépend fortement de la température et de l'humidité ambiante, et il ne peut souvent pas atteindre des températures aussi basses que le réfrigérateur traditionnel. Il est ainsi déconseillé pour la viande et le poisson, et la durée de conservation des aliments est inférieure.

Le réfrigérateur, que largement utilisé en France au quotidien est un appareil électroménager ayant pour objectif de conserver les aliments à basse température afin de limiter la prolifération de bactérie. Il fonctionne en utilisant un fluide réfrigérant pour évacuer la chaleur. Ce fluide permet certes un refroidissement efficace en absorbant puis en évacuant la chaleur (figure 5) mais il est aussi très nocif pour l'environnement. Il contribue alors à l'effet de serre et la destruction de l'environnement. Ils sont en plus inflammables et coûteux à produire.

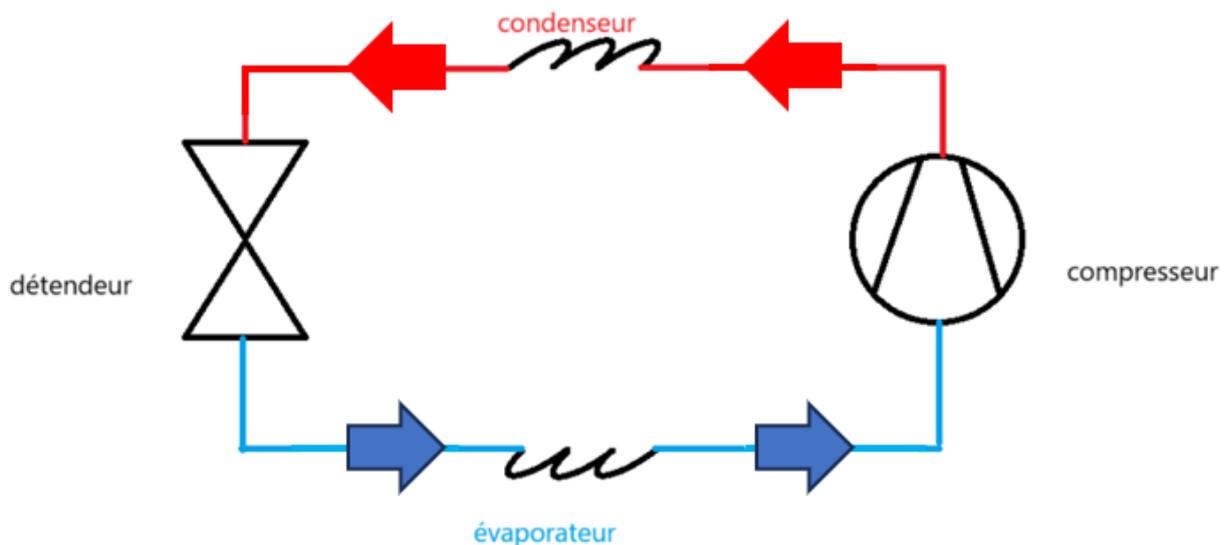


Figure 6: schéma du fluide réfrigérant

3. Organisation de l'avant-projet

Les objectifs de ce chapitre sont de :

- définir votre organisation, notamment en termes de planification, pour mener à bien votre avant-projet,

- montrer que vous travaillez comme des ingénieurs, et non pas comme des bricoleurs.

Pour montrer vos compétences en termes d'organisation, il faudra définir le planning avec méthode, en essayant préalablement de :

- anticiper les difficultés,
- saisir les opportunités,
- s'appuyer sur ses forces,
- limiter, voire supprimer, ses faiblesses.

Ces 4 points seront définis avec une matrice SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats), et nécessiteront la définition de plans d'actions de votre part.

De plus, pour montrer que vous travaillez avec méthode et que vous êtes organisés, il faudra s'appuyer :

- **sur des méthodes** enseignées ou non pour **toutes** les tâches de votre planning. Si vous n'avez pas eu d'enseignement sur certaines méthodes, cela nécessitera forcément une formation réalisée soit par un enseignant, soit en autonomie.
- **sur la structure de la trame de rapport**. Cette trame n'étant pas adaptée forcément à toutes les situations, il faudra l'adapter en conséquence et idéalement, en parler à votre responsable avant de commencer le travail d'avant-projet.

3.1. Définition de la matrice SWOT

Dans le but d'organiser l'avant-projet, d'orienter et de justifier les prises de décision future, sera réalisée dans un premier temps la Matrice SWOT associée au système. Une matrice SWOT est un outil d'analyse stratégique en entreprise dont le but est d'orienter l'approche décisionnelle, en analysant successivement les forces (Strengths) et les faiblesses (Weaknesses) de l'avant-projet, correspondant aux influences intérieures/propres, ainsi que les opportunités (Opportunities) et menaces (Threats), correspondant aux influences extérieures. Les éléments recueillis doivent être pondérés selon leur importance. À l'issue de la réalisation de la matrice SWOT, des plans d'actions concernant les points les plus mis en avant doivent être établis, puis mis en œuvre par le biais du planning.

On trouvera ci-dessous la matrice SWOT, associée à l'avant-projet :

FORCES	Pondération de 1 à 10	FAIBLESSES	Pondération de 1 à 10
Faible coût électrique	10	Sensibilité aux conditions extérieures	9
Produit de manière écologique	6	Mise en place dans la pièce	8
Faible coût du produit	4	Performances thermiques réduites	4
Durabilité du produit	4	Capacité volumique limitée	4
		Manque d'expertise	4
OPPORTUNITES	Pondération de 1 à 10	MENACES	Pondération de 1 à 10
Marché de la transition écologique	10	S'implanter sur le marché	7
Appui politique (subventions)	7	Ressources locales	6
Attrait de la nouveauté	4	Réchauffement climatique	5
		Acceptabilité culturelle	6

Figure 7 : Matrice SWOT pondérée de l'avant-projet

Après avoir réalisé la matrice SWOT, il est essentiel d'établir des plans d'actions afin d'optimiser les forces, de profiter des opportunités et de pouvoir contrer les faiblesses et les menaces. Les plans d'actions pour chaque élément le plus important / le plus critique de chaque case seront détaillés ci-dessous.

L'atout principale du réfrigérateurs low-tech réside dans son faible cout énergétique, afin de maximiser cette faible dépendance électrique, il convient de réaliser un frigo fonctionnant en synergie avec son environnement, notamment la température extérieure, dans le but de minimiser la consommation lorsque la température extérieure le permet. Puis lorsqu'elle ne le permet pas, il serait intéressant d'adopter des technologies d'isolation thermique plus primaire comme le pot Zeer voire même de diminuer ou de changer le frigo de place dans le logement

La faiblesse la plus importante du réfrigérateur est sa sensibilité aux conditions extérieures. En effet, une idée pour le projet est de le placer dans un endroit frais de la maison. De nombreuses variations de températures ayant lieu dans la cuisine (four, plaques de cuisson, ...), une solution envisageable est de le mettre dans une autre pièce, préférablement près d'une fenêtre. Pour amoindrir l'impact cette faiblesse, plusieurs solutions seront réfléchies : améliorer l'isolation thermique (double paroi, revêtement réfléchissant, mousse de polyuréthane, ...), adopter un système de refroidissement efficace qui pourrait être modulé selon la température extérieure, éviter au maximum les fuites dues à la porte en installant des joints de bonne qualité.

Pour tirer parti du marché de la transition écologique, nous mettrons en place une stratégie axée sur la certification, les partenariats publics et la production locale. L'obtention de labels tels que NF Environnement ou l'Écolabel européen garantira la qualité et la performance écologique de notre frigo low-tech, renforçant ainsi la confiance des consommateurs et facilitant son intégration sur le marché. En parallèle, nous établirons des collaborations avec l'État et les collectivités afin d'inclure notre produit dans les dispositifs d'aides à la transition énergétique, notamment les primes écologiques, les rénovations thermiques et l'équipement des logements sociaux. Cela permettra d'accroître notre visibilité et d'encourager son adoption à grande échelle. Enfin, nous centraliserons la production en France pour limiter l'empreinte carbone liée au transport, assurer un meilleur contrôle qualité et bénéficier des dispositifs de soutien à la relocalisation industrielle. En combinant ces leviers, nous renforcerons notre position sur un marché en pleine expansion tout en répondant aux enjeux environnementaux et économiques actuels.

Afin de minimiser la principale menace qui est de s'implanter sur un marché déjà très établi, il est important d'établir un plan d'action. En effet, les réfrigérateurs classiques sont les principaux concurrents du réfrigérateur low-tech. Les réfrigérateurs utilisant du fluide frigorigène et ayant une forte consommation électrique ont fait leurs preuves et sont utilisées depuis plusieurs décennies. Le réfrigérateur low-tech doit apparaître sur le marché et montrer qu'il peut lui aussi servir correctement à la conservation des aliments. Il faudra donc transmettre aux clients des arguments et des preuves de rentabilité. Il sera possible de s'appuyer sur une comparaison avec les réfrigérateurs classiques. La communication doit être axée sur les atouts du produit et il sera possible de valoriser le côté low-tech afin de profiter du marché de la transition écologique. Il faut se différencier des concurrents pour démarrer les ventes et s'implanter dans le marché. Il faut se différencier du concurrent pour démarrer les ventes et s'implanter dans le marché.

3.2. Définition du planning prévisionnel

La définition du planning est essentielle dans le cadre d'un avant-projet. Elle permet de s'organiser autour de tâches et sous-tâches. Il permet de valoriser les tâches demandant plus de travail et de souligner celles qui nécessiteront une formation/ des demandes au préalable.

PLANNING AVANT-PROJET				Dates (Semaines)																				
MACRO-TACHES	TACHES	SOUS TACHES	CHARGE DE TRAVAIL	RESPONSABLE	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	
Organisation de l'avant-projet	Définition de la matrice SWOT	forces, faiblesses, opportunités, menaces	0,5h (2 personnes)	Audrey																				
		plans d'actions	1h (2 personnes)																					
	Définition du planning prévisionnel	taches, sous taches	0,5h (2 personnes)	Nicolas																				
		définir charges de travail, responsables, dates	2h (3 personnes)																					
Définition de l'environnement	Produits concurrents		2h (1 Personne)	Camille																				
	Brevets sur le produit		2,5h (1 personnes)	Arthur																				
	Normes sur le produit/ législations		3h (1 personnes)	Clément																				
	Environnement physique du produit		2h (1 personnes)	Nicolas																				
Définition du périmètre	Cahier des charges fonctionnel		2,5h (4 personnes)	Camille																				
	Composants principaux du produits		2,5h (3 personnes)	Arthur																				
	Exclusions		1h (3 personnes)	Audrey																				
Conception préliminaire	Détermination des solutions élémentaires	réalisation du FAST	4h (4 personnes)	Clément																				
		choix des solutions	5h (4 personnes)																					

Second avant-projet COSI GIE1 et COPI GIM1 - Semestre 6			
Semaine	Revue de projet (avec Responsable BE)	Livrable	
		Numéro de livrable	Contenu
6		L1	Initialisation avant-projet + Introduction + Mise en situation
8		L2	Organisation de l'avant-projet : SWOT et Planification de l'avant-projet
9		L3.1	Définition de l'environnement du produit
10		L3.2	Définition du périmètre avec écriture du CDCF + exclusions + éventuellement, analyse critique rapports précédents
10	X		
12		L4.1	Définition du FAST, avec définition des fonctions techniques
12	X		
13		L4.2	Définition du FAST, avec recherche des solutions
13	X		
14		L4.3	Choix raisonné des solutions de la Fonction de Service et de quelques contraintes très importantes
14	X		
17		L5.1	Définition de l'architecture
17		L5.2	Prédimensionnement de quelques composants importants et nécessaires à la fonction de service
17	X		
19		L6	Organisation de la suite l'avant-projet + Conclusion
21-23			Soutenance finale
23			Clôture avant-projet

Figure 8: Planning fourni par M.périnet

Les jalons représentent les repères cruciaux de l'avant-projet. La réalisation du cahier des charges fonctionnel est la première étape indispensable de l'avant-projet, et donc le premier jalon, en ce que nous nous référerons tout au long de l'étude à ce dernier : les décisions prises doivent toujours s'effectuer en accord avec le cahier des charges, son établissement et sa validation forment donc une étape essentielle. Par la suite et à l'issue du choix des solutions, il y aura deux autres jalons qui sont la validation de l'architecture et de la structure. Cela permettra de visualiser concrètement un système théorique fonctionnel tout en répondant au cahier des charges. Finalement, le dernier jalon serait la conclusion, permettant d'amorcer la phase de projet suivante, durant laquelle devront notamment être confrontés les questions économiques et de fabrication, puis d'industrialisation.

4. Définition de l'environnement du produit / du service

4.1. Produits / services concurrents, voire d'éventuelles startups

Le marché des réfrigérateurs low-tech repose sur des solutions alternatives visant à réduire la consommation énergétique et l'impact environnemental. Parmi les produits existants, le frigo du désert (ou Zeer Pot) utilise l'évaporation de l'eau pour rafraîchir les aliments sans électricité, bien qu'il soit limité en capacité et en efficacité pour certains types de denrées. D'autres solutions, comme les réfrigérateurs solaires, exploitent l'énergie photovoltaïque ou l'absorption thermique pour fonctionner de manière autonome, mais leur coût initial peut être un frein. Par ailleurs, les glacières passives, couramment utilisées pour le transport médical ou alimentaire, permettent de conserver le froid sans électricité grâce à des matériaux isolants performants, bien que leur autonomie reste limitée. Plusieurs startups et organisations développent également des solutions innovantes dans ce domaine. FreshBox travaille sur des systèmes de réfrigération passive adaptés aux besoins alimentaires et médicaux, tandis qu'OffGridBox propose des réfrigérateurs intégrés à des micro-réseaux solaires pour les zones rurales. Des associations comme le Low-Tech Lab expérimentent et diffusent des alternatives open-source, encourageant l'auto-construction et le partage de savoir-faire. D'autres initiatives, comme le projet Mitticool en Inde, revisitent les technologies traditionnelles en proposant un réfrigérateur en argile fonctionnant sans électricité, inspiré du Zeer Pot mais optimisé pour une meilleure conservation des aliments. L'ensemble de ces acteurs et solutions témoignent d'un intérêt croissant pour des alternatives durables aux réfrigérateurs électriques classiques, répondant à des besoins spécifiques comme l'autonomie énergétique, le faible coût et l'adaptation aux climats chauds.

4.2. Brevets sur le produit / service

Les réfrigérateurs existent sous diverses formes. Plusieurs brevets ont été déposés pour différents réfrigérateurs ayant des objectifs précis (réduction des coûts, possibilité de déplacer le réfrigérateur...). Plusieurs brevets présentant des réfrigérateurs avec un aspect low-tech ont été regroupés dans cette partie, trouvés sur le site Esp@cenet.

➔ PENG Lin. Constant temperature fridge. CN205784116U. 18 mai 2016.

Ce brevet est sur un réfrigérateur à température constante. Cela permet un produit à faible coût, qui a une structure simple. Ainsi, les pièces sont faciles à changer par l'utilisateur. Le faible coût et la facilité de rechange des pièces sont des points importants dans une démarche low-tech. Cependant, ce brevet ne mentionne pas de progrès écologique, un aspect primordial du low-tech.

➔ CHEN Jiambo. Environment protection travelling type fridge-freezer used outdoors. CN201259361Y. 15 juillet 2008.

Ce brevet présente un réfrigérateur mobile respectueux de l'environnement. Grâce à son isolation en mousse de polyuréthane et la structure convexe-concave qui permet de faciliter l'écoulement de l'air froid, il est adapté au mieux à une utilisation dans un endroit chaud en consommant le moins d'énergie possible. Par ailleurs, il utilise un fluide frigorigène respectueux de l'environnement (R404A).

➔ MONTANER Simo, VINCENTE L. Réfrigérateur avec multiples compartiments indépendants. EP2182308A2. 4 novembre 2008.

Ce brevet concerne un réfrigérateur avec plusieurs compartiments indépendants pour baisser la consommation d'énergie. Ainsi, l'un des compartiments peut stocker des aliments à 15°C et un autre à 5°C, et ce dans le même réfrigérateur. Chaque compartiment peut être ouvert et régulé indépendamment. C'est une idée très intéressante dans le cadre de la réalisation d'un réfrigérateur qui consomme peu d'énergie. Néanmoins, le prix d'un tel réfrigérateur peut être très élevé.

➔ KUEHL Steven, WU Guolian. High efficiency refrigerator. US8511109B2. 20 août 2013.

L'objectif de cette invention est de créer un réfrigérateur avec une meilleure efficacité énergétique. En effet, les compresseurs dans les réfrigérateurs traditionnels fonctionnent toujours à capacité maximale, ce qui dépense plus d'énergie. L'utilisation d'un compresseur linéaire peut alors être une solution à ce problème.

4.3. Normes sur le produit / service

Le besoin de trouver des normes apparaît quand le produit doit s'adapter et/ou respecter son environnement, et qu'il manque des critères et niveaux définis précisément. Elle est utilisée pour mieux définir les attendus lors des échanges entre partenaires économiques, scientifiques, technique et sociaux. Elle est volontaire, et créé par un groupe de représentants de toutes les parties concernées. Elle peut également être obligatoire, dans son entièreté ou en partie si une réglementation le précise. Une enquête publique est nécessaire avant son adoption, et elle est réexaminer pour vérifier qu'elle reste pertinente dans le temps.

Les normes recherchées proviennent des sites Cobaz et AFNOR et ont été trouvé grâce aux mots-clefs « fluides frigorigènes », « réfrigérateur », « refroidissement ». Puis, en s'appuyant sur les normes citées dans les normes trouvées, l'information est remontée. Certaines normes abrogées seront citées dans cette partie car elles sont encore très popularisées ou possèdent un intérêt certain dans la compréhension du système.

Il sera cité ici des normes relatant de différents aspects liés aux réfrigérateurs. Tout d'abord seront citées les normes servant pour le fluide frigorigène qui sera potentiellement présents dans notre système final en fonction des solutions techniques retenues. Ensuite se trouvera les normes relatant des utilisations du réfrigérateur. Pour faciliter la lecture, les normes seront classées dans des tableaux.

Normes sur les fluides frigorigènes

<i>Normes</i>	<i>Points essentiels à retenir</i>
<i>AFNOR. Guide de bonnes pratiques destiné à la formation des techniciens de maintenance de réfrigérateurs, congélateurs et appareils combinés à usage domestique utilisant un fluide frigorigène inflammable. UTE C 73-997, 2006, 21 p</i>	<i>Les réfrigérateurs à fluide frigorigène utilisent de l'isobutane en faible quantité mais c'est un produit inflammable gazeux à température ambiante et à pression ordinaire, il se mélange facilement à l'air en cas de fuite. Par conséquent, il y a de nombreuses règles à respectées concernant la maintenance des réfrigérateurs. En effet, le mélange isobutane/air, dans des proportions comprises entre 1,8 et 8,5 % en volume d'isobutane est explosif et est particulièrement soluble dans l'huile du compresseur, il la rend inflammable à son tour. Il faut donc avant toutes opérations vérifier la température à l'intérieur et à l'extérieur du système, utiliser des protections, observer le type de gaz ...</i>
<i>AFNOR. Appareils électrodomestiques et analogues - Sécurité - Partie 2-24 : Règles particulières pour les appareils de</i>	<i>Le nom des fluides utilisant doit être précisé avec les symboles associés (risque incendie, toxicité...) et s'il y a plusieurs circuits, il faut les séparer.</i>

<p>réfrigération, les sorbetières et les fabriques de glace. NF EN 60335-2-24, 2012, 65 p</p>	<p>Ne pas utiliser d'appareils électriques à l'intérieur du compartiment de stockage des denrées, à moins qu'ils ne soient du type recommandé par le fabricant.</p>
<p>AFNOR. Systèmes frigorifiques et pompes à chaleur - Exigences de sécurité et d'environnement - Partie 2 : conception, construction, essais, marquage et documentation. NF EN 378, 2017, 98p</p>	<p>Détails de la conception des réfrigérateurs en spécifiant chaque élément en contact avec le circuit du fluide frigorigène.</p> <p>Les joints doivent être conçus de façon à ne pas être endommagés en cas de gel de l'eau à l'extérieur.</p> <p>Autorisation de fuites du système frigorigène de 3g / an.</p> <p>Le réfrigérateur doit pouvoir être utilisé 250 000 cycles.</p>

Normes sur l'utilisation d'un réfrigérateur

<p>AFNOR, Sécurité des appareils électrodomestiques et analogues - Partie 1 : prescriptions générales (complétée par les corrigendum 1 d'août 1995, 3 de décembre 1995, 4 d'avril 1997), NF EN 60335-1. 2013 et 1995, 207p</p>	<p>La puissance doit être inférieure à 25 W avec une tolérance de 20%.</p> <p>Le présent document traite de la sécurité des appareils électriques pour environnement domestique et usage collectif, dont leur tension assignée n'est pas supérieure à 250 V pour les appareils monophasés et à 480 V pour les autres appareils.</p>
<p>AFNOR. Appareils de réfrigération à usage ménager - Caractéristiques et méthodes d'essai. NF EN ISO 15502. En vigueur de 2007 à 2017, 92p</p>	<p>Cette norme est abrogée en 2017 mais montre de nombreux aspects intéressants du réfrigérateur.</p> <p>Elle explique que le réfrigérateur doit toujours contenir au moins un emplacement sans givre. Les denrées doivent être conservées et le goût ne doit pas être altéré.</p>
<p>AFNOR. Réfrigérateurs à usage ménager - Réfrigérateurs-congérateurs - Caractéristiques et méthodes d'essai. NF EN 28187. En vigueur de 1992 à 2011, 62p</p>	<p>Complète la norme précédente mais est abrogée en 2011</p>
<p>AFNOR. Composants électroniques - Système CENELEC d'assurance de la qualité - Condensateurs fixes à diélectrique en film de polycarbonate métallisé pour courant continu - Spécification intermédiaire. (changement de statut de NF C 83-153, mai 1978, ENR.). NF C83-153 UTE. 1981, 12p</p>	<p>Cette norme donne les caractéristiques qui doivent être pour les composants électroniques du réfrigérateur en particulier les condensateurs. Elle pourrait être utile dans le cadre de l'avant-projet pour aider aux choix des composants électroniques.</p>

<p><i>AFNOR. Méthodes de mesure de la consommation d'énergie électrique et des caractéristiques associées, des réfrigérateurs, conservateurs et congélateurs à usage ménager et leurs combinaisons. NF EN 153, en vigueur de 1990 à 1995, 14p</i></p>	<p><i>Cette norme est abrogée mais elle explique tous les éléments à citer pour caractériser le réfrigérateur et sa consommation électrique. L'alimentation doit être de 220V ± 1% à une fréquence de 50 Hz.</i></p>
---	--

4.4. Réglementations et/ou législations sur le produit / service

La conception d'un réfrigérateur se heurte vraisemblablement à certains prérequis légaux en lien avec les fonctions et l'utilisation du produit. En effet, le réfrigérateur servant à maintenir à basse température des aliments dans le but de les conserver, la dimension sanitaire du produit doit être contrôlée. Les dangers pour le consommateur sont les suivants, et peuvent avoir des impacts graves sur la santé :

Développement de moisissures, comme *Aspergillus* [2]

Développement de bactéries, comme la *Salmonellose* ou *Staphylococcus aureus* [3][4]

D'autre part, les réfrigérateurs sont aussi soumis à des réglementations, car ils consomment beaucoup d'énergie. Il s'agit notamment d'imposer aux fabricants des obligations afin de permettre aux consommateurs d'être plus éclairés sur l'impact environnemental des appareils électroménagers, tout en leur permettant de faire des économies.

Deux règlements délégués européens [5][6] définissent d'abord la plage de fonctionnement du réfrigérateur en température : la température à l'intérieur du réfrigérateur doit être inférieure à 4°C, celui-ci doit posséder un thermomètre permettant à l'utilisateur de connaître la température au dedans, ainsi qu'un dispositif de contrôle permettant de la faire varier. À l'achat, le produit doit aussi contenir une notice d'hygiène, ainsi que des consignes de réglage, et dans le cas où celui-ci est disponible à l'achat sur Internet, une fiche produit doit lui être assortie.

Par ailleurs, les décrets précisent notamment des termes comme « consommation d'énergie annuelle », « compartiment » et « appareil de réfrigération », avant d'imposer aux réfrigérateurs à usage domestique de volume compris entre 10 et 1500 litres un étiquetage énergétique (explicitant la classe d'efficacité énergétique).

Les décrets prévoient les sanctions (amendes) auxquels s'exposent les fabricants en cas de non-respect de la réglementation en vigueur.

4.5. Ressources libres de droit

Le réfrigérateur étant un élément essentiel de notre mode de vie quotidien et qui nécessite en plus de cela une source d'énergie électrique constante, plusieurs projets et ou évolution ont été mis en place afin de surmonter des contraintes d'infrastructure électrique et de consommation.

Le site web [wiki low tech](#) [7] présente de nombreux projets dits low-tech, dont le Zeer Pot, qui est en réalité une technologie ancestrale qui s'inscrit parfaitement dans le cadre du low-tech comme vu dans la partie 4.1 . Ce réfrigérateur du désert est fabriqué en terre cuite selon le schéma ci-dessous (figure 8) :

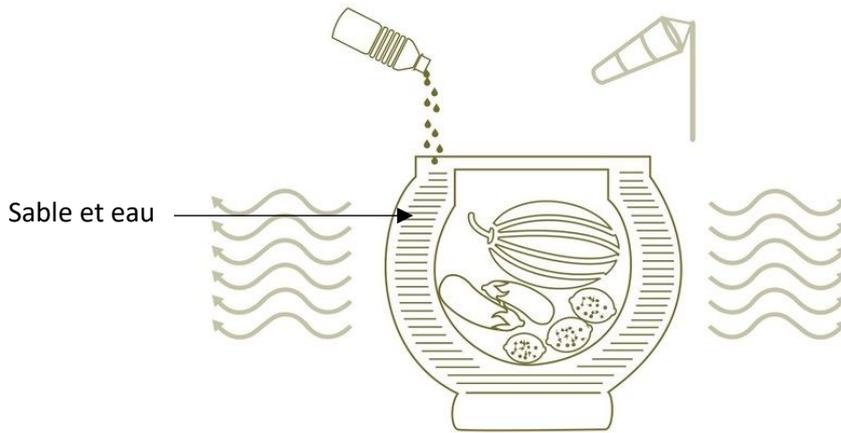


Figure 9 : Zeer Pot

Ce système utilise l'évaporation comme outil thermodynamique afin de préserver les aliments. Cette technologie ancestrale est libre de droits et permet de conserver les aliments à une température de 10°C inférieur à la température extérieur.

D'une manière tout à fait plus récente, le [forum low tech suivant](#) [8] mets en avant différents projets de développement durable dont le [Chest fridge](#). Ce projet a été mené par Dr Tom Chalko qui détaille dans son article tout le processus de développement du Chest fridge. Son idée a été d'en premier lieu de changer les habitudes d'utilisation inefficaces des utilisateurs en se basant sur un coffre afin de conserver l'air froid en bas de celui-ci. Pour ce faire il part d'un congélateur coffre classique qu'il transforme en frigo. Il présente dans son article différents schéma électrique comme celui-ci (figure 9) :

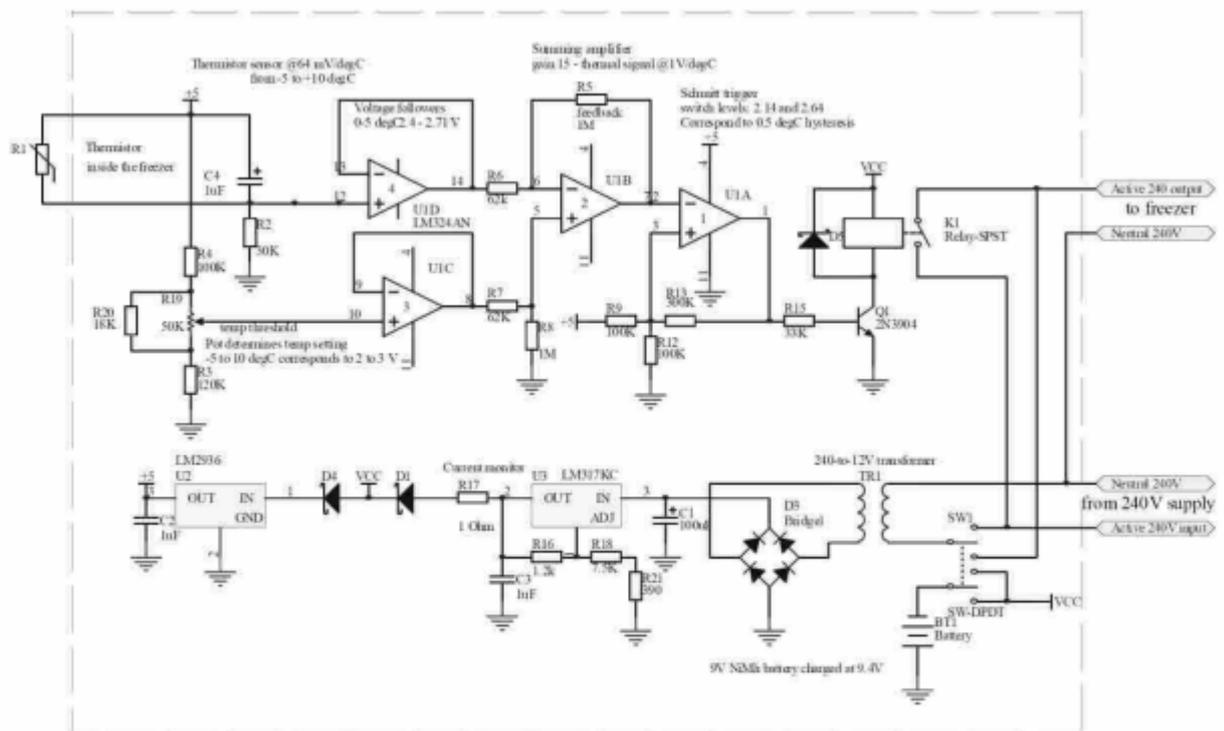


Fig 2. Schematic of the zero-standby-power freezer-to-fridge thermostat. Earth connection (not shown) must be carried from the AC power supply cable to the freezer supply cable. Suitably rated MOV (metal oxide varistor) installed between 240V output and the neutral terminals can help to protect the lifespan of the relay

Figure 10 : Schéma électrique du chest fridge

Le site internet où est présent cet article ne précise pas explicitement sa License ou ses droits d'utilisation associés cependant, l'idée de faire un frigo coffre est tout à fait libre de droits.

4.6. Environnement physique du produit / service

Cette partie sert à lister tous les éléments situés à proximité et en lien direct ou non avec le produit. Elle permet aussi de s'intéresser à des phases de vie particulières du réfrigérateur comme la réalisation, le transport, l'installation, la maintenance et le recyclage en fin de vie. De plus, pour ne pas oublier certains éléments extérieurs, un diagramme des interactions (figure 10) est inclus. Finalement, elle permet de faire une étude de marché afin de caractériser un profil type pour les futurs clients.

Il y aura certainement des répétitions avec l'environnement déjà défini dans le chapitre 2. **Mise en situation**, mais il est indispensable de tout rassembler ici pour faciliter la lecture.

De nombreux éléments sont en lien avec le réfrigérateur low-tech. L'air de la pièce et l'air provenant de l'extérieur peuvent modifier l'humidité et la chaleur à l'intérieur du réfrigérateur. Il y a donc des transferts thermiques qu'il convient de prendre en considération. Le réfrigérateur, même low-tech aura sûrement besoin d'une alimentation électrique afin de maintenir la température des aliments. Le secteur de 220V est donc dans l'environnement. Une idée pour cet avant-projet étant de placer le réfrigérateur à un endroit stratégique, c'est-à-dire un endroit frais de la maison (en hiver, à proximité d'une fenêtre). Il faudra ensuite adapter le réfrigérateur selon la fenêtre ou le mur qui le supportera. La pièce dans laquelle se trouve le système est aussi à prendre en compte. En effet, la fréquentation de celle-ci peut jouer sur divers facteurs, comme la chaleur de la pièce ou le désordre dans celle-ci (présence d'objets posés sur le réfrigérateur ?). Finalement, il est nécessaire de prendre en compte les utilisateurs, et notamment leur fréquence d'utilisation du réfrigérateur.

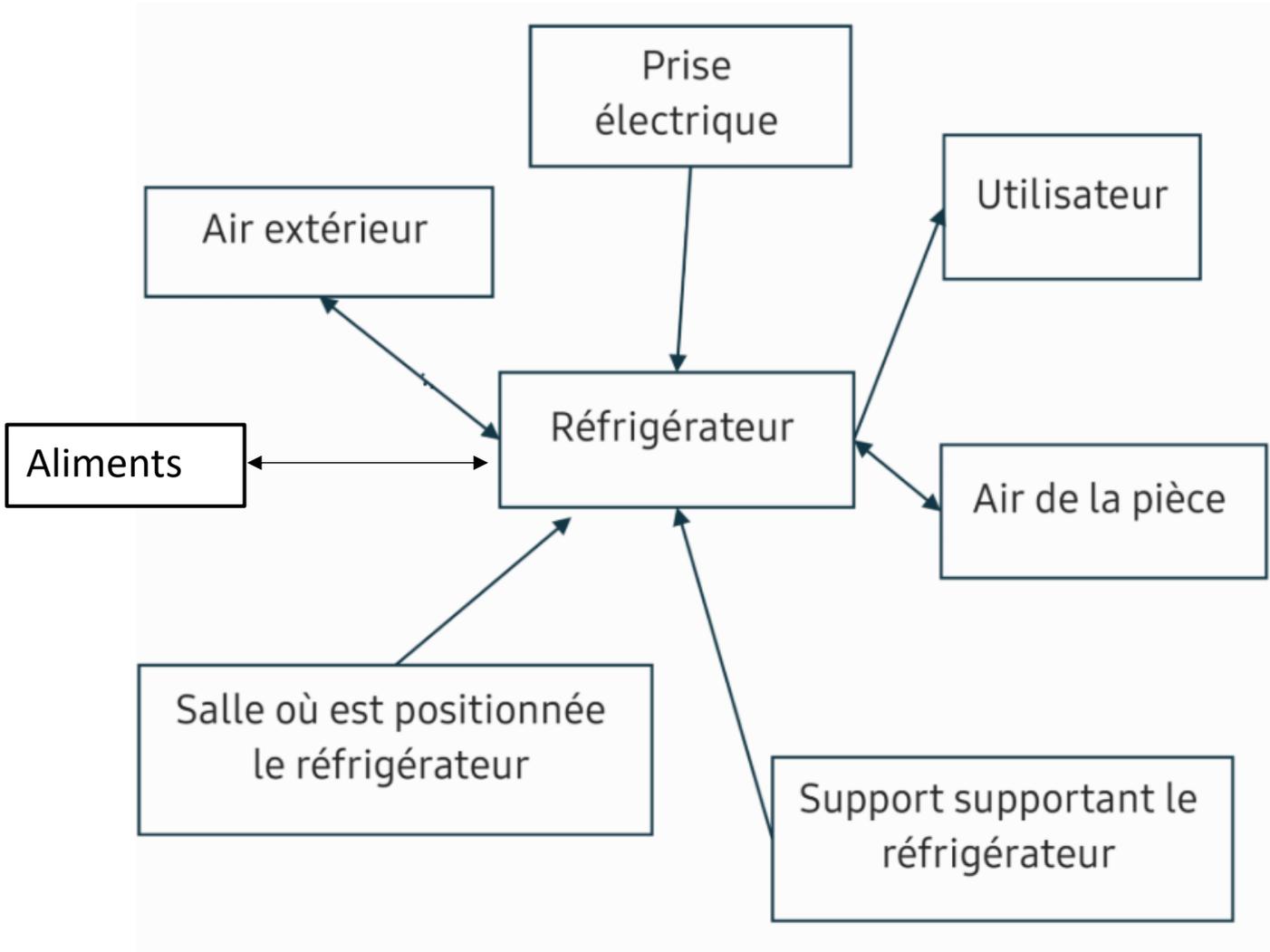


Figure 11 : Diagrammes des interactions du réfrigérateur

Au-delà des aspects thermiques, électriques et environnementaux liés à l'intégration du réfrigérateur low-tech dans son espace, il est essentiel de considérer l'ensemble du cycle de vie du système :

Le **Fabrication** : Consiste à trouver des matériaux et à les assembler tout en réalisant les tests adéquats pour assurer le fonctionnement du système. Pour satisfaire le côté low-tech, notre réfrigérateur doit être produit localement avec des matériaux durables.

Le **Transport** : Doit lui aussi minimiser les impacts écologiques. Il faut ainsi privilégier les modes de transport les moins polluants sur de petites distances avec une distribution locale. Les réfrigérateurs doivent pouvoir être disposés dans un camion et déplacés sur de courtes distances sans être détériorés : la disposition et l'empilement des produits dans le transport doit être prévu afin d'emballer les réfrigérateurs sans dommage (voir l'emballage : mousse, polystyrène...).

L'**Installation** : Le réfrigérateur doit être facilement montable/installable par le client (ne doit pas nécessiter de matériel excessif, c'est-à-dire que les outils nécessaires correspondent à des standards, si cela n'est pas le cas, ils devront être fournis. Ne doit présenter pas un danger pour le consommateur), dans la pièce prévue à cet effet. Il doit pouvoir se raccorder simplement au réseau électrique domestique et être prêt à l'emploi dans un court temps après l'installation (le temps de refroidir).

L'Utilisation : Représente la phase de vie principale du réfrigérateur, vraisemblablement la plus longue et représente la phase d'exploitation domestique des fonctionnalités du réfrigérateur. Elle regroupe les sous-phases suivantes : les **Réglages**, le **Fonctionnement Nominal**.

- **Réglages** : Représente la phase modification de la température (survient à l'installation après raccordement électrique, mais aussi lorsque l'utilisateur désire changer de température). Le réfrigérateur doit pouvoir atteindre rapidement la température de consigne, et l'utilisateur doit pouvoir connaître la température dans le réfrigérateur.
- **Fonctionnement Nominal** : Représente la phase de fonctionnement conventionnel. Le réfrigérateur doit pouvoir se maintenir à une température définie, même en cas d'ouverture courte par l'utilisateur.

Les **Phases de vie particulières** : Représente phases de vie « exceptionnelles », dont les **Accidents domestiques**, les **Chocs** et les **Pannes**

- **Accidents domestiques** : Dans le cas d'une chute de l'utilisateur à proximité du réfrigérateur, celui-ci ne doit pas être blessant (éviter les arrêtes coupantes et sommets pointus). Les aliments doivent d'ailleurs rester stable en cas de choc. Le réfrigérateur ne doit pas favoriser des départs de feu ou incendies. En cas de projection d'eau, les systèmes électriques doivent se trouver dans un compartiment étanche.
- **Pannes** : Lors d'une panne de courant, le réfrigérateur ne fonctionne plus. Mais, pour éviter au maximum de perdre tous les aliments dedans, la température à l'intérieur du réfrigérateur doit pouvoir varier lentement.

La **Maintenance** : Pour rester dans l'esprit low-tech les pièces défectueuses doivent pouvoir être facilement remplaçables.

Le **Recyclage** : Pour respecter la démarche low-tech, le système doit être réalisé en matériaux recyclables. L'idée est de reprendre l'économie circulaire, qui vise à éviter les déchets en fin de cycle de vie du produit (recyclage, remise à neuf, ...).

À l'issue de l'étude des phases de vie, on liste les **Éléments du Milieu Extérieur** :

- Air
- Outils du fabricant
- Pièces à fabriquer
- Moyen de transport, Emballage
- Support
- Outils du client
- Réseau électrique
- Pièce d'utilisation, Utilisateur
- Réparateurs
- Machines de recyclage.
- Gravité

Il faut aussi déterminer le profil des clients visés. Il est établi dans le tableau suivant :

Classe d'âge	Les jeunes avec des budgets assez faibles Des ménages voulant améliorer leur consommation électrique ou leur impact environnemental
Situation familiale	Ménage peu nombreux (3 personnes maximum)

Situation économique	Personnes cherchant à minimiser leurs dépenses en consommation énergétique
Psychologie (attentes profondes, valeurs, motivations...)	Touche les personnes investies dans la lutte climatique, les éco-anxieux, ceux qui recherchent du local, et ceux qui veulent réduire leur consommation électrique
Un ou plusieurs de leurs 5 sens	<p>Vue : assez esthétique pour une démarche de sobriété</p> <p>Odorat : pas d'odeur sortante du réfrigérateur</p> <p>Ouïe : limiter le bruit du réfrigérateur</p>

5. Définition du périmètre du produit / service

Ce chapitre vise à définir clairement le cadre et les objectifs de l'étude, en particulier si le cahier des charges fonctionnel fourni par le commanditaire est incomplet. L'enjeu est d'anticiper les remarques lors des premières revues de projet afin d'éviter tout rejet de travaux ou la mise en évidence d'oubli majeur. Il est donc essentiel de consolider le cahier des charges en utilisant une méthode adaptée, comme celle enseignée par Monsieur Périnet, et de préciser les limites du projet pour éviter toutes ambiguïtés. Ces éléments doivent être discutés et validés avec le commanditaire avant la rédaction du rapport pour préserver une relation constructive. Pour ce faire, lors d'une réunion préalable, il est recommandé de lui proposer des contraintes supplémentaires pertinentes, d'expliquer la méthode employée pour les identifier et de l'associer à la recherche d'autres contraintes essentielles à la réussite.

5.1. Consolidation éventuelle du cahier des charges fonctionnel

Le cahier des charges cité en partie 2.3 est déjà assez complet, on le consolidera par la suite grâce à des méthodes précises. Il s'agira également de le compléter et le détailler.

- Maintenir à environ 5°C la température à l'intérieur du réfrigérateur
- Contenir un volume de 50 à 150 L
- Réduire les coûts énergétiques en comparaison avec un réfrigérateur classique
- Être fabriqué et assemblé dans un lieu proche de la localisation du client
- Être fabriqué au moyen de matériaux proches du lieu d'assemblage
- Être facilement réparable et recyclable
- Posséder une durée de vie de 10 ans
- Résister à une utilisation domestique quotidienne
- Avoir un coût minimal
- Pouvoir être utilisé dans tout type d'habitation

5.1.1. Redéfinition éventuelle de la fonction de service

Pour rechercher la raison fondamentale du besoin, il faut se demander pourquoi le client a exprimé son besoin. En lui posant directement la question « pourquoi ? » plusieurs fois, il devrait donner la vraie raison de son besoin. Cette méthode s'appelle la « méthode des 5 pourquoi ? », car celui qui en est à l'origine estimait que 5 était un maximum pour arriver à cette vraie raison. Il n'est donc pas nécessaire d'atteindre ce nombre 5. La fonction de service trouvée est Maintenir les aliments et désormais nous allons continuer de répondre avec la méthode des pourquoi ?

- Maintenir la température des aliments

- Conserver les aliments
- Pour qu'ils ne périssent pas
- Pour les consommer sans danger
- Pour se nourrir

Le problème à la source c'est la consommation d'aliments frais, c'est un problème lié aux habitudes alimentaires. Les consommateurs ou les aliments ne peuvent disparaître, l'alimentation est un besoin vital. Le projet est donc viable.

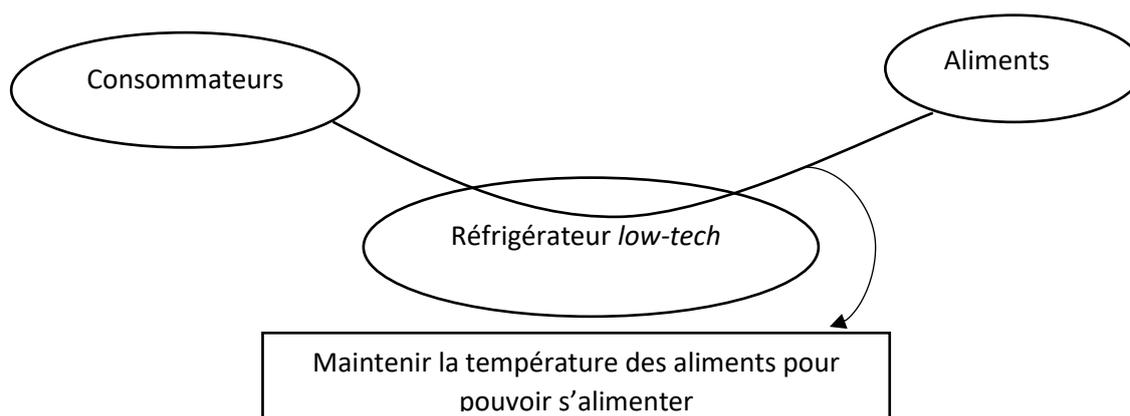


Figure 12: Rôle de la fonction globale

Avec tous les éléments pris en compte, il est possible de retrouver la fonction de service du système. Il est convenable de penser que celle-ci est « Maintenir les aliments à une température convenable pour satisfaire la consommation des utilisateurs ».

5.1.2. Recherche de contraintes supplémentaires

L'objectif après avoir trouvé la fonction de service est de trouver toutes les contraintes associées au système. Il faut alors croiser tous les EME répertoriés dans le chapitre 4.6. Environnement physique du produit / service, avec les 4 verbes d'action Résister, S'adapter, Respecter (= ne pas abîmer) et Informer. Contrairement à une fonction de service qui est constituée d'un verbe à l'infinitif et de 2 EME, une contrainte est une relation avec un verbe d'action et un seul EME.

Pour chaque couple (verbe d'action, EME), il faut évaluer son importance :

3 : la contrainte est jugée très importante pour l'avant-projet.

2 : la contrainte est intéressante pour l'avant-projet, mais ne « semble » pas critique en avant-projet sommaire. Cette contrainte sera abordée en phase de projet ou avant-projet détaillé.

1 : la contrainte a du sens, mais n'a aucun intérêt pour ce produit / service.

- : la contrainte n'a aucun sens avec le verbe.

Comme les 4 verbes d'action sont parfois assez vagues, il faut les remplacer par d'autres verbes d'action plus parlant lors de l'établissement des contraintes. Pour se repérer, dans le tableau croisé permettant d'établir les contraintes, il sera ajouté le nom de la contrainte associée.

EME	Résister	Respecter	S'adapter	Informé
Utilisateur	3	3	3	1
Aliments	3	3	3	-
Air	3	3	3	-
Réseaux électrique	2	-	3	-
Support	3	3	2	-
Pièce	-	-	3	-
Gravité	1	-	-	-
Outils du client	2	2	2	-
Localisation	-	-	3	-

Il s'agit ici de contraintes supplémentaires à ajouter au cahier des charges déjà existant.

5.1.3. Cahier des charges fonctionnel consolidé

Ce bilan souligne la nécessité de préciser les fonctions de service (performances, robustesse, fiabilité, etc.) et les contraintes (éléments extérieurs) à l'aide de critères mesurables. Certaines contraintes, comme la sécurité et l'ergonomie, nécessitent de s'appuyer sur des normes spécifiques. L'objectif est de remplacer les formulations vagues par des références normatives claires et vérifiables.

EME	Référence	Fonction de service / Contrainte	Critères	Niveaux	Classe de flexibilité
Utilisateur Aliments	FS1	Permettre à l'utilisateur de conserver plus longtemps des aliments périssables pour satisfaire sa consommation	Température intérieure	$T = 5^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$	F0
Utilisateur	C1	Ne pas blesser les utilisateurs	Forme extérieure du réfrigérateur	-	F1
Utilisateur	C2	Pouvoir être facile à utiliser			F0
Utilisateur	C3	Résister à des ouvertures fréquentes			F0
Air	C4	Résister à l'oxydation			F1
Aliments	C5	Avoir un volume assez important pour contenir	Volume intérieur du réfrigérateur	$V_{\min}=50\text{L}$ $V_{\max} = 100\text{L}$	F2

		les aliments d'un foyer			
Réseau électrique	C6	Être compatible avec les prises électriques classiques	Tension en sortie de la prise Fréquence de la prise électrique	T=230V f=50Hz	F0 F0
Pièce	C7	S'adapter à la salle dans laquelle le réfrigérateur est positionné	Dimensions	$L_{max} * l_{max} * h_{max}$ = 50cm * 50cm * 90cm	
Support	C8	Ne pas abimer le support sur lequel il est positionné			
Air	C9	Polluer le moins possible	Consommation maximale énergétique du réfrigérateur		F1
Utilisateur	C10	Réguler la température à l'intérieur du réfrigérateur			
Support	C11	Résister au support			
Utilisateur	C12	Indiquer au consommateur les paramètres du réfrigérateur			
Pièce	C13	Ne pas abîmer le mobilier			
Aliments	C14	Supporter la masse des aliments	Masse minimale à supporter		F1
Utilisateur	C15	Respecter le budget	Coût maximal de l'achat		F1
Localisation	C16	Utiliser des matériaux locaux			

5.2. Définition des exclusions

La définition des exclusions permet de déterminer les limites de l'étude du projet durant l'avant-projet. Elle s'appuie sur la définition des EME (Éléments du milieu extérieur) réalisée précédemment afin de déterminer parmi ceux-ci lesquels seront considérés (tout ou en partie).

- Air : Dans un souci de sobriété esthétique, on exclura l'influence de l'oxydation sur les matériaux du réfrigérateur. La température de la pièce dans laquelle se trouve le réfrigérateur sera prise en compte, ainsi que l'influence du cycle de vie sur la qualité de l'air
- Outils du fabricant : On exclut la prise en compte des outils dont dispose le fabricant, on le supposera équipé pour assembler tout type d'appareils destiné à un usage domestique
- Pièces à fabriquer : Nous ne nous intéresserons dans un premier temps qu'à une production écologique française.
- Moyen de transport : Nous excluons l'étude de l'emballage et de la disposition des réfrigérateurs dans un moyen de transport. Nous supposerons ainsi que le produit arrive chez le client sans dommage. Nous n'excluons cependant pas les impacts écologiques que ces trajets pourraient avoir.
- Support : Nous excluons l'étude des dommages que pourrait causer le réfrigérateur sur les différents types de surfaces sur lesquels un client pourrait le poser. Le support sera naturellement supposé plan.
- Outil client : L'outillage du client en vue d'une éventuelle phase d'assemblage sera exclu
- Utilisateur : Nous considérerons que le réfrigérateur est utilisé d'une manière normale (Condition Normale d'Utilisation) en excluant des dommages et contraintes inhabituels comme pour un vol.

En définitive, seront réalisés :

- Une étude thermique du réfrigérateur et de son environnement
- Un bilan écologique du cycle de vie du réfrigérateur dans les phases de vie suivantes : la fabrication, le transport, l'utilisation et le recyclage
- Une étude de la résistance mécanique associée à une utilisation normale du réfrigérateur

6. Conception préliminaire en avant-projet

Les principales étapes à suivre en conception sont les suivantes, elles doivent toutes répondre au cahier des charges fonctionnel :

- *Détermination des solutions élémentaires,*
- *Définition de l'architecture (= définition de la position relative de ces solutions),*
- *Définition de la structure supportant les efforts entre ces solutions,*
- *Prédimensionnement de ces solutions et de la structure,*

En conception préliminaire en avant-projet, l'objectif est de valider les faisabilités technique et économique d'un produit / service, et voir s'il est convenable de se lancer dans le vrai projet qui coûtera beaucoup plus cher.

6.1. Détermination des solutions élémentaires

Dans cette partie, les solutions envisageables face à un problème seront cherchées, et un choix raisonné sera effectué en s'appuyant sur le cahier des charges fonctionnel pour déterminer le meilleur compromis.

Pour trouver différentes solutions, il faut expliquer comment répondre aux Fonctions de Service et aux Contraintes du cahier des charges fonctionnel en omettant les solutions. Sur un FAST, la recherche de l'existant s'effectuera à partir de la dernière colonne des Fonctions techniques.

Dans cette avant-projet, l'objectif est de s'axer sur la fonction de service et 4 contraintes. Le tout devra être traité sur plusieurs niveaux.

6.1.1. Détermination des Fonctions techniques

La détermination des fonctions techniques est assez abstraite. La méthode pour les trouver est la suivante :

- Chercher « rapidement » des solutions à chaque Fonction de Service et Contrainte avec sa culture technologique, avec une recherche rapide sur le web, après discussions avec d'autres personnes...
- Définir les Fonctions Techniques à partir des solutions précédentes en expliquant l'intérêt de celles-ci vis-à-vis du cahier des charges fonctionnel (= prise de recul en se posant la question « **pourquoi** ? »),
- Éventuellement, définir d'autres Fonctions Techniques en se demandant **comment** on pourrait faire autrement,
- Éventuellement, trouver un point commun à plusieurs Fonctions Techniques pour définir une Fonction Technique de niveau supérieur **plus globale**.

Ensuite la méthode précédente pour chaque Fonction Technique peut être reprise (et non plus les Fonction de Service et Contraintes) pour définir les sous-Fonctions Techniques, et ainsi de suite jusqu'à arriver au dernier niveau des Fonctions Techniques.

Cette méthode permet d'élargir les solutions envisageables face à un problème.

Il faut lister toutes les premières idées de solutions et les Fonctions Techniques associées, et surtout ne pas effectuer de choix au début de la recherche des Fonctions Techniques.

Une Fonction Technique commence toujours par un verbe d'action à l'infinitif, pour faciliter la lecture du FAST, il est préférable d'ordonner les Fonctions Techniques de même niveau, avec un ordre logique. Quand il existe un lien entre une Fonction Technique et plusieurs sous-Fonctions Techniques, il faut indiquer clairement les liens entre celles-ci avec « **ET** » ou « **ET/OU** » (OU inclusif). Chaque Fonction Technique doit être référencée avec des numéros (FT3, FT3.1, FT3.1.1...) pour faciliter toute discussion et éviter des quiproquos avec les parties prenantes.

Pour la Fonction de Service, du fait que du recul ait été pris sur celle-ci lors de la consolidation du Cahier des Charges Fonctionnel, plusieurs Fonctions Techniques de 1^{er} niveau devraient apparaître, dont une correspondant à l'idée de solution globale imaginée en début d'avant-projet.

Il est possible d'indiquer les premières idées de solution ayant permis de trouver vos Fonctions Techniques :

- Dans le FAST final en conclusion de **6.1. Détermination des solutions élémentaires**
- Soit dans le sous-chapitre 6.1.1. Détermination des Fonctions techniques, ce qui permet d'alléger le FAST final.

Pour cet avant-projet la fonction de service : « Permettre à l'utilisateur de conserver plus longtemps des aliments périssables pour satisfaire sa consommation » sera traitée.

Les 4 contraintes retenues sont :

- Pouvoir être facile d'utilisation

- Résister à une utilisation quotidienne
- Respecter le budget des utilisateurs
- Polluer le moins possible

La fonction de service pour laquelle la recherche de solution est vraisemblablement la plus importante est : « Maintenir l'air à une certaine température dans le réfrigérateur », dans la mesure où elle concerne la phase de vie principale du réfrigérateur, mais aussi la fonction ayant l'impact écologique potentiellement le plus important. Ainsi, dans le FAST, les fonctions techniques allant de FTP 1.2.1.1 jusqu'à FTP 1.2.1.6 ont été établies en réfléchissant aux différentes solutions de réfrigération existantes sur le marché :

Fonction Technique	Solution Technique
FTP 1.2.1.1	Refroidissement par Cycle de réfrigération à compression de vapeur
FTP 1.2.1.2	Réfrigération par Absorption
FTP 1.2.1.3	Refroidissement par Réfrigération thermoélectrique (effet Peltier)
FTP 1.2.1.4	Réfrigération par Cycle Stirling
FTP 1.2.1.5	Refroidissement par Réfrigération magnétique
FTP 1.2.1.6	Réfrigération par évaporation
FTP 1.2.1.7	Réfrigération par cycle à air

Le FAST sans solutions techniques provisoire se trouve ci-dessous :

Réf.	Fonction de Service / Contraintes	Réf.	Fonctions Techniques (niveau 1)	Réf.	Fonctions Techniques (niveau 2)	Réf.	Fonctions Techniques (niveau 3)	Solutions techniques envisagées
FS1	Permettre à l'utilisateur de conserver plus longtemps des aliments périssables pour satisfaire sa consommation	FTP1.1	Stoker les aliments dans un compartiment					Utilisation de compartiments réfrigérants, les compartiments auraient une température différente Agencement de l'espace intérieur du frigo en bacs
		FTP1.2	ET Réguler la température de l'air dans le réfrigérateur à la température choisie par l'utilisateur	FTP 1.2.1	Maintenir l'air à une certaine température dans le réfrigérateur	FTP 1.2.1.1	Utiliser un fluide frigorigène qui change d'état pour absorber et rejeter la chaleur	Technologie de réfrigération par compression
						FTP 1.2.1.2	OU Utiliser une source de chaleur pour faire bouillir un fluide frigorigène	Technologie de réfrigération par absorption
						FTP 1.2.1.3	OU Utiliser des matériaux semi-conducteurs pour créer une différence de température	Technologie de réfrigération par absorption
						FTP 1.2.1.4	OU Utiliser un cycle thermodynamique fermé avec un gaz de travail, une source chaude et une source froide pour produire du froid	Technologie de réfrigération par cycle Stirling
						FTP 1.2.1.5	OU Utiliser des matériaux magnétocaloriques qui changent de température sous l'influence d'un champ magnétique	Technologie de réfrigération magnétique
						FTP 1.2.1.6	OU Utiliser l'évaporation de l'eau pour refroidir l'air	Technologie zeer-pot
						FTP 1.2.1.7	OU Utiliser l'air dans comme fluide frigorigène dans un cycle de compression	Technologie de réfrigération à air
						FTP 1.2.1.8	ET Minimiser les transferts thermiques-Minimiser l'absorption de chaleur	
						FTP 1.2.1.9	ET Maximiser les transferts thermiques-Maximiser l'entrée de fraîcheur	
FTP 1.2.2	ET Permettre à l'utilisateur de choisir la température dans le réfrigérateur	FTP 1.2.2.1	Permettre à l'utilisateur de choisir de réguler la température écologiquement ou non	Utilisation d'un thermostat électronique, la température pourra être réglée au moyen d'un cadran ou d'un écran numérique				

C2	Etre facile à utiliser	FT1.1	Être facile d'accès Permettre à l'utilisateur de se servir du produit sans se baisser	FT 1.1.1	Permettre à l'utilisateur de se servir du produit sans se baisser		Utilisation de réhausseurs		
							Fixation de pieds sur le système		
		FT1.2	ET Être facile à manipuler	FT 1.2.1	Etre facile à déplacer	FT 1.2.1.1	Minimiser la masse du réfrigérateur	Malgré sa masse, l'ajout de roulettes pourra le rendre plus facile à déplacer	
						FT 1.2.1.2	ET Avoir une forme traditionnelle	Le réfrigérateur est un prisme droit à base carrée. Pour l'ergonomie, la proportion hauteur/profondeur doit être étudiée	
				FT 1.2.2	ET Être facile à ouvrir	FT 1.2.2.1	Avoir une poignée ergonomique		Utilisation de poignées encastrées dans un côté des portes
									Utilisation de poignées à dépression, fixées sur la porte au moyen de ventouses à vide d'air
									Utilisation de poignées amovibles pouvant être échangées simplement
									Utilisation de poignées visibles et fixées à la porte
				FT 1.2.2.2	ET Minimiser la masse de la porte	Utilisation de poignées intégrées, moulées dans la porte ou dissimulées dans un renforcement			
		FT 1.3	ET Être facile à régler	FT 1.3.1	Avoir un dispositif facile d'accès pour choisir la température		Le thermostat doit être positionné à mi-hauteur du réfrigérateur		
FT 1.3.2	ET avoir un dispositif simple à la compréhension				Utilisation d'un thermostat électronique avec écran tactile. Les usagers sont familiers avec cette technologie				
			Eviter la casse des composants	FT 2.1.1	Avoir des bacs à aliments suffisamment résistants		Bac classique en plastique ou acier inoxydable, emboîtable, empilable et avec couvercles		

C3	Résister à des ouvertures fréquentes	FT 2.1					Bac à légume en plastique léger résistant à l'humidité, verre renforcé/trempé ou acier inoxydable	
				FT 2.1.2	ET Utiliser des articulations suffisamment solides au niveau de la porte		Utilisation de charnières en métal, comme en acier inoxydable	
							Utilisation de charnières invisibles	
							Utilisation de charnières pour adaptées au réfrigérateur	
		FT 2.1.3	ET Protéger les composants sensibles du système de refroidissement					
C9	Polluer le moins possible	FT 3.1	Eviter les rejets dans l'atmosphère	FT 3.1.1	Prévoir un système en cas de fuite du fluide			
				FT 3.1.2	ET Ne être trop énergivore			
		FT 3.2	ET Avoir un bilan carbonique neutre	FT.3.2.1	Limiter la pollution liée à la production	FT 3.2.1.1	Utiliser des produits locaux	
				FT 3.2.2	ET limiter la pollution due aux transports	FT 3.2.2.1	Utiliser des composants qui sont accessibles localement	
						FT 3.2.2.2	ET Faire une distribution locale	
FT 3.3.3	ET limiter la pollution liée à l'utilisation							
C15	Respecter le budget	FT4.1	Minimiser les coûts	FT 4.1.1	Minimiser les coûts liés à la fabrication	FT 4.1.1.1	Minimiser le coût des usinages, et donc les surfaces fonctionnelles (et donc le nombre de pièces à usiner)	
						FT 4.1.1.2	ET/OU minimiser le coût d'obtention des bruts	
						FT 4.1.1.3	ET/OU minimiser le coût des matériaux utilisés	
						FT 4.1.1.4	ET/OU viser la qualité de fabrication des pièces juste nécessaire (= ne pas faire de sur qualité)	
						FT 4.1.1.5	ET/OU employer les procédés de fabrication de l'entreprise, voire ceux de ses sous-traitants classiques	
						FT 4.1.1.6	ET/OU employer les procédés de fabrication de l'entreprise, voire ceux de ses sous-traitants classiques	
				FT 4.1.2	ET Minimiser les coûts d'achats des pièces et matériaux	FT 4.1.2.1	Intégrer les matériaux standard de l'entreprise	
						FT 4.1.2.2	ET/OU intégrer des pièces avec des références couramment employées dans l'entreprise	
						FT 4.1.2.3	ET/OU minimiser le nombre de références de pièces	
						FT 4.1.2.4	ET/OU intégrer des pièces très courantes chez les fournisseurs	
FT 4.1.3	ET Minimiser les coûts liés à la maintenance	FT 4.1.3.1	Minimiser l'usure des pièces par un dimensionnement adapté					
FT 4.1.4	ET Minimiser les coûts liés au transport							

6.1.2. Recherche de l'existant (= état de l'art = benchmarking technique)

Le benchmarking est un ensemble d'actions aidant à évaluer et à comparer les produits, méthodes et services à ceux des partenaires ou de la concurrence. S'appuyant sur des métriques spécifiques, le benchmarking permet de trouver les meilleures méthodes pour s'assurer un avantage concurrentiel.

Pour effectuer les recherches, il faut prendre en compte les attentes et les éléments de la partie 4 tout en s'appuyant sur les différents outils, pratiques et méthodes mis à notre disposition.

En avant-projet sommaire, cette recherche de l'existant doit être effectuée pour répondre aux besoins et contraintes du cahier des charges fonctionnel, identifiés comme étant dimensionnants, voire bloquants. Le détail de cette recherche sera à placer dans les sous-chapitres suivants et la synthèse de ces recherches apparaîtra dans la dernière colonne du FAST déjà commencé en conclusion de ce chapitre 6.1. Détermination des solutions élémentaires. De la même façon que les Fonctions Techniques, il faudra faire apparaître clairement les ET ou ET/OU entre les solutions trouvées dans le FAST.

La recherche de l'existant permet de lister les différentes technologies. Dans le cas où les contraintes n'ont pas de réelles solutions, il faut expliquer ce que la contrainte impose au produit.

6.1.2.1. Fonction de service : **FTP1.1: Stocker les aliments dans un compartiment**

Pour stocker les aliments dans un compartiment un brevet a été établi par MONTANER Simo, VINCENTE.L. *Réfrigérateur avec multiples compartiments indépendants*. EP2182308A2. 4 novembre 2008. **Il a été trouvé grâce aux mots « fridge with compartments » (en français, frigo avec compartiments) sur Esp@cenet.** Ce brevet concerne un réfrigérateur avec plusieurs compartiments indépendants permettant de réduire la consommation d'énergie (figure 13). Ainsi, l'un des compartiments peut stocker des aliments à 15°C et un autre à 5°C, et ce dans le même réfrigérateur. Chaque compartiment peut être ouvert et régulé indépendamment. C'est une idée très intéressante dans le cadre de la réalisation d'un réfrigérateur qui consomme peu d'énergie. Néanmoins, le prix d'un tel réfrigérateur peut être très élevé.

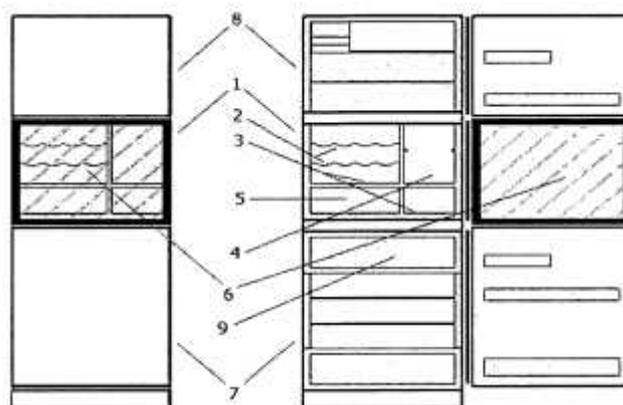


Figure 13: Réfrigérateur à compartiments

Les aliments peuvent être stockés dans des bacs à légumes qui seront évoqués plus tard dans cette partie.

6.1.2.2. Fonction de service :FTP.1.2.1: Maintenir l'air à une certaine température dans le réfrigérateur

Les informations dans cette partie proviennent des recherches suivantes :

- ChatGPT : « Donne des pistes concernant les différentes méthodes de réfrigération pour un réfrigérateur domestique » ; « Compare ces technologies ». L'utilisation de l'intelligence artificielle nous a permis d'établir une première liste de technologie à étudier ainsi que les premiers critères pouvant les discriminer.
- Moteur de recherche Google : « Techniques réfrigération » en générale, mais pour des illustrations et explications complémentaires : « réfrigération magnétique », « réfrigération absorption », « réfrigération cycle Stirling », « réfrigération par compression », « réfrigération thermoélectrique », « réfrigération cycle compression air ». Cela a permis d'obtenir des visuels, de compréhension, mais aussi des éléments de comparaison entre les technologies
- Pour les brevets, les mêmes mots clefs ont été utilisés avec succès sur les sites [DATA INPI](#) et [ESPACENET](#).

Afin de maintenir l'air dans le réfrigérateur à la température désiré, il existe différents types de réfrigération. La technologie la plus courante et le cycle de réfrigération avec compresseur. C'est la technologie de réfrigération la plus courante. Elle repose sur le principe de compression, condensation, détente et évaporation d'un fluide grâce à 5 parties :

- Un compresseur
- Un condenseur
- Un détendeur
- Un évaporateur
- Un fluide frigorigène

Le cycle thermique peut-être décrit au moyen de la figure suivante :

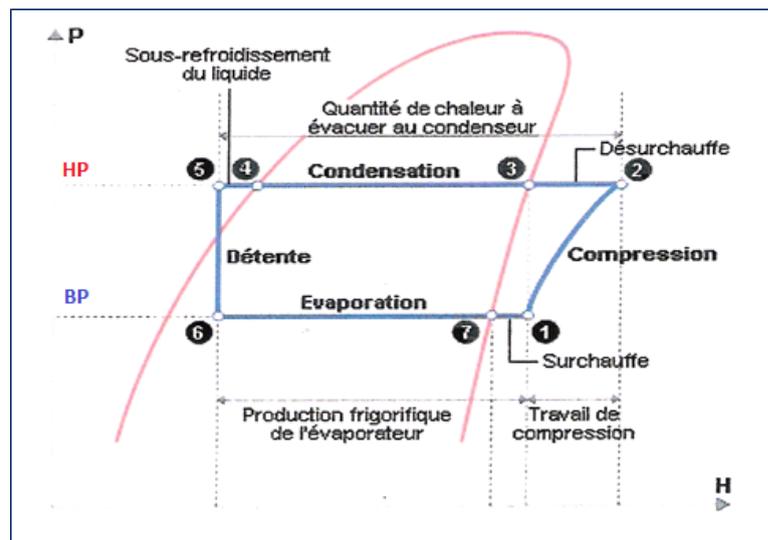


Figure 14: Diagramme d'un cycle de réfrigération avec compresseur classique

Et le schéma de principe du réfrigérateur est le suivant :

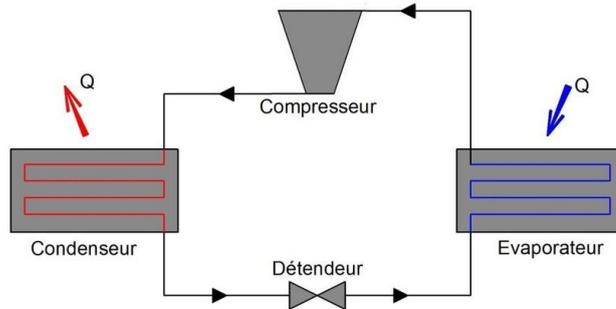


Figure 15: Schéma de principe du réfrigérateur

Des brevets sur ce type de réfrigération ont été écrit [10]. Cela permet de se rendre compte qu'il existe deux familles de compresseur.

- Compresseur hermétique : Le désavantage de ces compresseurs est qu'ils sont non-démontables, ce qui les rend irrépares en cas d'endommagement de la partie moteur ou compression
- Compresseur semi-hermétique : Celui-ci est démontable donc réparable
- Compresseur ouvert : Celui-ci est aussi réparable en plus de laisser le choix de l'accouplement entre le moteur et le compresseur

Il existe aussi plusieurs types de compresseur :

- Compresseur à piston : C'est le plus courant
- Compresseur à spirale : Celui-ci est plus récent et plus silencieux que le compresseur à piston

Il existe aussi plusieurs types de condenseurs :

- Les condenseurs à air : Ce sont les plus courants, parmi eux, il existe :
 - Les condenseurs à air statique
 - Les condenseurs à air forcé : Ils utilisent en plus un ventilateur
- Les condenseurs à eau :
 - Les condenseurs de type échangeur à plaques brasées
 - Les condenseurs de type tubulaire : Ils sont plutôt utilisés pour les réfrigérateurs nécessitant une puissance de réfrigération importante

Différents fluides frigorigènes peuvent aussi être utilisés, ils diffèrent par leurs propriétés thermodynamiques et leur impact environnemental. Parmi les plus courants, on recense :

- Les hydro fluocarbures (HFC), comme le R134a et le R404A
- Les hydrocarbures, comme le R290 qui est un hydrocarbure naturel

Ce mode de réfrigération présente des avantages économiques intéressants ainsi que des inconvénients en matière de sécurité et d'environnement.

Cependant, il existe de nombreux autres types de réfrigération, comme la réfrigération par absorption. Le réfrigérateur fonctionne sur le même principe que le réfrigérateur à compression et comprend donc aussi les éléments suivants :

- Un condenseur
- Un détendeur
- Un évaporateur
- Un fluide réfrigérant

La particularité de cette technologie est qu'elle ne s'appuie pas sur un système de compression mécanique motorisé, mais utilise un fluide absorbant, lequel est mélangé avec le fluide réfrigérant et augmente la pression du milieu lorsque sa température augmente.

Schéma de principe du réfrigérateur par absorption :

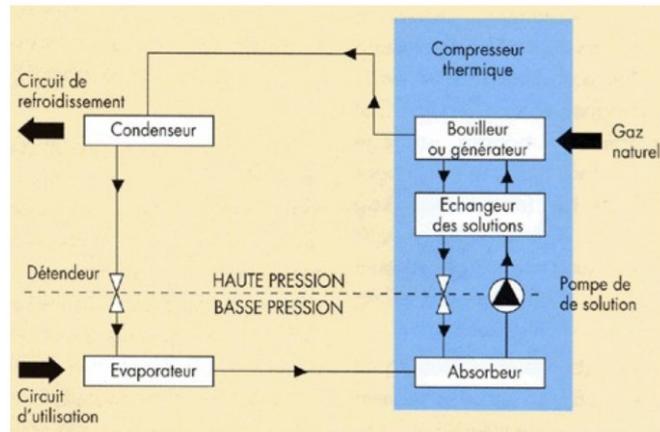


Figure 16: Schéma de principe du réfrigérateur par absorption

Ensuite, le refroidissement thermoélectrique utilise l'effet Peltier afin de créer une différence de température entre les deux faces de plaques (modules Peltier). Le principe est d'adjoindre l'élément à refroidir à la surface froide et d'évacuer la chaleur au niveau de la surface chaude.

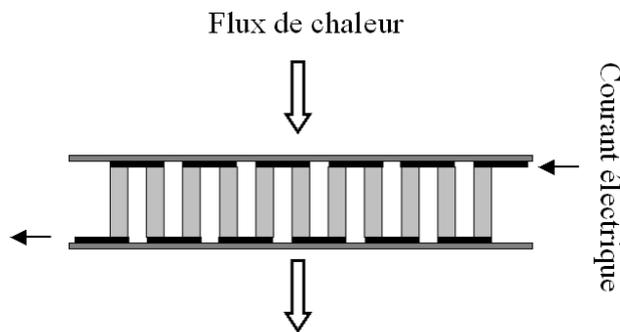


Figure 17 : Schéma d'une cellule Peltier

De nombreux articles traitent de cette technologie [11], [12],[13]. Ils permettent de déterminer les atouts et les inconvénients de cette technologie.

- L'absence de fluide frigorigène est un atout en matière de sécurité et d'écologie
- Les cellules Peltier possèdent une très bonne résistance mécanique en compression, mais pas en cisaillement
- Cette technologie est silencieuse
- Les performances en refroidissement sont bonnes (puissance de refroidissement par unité de volume), mais l'efficacité énergétique est faible
- La technologie nécessite très peu d'espace

Une autre possibilité est d'utiliser la réfrigération magnétique. La réfrigération magnétique se fonde sur l'effet magnétocalorique : la température d'un matériau magnétocalorique augmente avec l'application d'un champ magnétique extérieur. Le gadolinium et l'arsenic sont des matériaux magnétocaloriques.

Intérêt et recherches sur la réfrigération magnétique :

- Réduction de la pollution sonore

- Consommation électrique
- Pas de fluides dangereux pour la santé et l'environnement

Le principe de fonctionnement est relaté dans des brevets ou des articles scientifiques. [14], [15], [16]. Il est alors possible de découvrir deux principes de fonctionnement,

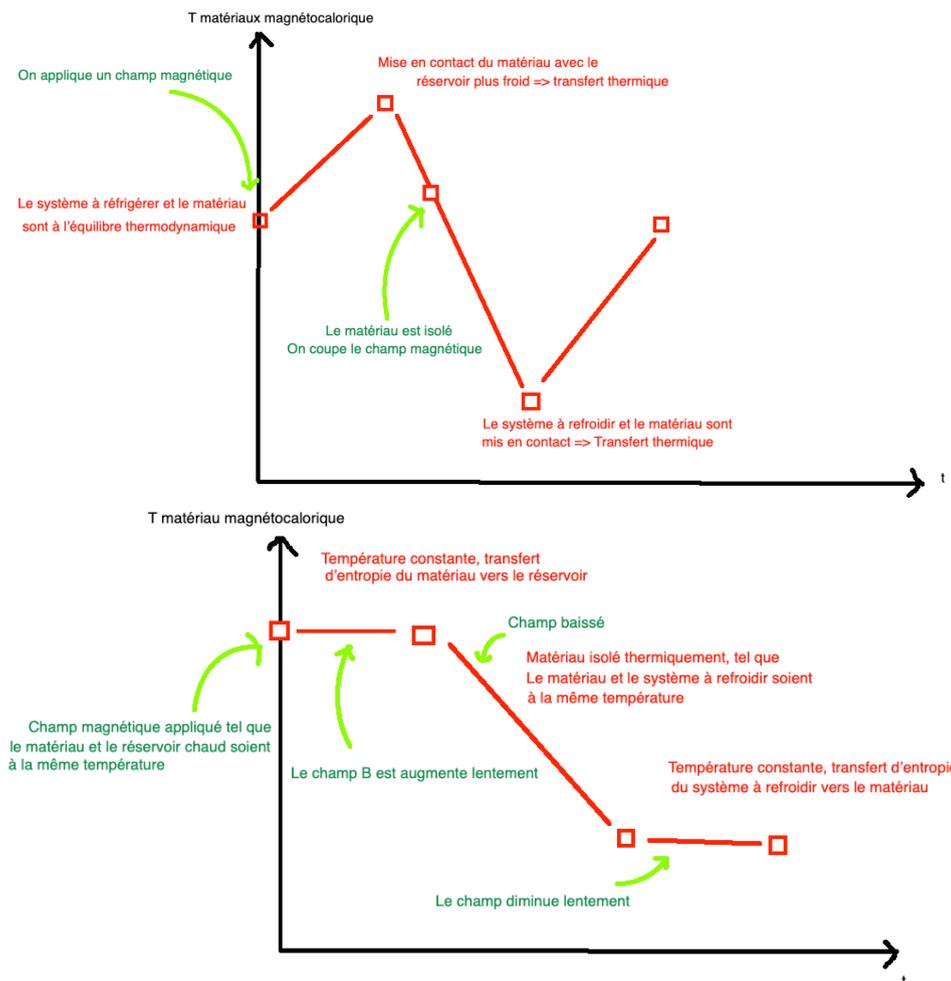


Figure 18: comparaison dans deux principes de fonctionnement

Cette technologie possède des inconvénients non négligeables tels que :

- Nécessite des bobines et électroaimants supraconducteurs à refroidir
- Champ magnétiques très élevés à créer

Si cette technologie pourrait être écologique, son coût semble toutefois très important en l'état actuel.

Enfin, plus marginalement, il existe la réfrigération par cycle Stirling et la réfrigération par cycle à air.

6.1.2.3. Fonction de service : FTP.1.2.2 : Permettre à l'utilisateur de choisir la température de réfrigération.

Pour accéder à ces données les mots clés suivants ont été utilisés, thermostat, régulation de température. Chat GPT : mots-clés : contrôle de température, thermostat

Le principe le plus courant et le thermostat de réfrigérateur classique avec une molette. Il est évoqué plus loin dans cette partie. La solution la plus simple afin de décider la température à l'intérieur du réfrigérateur et d'utiliser un thermostat électronique. Un thermostat de réfrigérateur est un dispositif qui régule la température à l'intérieur du réfrigérateur. Voici une exEsc(r)° Barb'splication rapide :

- Fonctionnement : Le thermostat détecte la température interne et active ou désactive le système de refroidissement pour maintenir la température souhaitée.
- Réglage : L'utilisateur peut ajuster la température via un cadran ou un écran numérique.
- Précision : Les thermostats modernes offrent une régulation précise et peuvent inclure des fonctionnalités supplémentaires comme des alarmes de température.

En résumé, le thermostat assure que les aliments restent à une température optimale pour leur conservation. Cette technologie est résumée dans un guide. [16]



Figure 19: thermostat électronique

6.1.2.4. FT1.1 Être facile d'accès

FT 1.1.1 Permettre à l'utilisateur de se servir du produit sans se baisser

Pour avoir les moyens d'accéder facilement à un réfrigérateur sans se baisser, les mots clefs « accès facile réfrigérateur » ont été écrit. Après avoir eu une idée de ce qui été accessible, les mots « réhausseur de meubles » sont inscrit sur des sites de magasin de bricolage.

Pour permettre à l'utilisateur d'utiliser le réfrigérateur sans se baisser, il existe différents procédés. Tout d'abord, une technique envisageable et d'utiliser un réhausseur. C'est un support conçu pour surélever un réfrigérateur afin d'améliorer l'ergonomie et l'utilisation de l'appareil. Il permet de rehausser la hauteur du réfrigérateur, rendant l'accès aux compartiments plus facile. Il y a plusieurs types de réhausseur avec différents matériaux (acier, aluminium, plastique), les dimensions sont en fonction du système. Il y a aussi la hauteur des pieds qui est parfois réglable et la capacité de charge doit correspondre au système.

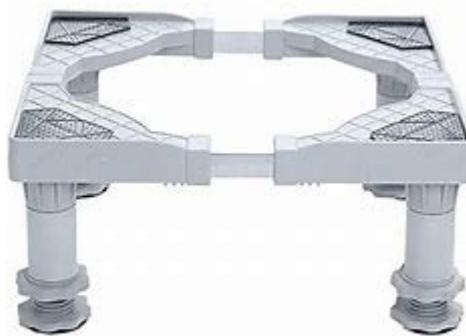


Figure 20: réhausseur de réfrigérateur

Il est aussi possible de mettre des pieds sur le système.



Figure 21: réfrigérateur avec pieds intégrés.

6.1.2.5. FT1.2 Être facile à manipuler

FT 1.2.1 Être facile à déplacer

Avec les mots clefs de la parties précédentes, il existait aussi des formats avec roulettes.

Les systèmes vus précédemment peuvent être équipé de roulettes comme cela est souvent le cas pour les réfrigérateurs d'extérieurs.



Figure 22: systèmes précédents avec roulettes

Les formes de réfrigérateurs sont recensées grâce à une IA.

Ensuite pour être facilement déplaçable il faut que la forme du réfrigérateur soit adaptée. Tout d'abord, une liste des différents types de réfrigérateurs est établie :

- **Réfrigérateur Table Top (Compact)** : Petit frigo, souvent utilisé dans les studios, bureaux ou chambres d'hôtel.
- **Réfrigérateur 1 porte** : Modèle standard avec une seule porte pour la partie réfrigérateur
- Modèle standard avec une seule porte pour la partie réfrigérateur : Deux portes verticales, avec le réfrigérateur d'un côté et le congélateur de l'autre.
- **Réfrigérateur encastrable** : Intégré dans un meuble de cuisine pour une apparence harmonieuse.

Le type de frigo choisi peut influencer sa géométrie. En effet, plus le volume est faible et plus les formes du réfrigérateur peuvent être variées. En plus de la géométrie classique du parallélépipède rectangle, il existe des formes plus rares de frigo.

- **Réfrigérateur cylindrique** : Rare, mais certains modèles spéciaux adoptent une forme de cylindre.

Il s'agit en général de frigo d'extérieur en général pouvant inspirer pour le projet.



Figure 23: réfrigérateur extérieur sur roulette et cylindrique

- Réfrigérateur arrondi : Certains designs rétro ont des bords semi-circulaires.
- Réfrigérateurs en coin : Des modèles en prisme trapézoïdal existent pour optimiser l'espace.

Ces deux formes sont plutôt utilisées pour l'esthétisme.

Il faut noter qu'il y a des caractéristiques communes à tous les types de réfrigérateur. Ils ont tous une symétrie axiale par rapport à leur hauteur. Il y a aussi un respect des proportions à avoir afin d'avoir une utilisation ergonomique.

Symétrie : La plupart des frigos ont une symétrie axiale par rapport à leur hauteur.

Rapport de proportions : Largeur, profondeur et hauteur doivent être équilibrées pour une utilisation ergonomique.

FT 1.2.2 Être facile à ouvrir

Sur les sites de ventes de pièces détachées de réfrigérateur, le mot « poignée » est renseignée. Le site Fixpart entre autres est manipulé.

L'ouverture se fait à l'aide d'une ou plusieurs poignées. Il existe différents types de poignées qui seront listés ci-dessous.

- Poignées intégrées : Moulées directement dans la porte du réfrigérateur ou dissimulées dans un renforcement.
- Poignées externes (fixes ou vissées) : Poignées visibles et solidement fixées à la porte avec des vis
- Poignées amovibles : Poignées qui peuvent être retirées ou changées facilement.
- Poignées à dépression (ventouse) : Se fixent sur la porte grâce à une ventouse à vide d'air.

- Poignées encastrées : Situées sur le côté de la porte, elles sont creusées dans la structure.

6.1.2.6. FT 1.3 Être facile à régler

FT 1.3.1 Avoir un dispositif facile d'accès pour choisir la température

Le thermostat a des emplacements courants pour tous types de réfrigérateur. Il peut être dans la zone supérieure, à l'arrière ou proche des étagères intermédiaires. Un thermostat placé trop haut peut conduire à un refroidissement excessif des aliments en bas du réfrigérateur. Tandis qu'un thermostat placé trop bas risque de prolonger les cycles de refroidissement, entraînant une surconsommation énergétique. De plus, l'optimisation du placement du thermostat et des capteurs peut réduire de 10 à 15 % la consommation énergétique.

FT 1.3.2 ET avoir un dispositif simple à la compréhension

Pour avoir un dispositif simple à la compréhension, il existe le thermostat électronique, évoqué précédemment, mais aussi le thermostat classique indiquant la force de refroidissement au lieu de la température. Il y a de nombreux modèles disponibles sur le site 1001 pièces.

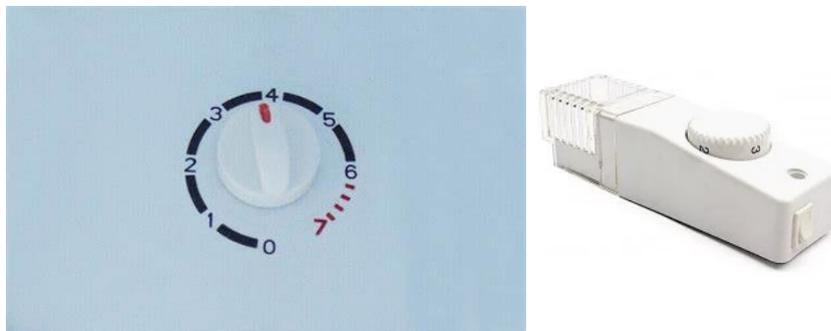


Figure 24: thermostats classiques trouvables dans le commerce

6.1.2.7. FT 2.1 Eviter la casse des composants

FT 2.1.1 Avoir des bacs à aliments suffisamment résistants

Les bacs à aliments résistants sont conçus pour supporter des conditions difficiles et garantir la sécurité alimentaire. Les informations ont été trouvées grâce à la recherche image après avoir tapé « bac à légumes frigo » sur Google. Ensuite, des recherches plus précises ont été faites en tapant les mots « bac à légumes plastique frigo », « bac à légumes acier inoxydable frigo » et « « bac à légumes verre trempé frigo ». Voici une explication rapide :

- Matériaux : Ils sont souvent fabriqués en plastique robuste ou en acier inoxydable, ce qui les rend durables et faciles à nettoyer
- Types : Il existe des bacs empilables, emboîtables, avec couvercles, et même des bacs sur roues pour faciliter le transport
- Utilisation : Idéaux pour le stockage, la préparation et le transport des aliments, ils sont souvent utilisés dans les industries agroalimentaires et les cuisines professionnelles

Les bacs à légumes permettent un compartiment dans le réfrigérateur pour conserver les légumes de façon optimale. Ils sont très largement utilisés. La matière de ces bacs peut varier :

- Plastique : très fréquent, léger, facile à nettoyer et résistant à l'humidité
- Verre trempé ou verre renforcé : pour le haut de gamme, résistant et peut supporter des températures basses sans se casser, comme le réfrigérateur Side by Side Family hub Samsung

- Acier inoxydable : rare, réservé au très haut de gamme ou à un usage professionnel, durable et résistant à la corrosion

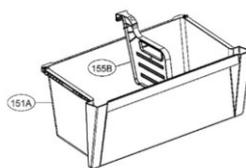


Figure 25: bac à légumes

FT 2.1.2 ET Utiliser des articulations suffisamment solides au niveau de la porte

Pour garantir que les portes de réfrigérateur soient suffisamment solides, plusieurs types d'articulations peuvent être utilisées. **Celles-ci ont été trouvées grâce aux mots clés « Charnières », « Charnières frigo », « charnière fenêtre » et « charnière armoire » : Chat GPT : mots-clefs : technologie pivot porte**

1. Charnières robustes : Les charnières en métal, comme celles en acier inoxydable, offrent une grande résistance et durabilité
2. Charnières invisibles : Ces charnières sont conçues pour être discrètes tout en offrant une solidité optimale
3. Charnières spéciales pour réfrigérateur : Des modèles spécifiques, comme les charnières Blum, sont conçus pour les portes de réfrigérateur et offrent une fermeture douce et silencieuse

Ces solutions assurent que les portes de réfrigérateur restent bien fixées et fonctionnent de manière fiable. [18]



Figure 26: Charnière

6.1.2.8. FT 3.1 Eviter les rejets dans l'atmosphère

FT 3.1.1 Prévoir un système en cas de fuite du fluide

Ce paragraphe a été trouvé grâce à la recherche google et les mots-clefs : fluides frigorigènes + fuites. Avec Cobaz les mots clefs fluides frigorigènes. Il y avait très peu de données. Une réglementation a été trouvé sur google.

Il existe des réglementations à respecter, on retrouve tout cela dans la Réglementation des fluides frigorigène [9]. Ce document traite les obligations liées aux fluides fluorés en France. Il annonce également les

obligations à suivre par les professionnels lors de l'utilisation du fluide et comment réagir en cas de fuite, comment les détecter est aussi énoncé. Pour éviter les fuites, il faut vérifier régulièrement les joints et raccords, ne pas surcharger le réfrigérateur, éviter le dégivrage manuel.

6.1.2.9. FT 3.2 Avoir un bilan carbonique neutre

FT 3.2.3 ET limiter la pollution liée à l'utilisation

Les articles sont trouvés sur Copilot grâce « Article sur la pollution des fluides ». Les articles ont été élus et les plus pertinents ont été gardés.

Avec des recherches google associées, les mêmes articles sont trouvés.

Sur Chat GPT avec mots-clés : pollution d'un réfrigérateur, diminution de la pollution, cause de la pollution du réfrigérateur, les mêmes articles sont encore une fois trouvés.

Pour limiter la pollution liée à l'utilisation du réfrigérateur, différentes études ont été menées. Tout d'abord, le rôle de la température est étudié dans l'article. "Role of ambient temperature, door opening, thermostat setting position and their combined effect on refrigerator-freezer energy consumption" [10].

La température ambiante a l'effet le plus élevé sur la consommation d'énergie, suivie de l'ouverture de la porte et de la position de réglage du thermostat. L'ouverture de la porte et la position de réglage du thermostat ont très peu de différence dans leur effet relatif sur la consommation d'énergie.

Un second article traite de la consommation d'énergie en fonction du réglage du thermostat. "An Experimental Investigation into the Effect of Thermostat Settings on the Energy Consumption of Household Refrigerators" [11] Sur la base de l'expérience, une augmentation de la consommation d'énergie de 0,175 kWh/jour a été obtenue lorsque le réglage du thermostat a été augmenté du point 1 au point 3. Il y avait aussi une légère augmentation de la consommation d'énergie de 0,016 kWh/jour lorsque ce paramètre a été augmenté à partir du point 3 au point 4. Lorsque le réglage du thermostat est passé du point 3 au point 4, il n'y a pas eu de de la consommation d'énergie ou de la baisse de la température, de sorte que l'on peut conclure que le réglage du thermostat au point 3 est suffisant pour conserver la fraîcheur des aliments. Tout en testant même l'énergie. La consommation d'un même réfrigérateur n'est pas forcément le même résultat.

6.1.3. Choix des solutions

A priori, chaque solution dimensionnée correctement peut convenir aux besoins du produit / service en termes de performances. Néanmoins, chaque solution sera plus ou moins bonne vis-à-vis des contraintes et la solution idéale sur tous les plans n'existe pas. Parmi toutes les solutions fonctionnelles, il faudra donc trouver le meilleur compromis par rapport aux contraintes du cahier des charges. Ces contraintes permettent d'effectuer les choix qui vont permettre de définir des critères de choix généraux grâce au CDCF. Les critères de choix seront validés par le commanditaire afin d'être en accord avec ses idées. Ils n'ont pas tous la même importance. Il faut les hiérarchiser pour trouver le meilleur compromis.

Parmi les différentes solutions proposées dans la partie précédente, il faut déterminer le meilleur compromis pour trouver la solution optimale. Mais, une solution parfaite sur tous les plans n'existe pas, il faut donc faire des compromis. Pour cela, des critères de choix, devant être validé par le commanditaire, sont utilisés.

Le raisonnement simple peut parfois conduire à la meilleure solution, le meilleur compromis, cependant si cela n'est pas le cas, il faut choisir grâce à une matrice de choix ou grille de décisions (voir 1) et les critères sont pondérés en fonction de leur importance.

Cette méthode de choix est critiquable et ne doit être utilisée qu'en première approche pour dégrossir les choix en avant-projet. Elle ne peut pas être utilisée pour faire des choix définitifs en projet. Cette méthode

permet d'avoir une idée globale des choix possibles mais il est impossible de traiter et de comparer tous les cas avec celle-ci. Il faut donc avoir conscience des limites de la méthode et en discuter avec toutes les parties prenantes.

Les solutions ne répondant pas à un besoin ou à un critère doivent y figurer pour montrer que vous y avez pensé, mais il est inutile de noter suivant les critères, à moins que vous ne réfléchissiez à une méthode pour contourner la difficulté. D'ailleurs, ces solutions peuvent donner des idées pour d'autres solutions.

Pour réaliser la matrice de choix, il faut idéalement :

- se focaliser sur l'essentiel et se limiter à 3 grands critères de choix (5 au très grand maximum),
- expliquer rapidement les notes rapidement, notamment si elles risquent d'être contestées,

Les solutions arrivant en tête dans le classement et avec des notes similaires doivent être étudiées par la suite et départagées de façon rigoureuse, soit dans l'avant-projet, soit dans d'autres avant-projets si le travail est trop conséquent. Cela inclut des calculs de prédimensionnement, des essais avec des démonstrateurs.

Pour définir les pondérations, en première approche, on peut comparer les critères entre eux dans une matrice et affecter une note :

- 1 pour le critère le moins important (si on mettait 0, le critère pourrait avoir une pondération de 0 à la fin...),
- 2 si les critères sont semblables,
- 3 pour le critère le plus important.

Cette notation est aussi arbitraire et peut conduire à surpondérer certains critères. Si la pondération semble mal adaptée (à voir avec le commanditaire), on peut réduire les notes intermédiaire et maximale, par exemple, passer de 2 à 1,3 et passer de 3 à 1,6.

6.1.3.1. Définition des critères de choix généraux

Comme expliqué dans l'introduction précédente, ces critères de choix généraux proviennent du cahier des charges fonctionnel, et sont souvent parmi les suivants :

- Fonctionnelle pour une durée de 15 ans
- Avoir Un coût (d'achat et d'exploitation) minimal
- Respect des Normes de sécurités
- Minimiser la pollution
- Encombrement

Le critère de fonctionnalité est impératif dans la mesure où aucun compromis n'est possible. D'autant plus que dans le cadre de la démarche Löw-tech il est important de viser une longue durée de vie pour le produit. Par ailleurs se trouve dans le coût minimal à la fois le coût d'achat mais aussi le coût d'exploitation du réfrigérateur c'est-à-dire que cela induit le fait de consommer le moins d'énergie électrique. Le réfrigérateur séjournera à l'intérieur du foyer de fait il est soumis à une norme stricte pour les produits électro-ménagers. La pollution est un critère essentiel à prendre en compte dans le Low-cost, sera pris en compte la pollution totale du produit, c'est-à-dire la pollution venant des composants et de l'utilisation. Enfin le critère d'encombrement provient de la vision de sobriété qui est rattaché au Low-cost.

6.1.3.2. Évaluation des solutions technologiques

Les évaluations des solutions prendront en compte les critères de choix, avec éventuellement quelques critères supplémentaires et spécifiques à chaque composant. Cette partie de livrable sera très visuelle avec de nombreux tableaux afin de donner une idée simplifiée des choix qui seront effectués par la suite.

6.1.3.2.1. FTP1.2.1 : Maintenir l'air à une certaine température dans le réfrigérateur

Afin de réaliser la matrice de choix, nous allons apporter certaines précisions concernant les éventuelles solutions à disposition : il s'agit déjà, comme pour la technologie de réfrigération par compression, de choisir parmi les éventuelles variantes d'une technologie, laquelle serait la plus adaptée au regard des critères de décision.

Réfrigération par compression :

Choix du compresseur parmi le compresseur hermétique, semi-hermétique, ouvert :

En termes d'encombrement, la taille est croissante entre compresseur hermétique, semi-hermétique et ouvert. Les trois systèmes sont sécurisés, mais s'ils devaient être hiérarchisés, le plus sécurisé serait le compresseur hermétique, et le moins sécurisé le compresseur ouvert. Les 3 compresseurs se distinguent surtout par leur coût comme introduit lors de leur description : ces compresseurs ont non seulement des coûts d'achat différents, mais leur caractère hermétique ou non impacte aussi leur réparabilité et donc leur coût de remplacement. Sur une période d'utilisation relativement longue, le compresseur ouvert peut-être plus économique que le compresseur semi-hermétique, lui-même plus économique que le compresseur hermétique, en raison de la capacité à pouvoir changer les pièces du compresseur. Cependant, le coût d'achat du compresseur ouvert semble rédhibitoire car son prix dépasse le millier d'euros, et n'est donc pas adapté à un usage domestique. Le compresseur hermétique a le coût d'achat le plus faible, mais il doit être intégralement remplacé en cas de panne.

Enfin, le critère d'encombrement permet de retenir le compresseur hermétique.

Choix du condensateur, parmi le condensateur à eau et le condensateur à air :

Les deux méthodes permettent de refroidir le réfrigérant à l'issue de la phase de compression grâce à une circulation d'air ou d'eau. Cependant, lorsque le condensateur à air utilise l'air ambiant (air statique ou circulation forcée au moyen d'un ventilateur), le condensateur à eau doit être constamment alimenté en eau. Nous ne retiendrons pas cette dernière technologie entraînant une augmentation des coûts, une maintenance lourde et régulière (corrosion, dépôts minéraux), à fort impact sur la position du réfrigérateur dans la maison. Cette technologie semble s'éloigner de la sobriété prônée par le low-tech, mais l'efficacité qu'elle permet (capacité thermique de l'eau plus intéressante que l'air) est valorisée dans des applications industrielles.

On réalise la matrice de choix suivante, en fournissant certains éléments justificatifs du tableau :

Technologie refroidissement	Coût faible	Encombrement faible	Pollution faible	Sécurité élevée	Note
Coefficient	7	4	7	5	
Compression	3	2	2	2	53
Absorption	2	1	3	2	49
Thermoélectrique	2	3	2	3	55
Magnétique	1	2	3	3	51
Légende	Très Bien	Bien	Refusé		

Figure 27 : Matrice de choix

La note de pollution pour le refroidissement par compression est intermédiaire mais peut vraisemblablement être améliorée (devenir 3, dans ce cas sa note serait de 60) dans le cas de l'utilisation de l'air comme fluide réfrigérant. Dans ce cas, le fluide ne représenterait pas un danger pour le consommateur à l'inhalation, ni un danger pour la planète. De plus, un gaz naturel comme le R290 permettrait, au regard de l'ensemble du cycle de vie, d'utiliser des ressources naturelles renouvelables.

Afin de quantifier l'impact des gaz sur l'environnement, les indicateurs suivants ont été créés [19]:

- PRG Potentiel de Réchauffement Global : Évalue la capacité d'un gaz à piéger de la chaleur dans l'atmosphère
- PDO : Potentiel de Déplétion de l'Ozone : Évalue la capacité d'un gaz à détruire l'atmosphère
- DVA Durée de Vie Atmosphérique

A contrario, si le R314a n'est pas toxique, il possède un PRG élevé, et sa production nécessite du fluorure d'hydrogène qui lui est un gaz dangereux pour la santé.

Une remarque analogue peut-être faire concernant la réfrigération par absorption, en ajoutant aussi que le générateur de chaleur peut fonctionner au moyen d'un gaz naturel ou être relié à un réseau de distribution de chaleur. Cependant, et à l'instar du condenseur à eau pour la réfrigération par compression, la nécessité de l'alimentation décrite n'est pas toujours possible, en plus de s'imposer comme une forte contrainte positionnelle sur le réfrigérateur.

En matière de sécurité, les technologies ayant été jugées les plus sécurisées sont celles ne nécessitant pas de fluide réfrigérant.

En matière de coût, il apparaît clair que la technologie la meilleure du marché est la réfrigération par compression, qui représente la majorité des moyens réfrigérations domestiques. La plus chère est la réfrigération magnétique, en raison de sa plus haute technicité. Les deux autres ont donc une note intermédiaire.

À l'issue de la réalisation de cette matrice de choix, la solution la plus intéressante semble être la réfrigération thermoélectrique, en raison de son fort potentiel en matière de réduction de l'encombrement, tout en garantissant une sécurité élevée. Cependant, la réfrigération par compression présente un intérêt réel, notamment financier, et son impact environnemental ainsi que sa sécurité peuvent être améliorés en privilégiant l'air comme fluide frigorigène. Ainsi, l'air serait utilisé comme fluide frigorigène non polluant, ce qui permettrait de diminuer l'impact environnemental de la réfrigération par compression, et donc d'en faire une solution très intéressante.

6.1.3.2.2. FTP1.1: Stocker les aliments dans un compartiment

Stocker les aliments dans des compartiments ne désigne pas le type de compartiments mais plutôt le nombre de compartiments, d'un commun accord avec les parties prenantes, il est convenu que ce nombre sera choisi en fonction du volume intérieur du réfrigérateur.

6.1.3.2.1. Fonction de service : FTP.1.2.2 : Permettre à l'utilisateur de choisir la température de réfrigération.

Dans ces sous-parties, les croix sont mises pour les solutions qui respectent le mieux le critère.

	Thermostat classique	Thermostat électronique
Cout	X	
Précision		X
Economie d'énergie		X

Simplicité de production	X	
Masse	Equivalent	

6.1.3.2.2. FT1.2 Être facile à manipuler

FT 1.2.1 Être facile à déplacer

	Pieds	Réhausseur
Cout	X	
Economie d'énergie		
Masse	Pour minimiser la masse du frigo, les pieds sont plus lourds	
Changement		X
Sécurité		X

FT 1.2.2 Être facile à ouvrir

Dans ce tableau, les plus petits coefficients ont été attribués aux critères qui étaient le mieux respectés. Il ne s'agit pas d'une matrice de choix mais c'est un tableau montrant les différents critères établis.

	Coût	Masse	Pollution	Prise en main	Résistance
Poignée externe non amovible	X		X	X	
Poignée externe amovible					
Poignée interne		X		X	X

6.1.3.2.3. FT 2.1 Eviter la casse des composants

FT 2.1.1 Avoir des bacs à aliments suffisamment résistants

	Cout d'utilisation	Masse	Pollution	Sécurité	Utilisation	Cout de production
Plastique recyclé	X				X	X
Verre Trempé			X			
Acier inoxydable		X				

FT 2.1.2 ET Utiliser des articulations suffisamment solides au niveau de la porte

	Coût	Pollution	Adaptation au réfrigérateur	Résistance
Charnière en acier inoxydable	X	X		X
Charnière invisible				
Charnières pour réfrigérateur			X	

6.1.3.3. Choix des solutions technologiques

Comme cela a été expliqué dans l'introduction du chapitre 6.1.3 Choix des solutions, les solutions retenues dans ce chapitre doivent impérativement :

- être compatibles entre elles,
- avoir de très bonnes notes globalement (il se peut que certains composants soient mal notés, mais que l'association avec d'autres composants très bien notés aboutissent à une solution performante).

Néanmoins, il se peut que ces solutions intéressantes s'avèrent finalement inadaptées pour des questions de dimensions inappropriées, d'architecture problématique... et il faudra « reboucler ». La phase d'avant-projet est adaptée à ce genre d'opération, contrairement à la phase de projet, où on ne peut pas se le permettre vu les engagements pris en termes de délai, de coûts et de qualité.

Cette partie sert à confirmer la compatibilité de tous les choix et à affirmer qu'il s'agit de solutions raisonnées. Pour la fonction de service, il sera utilisé la méthode vue précédemment avec la matrice de choix. Les autres solutions sont déterminées à base de choix raisonnés.

1. Le thermostat

Pour le thermostat, il y a deux critères à prendre en compte, son emplacement et le type de thermostat. L'avantage d'un thermostat électronique est que le système est facile à régler. Il est plus cher qu'un thermostat classique. Mais sa précision d'assurer un gain d'énergie et permet de mieux gérer les variations de températures. Le thermostat classique tout aussi simple à la compréhension et plus commun, donc plus simple à remplacer. Il possède moins de composants électroniques, ce qui donne une fabrication plus simple. Mais il ne permet pas d'avoir une réelle vision d'ensemble sur la température dans le réfrigérateur. Par conséquent, pour satisfaire les besoins d'un réfrigérateur low-tech, le meilleur compromis est le **thermostat électronique**.

Concernant l'emplacement du thermostat il y a trois choix courants. La zone medium, inférieure ou supérieure. Le risque de placer dans la zone supérieure est le refroidissement excessif en bas du réfrigérateur. Les aliments risquent de congeler. En bas, il y a un fort risque de surconsommation ce qui est à l'encontre de la démarche low-tech. Il est donc plus convenable de placer le thermostat dans la **zone centrale** du réfrigérateur.

2. Ne pas se baisser

Pour satisfaire la fonction technique ne pas se baisser. Il est recensé deux méthodes. Le réhausseur et les pieds. Le réhausseur est facile à changer en cas de casse et il a l'avantage d'être réglable. Les pieds quant à eux sont moins chers que le réhausseur mais en cas de casse, le frigo risque d'être endommagé et les réparations seront plus compliquées. Le **réhausseur** paraît donc être la solution la plus adéquate.

3. Déplacement du réfrigérateur

Le déplacement du réfrigérateur est le plus simple avec des roulettes pour assurer un déplacement efficace. Pour éviter les déplacements non désirés, il faudrait ajouter des freins sur le système. Ainsi, il sera choisi d'utiliser **des roulettes possédant des freins**.

Pour ce qui est de la forme du réfrigérateur, d'après les recherches effectuées dans la partie précédente montre qu'il est mieux d'avoir un réfrigérateur sous forme de coffre. De cette manière l'air frais reste au fond du réfrigérateur. De plus, la forme doit être optimale pour limiter la place qui pourrait être non utilisée. Les composants standards sont faits pour les réfrigérateurs rectangulaires il sera donc plus facile d'utiliser ce type de forme. Ensuite afin de limiter la déperdition d'énergie, il faudra que le réfrigérateur ne possède qu'une porte. En conclusion, on peut décider d'utiliser un **petit réfrigérateur rectangulaire sous forme de coffre ne possédant qu'une porte**.

4. La poignée

L'utilisation d'une poignée encastrée dans le réfrigérateur permet un design plus esthétique. Cependant, ce critère n'est pas très important dans le cadre d'un réfrigérateur low-tech. Cette poignée permet aussi d'alléger le réfrigérateur, mais pas de façon assez importante pour que ce soit notable.

En outre, la poignée interne demande parfois plus d'étapes de fabrication pour être intégrée proprement dans la porte. C'est à la fois plus coûteux et plus polluant.

La poignée externe amovible a pour avantage de pouvoir être changée en cas de besoin. Or, ce n'est pas forcément nécessaire car la poignée du frigo est conçue pour durer la durée de vie du frigo lui-même, une poignée externe non amovible est donc moins chère et satisfait tout de même les besoins du client.

Enfin, le réfrigérateur ayant la particularité de s'ouvrir vers le haut, la poignée de porte doit être adaptée pour permettre à l'utilisateur une prise en main optimale. Une **barre** serait un bon moyen de permettre une fermeture et une ouverture facile de cette porte (figure 27).



Figure 28: barre pour ouvrir le réfrigérateur

5. Charnières

Les charnières en acier inoxydable ont une meilleure résistance à l'humidité et à la corrosion, ce qui est utile dans l'environnement du frigo. Elles ont une longue durée de vie et résistent à une utilisation quotidienne. De plus, les charnières invisibles sont coûteuses, et le côté esthétique n'est pas une priorité dans cet avant-projet. Les charnières adaptées pour frigo, bien que présentant également une bonne résistance à l'humidité, sont plus chères que les charnières en acier inoxydable. Ainsi, **les charnières en acier inoxydable** sont la meilleure solution en termes de durabilité et de coût.

6. Bacs à aliments

Il existe de nombreux types de bacs à aliments. Ils sont en général en plastique, en acier inoxydable ou en verre trempé. Le plastique, pour coller à la définition du low-tech serait recyclé et recyclable. Le plastique a l'avantage d'être peu coûteux et il est facile à nettoyer. Les inconvénients sont la pollution. Le verre trempé est utilisé dans les réfrigérateurs haut de gamme. Il est donc plus cher que le plastique mais pollue moins. Les bacs en verre ont tendance à être plus résistants que ceux en plastique. Les bacs en acier inoxydable sont beaucoup plus chers et utilisés en général dans les grandes restaurations. Ils durent très longtemps dans d'excellents états. A la vue de tous ces arguments, il semble que le meilleur compromis soit le **plastique recyclé et recyclable**. La pollution est limitée par le recyclage et c'est également l'option la moins coûteuse. Pour gagner de la place, il faudra que les bacs à aliments est la possibilité d'être **empilables** et **emboitables** les uns dans les autres. Ensuite pour améliorer la conservation et éviter les contacts avec les autres aliments l'idéal serait des bacs possédant des **couvercles**.

6.2. Définition de l'architecture générale

La définition de l'architecture générale consiste à définir les emplacements relatifs des principaux composants retenus. Toutes les architectures envisageables seront présentées, et un choix raisonné entre celles-ci sera effectué en fonction du cahier des charges fonctionnel. Lorsqu'une seule architecture sera envisageable, les raisons seront expliquées.

Tout d'abord, il faut comprendre le système général grâce à une chaîne d'information et d'énergie.

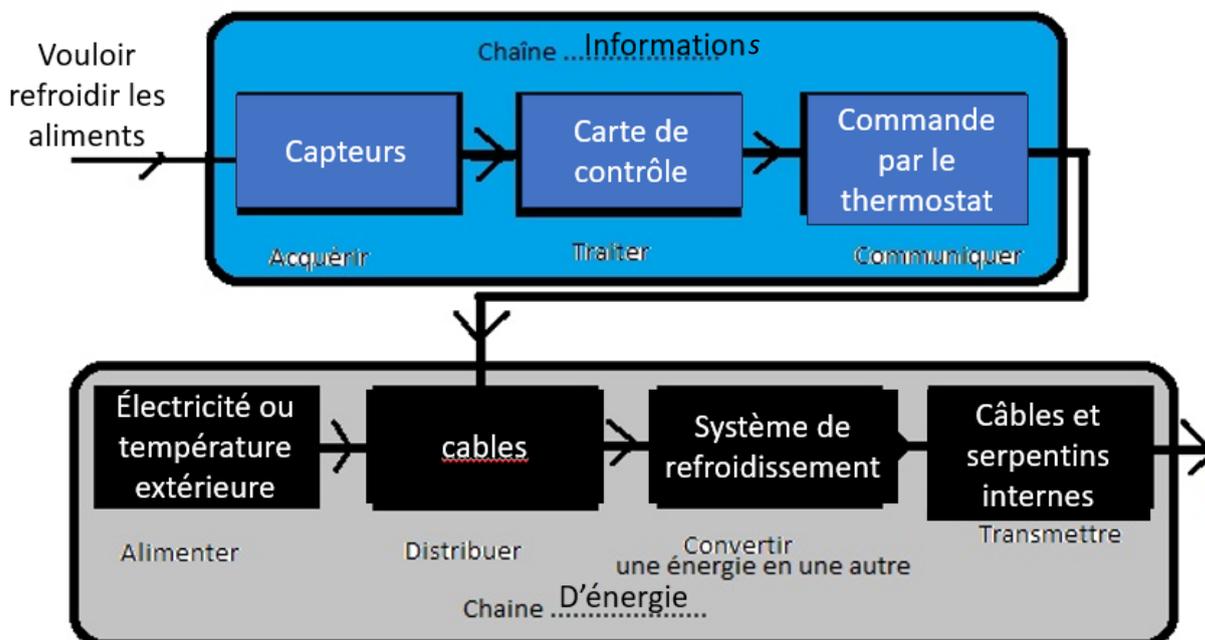


Figure 29: chaîne d'informations et d'énergie pour le réfrigérateur

L'architecture générale permet de placer les éléments les uns par rapport aux autres. Il peut y avoir plusieurs configurations possibles. Tout d'abord, afin de stocker un maximum d'aliments dans le réfrigérateur, il est convenable d'utiliser en plus du fond du coffre deux bacs coulissants. Les deux bacs prendront les deux tiers de l'espace disponibles, ce qui permettra d'avoir accès au fond du coffre sans devoir enlever les bacs.

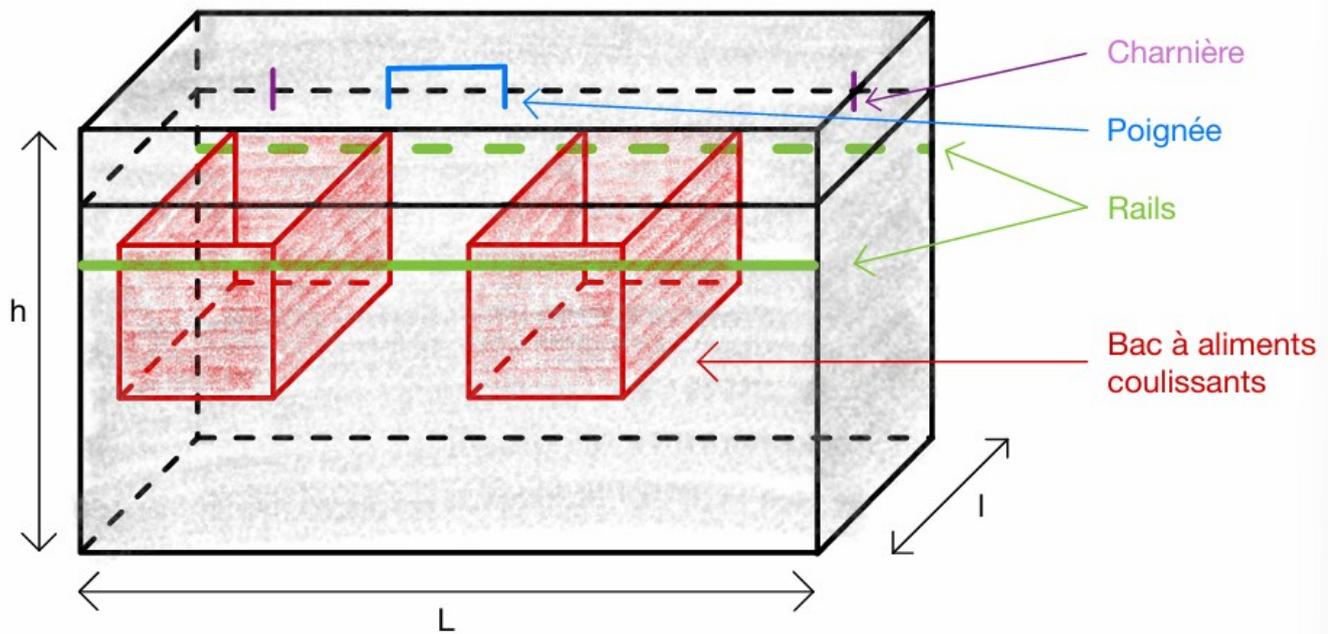


Figure 30: schéma global

Il existe deux possibilités pour le couvercle. Il est possible de ne mettre qu'une seule porte ou de mettre deux portes se rejoignant au centre du coffre. Les deux options possèdent des avantages et des inconvénients. Premièrement, il faut deux charnières et une poignée sur chaque porte donc la deuxième option revient plus cher. Cependant si l'on connaît la disposition des aliments à l'intérieur du réfrigérateur, le fait d'avoir deux portes permet de n'ouvrir qu'une partie et de limiter la perte d'énergie lors de la phase d'ouverture. Mais le joint entre les deux portes laisse passer de la chaleur cela constitue une source de perte lors de la phase de maintien à température. En conséquence, il est convenable de choisir la disposition avec une seule porte qui permet des économies sur les coûts de fabrication et sur les couts énergétiques lors du maintien en température.

Couvercle :

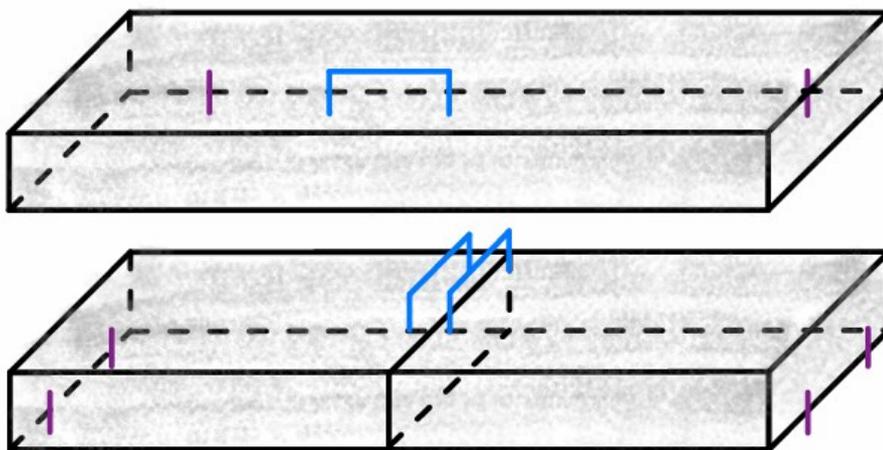


Figure 31: architecture possible pour les couvercles

La disposition du fluide fait partie intégrante de la structure. Le système de refroidissement doit être disposé sur une surface composant le réfrigérateur et le fluide doit pouvoir circuler sur une grande partie de cette surface. Afin de pouvoir couvrir la plus grande surface possible, il est convenable de considérer la disposition en serpentin.

Position du fluide :

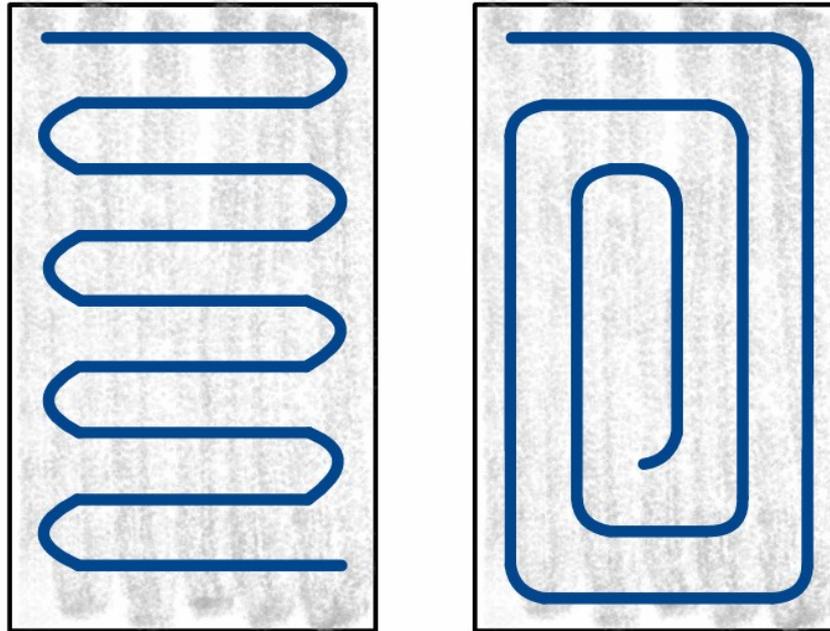


Figure 32: position du fluide

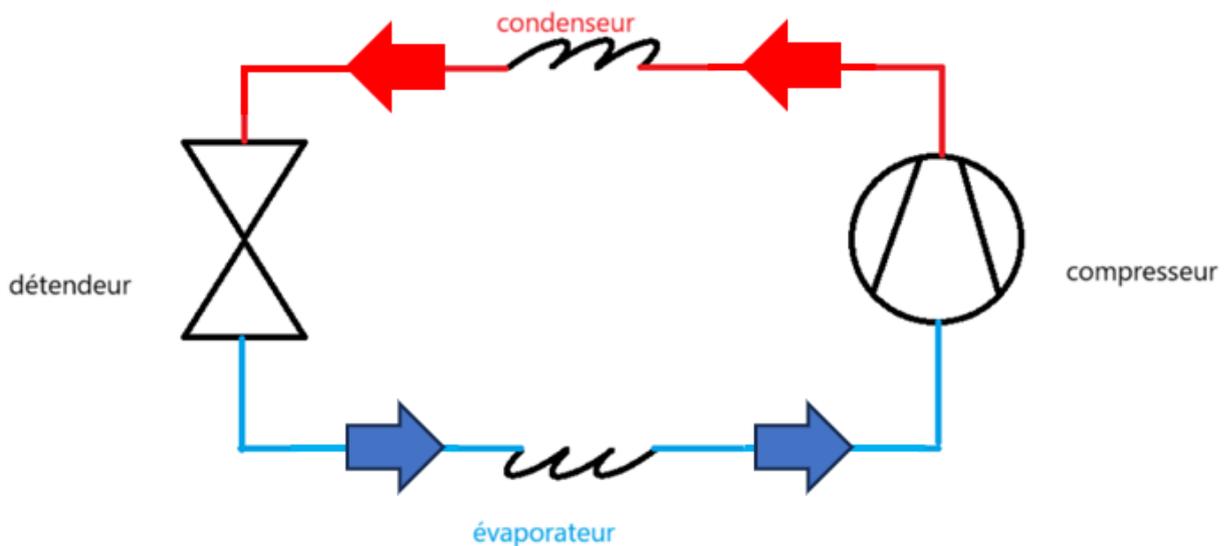


Figure 33: système de refroidissement

Il y a deux choix possibles, la disposition en spirale ou en serpent. Afin d'assurer un meilleur refroidissement, la disposition en serpent est la meilleure solution. Il faudra le poser sur la plus grande des surfaces afin de maximiser les échanges.

6.3. Détermination des efforts, des vitesses et/ou des puissances

La détermination des efforts, vitesses et/ou puissances au niveau des éléments extérieurs du système et internes au système est nécessaire pour : définir la structure et prédimensionner les composants et la structure.

6.3.1. Définition de la méthode de calcul et du modèle associé

La partie la plus importante à dimensionner est le fluide frigorigène. Dans la démarche du low-tech, le fluide sera de l'air afin de ne pas utiliser de matériaux polluants. En effet, le fluide frigorigène classique est très polluant. Afin d'établir ce prédimensionnement M. Radilla, professeur de mécanique des fluides à l'ENSAM a été consulté. L'objectif de ce calcul est de déterminer la surface d'échange entre le fluide et le réfrigérateur afin de maintenir une température constante à l'intérieur de celui-ci.

Tout d'abord, il faut distinguer deux cas. En été, le réfrigérateur low-tech sera branché sur une prise électrique et utilisera de l'air comme fluide. En hiver, la première idée est d'utiliser l'air extérieur uniquement et le principe de conduction afin que l'air frais entre dans le réfrigérateur est que les aliments soient à une température convenable. Cette idée demande l'avis d'un expert afin de savoir si elle est réalisable.

Dans la phase été, M. Radilla indique qu'il faut commencer par déterminer la puissance maximale dont nous avons besoin pour refroidir un volume donné. Cette puissance maximale est demandée lors de la mise en température du réfrigérateur.

Dans un deuxième temps, M. Périnet a été consulté afin d'étudier le dimensionnement lors de l'ouverture de la porte.

Ensuite il faudra déterminer la surface d'échange permettant d'assurer cette puissance. Connaissant cette surface, il sera possible de déterminer une géométrie pour le fluide.

L'objectif est de dimensionner un réfrigérateur low-tech de 100 L capable de maintenir une température interne stable de 5 °C, en utilisant un fluide frigorigène non polluant : l'air. Ce choix s'inscrit dans une logique de sobriété technologique et environnementale, en évitant les fluides HFC ou hydrocarbures.

Afin de valider les hypothèses thermiques et le modèle général, des échanges ont été menés avec M. Radilla, professeur de mécanique des fluides à l'ENSAM. Il a recommandé une méthode de calcul progressive, structurée autour d'un cycle thermodynamique de Joule inversé (compression → refroidissement → détente → évaporation), adapté au comportement de l'air sec en circuit fermé.

Deux régimes d'utilisation ont été envisagés :

- en été : fonctionnement actif avec alimentation électrique (compresseur, échangeurs),
- en hiver : possibilité d'utiliser l'air extérieur comme source froide naturelle (hypothèse à valider expérimentalement).

Le dimensionnement réalisé ici concerne le mode été, c'est-à-dire le cas le plus contraignant. Il servira de base pour évaluer la puissance maximale nécessaire au système.

Méthode de calcul retenue

Le modèle repose sur trois phénomènes thermiques majeurs :

1. **Conduction thermique à travers les parois du réfrigérateur :**
Ce flux de chaleur continu dépend des matériaux, de l'épaisseur de l'isolant et de l'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur.
2. **Mise en température du contenu du frigo :**
Il faut extraire l'énergie contenue dans l'air, l'eau, les aliments et les parois pour passer de la température ambiante à 5 °C.
3. **Maintien de la température constante :**
Une fois le frigo froid, un faible flux thermique résiduel subsiste et doit être compensé cycliquement.

Modèle théorique utilisé

Le modèle repose sur des **hypothèses simplificatrices**, suffisantes pour un avant-projet :

- Parois planes, homogènes et isotropes,

- Épaisseur d'isolant constante sur toutes les faces,
- Températures homogènes de part et d'autre de chaque paroi,
- Fluide parfaitement sec et renouvelé sans condensation.
- On suppose que le réfrigérateur est rempli avec différents aliments

Formules fondamentales utilisées

Pertes thermiques par conduction (loi de Fourier) :

$$P = \frac{S \cdot \Delta T}{R}, \quad \text{avec} \quad R = \frac{e}{\lambda}$$

Énergie à extraire pour refroidir un corps :

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T$$

Puissance moyenne associée :

$$\dot{Q} = \frac{Q}{t}$$

Choix du fluide frigorigène et cycle thermodynamique

Le fluide choisi est l'air sec en circuit fermé, ce qui impose un fonctionnement basé sur un cycle de Joule inversé :

- compression de l'air par un compresseur mécanique,
- refroidissement externe dans un condenseur,
- détente (idéalement isentropique),
- expansion dans un échangeur placé à l'intérieur du frigo.

Ce cycle sera alimenté par une source électrique, avec des composants simples, robustes, compatibles avec une logique low-tech.

6.3.2. Recherche des données

Pour la phase été, les données sont la température intérieure de 5°C, la température extérieure, correspondant à l'air de la pièce de 25°C et le volume du réfrigérateur de 100L.

Les données suivantes ont été utilisées pour le prédimensionnement thermique :

Volume du frigo : $V=100 \text{ L}=0.1 \text{ m}^3$

Dimensions internes (approximées) : $H=0.4 \text{ m}$, $L=0.5 \text{ m}$, $P=0.5 \text{ m}$

Surface totale estimée des parois, c'est la surface d'échange : $S \approx 1.4 \text{ m}^2$

Épaisseur d'isolant : $e=0.08 \text{ m}$

Conductivité thermique : $\lambda=0.025 \text{ W.m}^{-1}$ (mousse PU)

Température intérieure cible : $T=5^\circ\text{C}$

Température ambiante intérieure : $T=25^\circ\text{C}$

Capacité thermique massique de l'air : $C_p=1005 \text{ J/kg.K}$

Densité de l'air : $\rho = 1.29 \text{ kg/m}^3$

Durée de mise en température : $t=1800 \text{ s}$

Un contenu type est prévu :

Eau(bouteilles, sauces): ($m_{\text{eau}} = 9 \text{ kg}$)

Légumes(80%d'eau, 20%defibres): ($m_{\text{légumes}} = 6 \text{ kg}$)

Pain: ($m_{\text{pain}} = 3 \text{ kg}$)

Air ($V_{\text{air}} = 0.015 \text{ m}^3$)

6.3.3. Application de la méthode de calcul des efforts

L'objectif des calculs suivants va être de dimensionner le fluide et le compresseur pour le réfrigérateur. Les autres éléments du système pourront être choisis en fonction de la puissance du compresseur.

On cherche la puissance maximale que devra fournir le réfrigérateur et grâce à cela on pourra arriver au diamètre des tuyaux à utiliser pour faire passer le fluide et sa longueur.

Les calculs suivants ne donneront qu'un ordre de grandeur de la puissance du compresseur. Il faut partir de l'hypothèse forte que lorsque l'on ouvre la porte du réfrigérateur tout l'air frais contenu est remplacé par de l'air chaud à 25°C. Il faut alors repasser à une température contenue dans l'intervalle de $\pm 3^\circ\text{C}$.

Calcul des pertes thermiques par les parois

Formule littérale (loi de Fourier) :

$$R = \frac{e}{\lambda}$$

R est la résistance thermique ($\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$)

Application numérique

$$R = \frac{0.08}{0.025} = 3.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$$

Énergie à extraire pour la mise en température

Application numérique

$$P = \frac{S \cdot \Delta T}{R}$$
$$P = \frac{1.4 \cdot 20}{3.2} = \boxed{8.75 \text{ W}}$$

Résultat : les pertes thermiques à travers l'isolant sont estimées à 8.75 W en régime permanent. C'est la puissance thermique qui entre dans le réfrigérateur à cause des pertes par les parois.

Énergie à extraire pour la mise en température

Pour connaître cette énergie à extraire de chaque aliment présent dans le réfrigérateur.

Formule littérale :

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T, \quad \text{avec} \quad m = \rho \cdot V$$

Application numérique :

1. Énergie à extraire de l'eau

$$Q_{\text{eau}} = m \cdot c \cdot \Delta T = 9 \cdot 4180 \cdot 20 = 752\,400$$

2. Énergie à extraire des légumes (approximée)

Capacité thermique moyenne :

$$c_{\text{légumes}} = 0.8 \cdot 4180 + 0.2 \cdot 1800 = 3784 \text{ J}/\text{kg} \cdot \text{K}$$

$$Q_{\text{légumes}} = 6 \cdot 3784 \cdot 20 = 454\,080 \text{ J}$$

3. Énergie à extraire du pain

$$Q_{\text{pain}} = 3 \cdot 1500 \cdot 20 = 90\,000 \text{ J}$$

4. Énergie à extraire de l'air

$$m_{\text{air}} = \rho \cdot V = 1.2 \cdot 0.015 = 0.018 \text{ kg}, \quad c_p = 1005 \text{ J}/\text{kg} \cdot \text{K}$$

$$Q_{\text{air}} = 0.018 \cdot 1005 \cdot 20 = 362 \text{ J}$$

5. Énergie totale à extraire

$$Q_{\text{total}} = 752\,400 + 454\,080 + 90\,000 + 362 = \boxed{1\,296\,842 \text{ J}} \approx \boxed{1.3 \text{ MJ}}$$

6. Puissance de refroidissement nécessaire

Refroidissement en 1 heure (3600 s)

$$Q_{1h} = \frac{1\,296\,842}{3600} \approx \boxed{360 \text{ W}}$$

Refroidissement en 2 heures (7200 s)

$$\dot{Q}_{2h} = \frac{1\,296\,842}{1200} \approx \boxed{190\text{ W}}$$

En conclusion de cette partie, le réfrigérateur lors de sa mise en service, a besoin de 190W pour refroidir en 2h. Ce temps et cette puissance semblent raisonnables.

Cependant suite à une indication de M. Périnet, il semble plus raisonnable de dimensionner le compresseur en considérant qu'il est déjà dans l'intervalle de température. En effet, la mise en service du réfrigérateur ne se déroule qu'une fois, alors qu'un réfrigérateur est ouvert plusieurs fois dans une même journée. Il est donc plus intéressant de chercher à minimiser le temps de refroidissement lors de l'ouverture d'une porte, plutôt que lors du premier branchement du réfrigérateur.

Il est considéré que lors de l'ouverture de la porte, l'air du réfrigérateur, soit 100L, est entièrement remplacé par de l'air chaud.

En reprenant les mêmes méthodes que précédemment, on trouve que l'énergie à extraire pour refroidir l'air est de 2 412 J.

Pour abaisser la température de l'air chaud de nouveau présent dans le réfrigérateur, il faudra abaisser la température de 17°C. D'où :

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T = 0.12 \times 1005 \times 17 = 2051\text{ J}$$

Idéalement, le temps de remise à température doit être assez rapide. La durée de 5 min est raisonnable car cela permet aux aliments de ne pas se réchauffer. L'objectif est d'extraire 2 051 J en 5 minutes.

Cela donne : $P = Q/t = 2051/300 \approx 6.84\text{ W}$ ($\approx 7\text{ W frigorifiques}$).

Une fois cette valeur trouvée, il faut obtenir la puissance du compresseur. Comme *le compresseur est un système air-air avec cycle thermodynamique réel (compression-expansion), il a un rendement (COP = coefficient de performance)*.

Pour de l'air refroidi par compression + échangeur : le COP est de 1.2, c'est assez faible en comparaison au réfrigérateur commercialisé mais le fluide frigorigène utilisé est moins efficace que le classique.

$$P_{\text{électrique}} = P_{\text{froid}} / \text{COP} = 7/1.2 = 5.8\text{ W}$$

Mais un compresseur d'air "commercial" de petite taille a souvent un rendement mécanique et thermique plus faible. Il faut alors une marge de sécurité de 3 à 5 pour les pertes, redémarrages, surchauffes. Prévoir un compresseur d'air de 30 à 50 W pour assurer un abaissement à 8 °C en 5 min, même dans des conditions peu favorables.

Maintenant il faut Déterminer le diamètre minimal intérieur des tuyaux dans lesquels circule l'air (fluide frigorigène) pour garantir un débit suffisant, avec une perte de charge acceptable, tout en s'insérant dans un échangeur thermique compact et performant.

Afin de dimensionner la tuyauterie en suivant la méthode de monsieur Périnet, il faut déterminer le diamètre minimal intérieur des tuyaux dans lesquels circule l'air (fluide frigorigène). Il faut se placer dans le cas de l'ouverture de la porte. Cela signifie alors que le temps de refroidissement calculé en premier lieu sera beaucoup plus long. Cependant, il s'agit d'une phase exceptionnelle, il n'est donc pas convenable de baser un dimensionnement sur cette phase. Il faut utiliser les phases courantes, c'est – à-dire l'ouverture de la porte et la remise en température.

On part de la formule d'échange thermique par convection forcée :

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T$$
$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}}{c_p \cdot \Delta T}$$

$$\dot{m} = \frac{7}{1005 \cdot 25} = \boxed{4,11 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s}}$$

$$\rho = 1.29 \text{ kg/m}^3 \Rightarrow$$

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} = \frac{4.11 \cdot 10^{-3}}{1.29} = \boxed{3.43 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}}$$

Pour limiter les pertes de charge tout en assurant un bon échange thermique, on fixe :

$$v = 8 \text{ m/s}$$

$$\Rightarrow$$

$$A = \frac{\dot{V}}{v} = \frac{3.43 \times 10^{-4}}{8} = 4.29 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$D = 2 \cdot \sqrt{\frac{A}{\pi}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{4.29 \times 10^{-5}}{\pi}} = \boxed{7.4 \text{ mm}}$$

Ce diamètre permet un refroidissement rapide mais il y aura des pertes de charges très élevées.

Avec :

- D=0.0074 m
- L=3 m
- v=8 m/s
- f=0.02

$$\Delta P = 0.02 \cdot (3/0.0074) \cdot (1.2 \cdot 8^2 / 2) \approx 311 \text{ kPa}$$

Les pertes de charges sont beaucoup trop importantes, il semblerait que le bon compromis soit une vitesse plus réduite, à 3m/s avec un diamètre élargi à 15 mm, ce qui correspond à un tuyau standard. Ce diamètre garantit un écoulement raisonnable, avec des pertes de charge faibles et une vitesse adaptée aux échanges thermiques dans les tuyaux du cycle.

On garde les mêmes hypothèses :

Longueur L=3 m

Vitesse cible de l'air v=8 m/s

Masse volumique $\rho=1.2 \text{ kg/m}^3$

Coefficient de frottement f=0.02

$$\Delta P = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2}$$

$$\Delta P = 0.02 \cdot \frac{3}{0.0345} \cdot \frac{1.2 \cdot (8)^2}{2}$$

$$= 0.02 \cdot 86.96 \cdot \frac{1.2 \cdot 64}{2}$$

$$= 0.02 \cdot 86.96 \cdot 38.4$$

$$= \boxed{66.9 \text{ kPa}}$$

En utilisant le diamètre minimal calculé précédemment (34.5 mm), la perte de charge devient très importante : environ 66.9 kPa, ce qui est trop élevé pour un système low-tech à air avec compresseur basse pression (1 → 4 bar).

Cela justifie le choix final d'un diamètre supérieur à 35 mm (par exemple 50 mm), pour réduire drastiquement les pertes de charge tout en gardant une géométrie compacte (spirale).

6.3.4. Conclusion

Cette étude a permis de dimensionner le compresseur et la tuyauterie du réfrigérateur. Cela permet surtout de mettre en valeur les premières difficultés si ce projet est concrétisé :

- L'air stocke très peu de chaleur, comparé aux liquides classiques → il faut circuler beaucoup d'air pour peu d'effet thermique.
- Un frigo classique utilise un fluide qui change de phase (ex. R600a) : condensation + évaporation → stockage/évacuation de chaleur beaucoup plus efficace.
- Les échangeurs air-air sont beaucoup moins performants que les échangeurs air-liquide.
- Il faut soit augmenter la surface d'échange (ailettes, spirales), soit augmenter la vitesse de l'air (ce qui augmente les pertes de charge...).



Pour résumer ce premier dimensionnement, il est possible de comparer les valeurs du réfrigérateur low-tech et celles du réfrigérateur classique.

Critère	Low tech	Classique
Technologie	Air sec	Fluide HFC ou hydrocarbure
Phase de travail	Monophasique	Changement de phase
Puissance crête	~7 W	80–150 W
Isolation requise	Très forte	Forte
Temps de remise à température	~5 min	~1–2 min
Complexité technique	Faible	Moyenne
Rendement énergétique	Faible	Élevé (COP > 1)
Écologie	Excellent	Moyen (fluides polluants)

Ainsi, l'air permettrait un excellent résultat pour la réfrigération. Mais, une telle solution aurait déjà été utilisée pour les réfrigérateurs classique. La raison pour laquelle elle n'est pas utilisée est sûrement le volume d'air nécessaire pour le refroidissement. Il faut sûrement une grosse bobine pour faire fonctionner le système, voire utiliser un circuit ouvert, ce qui expliquerait l'utilisation d'un fluide frigorigène dans les réfrigérateurs classiques.

6.4. Définition de la structure

Une étude de la structure permet d'étudier les efforts entre les différents composants, et d'éviter des pièces trop massives. Il faut éviter la flexion et la torsion, mais aussi les phénomènes de flambement et les départs de cricque qui peuvent survenir en compression et en traction.

6.4.1. Composant n°1 : Charnières

6.4.1.1. Définition des méthodes de choix et de prédimensionnement (avec son modèle associé)

Dans cette partie sera réalisé le prédimensionnement des charnières permettant l'ouverture et le maintien en suspension de la porte du réfrigérateur coffre.

Modèle de la porte coffre :

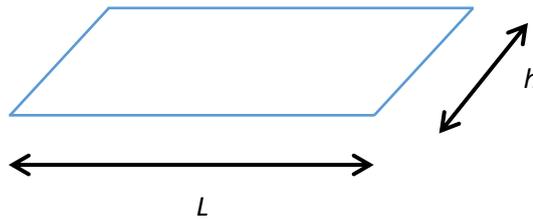


Figure 34 : Schéma de la porte du réfrigérateur

D'après les recommandations fournies sur le site fabricant Kronakoblenz [20], il est intéressant de poser plus de 2 charnières pour des portes de plus de 2.1m et sujettes à déformation. Il sera supposé que la porte de ce réfrigérateur ne se déforme pas et que sa longueur est bien inférieure à 2.1m, deux charnières seront donc utilisées. De plus, ces 2 charnières seront placées de manière symétrique sur la longueur latérale de la porte et séparée par un entraxe x comme représenté sur le schéma suivant :

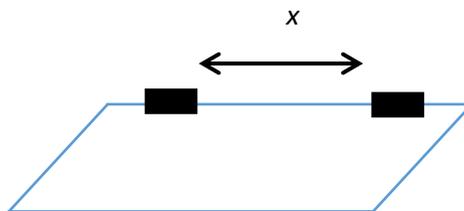


Figure 35 : Schéma de la porte avec charnières et entraxe

De plus, m correspondra à la masse de la porte.

Deux types de charnières peuvent être utilisés :

- Les charnières classiques assurent l'ouverture et la fermeture de la porte
- Les compas de porte permettent l'ouverture ainsi que le maintien ouvert (dans le cas où l'utilisateur aurait besoin de ses deux mains pour atteindre un aliment)

Rappel CDCF

Les contraintes liées au prédimensionnement sont mécaniques : Les charnières doivent être adaptées au poids de la porte. Elles doivent aussi pouvoir effectuer une rotation d'au moins 90°

Modèle :

Dans les conditions normales d'utilisation et par l'horizontalité de la porte, les efforts axiaux pouvant s'exercer sur les charnières seront négligés (cas de choc sur une surface latérale de la porte lorsque celle-ci est ouverte). Cette hypothèse serait d'autant plus cohérente que l'entraxe x est grand. Les efforts sont supposés nuls lorsque la porte est fermée et naturellement les plus intenses lorsque la porte est ouverte à 90° , comme dans le schéma ci-dessous :

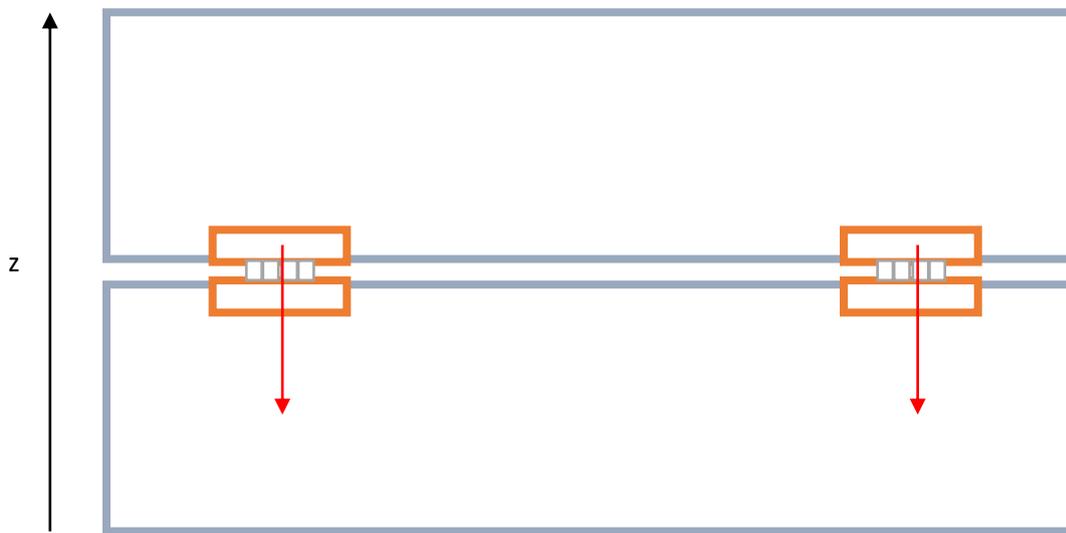


Figure 36 : Schéma du réfrigérateur avec contraintes radiales sur les charnières

En appliquant le principe fondamental de la dynamique à une charnière supposée à l'équilibre dans cette position :

On appelle \vec{R} la réaction de la charnière

$\vec{0} = \vec{F} + 2\vec{R}$, (Par symétrie, les deux charnières opposent la même force à la porte)

On applique désormais le principe fondamental de la dynamique à la porte :

$\vec{0} = -mg\vec{z} + 2\vec{R}$

D'où :

$$\vec{F} = -mg\vec{z} = 2\vec{R}$$

$$\vec{R} = -\frac{mg}{2}\vec{z}$$

En connaissant la masse m de la porte du frigo, il est désormais possible de choisir les charnières adaptées dans un catalogue fabricant.

6.5. Prédimensionnement de la structure

En parallèle, il est nécessaire de pré-dimensionner ces éléments. Les méthodes de dimensionnement de structure (résistance, déformation, résonance notamment pour les systèmes légers et peu rigides aux fréquences basses proches des fréquences d'excitation, phénomène de couplage comme le flutter sur les avions...) devront être définies à partir du cahier des charges fonctionnel. Les efforts à prendre en compte devront être déterminés dans tous les phases de vie (attention : les efforts dimensionnants ne sont pas forcément en phase de vie principale).

Les coefficients de sécurité ne sont pas faciles à quantifier et justifier, mais :

- plus le modèle est grossier,
- plus l'intensité des efforts est mal maîtrisée,
- plus les matériaux sont mal connus (notamment en termes de fatigue),
- plus la criticité est importante (conséquences désastreuses si la pièce casse),

et plus le coefficient de sécurité sera important (pour les avions de ligne, le coefficient de sécurité est de 1,5 du fait d'une excellente maîtrise de tous ces points, et à contrario, sur un ascenseur dans le cadre d'un avant-projet, le coefficient de sécurité peut être de 15...). En évoquant les niveaux de maîtrise de tous ces paramètres dans le contexte de l'étude, il est ainsi possible d'expliquer le choix du coefficient de sécurité (attention, celui-ci est le résultat du produit des coefficients de sécurité des 4 points cités ci-dessus).

Les calculs doivent être détaillés complètement (éventuellement en annexe) avec les formules littérales, puis les applications numériques et enfin les résultats, pour que le lecteur comprenne facilement l'origine de ceux-ci (et non pas qu'il ait à décortiquer le rapport pour comprendre le « pourquoi du comment »...). De plus, pour éviter toute approximation involontaire lors de calculs « simples » (par exemple, un calcul de puissance avec la formule $P=C.\omega$), il faut appliquer les méthodes vues en cours (par exemple : système isolé, bilan d'actions mécaniques extérieures, PFS), et s'assurer que les hypothèses de ces méthodes sont bien vérifiées. De plus, les unités ne doivent jamais être oubliées.

6.5.1. Définition de la méthode de prédimensionnement et du modèle associé

Voir les commentaires de 5.3.1 .

6.5.2. Recherche des données et formulation d'hypothèses

Voir les commentaires de 5.3.2 .

6.5.3. Calcul de prédimensionnement

Voir les commentaires de 5.3.3 .

6.5.4. Conclusion

Voir les commentaires de 5.3.4 .

6.6. Croquis complet du système

Les croquis doivent permettre de montrer précisément les formes des pièces, notamment les surfaces usinées et les bruts, et doivent donc pleinement intégrer les contraintes de fabrication (usinage, moulage...).

Si certaines solutions aux fonctions de service et contraintes ne peuvent pas apparaître sur ces croquis, il faudra les écrire en accompagnement de ces derniers pour ne pas les oublier par la suite.

7. Conception détaillée (en projet)

La conception détaillée correspond à reprendre la meilleure étude menée en avant-projet :

- en définissant l'ensemble des composants à fabriquer ou acheter, avec des outils numériques pour optimiser davantage,
- en prenant en compte davantage l'industrialisation avec des personnes compétentes issues de la fabrication.

Le maquettage physique (comme avec l'impression 3D) a pour objectifs de s'assurer notamment que le produit sera ergonomique et/ou montable, et il peut faire partie du processus de conception détaillé.

La rétro-conception qui consiste à modéliser numériquement un système existant (avec un scanner 3D) permet de s'assurer que le nouveau produit sera bien compatible géométriquement avec l'ancien.

Si la conception détaillée n'est pas demandée, il faudra indiquer « **(sans objet)** » dans le titre du chapitre avec une justification rapide en-dessous. Cette pratique montre au lecteur que vous avez pensé à cette éventualité.

8. Financement

Plusieurs méthodes de financement sont généralement possibles, et il faudra comme en conception, présenter celles-ci, puis effectuer un choix raisonné.

*Si le financement n'est pas demandé, il faudra indiquer « **(sans objet)** » **dans le titre du chapitre** avec **une justification rapide en-dessous**. Cette pratique montre au lecteur que vous avez pensé à cette éventualité.*

9. Réalisation

La réalisation est à différencier de la conception où on imagine, dessine, dimensionne... D'un côté, le produit est réel et de l'autre, virtuel sous formes de croquis et de maquette numérique (terme à la mode : jumeau numérique).

La réalisation englobe :

1. L'approvisionnement des composants non réalisés par vous.
2. La fabrication de certains composants.
3. L'assemblage de l'ensemble des composants.

Si la réalisation du produit n'est pas demandée, il faudra indiquer « **(sans objet)** » **dans le titre du chapitre avec une justification rapide en-dessous**, et supprimer tous les sous-chapitres pour ne pas surcharger le sommaire. Cette pratique montre au lecteur que vous avez pensé à cette éventualité.

9.1. Approvisionnements / achats de composants

Il s'agit de lister ceux-ci, pour que le lecteur comprenne ce qui ne sera pas réalisé par vous. L'approvisionnement de ces composants devra forcément apparaître dans le planning (risque plus ou moins élevé de dépendance externe).

Il peut s'agir de composants sous-traités, et il faudra alors donner les spécifications techniques de ceux-ci (dessin de définition coté s'il s'agit d'une pièce mécanique).

9.2. Fabrication de composants

Dans cette partie, vous devez présenter comme en conception, les différentes méthodes envisageables pour fabriquer un composant, puis effectuer un choix raisonné.

La gamme de fabrication sera ensuite présentée.

9.3. Assemblage des composants

Cette partie doit présenter la gamme de montage. Parfois, le montage ne peut pas s'effectuer sans outils spécifiques (par exemple, bâti d'assemblage sur lequel on positionne les pièces avant de les assembler définitivement par vissage, rivetage, soudage...), et la conception de ces outillages devra être présentée si vous l'avez réalisée.

10. Retours d'expérience techniques et managériaux

Pour apprendre de ses erreurs, de ses succès et / ou de ses découvertes sur des outils / méthodes de travail non enseignées à l'école, et donc capitaliser votre expérience, vous pouvez faire des retours d'expériences (REX) managériaux et / ou techniques.

10.1. REX techniques

Pour que vos successeurs puissent reprendre facilement vos travaux, il faut indiquer les problèmes techniques rencontrés, vos réflexions et les solutions que vous avez mises en place ou que vous mettriez en place si vous deviez reprendre un tel projet. Si vous avez dû vous former à un logiciel ou à une méthode, vous mettrez en annexe de ce rapport, un guide pour faciliter la formation de vos successeurs (vous pouvez vous appuyer sur des ressources externes), voire un tutoriel trouvé, modifié et amélioré, créé...

Pour être sûr que votre guide, voire votre tutoriel, soit réellement exploitable par vos successeurs, il faut le faire tester par un candide.

10.2. REX managériaux

Avant de détailler un REX managérial, il faut lui donner un titre explicite et qui soit général pour être utilisé dans d'autres situations. Si vous faites plusieurs REX, il faut décomposer ce chapitre en plusieurs sous-chapitres.

En termes de management, pour éviter de reproduire des erreurs passées et progresser dans ses pratiques, il est conseillé d'effectuer l'analyse suivante en fin de projet :

- Dans un 1^{er} paragraphe, il faut citer un exemple de situation que vous avez vécue et représentative du REX que vous rédigez. Vous pouvez citer plusieurs exemples si ceux-ci sont complémentaires vis-à-vis de ce REX. Il faudra clairement identifier une difficulté non anticipée initialement (dans le cahier des charges, le planning, les risques...) ou une action qui ne s'est pas bien déroulée, le tout en termes de management (dans ce cadre, l'aspect technique n'est pas intéressant, mais des difficultés techniques rencontrées peuvent faire suite à une « mauvaise » anticipation, et qui elle, est intéressante à analyser).
- Dans un 2^{ème} paragraphe, il faut identifier l'(les) origine(s) du problème et éventuellement, un(des) facteur(s) aggravant(s) la situation, en analysant point par point tous les problèmes évoqués dans le 1^{er} paragraphe.
- Dans un 3^{ème} paragraphe, il faut définir une(des) méthode(s) pour éviter, voire limiter, la survenance de ce problème, en s'appuyant sur l'analyse du 2^{ème} paragraphe. Cette démarche devra être générale et complètement déconnectée de votre projet pour éviter, voire limiter, la reproduction de cette difficulté dans vos projets futurs. Cette 3^{ème} partie devrait commencer par une phrase du genre : « La prochaine fois que je serai confronté à ..., je ferai ... ». Vous pouvez vous inspirer, voire utiliser, les bonnes pratiques de management de projet de l'annexe 1

Cette analyse doit être relativement synthétique pour être comprise facilement (sur une quinzaine de lignes maximum). Pour la 3^{ème} partie, vous pouvez vous inspirer de REX des années précédentes disponibles sur X:\Enseignants\PerinetJM\ENSAM\Cours\Management de projet\REX de projets.ppt , et les démarches à mettre en place se trouvent parfois dans le cours de Management de projet.

Si la difficulté provient d'autres personnes (du commanditaire, d'un fournisseur, d'un service technique/administratif...), il ne faut pas les incriminer (malheureusement, dans vos futurs projets, vous dépendrez d'autres personnes qui seront plus ou moins fiables...), mais il faut essayer de trouver une solution pour que le projet avance malgré ces personnes.

Par exemple, pour moi, dans le cas d'un PJT que j'ai encadré :

- *J'ai été très critique envers des étudiants travaillant sur un PJT après quelques semaines car je trouvais que le projet n'avancait pas vite. Cette action aurait pu démotiver les étudiants, d'autant plus que ceux-ci étaient de bonne volonté.*
- *En fait, les étudiants étaient en difficulté, car la modélisation du système était particulièrement difficile, alors que cela me semblait relativement facile (1^{ère} erreur de ma part). J'aurais donc dû les accompagner davantage dans cette partie pour qu'ils avancent plus rapidement (2^{ème} erreur de ma part).*
- *Dans tout nouveau projet :*
 - *je suivrai particulièrement la résolution des points durs par les étudiants,*
 - *je chercherai de mon côté à trouver des pistes, voire résoudre ces points durs, sans pour autant leur donner la solution, mais avec pour objectif de les faire avancer à partir de leurs réflexions.*

Dans l'exemple du REX précédent, deux erreurs et deux démarches ont été proposées, et c'est un cas particulier. Il se peut qu'il n'y ait qu'une seule erreur et/ou qu'une seule démarche à appliquer ensuite, ou au contraire, plus que deux erreurs et/ou plus que deux démarches.

Un retour d'expérience positif peut aussi être rédigé, et il faut l'analyser de la même manière. Une part de chance a peut-être permis que cela se passe bien. Si c'est le cas, il faut le prendre en compte dans le retour d'expérience pour qu'il soit réellement réutilisable, sans cet aspect chance.

11. Conclusion

Dans la conclusion, vous devez répondre à l'introduction et vendre les résultats obtenus, avec une synthèse des principaux objectifs, des principales solutions choisies et des principales étapes effectuées et/ou méthodes utilisées pour répondre au problème. Une page pour la conclusion est un grand maximum.

En phase d'avant-projet, vous pouvez indiquer les points durs que vous avez découverts, et décrire un minimum les actions nécessaires pour finaliser le projet :

- les études complémentaires et/ou les recherches scientifiques à mener,
- les données inconnues pour le moment à déterminer,
- les compétences à acquérir,
- les démonstrateurs à réaliser.

Dans un rapport, et en particulier dans la conclusion, il faut être positif et **NE PAS** vous dévaloriser. Au cas où :

- l'étude ne serait pas terminée ,
- des simplifications ont été effectuées,
- des hypothèses ont été prises,
- et/ou l'étude serait suivie d'une nouvelle étude et/ou réalisation,

il est impératif de définir les tâches suivantes pour faciliter la reprise de votre travail par vos successeurs et pour montrer que vous avez bien une vision globale du projet (normalement, dans le premier cas, tout ceci devrait déjà être défini dans le corps du rapport, lors de la conception du système, car ces tâches non-réalisées devaient être anticipées).

Dans une conclusion, il ne faut pas s'autocongratuler : c'est au lecteur de juger, et cela a un effet particulièrement négatif quand le lecteur n'est pas convaincu, voire déçu. Il faut donc faire sentir dans la conclusion que vous avez bien réalisé votre travail.

12. Ressources externes

(livres, sites internet, mails, feuilles de calculs, logiciels utilisés)

[1] <https://fr.statista.com/statistiques/802856/temperature-maximale-minimale-moyenne-par-mois-france/> [consulté le 6/02/2025]

[2] *Can Salmonella Spread in the Refrigerator? A Comprehensive Guide - Appliance Update*. 26 Nov. 2024, <https://applianceupdate.com/can-salmonella-spread-in-the-refrigerator/>

[3] Brian. 'Can Mold in Fridge Make You Sick? Hidden Health Risks Revealed'. Mold Labs, 11 Dec. 2024, <https://moldlabs.org/can-mold-in-fridge-make-you-sick/>

[4] Bonardi, Silvia. 'Staphylococcus Aureus and Food Safety'. FoodTimes, 9 July 2024, <https://www.foodtimes.eu/food-system-en/staphylococcus-aureus-and-food-safety/>

[5] Décret n°98-257 du 31 mars 1998 relatif à la consommation en énergie des réfrigérateurs et congélateurs électriques à usage domestique

<https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/LEGIARTI000006630186/1999-09-03/#LEGIARTI000006630186>

[6] Le Règlement délégué (UE) 2019/2016 de la Commission du 11 mars 2019, modifié par le règlement délégué (UE) 2021/340 du 17 décembre 2020 et par le rectificatif publié au JOUE L 50 du 24/02/2020

eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32021R0340&qid=1633592713974&from=FR

[7] Wiki low tech, consulté le 02/03/2025 https://wiki.lowtechlab.org/wiki/Frigo_du_d%C3%A9sert

[8] Mtbest.net, consulté le 02/03/2025 <https://mtbest.net/>

[9] afce, consulté le 25/03/2025 <https://www.afce.asso.fr/wp-content/uploads/2020/02/AFCE-leaflet02-devoirs-fluides-fluores-web.pdf>

[10] Procédé et appareil de réfrigération (Brevets) - Data INPI. <https://data.inpi.fr/brevets/EP0641978>. Consulté le 29 mars 2025.

[11] « Peltier Cooler Installation ». Thermoelectric, <https://thermal.ferrotec.com/technology/thermoelectric-reference-guide/thermalref06/>. Consulté le 29 mars 2025.

[12] « FAQ's & Technical Information ». TE Technology, <https://tetech.com/faqs/>. Consulté le 29 mars 2025.

[13] SYSTEME DE REFRIGERATION THERMOELECTRIQUE A ELEMENT THERMOCONDUCTEUR SOUPLE (Brevets) - Data INPI. <https://data.inpi.fr/brevets/EP0605664?q=r%C3%A9frig%C3%A9ration%20thermo%C3%A9lectrique#EP0605664>. Consulté le 29 mars 2025.

[14] Dispositif de Réfrigération Magnétique et Système de Réfrigération Magnétique (Brevets) - Data INPI. <https://data.inpi.fr/brevets/EP2420761?q=r%C3%A9frig%C3%A9ration%20magn%C3%A9tique#EP2420761>. Accessed 29 Mar. 2025.

[15] "Ambient pressure colossal magnetocaloric effect tuned by composition in MnFeAs", Ariana de Campos, Daniel L Rocco, Alexandre Magnus G. Carvalho, Luana Caron, Adelino A. Coelho, Luzeli M. da Silva, Flávio C. G. Gandra, Adenilson O. dos Santos, Lisandro P. Cardoso, Pedro J. von Ranke, Nature Materials 5, 802-804 (3 September 2006)

[16] "Reduction of hysteresis losses in the magnetic refrigerant GdGeSi by the addition of iron", Alexander J. Shapiro, Robert D. Shull, Virgil Provenzano, *Nature* 429, 853-857 (24 June 2004)

[17] Rédaction, La. « Guide complet sur le thermostat électronique frigo : fonctionnement et réglages ». Umvie, 13 avril 2024, <https://umvie.com/guide-complet-sur-le-thermostat-electronique-frigo-fonctionnement-et-reglages/>.

[18] « Blum ». Heimwerkertools, <https://www.heimwerkertools.com/fr/blum/>. Consulté le 29 mars 2025.

[19] Gaz Réfrigérants : Impact & Nouvelles Réglementations. <https://www.terredenergies.info/gaz-refrigerants-impact-environnemental-et-nouvelles-reglementations/>. Accessed 6 Apr. 2025.

[20] : <https://www.kronakoblenz.com/fr/ecole-de-produits/guide-facteurs-a-prendre-en-compte-pour-choisir-une-charniere#combien-de-charnieres-installer>

