

Filière Systèmes industriels

Orientation Power & Control

Travail de bachelor Diplôme 2021

Steven Deperiers

Efficacité énergétique dans la viticulture

■ *Professeur*
Manuele Margni, Jessen Page

■ *Expert*
Nathanaël Gobat

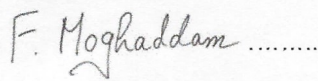
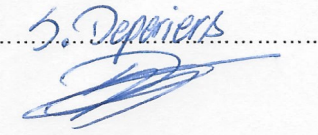
■ *Date de la remise du rapport*
20.08.2021

Ce rapport est l'original remis par l'étudiant.
Il n'a pas été corrigé et peut donc contenir des inexactitudes ou des erreurs.

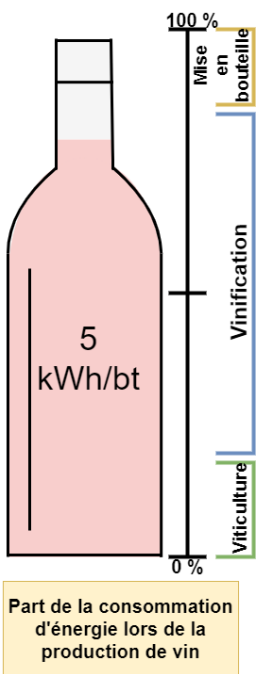
SYND	ETE	TEVI
X	X	X

Filière / Studiengang SYND	Année académique / Studienjahr 2020/21	No TD / Nr. DA PC/2021/68
Mandant / Auftraggeber ☐ HES—SO Valais ☒ Industrie ☐ Etablissement partenaire Partnerinstitution	Etudiant / Student Steven Deperiers Professeur / Dozent Manuele Margni	Lieu d'exécution / Ausführungsort ☒ HES—SO Valais ☒ Industrie ☐ Etablissement partenaire Partnerinstitution
Travail confidentiel / vertrauliche Arbeit ☐ oui / ja ¹ ☒ non / nein	Expert / Experte (données complètes) Nathanaël Gobat AgroCleanTech C/o Union suisse des paysans, Belpstrasse 26, 3007 Bern	

Titre / Titel Efficacité énergétique dans la viticulture
Description / Beschreibung Les cantons du Valais, Vaud, Genève et Neuchâtel présentent 70% des surfaces cultivées. Le raisin suisse est transformé et consommé à 98% dans le pays (peu d'exportation), soit 98 mio litres en 2019. La vinification a des besoins importants en énergie (froid, chaud et de processus) et en eau (nettoyage du matériel) la plupart du temps saisonniers. Le but de ce travail de diplôme est de proposer une ou des mesures techniques chiffrées permettant de diminuer les coûts énergétiques (électricité et combustible) et l'empreinte environnementale des caves. Le TD est encadré par AgroCleanTech et ses partenaires (Agroscope Changins). L'étudiant devra, lors d'une phase du TD, se rendre dans une cave pilote (Agroscope Changins ou autre) pour effectuer les comparaisons des systèmes proposés. Objectifs / Ziele — Comprendre et analyser les postes de consommation énergétiques principaux des caves — Lister les mesures d'efficacité énergétique applicables à ce domaine — Evaluer et comparer une des mesures d'efficacité dans une cave pilote (comparaison technique de plusieurs solutions énergétiques [coût d'investissement, coût d'exploitation, efficacité, consommation énergétique, difficulté de mise en œuvre, etc.]) — Evaluer le potentiel d'application de la/des mesure/s testée/s pour la branche vinicole.

Signature ou visa / Unterschrift oder Visum Responsable de l'orientation / filière Leiter der Vertiefungsrichtung / Studiengang:  ¹ Etudiant / Student : 	Délais / Termine Attribution du thème / Ausgabe des Auftrags: 10.05.2021 Présentation intermédiaire / Zwischenpräsentation 07 – 08.06.2021 Remise du rapport / Abgabe des Schlussberichts: 20.08.2021, 12:00 Exposition / Ausstellung der Diplomarbeiten: 25 – 27.08.2021 (si autorisé / falls genehmigt) Défense orale / Mündliche Verfechtung: 30.08 – 09.09.2021
---	--

¹ Par sa signature, l'étudiant-e s'engage à respecter strictement la directive DI.1.2.02.07 liée au travail de diplôme.
Durch seine Unterschrift verpflichtet sich der/die Student/in, sich an die Richtlinie DI.1.2.02.07 der Diplomarbeit zu halten.



Travail de diplôme
| édition 2021 |



Filière
Systèmes Industriels

Domaine d'application
Power & Control

Professeur responsable
Manuele Margni
manuele.margni@hevs.ch

Partenaire
AgroCleanTech

Efficacité énergétique dans la viticulture

Diplômant/e Steven Deperiers

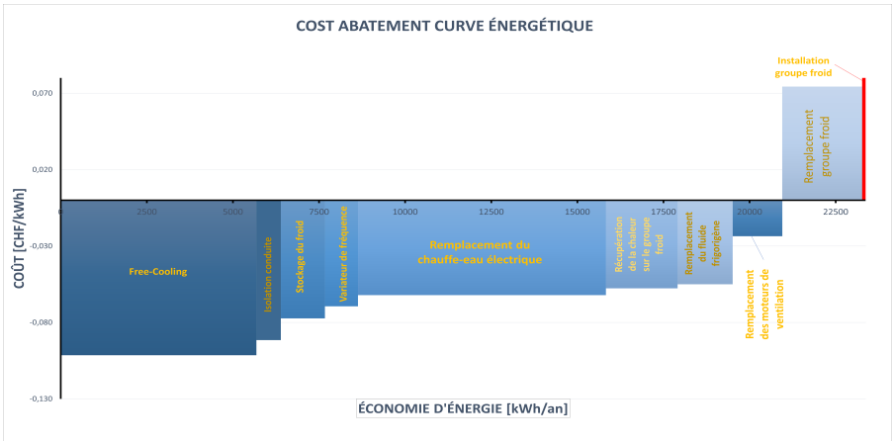
Objectif du projet

AgroCleanTech souhaite mettre en place un programme d'aide financière afin de subventionner des mesures efficaces dans le domaine vinicole. Ce travail de diplôme a pour but de proposer des solutions visant à réduire la consommation d'énergie durant les processus de transformation du raisin en vin.

Méthodes | Expériences | Résultats

Dans un premier temps, afin que les mesures soient applicables au plus grand nombre d'exploitations, un bilan des consommations de plusieurs caves types a été déterminés. À la suite de cela, des alternatives pouvant permettre de diminuer l'énergie nécessaire à la production de vin ont été listées. Afin de pouvoir quantifier l'impact des mesures, toute les réductions énergétiques ont été rapportées à la production de 1 hectolitre de vin. Finalement, les répercussions économiques de chaque mesure ont été évaluées en fonction de le leur potentiel de rentabilité et de leur temps de retour sur investissement.

La Cost Abatement curve ci-dessous représente les économies tant énergétiques (axe horizontal) qu'économiques (axe vertical) de l'ensemble des mesures évaluées. Alors que celles-ci permettraient une réduction de 40% à 50% de l'énergie nécessaire à la production de vin elles représentent, une fois les coûts d'investissement intégrés, une économie financière d'environ 20%. Le projet d'aide financière de la société AgroCleanTech semble donc essentiel pour motiver la mise en place d'alternatives énergétiquement efficaces.



1 Abstract

Ce travail de diplôme a pour but de proposer des solutions aux problèmes liés à la consommation d'énergie durant les processus de transformation du raisin en vin. Le projet est mandaté par la société AgroCleanTech qui souhaite mettre en place un programme d'aide financière afin de subventionner des mesures efficaces, mais coûteuses.

Actuellement, concernant les problèmes dus à la production de vin, le principal sujet traité est l'analyse du cycle de vie. D'après les études lues, les solutions sont à trouver dans la façon de traiter et cultiver les vignes ainsi que dans les alternatives à la bouteille en verre. La cave possède aussi des points à améliorer, essentiellement dans la quantité d'eau utilisée et dans son évacuation pouvant contenir des polluants.

À propos de la vinification, c'est-à-dire la partie s'occupant de faire du vin avec les raisins reçus, le constat récurant est que sur toute l'énergie nécessaire à cette production, cette partie peut représenter près de 70 % la consommation totale (du travail de la vigne jusqu'à la distribution).

Pour pouvoir réduire cette part de consommation, ce projet s'est déroulé en deux phases, la première a principalement consisté en la recherche et la récolte de données afin de comprendre les différents processus de vinification ainsi que les impératifs et besoins des encaveurs. Puis pour compléter les données, 3 visites de caves ont été effectuées.

En se basant sur les informations reçues, la seconde partie a permis de définir une liste de plusieurs mesures, dont le potentiel énergétique et économique de chacune a été évalué pour plusieurs caves types définies.

D'après les résultats obtenus, la mise en place de toutes les solutions proposées pourrait réduire d'environ 40% à 50% la consommation d'énergie et permettrait de diminuer d'environ 20% la facture annuelle d'électricité. Cette différence entre l'économie énergétique et celle financière est due aux coûts d'investissement et d'entretien qu'engendrent les mesures. Il faut également prendre en compte qu'un grand manque de données concernant le secteur vinicole a obligé plusieurs hypothèses à être faites, il se peut donc qu'en pratique le potentiel énergétique soit revu à la hausse ou à la baisse. De plus, par manque de temps, les coûts de mise en place et d'entretien ont été estimés en se basant sur le prix d'appareils disponibles sur le marché, pour obtenir des valeurs plus précises, l'idée initiale était de demander des offres aux entreprises compétentes dans l'installation des différents systèmes.

La mise en place de solutions techniques a un fort potentiel de réduction de la consommation, mais elle a aussi un coût financier élevé ce qui réduit les chances d'avoir un retour sur investissement attrayant. Sans une aide financière, il est peu probable qu'un grand nombre d'encaveurs optent pour l'une ou l'autre de ces solutions, la création d'aide financière pour le secteur est donc essentiel si l'on souhaite réduire son impact énergétique.

Table des matières

1	Abstract	1
	Table des figures	1
2	Introduction	3
2.1	But et objectifs	3
2.2	Processus de vinification	4
3	État de l’art de la situation vinicole suisse	5
3.1	Études ACV	5
3.2	Études sur la consommation d’énergie et de ressources	7
4	Compréhension et analyse des principaux postes de consommation énergétique	10
4.1	Définition des archétypes	10
4.2	Énergie thermique	11
4.2.1	Fermentation alcoolique	12
4.2.2	Fermentation malolactique	13
4.2.3	Stabilisation	14
4.2.4	Stockage	14
4.3	Énergie mécanique	15
4.4	Autre	15
4.4.1	Eau chaude nettoyage	15
4.4.2	Énergie annexe	16
4.5	Consommation globale par volume vinifié	16
5	Lister et évaluer des mesures pouvant réduire la consommation d’énergie	16
5.1	Free-Cooling	16
5.2	Stockage du froid	20
5.3	Remplacement ou installation d’un groupe froid	21
5.4	Récupération de la chaleur sur le groupe froid	22
5.5	Variateur de fréquence sur compresseur du groupe froid	24
5.6	Remplacement du fluide frigorigène du groupe froid	25
5.7	Isolation des conduites	26
5.8	Remplacement du chauffe-eau électrique	27
5.9	Remplacement des moteurs de ventilation	28
6	Évaluation du potentiel économique des mesures	29
6.1	Free-Cooling	29
6.2	Stockage du froid	30
6.3	Remplacement ou installation d’un groupe froid	31
6.3.1	Remplacement du groupe froid	31
6.3.2	Installation d’un groupe froid	32
6.4	Récupération de la chaleur sur le groupe froid	33
6.5	Variateur de fréquence sur compresseur du groupe froid	33
6.6	Remplacement du fluide frigorigène	34
6.7	Isolation des conduites	34
6.8	Remplacement du chauffe-eau électrique	35
6.9	Remplacement des moteurs de ventilation	36
7	Analyse des résultats et discussions	37
7.1	Potentiel de réduction énergétique	37
7.2	Analyse économique	40
7.3	Discussion	43

8 Conclusion et suite du projet	45
A Annexe	46
A.1 Compréhension et analyse des principaux postes de consommation énergétique	46
A.1.1 Fermentation alcoolique	46
A.1.2 Fermentation malolactique	48
A.1.3 Stabilisation	49
A.1.4 Stockage	49
A.1.5 Eau chaude nettoyage	50
A.2 Tableaux des simulations et résultats des besoins de frigories pour la fermentation alcoolique	50
A.2.1 Production de 250hl de vin	50
A.2.2 Production de 800hl de vin	53
A.2.3 Production de 2500hl de vin	55
A.2.4 Production de 10000hl de vin	57
A.2.5 Tableaux des consommations totales	59
A.3 Relevé des températures par région	63
A.4 Évaluation énergétique des mesures	64
A.4.1 Free-Cooling	64
A.4.2 Isolation des conduites	64
A.4.3 Remplacement du chauffe-eau électrique	65
A.4.4 Remplacement des moteurs de ventilation	66
A.5 Évaluation économique des mesures	67
A.5.1 Free-Cooling	67
A.5.2 Stockage du froid	67
A.5.3 variateur de fréquence	68
A.5.4 fluide	68
A.6 Analyse de résultats	70
Références	71

Table des figures

1	Vinification du vin blanc avec ses températures et temps d'utilisation	5
2	Vinification du vin rouge avec ses températures et temps d'utilisation	5
3	Part moyenne de la production de CO ₂ par étape et quantité de CO ₂ produite par bouteille selon l'étude suisse faite sur 8 domaines vini- coles [2]	6
4	Flux de consommation d'énergie d'un chai produisant 30'000 hl de vin	8
5	Profil annuel des consommations en énergie et ressources.	9
6	Répartition de la consommation électrique en kWh/Litre de vin produit.	9
7	Répartition de la consommation d'eau en litre d'eau/litre de vin produit	10
8	Répartition des caves selon leurs capacités d'encavage en litres.	11
9	Segmentation des différentes typologies de caves	12
10	En orange les processus traités dans la partie énergie thermique	12
11	Estimation de la consommation d'énergie des différentes machines pour produire 1 hl de vin.	15
12	Principe du Free-Cooling	17
13	Évolution annuelle de la température par canton et besoins des pro- cessus	18
14	Schéma avec ballon de stockage en série sur le départ d'eau glacée	20
15	Principe d'un cycle frigorifique	21
16		22
17	Principe de la récupération de chaleur sur un groupe froid (désurchauffe)	23
18	Résultats obtenus concernant l'énergie.	23
19	Profil des besoins en frigories pour une cave vinifiant 2500hl	24
20	Alternative aux R22 et R404a	25
21	Principe de fonctionnement d'un boiler thermodynamique	27
22	Rendement des moteurs 4 pôles	28
23	Quantité d'eau nécessaire durant la fermentation alcoolique d'une cuve de 1000 litres	32
24	Comparaison des prix des classes de rendement de moteurs : valeur moyenne des prix spécifiques IE2, IE3, IE4 de chacun 0,12 kW à 1000 kW (Topmotors Market Report, 2018)	36
24	Graphique et tableau de la réduction estimée si toutes les mesures sont mises en places	38
24	Graphique du potentiel de réduction énergétique des mesures.	39
25	Graphique du potentiel de réduction économique et énergétique.	40
26	Graphique du potentiel de réduction économique et énergétique par temps de rentabilité.	41
27	Résumé de l'impact énergétique et économique de chaque mesure	41
28	Abatement Cost curve énergétique	42
29	Valeurs pour le volume de la cuve, sa matière et sa hauteur.	46
30	Planning de la réception des vendanges	46
31	Puissance frigorifique nécessaire	47
31	Besoins en frigorie pour une cave vinifiant 250hl	52
31	Besoins en frigorie pour une cave vinifiant 800hl	54
31	Besoins en frigorie pour une cave vinifiant 2500hl	56
31	Besoins en frigorie pour une cave vinifiant 10000hl	58
32	Résultats pour une cave vinifiant 250hl	59
33	Résultats pour une cave vinifiant 800hl	60
34	Résultats pour une cave vinifiant 2500hl	61
35	Résultats pour une cave vinifiant 10000hl	62
35	Relevé des températures moyennes mensuelles entre 1981 et 2010 pour différentes régions vinicoles romandes.	63
36	Ventilateur pour grande pièce	67
37	Variateur de fréquence pour groupe froid	68
38	Ballon de stockage pour eau glacée	68

39	Caractéristiques du fluide RS-50	69
40	Tableaux des graphiques énergétiques.	70
41	Tableaux des graphiques économiques.	70

2 Introduction

La production de vin est un concept connu depuis plus de 5000 ans. De la culture des cepes jusqu'aux procédés de vinification, tout a évolué et continue d'évoluer encore aujourd'hui. Les prochains défis pour la branche vitivinicole ne résident plus uniquement dans l'amélioration de la qualité du produit, mais également dans l'impact que la production a sur l'environnement.

La Suisse a produit 980'000 hectolitres de vin en 2019 et 98% de cette production a été consommée dans le pays. Nous nous situons également au 10e rang mondial par le ratio entre la surface du pays et ses vignes et 4e rang mondial sur la consommation de vin annuel par habitant (33 l par habitant)) [18].

L'importance de ce secteur et la volonté de promouvoir une utilisation rationnelle de l'énergie nécessitent de trouver des solutions afin de produire du vin de qualité en réduisant les coûts environnementaux et énergétiques qu'ont les processus.

Ce travail s'inscrit dans un projet mandaté par la société AgroCleanTech, dont l'un des buts est de promouvoir et développer une agriculture efficiente dans la consommation des ressources et l'impact climatique. Le secteur sur lequel ce projet s'attarde est celui de la viniculture qui représente toutes les étapes se déroulant dans la cave produisant du vin, à ne pas confondre avec la viticulture qui reprend l'ensemble des travaux effectués à la vigne.

Pour AgroCleanTech, ce rapport servira à avoir une idée de la situation vinicole suisse. De plus des propositions de mesures à mettre en place selon leurs potentiels permettront d'orienter et de hiérarchiser les choix possibles. Dans un second temps, si l'impact d'une ou plusieurs mesures s'avère significatif sur les réductions énergétiques et financières, un développement plus détaillé de la solution pourra être fait afin de pouvoir mettre en place un programme de soutien financier pour la branche.

Ce genre de recherches sur la branche n'ayant encore jamais été fait ou publié, il est nécessaire de faire des hypothèses ou des simplifications pour pallier au manque de données. Les résultats et chiffres présents dans ce rapport sont des ordres de grandeur permettant de mesurer le potentiel d'une liste de solutions. Dans la suite de ce projet une récolte de données permettrait de réévaluer plus précisément les mesures proposées ainsi que d'en ajouter d'autres.

2.1 But et objectifs

Ce projet a pour but de définir quelles sont les pratiques courantes du domaine vinicole et de proposer des solutions pouvant être des alternatives à ces pratiques ou des améliorations permettant de les rendre plus efficaces.

- État de l'art de la situation vinicole suisse :
La Suisse est composée d'une multitude de petits encaveurs ayant chacun leurs spécificités. Pour pouvoir tirer des généralités dans la manière de vinifier, il est nécessaire de faire un bilan de la situation actuelle.
- Compréhension et analyse des principaux postes de consommation énergétique :
Pour chaque processus effectué, une ou plusieurs ressources sont consommées. Il est important de savoir quelles sont ces ressources et dans quelle proportion la vinification les utilise.
- Lister et évaluer des mesures pouvant réduire la consommation d'énergie :
Une liste de mesures applicables au plus grand nombre de caves doit être définie puis, pour chaque mesure, la réduction potentielle de ressources consommées doit être évaluée.

- Évaluation du potentiel économique des mesures :
Pour chaque mesure listée dans la section précédente, une évaluation de l'impact économique qu'auront leurs mises en place doit être faite.

2.2 Processus de vinification

Avant de pouvoir mettre en bouteille le produit fini, plusieurs étapes sont nécessaires. Chaque poste doit répondre aux exigences du producteur et une amélioration énergétique d'un process ne doit pas impacter la qualité du vin. Pour respecter ce critère, chaque étape et ses contraintes doivent être connues.

La réception des vendanges débute par l'arrivée des grappes de raisin à la cave afin d'être pesée. Les baies sont ensuite séparées des rafles grâce à une égrappeuse avant d'être foulées et pressées si l'on désire faire du vin blanc. Dans le cas du vin rouge, le raisin ne sera pressé qu'après la première fermentation.

Les points critiques concernant l'efficacité énergétique de cette première étape sont entre autres la consommation d'électricité pour le fonctionnement des machines ainsi que celle nécessaire au compresseur du pressoir.

Suite à cela, l'étape suivante consiste en la transformation du sucre en alcool par macération. Les levures effectuant cette tâche ont besoin d'un environnement où les températures sont stables, on appelle ce processus la fermentation alcoolique (FA). La seconde fermentation s'effectue après le pressurage pour le vin rouge et sans étapes intermédiaires pour le vin blanc. Des bactéries vont transformer l'acide malique en acide lactique, durant ce processus un contrôle des températures est également nécessaire. La stabilisation physique permet de faire précipiter les cristaux de tartre encore présents dans le liquide. C'est à ce moment que la température est la plus basse, le vin doit être refroidi entre -4 et 4 degrés durant plusieurs semaines.

Toutes ces étapes ont en commun la nécessité de se trouver dans un environnement stable en température, or les productions de froid et de chaud sont des points critiques de l'efficacité énergétique. L'optimisation de ces processus a donc un fort potentiel de réduction de la consommation d'énergie.

La dernière étape en viticulture est la mise en bouteille, qui consiste au remplissage, étiquetage, et bouchonnage des bouteilles. Après cela le produit fini est soit expédié, soit stocké.

La chaîne de mise en bouteille comporte plusieurs machines, dont chaque moteur consomme de l'énergie.

Un point important concernant la consommation de ressources est la consommation d'eau potable. Elle est entre autres nécessaire pour les nombreux nettoyages effectués à toutes les étapes de vinification. Dans certaines caves l'eau sert également à la régulation thermique des cuves, ce qui a pour effet d'augmenter considérablement l'impact déjà important qu'a l'utilisation de cette ressource.

Les figures suivantes représentent les différentes phases de vinifications de manière chronologique. La période d'utilisation et les températures généralement voulues sont mises à titre indicatif. Selon les vins souhaités, les températures et les procédés peuvent être modifiés.

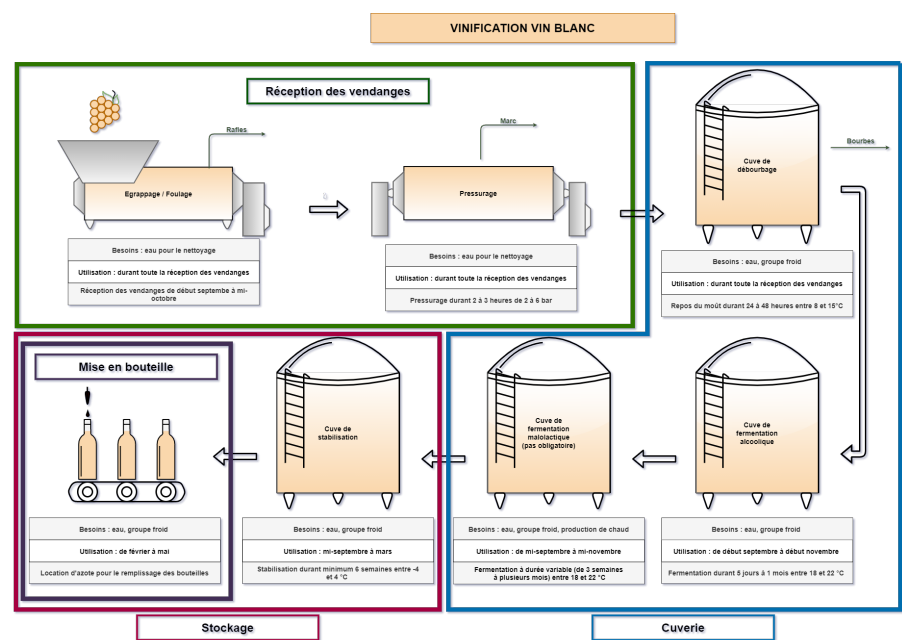


FIGURE 1 – Vinification du vin blanc avec ses températures et temps d'utilisation

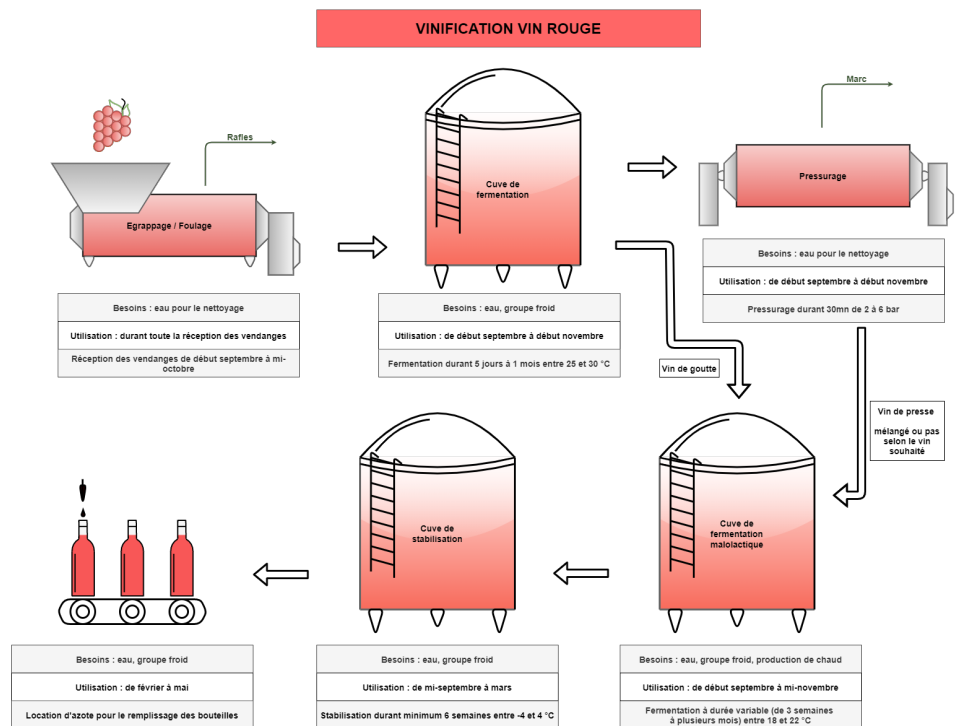


FIGURE 2 – Vinification du vin rouge avec ses températures et temps d'utilisation

3 État de l'art de la situation vinicole suisse

La recherche de documentation sur le sujet fait ressortir deux principaux types de publications et articles traitant de ce domaine. Il y a d'une part les études traitant de l'analyse du cycle de vie (ACV) qui prennent en compte les émissions de gaz à effet de serre (GES), l'impact sur les sols ou la couche d'ozone ainsi que plusieurs autres critères. L'autre type d'étude traite de l'énergie nécessaire à la production de vin et à la façon dont les processus fonctionnent.

3.1 Études ACV

Cette distinction est importante, car un fort taux d'émission de CO₂ ou autre impact environnemental ne veut pas forcément dire un processus énergivore. En effet, plusieurs études montrent que les problèmes environnementaux qui concernent la transformation des raisins en vin semblent provenir essentiellement des méthodes

de traitement des vignes, de la logistique et de l'utilisation d'une bouteille en verre dont la fabrication contribue à grandement augmenter le taux de CO₂ émis [7, 15]. L'analyse du cycle de vie dans le domaine vitivinicole comprend plusieurs publications avec des conclusions souvent similaires, mais dont les valeurs varient. Ce domaine demande donc qu'on s'y intéresse davantage afin de pouvoir affiner les résultats obtenus.

En Suisse, une étude a été menée sur 8 établissements vinicoles répartis dans différentes régions romandes et alémaniques, 4 étant biologiques et 4 autres conventionnels. L'étude réalise une analyse du cycle de vie complète pour les deux systèmes de production, elle différencie la région, les cépages et prend en compte l'extraction des matières premières ainsi que l'élimination des déchets. Le résultat de l'analyse indique qu'une bouteille de vin produit entre 0.6 et 1.4kg eqCO₂ et que cette variation dépend considérablement des rendements des différentes variétés de raisins (étude : "Ökobilanz von Schweizer Wein aus ÖLN und biologischer Produktion") [2].

Une autre analyse sur la production du vin rouge genevois a été faite en 2009. Les résultats de ce rapport arrivent aux mêmes conclusions que l'étude précédente avec des valeurs différant légèrement. Ce projet comparait la production d'une bouteille de vin local à celle provenant d'Espagne et du Chili [4], il mettait également en évidence la faible qualité des données pouvant être récoltées durant ce genre d'étude.

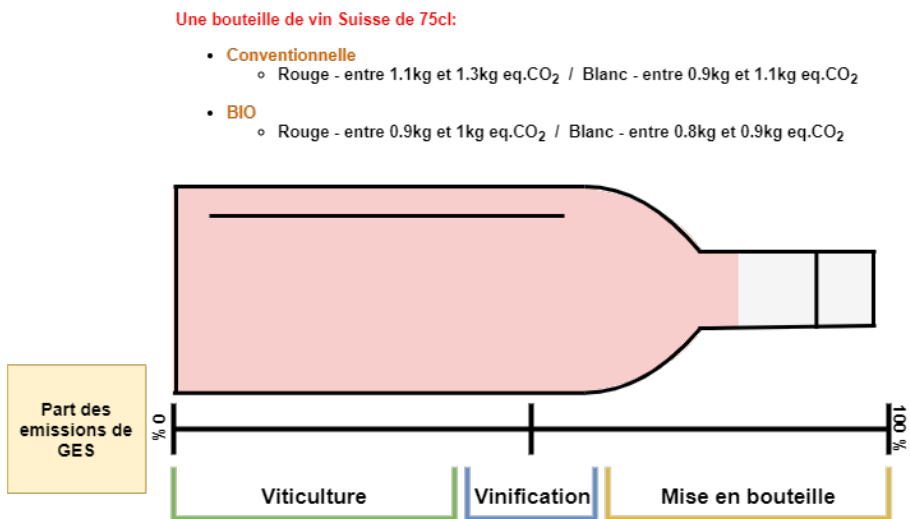


FIGURE 3 – Part moyenne de la production de CO₂ par étape et quantité de CO₂ produite par bouteille selon l'étude suisse faite sur 8 domaines vinicoles [2]

En se basant sur les chiffres provenant de l'étude "Ökobilanz von Schweizer Wein aus ÖLN und biologischer Produktion" [2] une estimation des émissions de gaz à effet de serre a pu être faite.

Liste des valeurs et hypothèses faites :

- Les chiffres sur la quantité de vin produit en Suisse sont ceux de 2019 (98mio de litres)[5]
- L'entièreté du vin est mise en bouteille dans des contenants de 75 cl.
- La quantité de CO₂ émis par bouteille est de 1.1 kg eq-CO₂ (Chiffres provenant de l'étude suisse citée dans le paragraphe précédent)
- La part considérée d'émission provenant de la vinification est de 20%

$$\text{Nb de bouteilles produites} = \frac{\text{quantité de vin produit}}{\text{vol. d'une bouteille}} = \frac{98 \cdot 10^6}{75 \cdot 10^{-2}} = 130.7 \text{ mio de bouteilles}$$

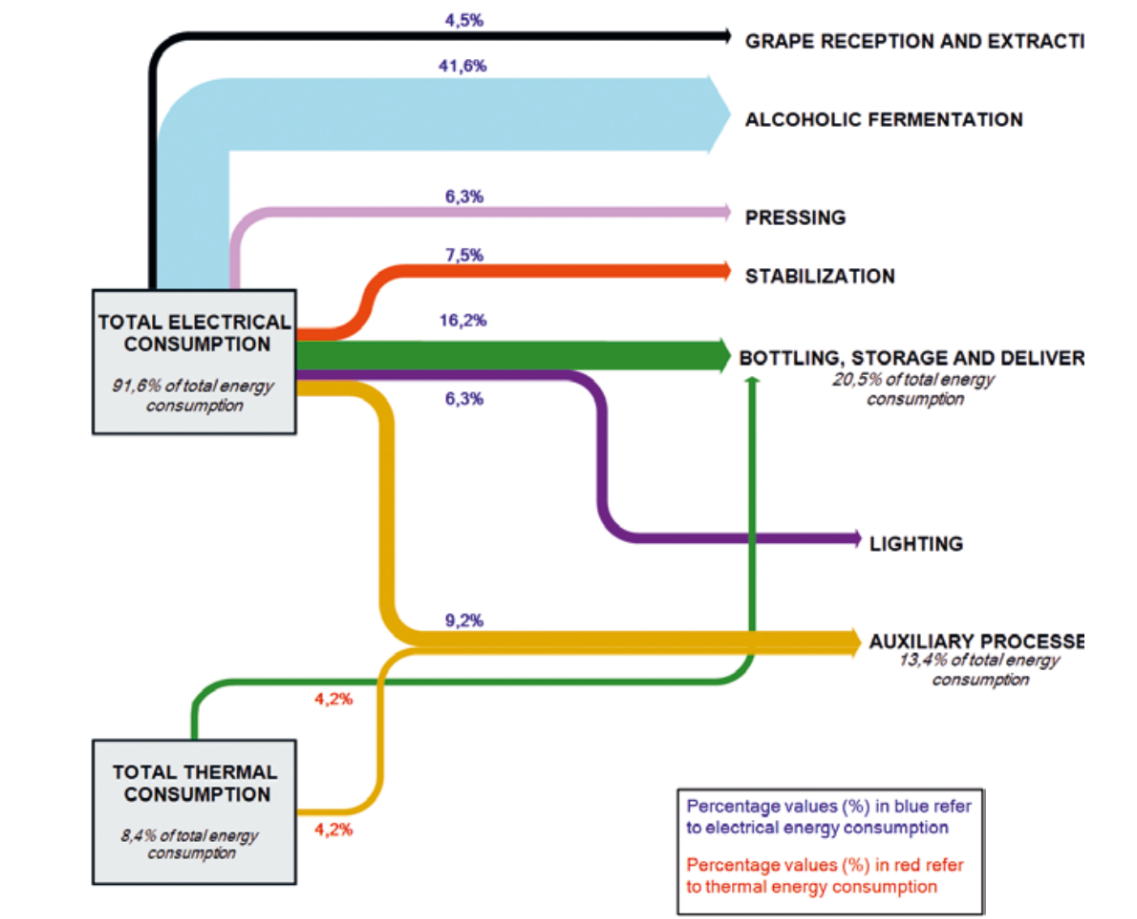
$$\text{CO}_2 \text{ émis} = \text{CO}_2 \text{ produit par bouteille} \times \text{Nbre de bouteilles produites} = \\ 1.1 \times 130.7 \times 10^6 = 143.8 \times 10^6 \text{ kg eq - CO}_2 = 143'800 \text{ tonnes eq - CO}_2$$

$$\text{Part due à la vinification} = \text{CO}_2 \text{ émis} \times 20\% = 143'800 \times 0.2 = \\ \text{env. } 30'000 \text{ tonnes eq - CO}_2$$

3.2 Études sur la consommation d'énergie et de ressources

Au niveau européen, les publications sur le sujet sont nombreuses, beaucoup d'entre elles font un état des lieux de la situation actuelle dans des régions produisant certains cépages ou ayant des pratiques similaires. Les conclusions des différentes études pointent toutes du doigt la production de froid et la consommation d'eau comme étant les principales améliorations à apporter dans le secteur vinicole. Une autre conclusion récurrente met en évidence qu'une cave efficace représente en moyenne 30% de la consommation totale en énergie (de la culture de la vigne jusqu'à la distribution), les caves les plus gourmandes, quant à elles, peuvent représenter plus de 70% de cette consommation totale et cette valeur semble être représentative de la majorité des installations [13, 11, 3].

Les résultats d'un rapport publié dans un projet européen (TESLA - Transferring Energy Save Laid on Agroindustry) montrent que la consommation moyenne d'électricité dans les caves étudiées (Portugal, Espagne, Italie et France) est de 11 kW/hl de vin produit, cette valeur pouvant être réduite à 3 kW/hl pour les plus efficaces et monter à 25 kW/hl pour les moins bonnes [8, 20, 12]. Cependant, la cave la plus courante de cette étude produit 30'000hl par an, ce qui peut être représentatif de pays comme la France ou l'Espagne, mais qui est beaucoup plus grand que ce que l'on retrouve en Suisse. Le diagramme de la figure suivante provient de cette étude européenne et représente sous forme de flux, la part d'énergie consommée imputée aux principaux processus de vinification. La grande variabilité des résultats concernant la consommation par hectolitre entre différentes caves ayant la même production montre qu'une grande marge d'amélioration est possible. Deux caves produisant une même quantité peuvent avoir un facteur 8 sur leur consommation, même si les exigences et les processus diffèrent. Un tel facteur doit pouvoir être réduit.



Source : Efficient Wineries. TESLA project deliverable [8]

FIGURE 4 – Flux de consommation d’énergie d’un chai produisant 30’000 hl de vin

En Suisse, peu d’études ont été effectuées et seules des listes de bonnes pratiques à adopter ou de nouveaux matériels plus efficaces sont facilement trouvables. Une présentation pertinente traitant de cela est celle du programme de formation continue du Service cantonal de l’Agriculture Valaisan. Elle reprend les points sensibles de la consommation d’eau et d’énergie et liste les équipements utilisables ainsi que leurs avantages ([16]).

Concernant les pratiques et la situation vinicole suisse, une étude, fournie par la Haute École de Viticulture et Œnologie de Changins, a servi de principale ressource. Ce travail de diplôme effectué en 2014 a permis de déterminer globalement la situation vinicole suisse. L’un de ses objectifs a été de recenser les habitudes de travail des exploitants vinicoles par la récolte d’informations sous forme d’un questionnaire envoyé à 500 caves. La première version envoyée a obtenu 70 réponses, le second questionnaire en a récolté 20 [14]. Les autres ressources utiles proviennent principalement de documents fournis par l’Agroscope de Changins.

L’une des spécificités de la viticulture est le caractère saisonnier de la branche qui fait de la période des vendanges celle où presque tous les éléments de la cave sont sollicités en même temps. Il en résulte un profil de consommation où les besoins énergétiques se concentrent entre les mois d’août et octobre.

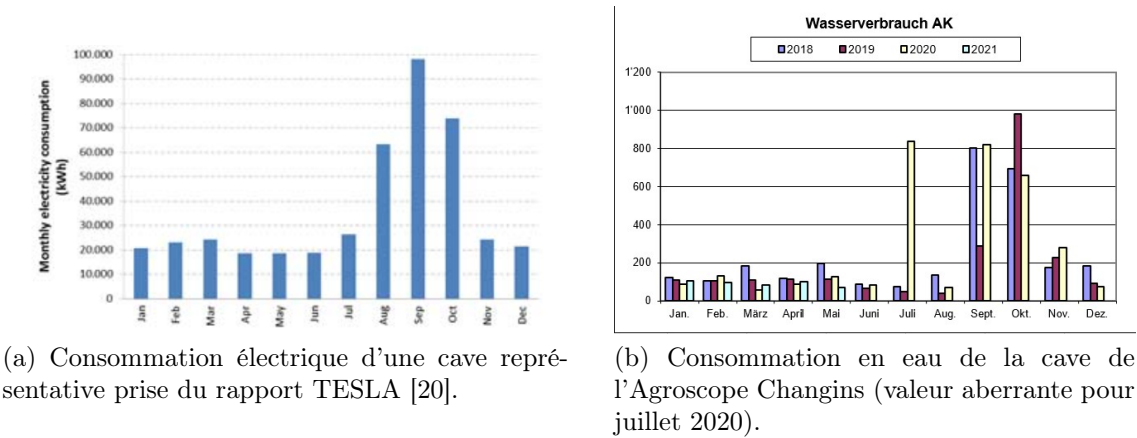
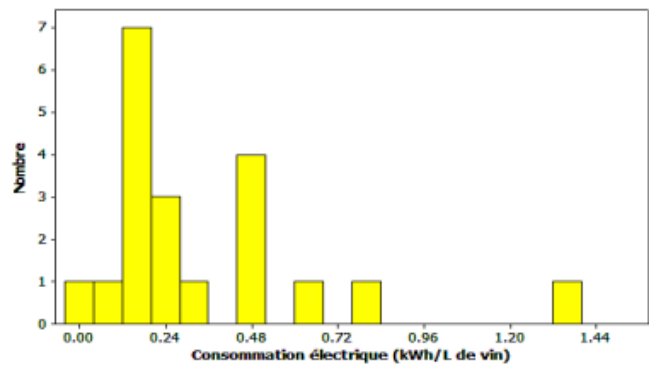


FIGURE 5 – Profil annuel des consommations en énergie et ressources.

Le second résultat intéressant concernant l'utilisation d'énergie en chai, également tiré du travail de diplôme cité plus haut, montre les valeurs obtenues pour la consommation électrique par litre de vin produit. Cette question était dans le deuxième questionnaire n'ayant obtenu que 20 réponses, néanmoins on constate que la majeure partie des exploitations se situent entre 0.16 et 0.48 kWh/L.

Une comparaison avec plusieurs audits mis à disposition durant la rédaction de ce travail montre que les valeurs de l'étude sont en dessous de celles obtenues sur place lors de visites de caves. Cependant vu la quantité de données dans les deux cas il est impossible de dire quelles sont les valeurs se rapprochant le plus de la réalité.



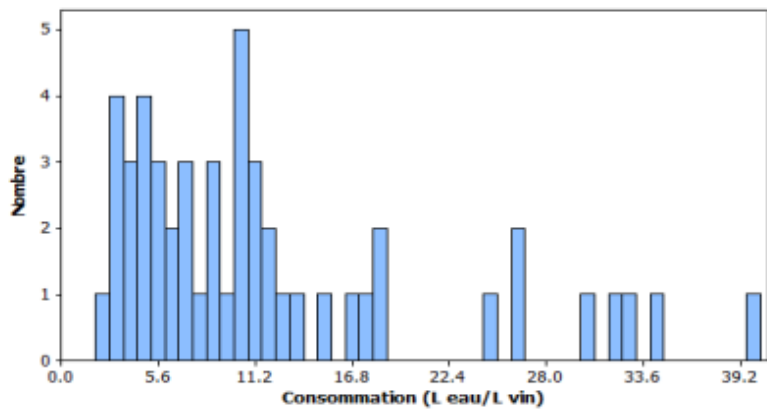
Source : Répertoire et analyser les applications d'écoconception de caves suisses [14]

FIGURE 6 – Répartition de la consommation électrique en kWh/Litre de vin produit.

Le bilan sur la consommation d'eau est relativement difficile à estimer, car en suisse un grand nombre de caves possède des locaux d'habitations ou annexes au sein d'un même bâtiment. C'est entre autres pour cette raison qu'il est difficile de différencier la part due à la vinification et que les études réalisées en Suisse mettent en évidence la faible qualité des données concernant l'eau.

Pour estimer la consommation d'eau en chai (c.-à-d. uniquement pour la partie vinification) l'hypothèse qu'une bouteille de vin représente 5 litres d'eau utilisée semble assez correcte voir légèrement en dessous des chiffres avancés dans la figure 7. Cette valeur est également celle prise dans les deux analyses du cycle de vie faites en Suisse ainsi que dans un article paru dans le magazine "Objectif" (N°87) [2, 4, 10]. Pour avoir un ordre de grandeur de la consommation d'eau en chai, la quantité moyenne estimée a simplement été multipliée par le nombre de bouteilles de 75cl pouvant être rempli avec la production suisse de 2019.

$$\text{Consommation d'eau due à la vinification} = \text{Nbre de litres d'eau par bouteille} \times \text{Nbre de bouteilles} = 5 \times 130.7 \times 10^6 = 650 \text{ millions de litres par an}$$



Source : Répertoire et analyser les applications d’écoconception de caves suisses [14]

FIGURE 7 – Répartition de la consommation d’eau en litre d’eau/litre de vin produit

4 Compréhension et analyse des principaux postes de consommation énergétique

Pour analyser le coût énergétique de la production de vin, chaque processus et machine utilisés ont été séparés puis, pour chaque poste, l’énergie nécessaire pour produire 1hl de vin a été calculée.

La puissance des machines est tirée de catalogues de fournisseurs, de sites de fournisseurs et de plaquettes signalétiques de machines. Les temps d’utilisation ont été estimés pour des durées courantes de processus, de fermentations et de stabilisations.

4.1 Définition des archétypes

Les caves fonctionnant différemment les unes des autres, les mêmes mesures n’auront pas le même impact sur les économies d’énergie. Pour proposer des solutions adaptées, la quantité vinifiée, le type de cuves utilisées et la zone géographique permettront, dans cette première version du projet, de différencier le potentiel qu’aura une mesure lors de son application.

- Quantité vinifiée

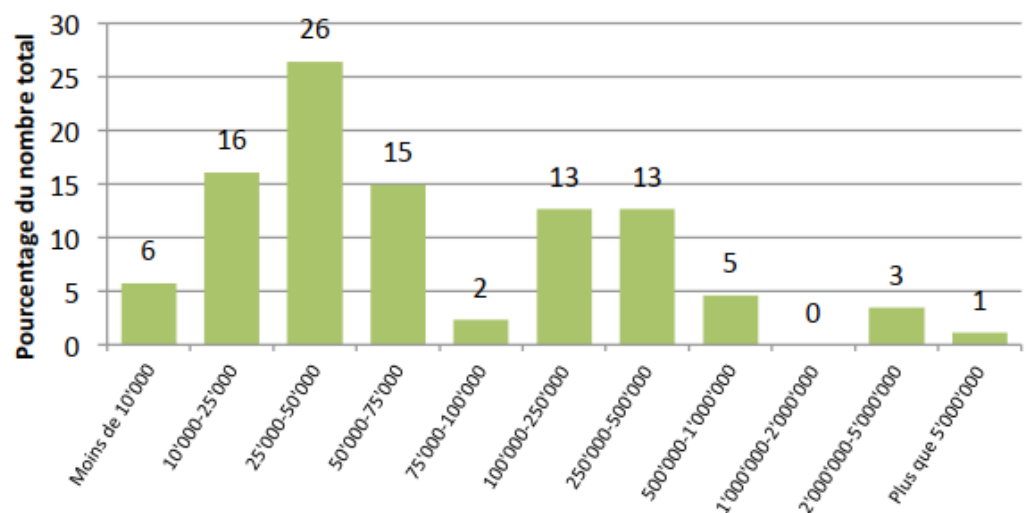
Cette caractéristique est importante, car une grande production permet de réduire le coût financier, mais également énergétique par unité produite. Il faudra donc moins d’énergie à un grand producteur pour produire une bouteille et cela aura une influence sur le potentiel d’une mesure.

L’une des questions posées dans le questionnaire du travail de diplôme cité plus haut demandait aux encaveurs quel était leur volume vinifié par an. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 8.

On distingue 3 "bosses" décroissantes représentant des quantités vinifiées les plus récurrentes. La valeur la plus courante semble se situer entre 25’000 et 50’000 litres et représente près du quart des exploitations.

Pour distinguer l’impact qu’aura une mesure, les caves ont été catégorisées par taille et 4 typologies ont été définies en se basant sur la figure ci-dessus.

1. Cave vinifiant moins de 250hl par an
2. Cave vinifiant entre 250hl et 800hl par an



Source : Répertoire et analyser les applications d’écoconception de caves suisses [14]

FIGURE 8 – Répartition des caves selon leurs capacités d’encavage en litres.

- 3. Cave vinifiant entre 800hl et 2500hl par an
- 4. Cave vinifiant plus de 10'000hl par an

Le choix de segmenter en 4 les volumes vinifiés a été fait pour différencier les caves de petites et très petites tailles (de moins de 100hl à env. 800hl) qui sur la figure 8 représente près des deux tiers des encaveurs interrogés.

- Type de cuverie
Le type de cuve utilisé influence grandement l’énergie nécessaire dans tous les processus impliquant une régulation de la température. Lors des visites de caves et des discussions avec les fournisseurs de matériel, il est ressorti que les cuves utilisées sont principalement en inox (plus de 60% des ventes de cuve selon les fournisseurs), mais il n’est cependant par rare que des chais optent pour des cuves en béton ou en bois. Pour différencier les besoins de chaque récipient, les calculs ont été effectués pour les trois types de cuves.
- Zone géographique
Le relief et le climat suisse ont la particularité de pouvoir être très différents d’une région à l’autre, le recourt au froid disponible à l’extérieur sera donc à considérer pour chaque cas de figure. Les graphiques comparant les températures moyennes extérieures par canton romand se situent dans la section 5.1.

4.2 Énergie thermique

Cette forme d’énergie est celle qui va être apportée ou soutirée lors des différentes phases de chauffage et refroidissement des cuves. Cette section comporte donc les processus où un échange de chaleur est nécessaire. C’est durant ces différentes phases que le groupe froid est le plus sollicité et que la consommation électrique est la plus importante.

Une approximation faite généralement lors de calculs concernant les machines thermiques concerne le coefficient de performance (COP). Cette valeur sert à quantifier le ratio entre énergie consommée et énergie produite.
Pour les calculs nécessitant l’utilisation d’un coefficient de performance, la valeur de 3 a été prise. Ce chiffre est une estimation courante, faite lorsque l’on parle de machines thermiques (groupe froid, PAC), cela signifie que lorsque le groupe froid aura consommé 1 kilowattheure électrique, 3 kilowattheures thermiques auront été générés.

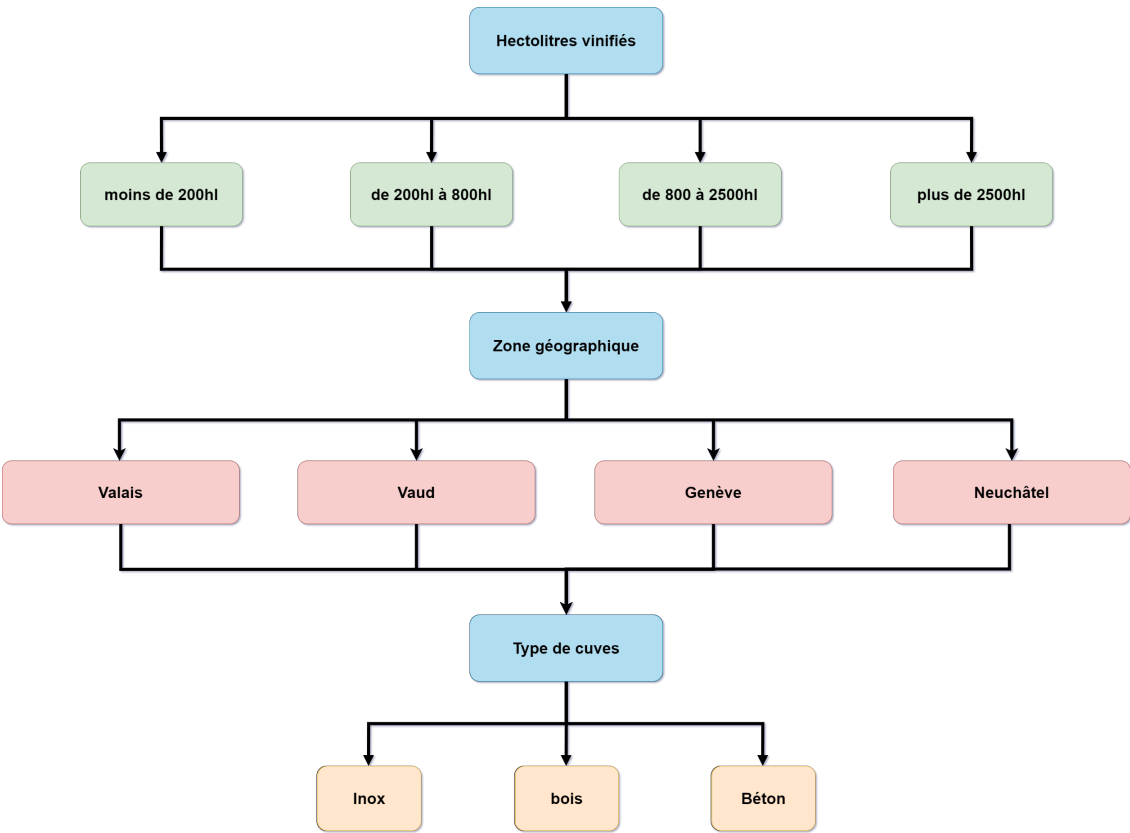


FIGURE 9 – Segmentation des différentes typologies de caves

Il est important de noter que cette valeur est fournie par le fabricant de la machine et que ce chiffre a été obtenu sur un banc de tests, dans la réalité, le COP varie constamment en fonction des conditions climatiques et d’utilisation.

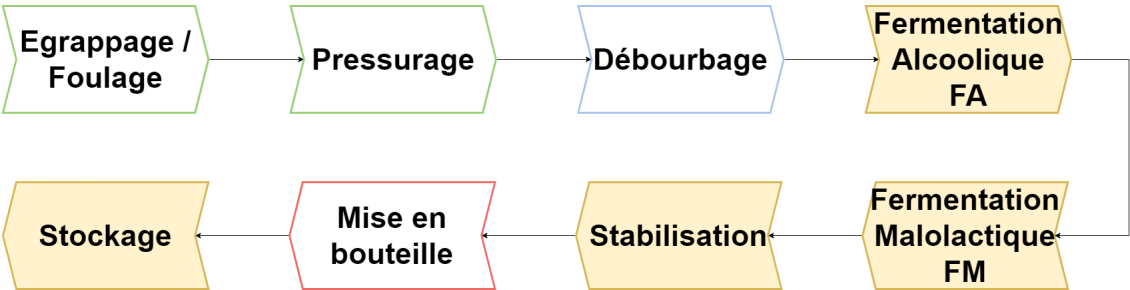


FIGURE 10 – En orange les processus traités dans la partie énergie thermique

4.2.1 Fermentation alcoolique

La fermentation alcoolique est un processus générant de la chaleur ainsi que du CO₂ et devant être refroidi pour être maintenu en température. C’est durant cette étape que le sucre contenu dans le raisin se transforme en alcool. Les besoins de production de froid pour effectuer ce maintien en température dépendent des choix de l’exploitant, mais également du type de cuves et du planning des vendanges.

Le site <https://www.vignevin-occitanie.com> met à disposition un outil permettant d’estimer les besoins de froid durant la fermentation en y introduisant les caractéristiques des cuves (volume, matériaux, hauteur), puis en indiquant les paramètres du processus (durée, températures de fermentation) et finalement en insérant le planning des vendanges pour une période d’un mois.

Ce tableau représente les puissances électriques de groupes froids à installer pour les différents archétypes. Pour les caves de 250hl et 800hl des puissances similaires ont été constatées lors de deux visites ce qui semble confirmer les résultats obtenus. Les détails concernant l’utilisation et les valeurs introduites dans cet outil se situent en annexe A.1.1,

Volume [hl]	P _{Cuve inox} [kW]	P _{Cuve bois} [kW]	P _{Cuve béton} [kW]
250	3	2.2	2
800	7	5	4
2500	18	16	15
10000	50	41	37

TABLE 1 – Estimation de la puissance du groupe froid à installer pour les différents volumes vinifiés et types de cuves

Le site permettant d’estimer les besoins de froid fournit les résultats sous forme de puissance frigorifique journalière (cf. figure 31). La conversion des valeurs obtenues est indiquée dans le tableau suivant, elles représentent l’énergie électrique consommée durant la production de 1 hectolitre de vin.

Volume [hl]	W _{Cuve inox} [kWh/hl]	W _{Cuve bois} [kWh/hl]	W _{Cuve béton} [kWh/hl]
250	5.5	3.9	3.2
800	5.5	3.8	3
2500	3.9	3.1	2.7
10000	2.5	2.1	1.8

TABLE 2 – Tableau des valeurs obtenues pour l’énergie nécessaire à la fermentation alcoolique (FA)

On remarque que plus le volume produit par an est grand et plus l’énergie à fournir par hectolitre de vin produit diminue.

4.2.2 Fermentation malolactique

La fermentation malolactique contrairement à celle alcoolique n’est pas une réaction exothermique, la température du liquide aura donc tendance à se stabiliser autour de celle de la pièce. Afin de calculer les besoins thermiques, 2 hypothèses ont été faites :

- La température de la pièce où se trouvent les cuves est à 18°C et celle à laquelle le vin doit être amené est proche des 20°C. Les deux valeurs étant proches, l’énergie nécessaire à cette opération est négligée.
- Un transfert de chaleur aura tendance à s’effectuer à travers les parois de la cuve si la pièce et le vin ne sont pas à la même température. Pour cette déperdition le ΔT 2°C n’a pas été négligé, car ce processus s’effectue sur une période relativement longue.

Le coefficient k représente, selon le matériau la capacité qu’a celui-ci à transmettre de la chaleur. Plus la valeur de k est grande et plus la quantité d’énergie transmise sera grande. À l’inverse, plus elle sera petite et plus le matériau sera considéré comme un isolant thermique. La surface S permet de définir l’aire à travers laquelle le transfert s’effectue. Les autres coefficients sont la différence de température et de temps ainsi que le facteur permettant de passer de kilocalorie à kilowattheure.

$$1kcal = 0.00115kWh$$

$$W_{thermique\ passant\ par\ les\ parois\ en\ kWh} = k_{Inox} * S * \Delta T * \Delta t * 0.00115 \tag{1}$$

De l’équation précédente il a été possible de déterminer l’énergie électrique à fournir pour la phase de fermentation malolactique. Les calculs détaillés et valeurs considérées se trouvent en annexe A.1.2.

Volume [hl]	Surface [m ²]	$W_{Cuve\ inox}$ [kWh/hl]	$W_{Cuve\ bois}$ [kWh/hl]	$W_{Cuve\ béton}$ [kWh/hl]
250	7	1.6	1.1	0.6
800	8.5	1.3	0.9	0.5
2500	19	0.9	0.6	0.35
10000	48	0.7	0.5	0.29

TABLE 3 – Tableau des valeurs obtenues pour l’énergie nécessaire à la fermentation malolactique (FM)

4.2.3 Stabilisation

La phase de stabilisation est celle qui demande d’abaisser le plus la température du vin. Le liquide doit être descendu à 0°C durant une période d’environ 6 semaines pour permettre la précipitation du tartre.

Les considérations suivantes ont été faites pour déterminer l’énergie à fournir durant ce processus :

- La température de la pièce où se trouvent les cuves est à 10°C et celle à laquelle le vin doit être amené est proche des 0°C, il faut donc abaisser la température du vin de 10°C.
- Un transfert de chaleur aura tendance à s’effectuer à travers les parois de la cuve, le liquide étant à 0°C et la pièce à 10°C.
- La masse volumique ($\rho = 100kg/m^3$) et la chaleur massique du vin ($C_p = 4187\text{ j/K}$) sont semblables à celles de l’eau.

$$1joule = 2.8 * 10^{-7}kWh$$

$$W_{baisse\ temp.} = m * C_p * \Delta T * 2.8 * 10^{-7} = \frac{V_{hl} * 100}{1000} * \rho * C_p * \Delta T * 2.8 * 10^{-7} \tag{2}$$

$$1kcal = 0.00115kWh$$

$$W_{thermique\ passant\ par\ les\ parois\ en\ kWh} = k_{Inox} * S * \Delta T * \Delta t * 0.00115 \tag{3}$$

Volume [hl]	Surface [m ²]	$W_{Cuve\ inox}$ [kWh/hl]	$W_{Cuve\ bois}$ [kWh/hl]	$W_{Cuve\ béton}$ [kWh/hl]
250	7	14.9	10.5	6.2
800	8.5	12.1	8.6	5
2500	19	8.3	5.9	3.5
10000	48	6.7	4.7	2.6

TABLE 4 – Tableau de valeurs obtenues pour l’énergie nécessaire à la stabilisation tartrique de 100 litres de vin

4.2.4 Stockage

Le stockage intervient avant et après la mise en bouteille et peut durer de quelques semaines à plusieurs années. Comme cette étape peut être relativement longue, il semble raisonnable d’imaginer que les encaveurs aient prévu une pièce enterrée ou bien isolée pour conserver leurs fûts et leurs bouteilles.

Sur la base d’informations fournies par les encaveurs durant des visites, l’hypothèse a été faite que le liquide était laissé à température ambiante (environ 15°C) et que sur une période de stockage de une année, le besoin de refroidir était nécessaire uniquement durant quelques heures pendant l’été (env. 400 heures). Les calculs sont les mêmes que pour la section fermentation alcoolique (4.2.1) et se trouvent en annexe A.1.4.

Volume [hl]	Surface [m ²]	$W_{Cuve\ inox}$ [kWh/hl]	$W_{Cuve\ bois}$ [kWh/hl]	$W_{Cuve\ béton}$ [kWh/hl]
250	7	2.7	1.9	1.1
800	8.5	2.2	1.5	0.9
2500	19	1.5	1	0.6
10000	48	1.2	0.85	0.5

TABLE 5 – Tableau de valeurs obtenues pour l’énergie nécessaire au stockage du vin

4.3 Énergie mécanique

Pour les besoins thermiques, peu de calculs ont été effectués. Chaque machine utilisée pour un processus a été soit recherchée dans un catalogue, soit les valeurs proviennent d’une plaquette signalétique d’une cave visitée ou d’informations provenant de fournisseurs de matériel. Il en est de même pour les temps d’utilisation des machines.

Les tableaux contiennent les valeurs obtenues ainsi que la somme des énergies consommées par les machines.



FIGURE 11 – Estimation de la consommation d’énergie des différentes machines pour produire 1 hl de vin.

4.4 Autre

Différents postes ne font pas directement partie des processus de vinification, mais sont tout de même nécessaires. Ces postes annexes sont entre autres l’eau pour le nettoyage, l’éclairage, le chauffage des pièces ne servant pas à la vinification, etc.

4.4.1 Eau chaude nettoyage

L’hygiène de la cave devant être complètement maîtrisée, afin d’éviter toute détérioration du produit, l’utilisation d’eau potable pour la plupart des étapes de nettoyage est obligatoire. Le tableau suivant indique pour chaque typologie de cave la quantité d’eau chauffée ainsi que l’énergie nécessaire au chauffage de cette eau.

L'énergie nécessaire à l'augmentation de la température de l'eau (détail annexe A.1.5) :

$$W_{chauffage\ eau} = m * C_{p_{eau}} * \Delta T * 2,8 * 10^{-7} [kWh]$$

Volume	$Nbre_{litre}$ (inox)	$Q_{Cuve\ inox}$	$Nbre_{litre}$ (bois et béton)	$Q_{Cuve\ bois}$	$Q_{Cuve\ beton}$
[hl]	[L]	[kWh/hl]	[L]	[kWh/hl]	[kWh/hl]
250	300	18	400	23	23
800	300	18	400	23	23
2500	200	12	300	18	18
10000	200	12	300	18	18

TABLE 6 – Nombre de kilowattheures par hectolitre nécessaires à la production d'eau chaude

4.4.2 Énergie annexe

Les consommations difficilement évaluables comme l'éclairage, les bureaux si intégrés au bâtiment ou le chauffage des salles de pause ont été estimées à 10% de la consommation globale. Cela permet également de compenser certaines estimations basses faites dans d'autres sections. Les chiffres sont présentés aux points suivants.

4.5 Consommation globale par volume vinifié

En sommant toutes les valeurs calculées précédemment, les résultats obtenus fournissent pour chaque typologie la consommation nécessaire à la production de 1 hectolitre de vin.

Volume	$W_{Cuve\ inox}$	$W_{Cuve\ bois}$	$W_{Cuve\ beton}$
[hl]	[kWh/hl]	[kWh/hl]	[kWh/hl]
250	60	58	52
800	53	52	46
2500	37	40	36
10000	30	32	29

TABLE 7 – Consommation totale en énergie pour la production de 1hl

5 Lister et évaluer des mesures pouvant réduire la consommation d'énergie

Cette partie liste les mesures proposées, leur impact sur la consommation d'énergie par taille de caves et par type de cuves utilisées. Le potentiel d'économie est toujours évalué par rapport aux résultats obtenus dans la section précédente (4). Si des calculs avec des valeurs numériques sont effectués, les valeurs prises sont celles d'une cave vinifiant 250hl de vin. Les tableaux comportent les résultats de toutes les tailles de caves définies plus haut ainsi que pour les 3 types de cuveries. Si d'autres critères influencent le potentiel d'une mesure, plus de détails concernant les avantages et inconvénients que ceux-ci ont sont donnés après les premiers résultats. Si cela est nécessaire, une seconde série de résultats pour un critère particulier est donnée.

5.1 Free-Cooling

Le Free-Cooling ou refroidissement passif consiste à utiliser une source naturelle gratuite pour réduire la température d'une pièce. Cet apport de froid est utilisable dès que la température extérieure est inférieure à celle désirée dans l'environnement que l'on souhaite rafraichir. Il existe plusieurs façons pour profiter de ce type de refroidissement, la plus simple étant d'extraire la chaleur du bâtiment dans l'air extérieur.

On distingue deux types de Free-Cooling : la version dite directe et la seconde indirecte.

Le mode direct signifie que l'air frais extérieur circule directement dans l'environnement à refroidir. Cette solution a l'avantage d'être simple à mettre en place, il suffit d'ouvrir les fenêtres (ventilation naturelle) ou d'enclencher les ventilateurs (ventilation forcée). Cependant, la pièce sera soumise aux conditions extérieures, les températures dépendront de la qualité de l'air introduit et il subsistera une consommation électrique.

Le mode indirect signifie que l'air extérieur n'entre pas en contact avec celui à l'intérieur. Le transfert de chaleur est fait par l'intermédiaire d'un échangeur (air-air ou air-eau). Dans ce cas, l'intérieur n'est plus soumis aux conditions atmosphériques de l'extérieur. Comme dans le cas d'une ventilation forcée, il faut consommer de l'électricité afin de faire circuler le liquide caloporteur effectuant le transfert de chaleur.

Le potentiel de cette solution pour le domaine vinicole est d'autant plus intéressant que les besoins de froid se produisent, pour une bonne partie, simultanément à la période froide de l'année.

Les figures suivantes représentent les températures de processus ainsi que l'évolution des températures annuelles pour différents cantons vinicoles romands. Les relevés de l'Office fédéral de météorologie et de climatologie d'où sont tirés les valeurs se trouvent en annexe.

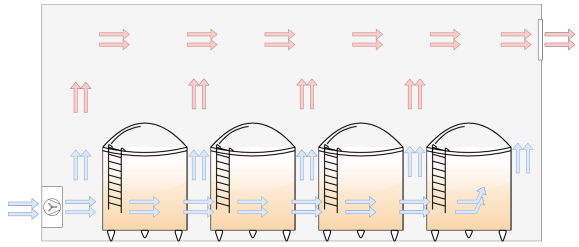
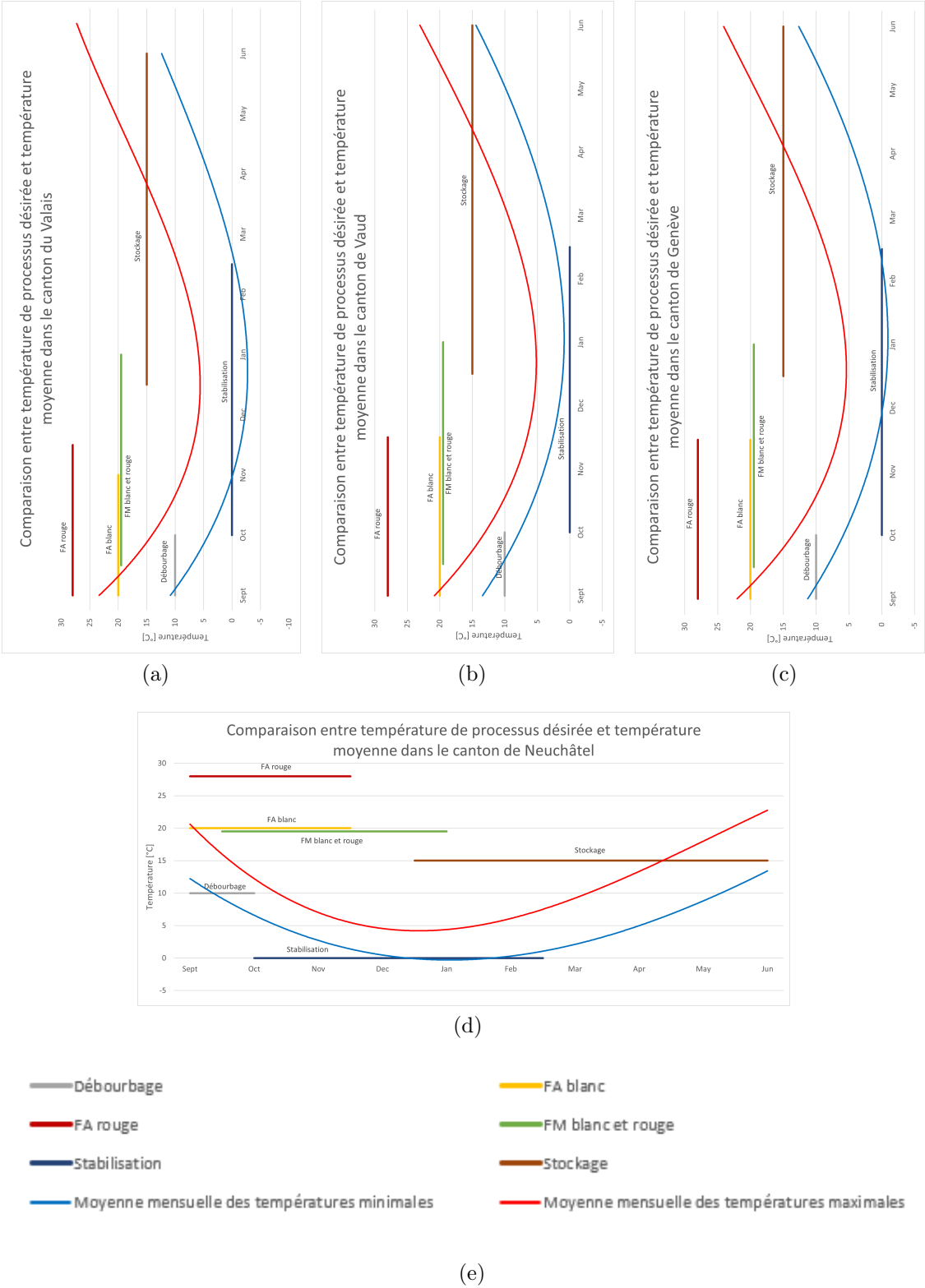


FIGURE 12 – Principe du Free-Cooling



(b)

Comparaison entre température de processus désirée et température moyenne dans le canton de Genève

(c)

Comparaison entre température de processus désirée et température moyenne dans le canton de Neuchâtel

(d)

— Débourbage

— FA rouge

— Stabilisation

— Moyenne mensuelle des températures minimales

— FA blanc

— FM blanc et rouge

— Stockage

— Moyenne mensuelle des températures maximales

(e)

FIGURE 13 – Évolution annuelle de la température par canton et besoins des processus

Pour déterminer le potentiel de la mesure, les considérations suivantes ont été faites (détail annexe A.4.1) :

- Durant le processus de fermentation alcoolique et de stockage, le Free-Cooling réduit le nombre d'heures d'utilisation du groupe froid. Cela peut générer une réduction de 25% de la consommation électrique durant ces deux phases.
- Durant la stabilisation, cette mesure peut permettre de descendre la température de la pièce à 5°C sans avoir recours au groupe froid, soit une réduction de 50% de la consommation due à ce processus.

Impact sur la consommation totale par hectolitre produit.

Volume [hl]	$W_{\acute{E}co. cuve\ inox}$ [kWh/hl]	$W_{\acute{E}co. cuve\ bois}$ [kWh/hl]	$W_{\acute{E}co. cuve\ beton}$ [kWh/hl]
250	9	6.5	4.5
800	7.1	5.3	3.5
2500	5.1	4	2.7
10000	3.9	2.9	1.9

TABLE 8 – Nombre de kilowattheures économisés grâce à la mesure

Si l'on compare les besoins des processus aux températures extérieures de la figure précédente, il est envisageable qu'avec un système de Free-Cooling performant la quasi-totalité des besoins de froid soit fournie sans avoir recours à un groupe froid. En considérant que 70% des besoins en énergie durant la stabilisation proviennent de ce système, le potentiel d'économie suivant pourrait être plus proche des valeurs suivantes :

Volume [hl]	$W_{\acute{E}co. cuve\ inox}$ [kWh/hl]	$W_{\acute{E}co. cuve\ bois}$ [kWh/hl]	$W_{\acute{E}co. cuve\ beton}$ [kWh/hl]
250	14.3	10.1	6
800	11.6	8.2	4.9
2500	7.9	5.7	3.4
10000	6.4	4.5	2.6

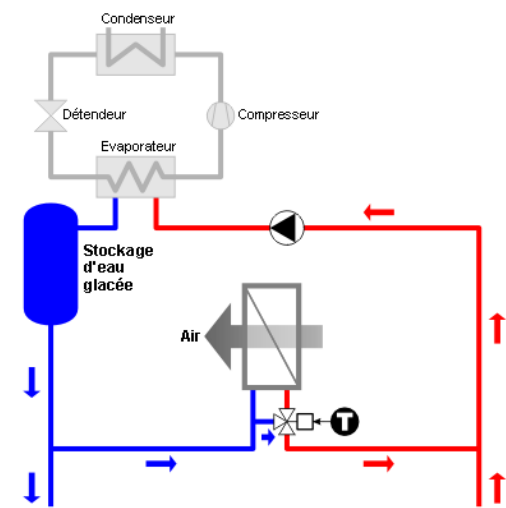
TABLE 9 – Nombre de kilowattheures économisés grâce à la mesure pour une estimation optimiste en Valais

5.2 Stockage du froid

Afin de profiter d'une source de froid, il est possible d'introduire dans le circuit un réservoir de stockage à eau glacée qui servira à accumuler une production nocturne plus avantageuse, afin d'en disposer durant la journée. En utilisant un tel système, la quantité de froid demandée au groupe frigorifique est diminuée pendant la période chaude de la journée et, si un pic de production est nécessaire, le ballon peut permettre d'y pallier sans enclencher les compresseurs. De plus, en cas de remplacement du groupe froid la puissance frigorifique à installer peut être diminuée. Un tel système comporte l'avantage d'être relativement simple à mettre en place, mais il faut cependant une régulation capable de gérer les cycles de production de froid et un bon dimensionnement de la taille de stockage nécessaire.

Dans le secteur vinicole, les besoins de froid coïncident avec la période où les températures commencent à baisser, ce qui augmente l'efficacité de la mesure. Cette solution permet de réduire la puissance frigorifique installée d'environ 10%. Cependant, le potentiel d'économie d'énergie n'est que de 5% à 10% sur la consommation du groupe froid (source <https://energieplus-lesite.be/>, [6]).

Cette mesure ne permet pas d'économiser de grandes quantités d'énergie, le froid à fournir n'est pas diminué, mais il est produit en période avantageuse, c'est-à-dire quand les températures et le coût de l'énergie sont au plus bas. Le potentiel de cette solution augmente si de forts pics de consommation sont constatés et si une tarification de nuit d' électricité est possible.



Source : <https://energieplus-lesite.be/>
FIGURE 14 – Schéma avec ballon de stockage en série sur le départ d'eau glacée

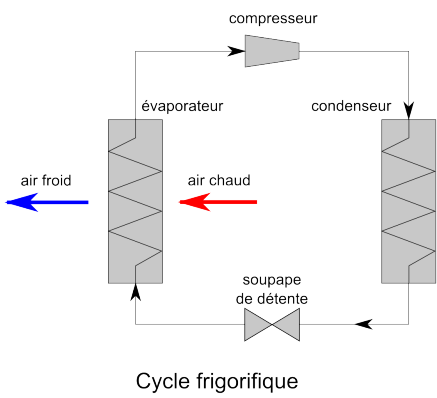
Volume [hl]	$W_{Éco. cuve inox}$ [kWh/hl]	$W_{Éco. cuve bois}$ [kWh/hl]	$W_{Éco. cuve béton}$ [kWh/hl]
250	1.8	1.3	0.8
800	1.6	1.1	0.6
2500	1	0.8	0.5
10000	0.8	0.6	0.4

TABLE 10 – Nombre de kilowattheures pouvant être économisés grâce à l'ajout d'un ballon tampon

5.3 Remplacement ou installation d'un groupe froid

Cette mesure est difficile à évaluer, car elle a un impact sur tous les appareils composant un groupe froid. En cas de remplacement du système, le coefficient de performance peut être amélioré, le fluide utilisé peut être changé, le dimensionnement ajusté et tous ces éléments auront une influence sur le potentiel de la mesure.

- Remplacement du groupe froid
- Pour déterminer la réduction d'énergie pouvant être générée grâce au remplacement de l'ancien système, les calculs de la partie énergie thermique (section 4.2) ont été refaits en augmentant le COP de 0.5. Il est difficile de déterminer si cette amélioration est atteignable ou si elle est au contraire pessimiste. Mais si l'on considère également une amélioration des consommateurs annexes tels que les ventilateurs, pompes, échangeurs. Les résultats d'économies générés ne semblent pas improbables.



Source : https://fr.wikipedia.org/wiki/Cycle_frigorifique

FIGURE 15 – Principe d'un cycle frigorifique

Volume [hl]	$W_{Éco. cuve inox}$ [kWh/hl]	$W_{Éco. cuve bois}$ [kWh/hl]	$W_{Éco. cuve béton}$ [kWh/hl]
250	3.7	2.7	1.8
800	2.9	2.1	1.4
2500	2.1	1.6	1.1
10000	1.6	1.2	0.8

TABLE 11 – Nombre de kilowattheures économisés grâce à l'amélioration du coefficient de performance frigorifique

- Refroidissement par aspersion ou ruissellement
- Avant que l'installation d'un groupe froid soit répendue, le refroidissement des cuves était essentiellement fait par aspersion ou ruissellement d'eau le long des parois des cuves. L'utilisation de cette technique, bien que moins rependue aujourd'hui, est toutefois toujours utilisée. Il est difficile de quantifier l'énergie nécessaire à ce mode de refroidissement, car beaucoup de paramètres influencent ce dernier, notamment la part de chaleur transmise par conduction et convection, la part d'eau s'évaporant durant le processus ou encore la température et le débit. De plus, en cas d'installation d'un groupe frigorigène, il n'y a pas réellement d'économie d'énergie, mais plutôt un remplacement de la ressource utilisée.

Le travail de diplôme effectué en 2014 à la Haute École de Viticulture et œnologie a évalué la quantité d'eau nécessaire au refroidissement d'une cuve de 1000l en cours de fermentation alcoolique.

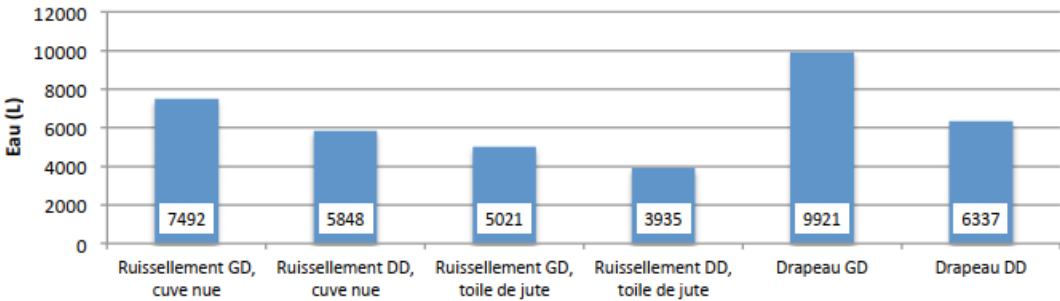
L'expérience a été menée pour différents débits et également en recouvrant la cuve de toile de jute pour améliorer la quantité de chaleur captée par l'eau ruisselante [14].

Si l'on applique ce mode de refroidissement à tous les processus, l'empreinte eau des chais devient faramineuse. De plus, avec ce système il n'est pas possible de récupérer la chaleur évacuée et un système de déshumidification de la cave doit éventuellement être mis en place.

N°	Type	Débit de refroidissement	Code	Ventilation	Durée	Intervalle de mesure	Température initiale	Répétitions
1.1	Ruissellement, cuve nue	585 L/h		sans	3h30	10 min	19.0 °C	1
1.2.1	Ruissellement, cuve nue	577 L/h	RT/CN/GD	sans	1h00	10 min	T. ambiante	2
1.2.2	Ruissellement, cuve nue	294 L/h	RT/CN/DD	sans	1h00	10 min	T. ambiante	2
2.1.1	Ruissellement, toile de jute	570 L/h		sans	3h30 (rép. 1) 1h00 (rép. 2-3)	10 min	19.0 °C	3
2.1.2	Ruissellement, toile de jute	290 L/h		sans	1h00	10 min	19.0 °C	3
2.2.1	Ruissellement, toile de jute	582 L/h	RT/TJ/GD	sans	1h00	10 min	T. ambiante	2
2.2.2	Ruissellement, toile de jute	292 L/h	RT/TJ/DD	sans	1h00	10 min	T. ambiante	2
3.1	Ruissellement, toile de jute	295 L/h		sans	1h00	10 min	T. ambiante	3
3.2	Ruissellement, toile de jute	292 L/h		avec	1h00	10 min	T. ambiante	3
4	Ruissellement, toile de jute	282 L/h		avec	1h00	10 min	19.5 °C	3
5.1	Drapeau	589 L/h	DP/GD	sans	1h00	10 min	T. ambiante	2
5.2	Drapeau	286 L/h	DP/DD	sans	1h00	10 min	T. ambiante	2
6	Echangeur	-	EC	sans	-	-	T. ambiante	

Légende des codes utilisés : RT = ruissellement ; DP = drapeau ; CN = cuve nue ; TJ = toile de jute ; GD = grande débit ; DD = demi débit.

(a) Définition des différents essais effectués dans le travail de diplôme de l'école d'œnologie de Changins [14].



(b) Quantité d'eau pour maintenir en température une cuve de 1000l en fermentation alcoolique [14]

FIGURE 16

5.4 Récupération de la chaleur sur le groupe froid

Le fonctionnement d'un groupe frigorifique consiste à extirper la chaleur présente dans l'environnement à refroidir et à la rejeter ailleurs (le plus souvent à l'extérieur). Cette mesure a pour but de valoriser cette énergie.

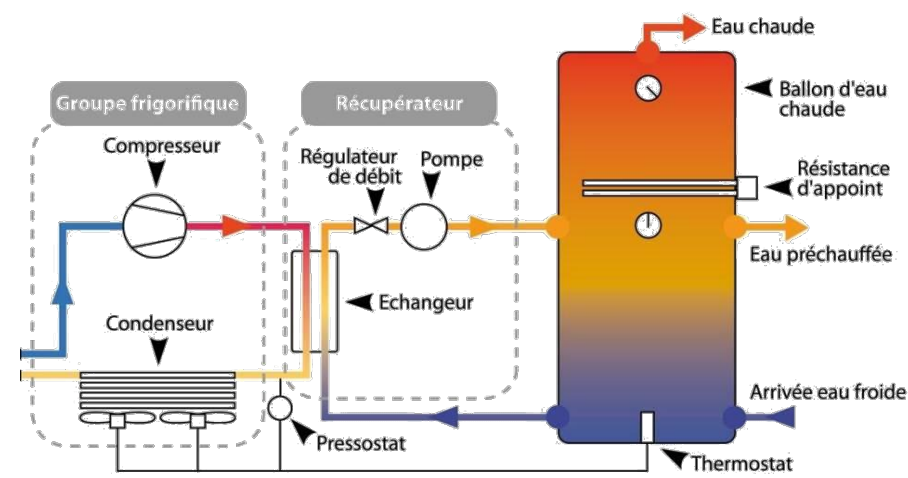
Si l'on souhaite récupérer cette chaleur pour le chauffage d'une pièce ou pour le dégivrage du groupe froid, il est possible d'effectuer cette tâche en récupérant cette énergie thermique sur le condenseur du groupe froid. Dans le domaine vinicole, les températures souhaitées sont la plupart du temps en dessous des 18°C, mais si des locaux tels que des bureaux ou salles de pause sont proches du poste de production de froid, il peut être intéressant d'évacuer la chaleur récupérée vers ces lieux plutôt qu'à l'extérieur [1, 19].

L'autre système consiste en l'ajout d'un échangeur de chaleur entre le compresseur et l'évaporateur du groupe froid. Ce dernier va permettre de récupérer une plus faible quantité de chaleur, mais à plus haute température. Selon le groupe froid et avec un bon système de récupération, la température en sortie d'échangeur peut atteindre les 90°C et peut représenter 15% de l'énergie apportée au chauffage de l'eau chaude sanitaire [1, 19].

Pour pouvoir mettre en place cette mesure, différents points doivent être étudiés au préalable.

- Il faut évaluer la durée de vie restante au groupe froid. Si le modèle doit être changé, cette mesure est à prévoir avec la nouvelle installation.
- Les échanges thermiques se faisant avec le fluide frigorigène, les caractéristiques de ce dernier influenceront le potentiel de la mesure.
- Si l'on veut chauffer une pièce ou l'eau chaude sanitaire, la distance avec le poste de récupération de chaleur doit être raisonnable. Plus la distance est

grande, plus les pertes et le prix le seront également.



Source : <https://www.limko.be>

FIGURE 17 – Principe de la récupération de chaleur sur un groupe froid (désurchauffe)

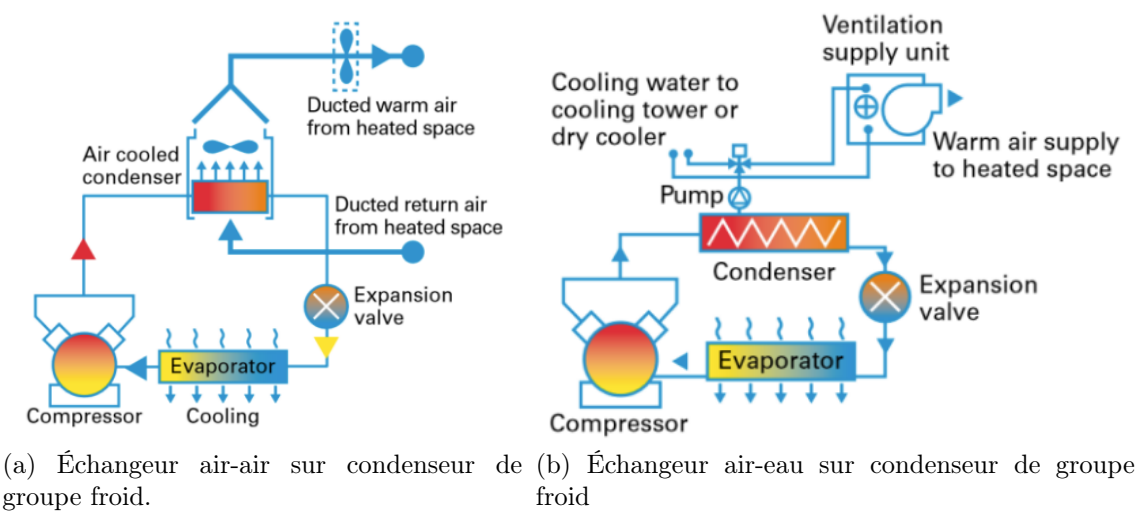


FIGURE 18 – Résultats obtenus concernant l'énergie.

La solution permettant de récupérer de la chaleur à haute température (désurchauffe) semble la plus adaptée au secteur vinicole. Le tableau suivant représente l'économie d'énergie par hectolitre produit si 15% de la chaleur est apportée par cette récupération.

Volume [hl]	W [kWh/hl]
250 et 800	2.6
2500 et 10000	1.8

TABLE 12 – potentiel d'énergie pouvant être utilisée pour le préchauffage de l'eau chaude sanitaire

5.5 Variateur de fréquence sur compresseur du groupe froid

Durant le processus de vinification, le froid à fournir varie constamment en fonction des apports de vendanges et de la volonté de l'encaveur à procéder ou non à certaines étapes. Or, une machine est le plus souvent dimensionnée pour fournir l'énergie nécessaire dans le cas le plus critique que l'on rencontre durant l'année. Il en résulte que, la majeure partie du temps, le groupe froid travaillera à charge partielle. Ce mode de fonctionnement a comme conséquence de faire chuter le rendement global du groupe froid.

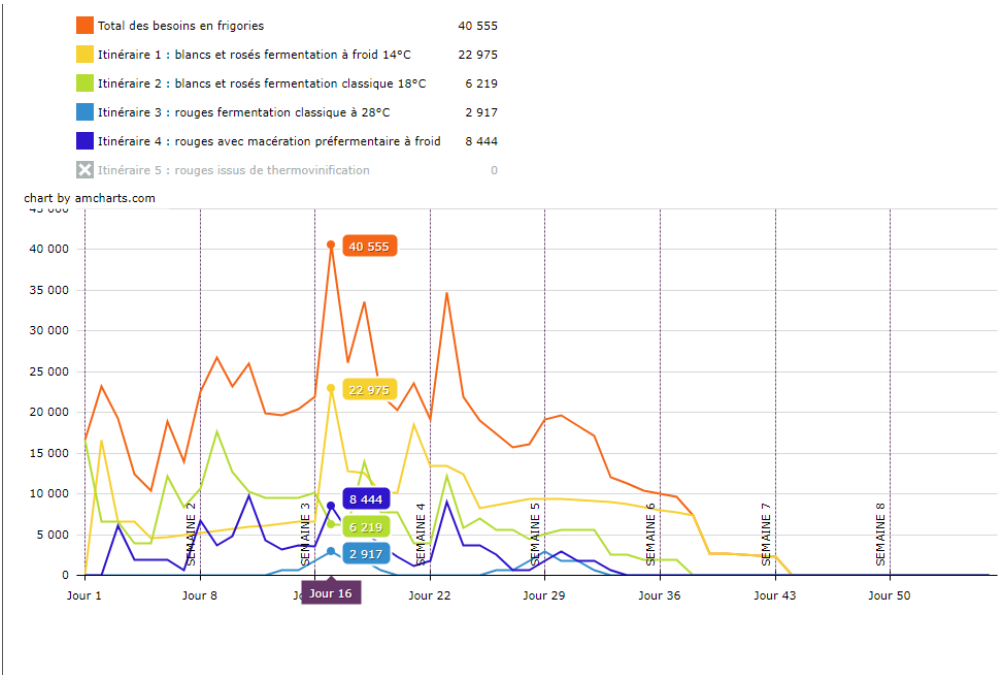


FIGURE 19 – Profil des besoins en frigories pour une cave vinifiant 2500hl

Deux solutions sont envisageables, la première consiste à dimensionner la génération de froid pour la valeur de charge la plus courante à fournir et de palier aux pics avec un groupe mobile d'appoint, mais cela doit être étudié avant l'installation du système.

Sur la figure ci-dessus cela pourrait revenir à l'installation d'un groupe fournissant 30'000 frigories et de le compléter avec une machine mobile pouvant fournir 10'000 frigories utilisées entre le jour 16 et 23 de la fermentation alcoolique.

La seconde possibilité pouvant être mise en place après mise en service du groupe frigorigène est l'installation d'un convertisseur de fréquence sur le compresseur. L'ajout de cet appareil comporte plusieurs avantages et permet entre autres :

- De réguler la puissance frigorifique à fournir en fonction de la charge demandée
- D'augmenter le rendement
- De limiter les pics de consommation lors du démarrage (démarrage progressif)
- De réduire le nombre d'enclenchements/déclenchements, ce qui augmente la durée de vie de tous les appareils composant le système.
- D'avoir un système de régulation électronique et plus mécanique

Cependant, si la charge demandée est vraiment trop basse par rapport à celle pour laquelle le système est dimensionné, le convertisseur ne pourra remonter le rendement à des valeurs acceptables. Ce problème apparaît lorsque le système a été surdimensionné.

Les calculs suivants estiment l'énergie pouvant être économisée avec cette mesure

Quantité vinifiée [hl]	$\eta_{sans\ CF}$	$\eta_{avec\ CF}$
250	0.75	0.85
800	0.78	0.85
2500	0.83	0.87
10000	0.85	0.9

TABLE 13 – Rendements théoriques considérés pour les estimations d'économie d'énergie

$$Pertes_{sans\ CF} = P_{grp\ froid} * t * (1 - \eta_{sans\ CF}) = 2.8 * 2160h * (1 - 0.75)$$
$$= 1620kWh$$
$$Pertes_{avec\ CF} = P_{grp\ froid} * t * (1 - \eta_{avec\ CF}) = 2.8 * 2160h * (1 - 0.85)$$
$$= 972kWh$$
$$W_{économisé} = Pertes_{sans\ CF} - Pertes_{avec\ CF} = 1620 - 972 = 648kWh$$

Quantité vinifiée [hl]	Kilowattheures économisés [kWh]
250	648
800	968
2500	1590
10000	5400

TABLE 14 – Économie d'énergie envisageable pour la mesure d'installation d'un variateur de fréquence

5.6 Remplacement du fluide frigorigène du groupe froid

Le fluide frigorigène est le fluide circulant dans le groupe froid et servant à la réalisation du cycle thermique. Il est utilisé pour sa capacité à pouvoir absorber la chaleur présente dans un environnement afin de pouvoir la restituer ailleurs.

Le problème de la plupart des gaz utilisés est leur fort potentiel de réchauffement global pouvant appauvrir la couche d'ozone. Actuellement, plusieurs types de fluides considérés comme trop nocifs sont interdits à l'utilisation et à l'achat. D'autres sont en phase transitoire ou l'achat est interdit, mais l'exploitation, si toujours conforme aux normes, peut continuer de fonctionner jusqu'à une date butoir où l'installation devra être remplacée. Cette mesure vise le remplacement de ces fluides par des alternatives moins polluantes et aux caractéristiques thermiques meilleures.

L'inconvénient de cette solution est qu'elle ne peut être mise en place sans trop de frais, que si le groupe froid est capable de fonctionner selon les contraintes imposées par le nouveau fluide. Il faut également que le nouveau caloporteur possède de meilleures caractéristiques thermiques que le précédent.

L'économie d'énergie envisageable selon le "Guide des fluides frigorigènes" du programme SuissEnergie de la Confédération [17] varie entre 10% et 15% de la consommation totale du groupe froid.

Temp °C	R407F	R407A	R442A RS50	R507	R404A	R22
Pression Evaporation (bar)	1.35	1.3	1.35	1.7	1.64	1.27
Pression Condensatio (bar)	16.1	14.8	16.2	17	16.05	12.68
HP/BP	11.93	11.33	12	10	9.78	9.98
Temp. de Refoulement (°C)	85	82	83	79	78	85
Capacité frigorifique (W)	1252	935	1477	1090	992	1263
Puissance alimentation (W)	711	583	760	717	720	669
COP	1.76	1.6	1.94	1.52	1.37	1.89

Source : http://www.frigoristes.fr/article.php?sid=310#.YQv-yYiP_-g

FIGURE 20 – Alternative aux R22 et R404a

Volume [hl]	$e_{isolation}$ [mm]	$P_{perdue\ tube\ acier}$ [W/m]	$P_{perdue\ tube\ isolé}$ [W/m]	$W_{écono.\ par\ mètre}$ [kWh/m]
250 et 800	50	13.9	1.3	35.5
2500 et 10000	60	20	1.47	52

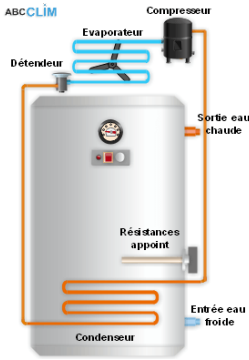
TABLE 16 – Nombre de kilowattheures économisés par mètre de conduite isolée

5.8 Remplacement du chauffe-eau électrique

La production d’eau chaude est l’un des postes de consommation le plus énergivore : les processus nécessitent des nettoyages fréquents, car l’hygiène des locaux requiert une attention particulière afin d’éviter toute contamination du vin. Dans le cas où aucun système particulier de production d’eau chaude n’est installé (type chaudière, PAC etc.), le moyen de générer cette chaleur est le simple boiler électrique. Cette solution comporte le désavantage de ne pouvoir produire que 1kW de chaleur pour 1kW électrique consommé alors que des solutions plus performantes existent.

Si le simple système électrique venait à être remplacé, une solution pouvant être mise en place serait l’installation d’un chauffe-eau thermodynamique (ou boiler PAC). La différence avec la version conventionnelle n’est pas dans le type de ressource consommée, mais dans la façon de produire de la chaleur : les anciens boilers vont chauffer une résistance électrique qui va transmettre sa chaleur au liquide, alors que la version thermodynamique va intégrer une pompe à chaleur sur le chauffe-eau qui permettra de puiser dans les calories contenues dans la pièce. Dans ce dernier cas de figure, 1kW électrique consommé génère entre 2 et 4 kW thermiques, cette valeur variant en fonction de la température de consigne donnée à l’eau et la température de la pièce. Le fait de puiser dans les calories contenues dans la pièce va avoir pour effet de faire baisser la température de celle-ci. Dans le cas d’une cave produisant du vin cela peut s’avérer intéressant : si un local de stockage est adjacent à celui du chauffe-eau, l’air refroidi peut y être évacué afin de diminuer les besoins de production de froid.

L’effet de cette mesure est l’augmentation du coefficient de performance par rapport à la version traditionnelle. Comme pour les autres sections les calculs détaillés se trouvent en annexe A.4.3.



Source : <https://www.abcclim.net>

FIGURE 21 – Principe de fonctionnement d’un boiler thermodynamique

$$Q_{économisés} = Q_{chauffe-eau\ conventionnel} - Q_{chauffe-eau\ thermodynamique}$$
(6)

Quantité vinifiée [hl]	Kilowattheures économisés	
	Cuverie inox [kWh/hl]	Cuverie bois et béton [kWh/hl]
250 et 800	9	12
2500 et 10000	6	9

TABLE 17 – Économie d’énergie envisageable pour la mesure de remplacement du boiler par un chauffe-eau avec PAC intégré

5.9 Remplacement des moteurs de ventilation

Les moteurs de ventilation font partie des appareils ayant une durée de fonctionnement annuelle des plus importantes. Ils sont enclenchés dès que l'on souhaite réguler la température d'une pièce ou que l'air doit être renouvelé.

Lors des visites effectuées, les moteurs installés étaient de classe énergétique 1 et 2, cela signifie que les pertes générées par leur fonctionnement sont importantes. Dans ce cas, le remplacement de l'ancien système d'entraînement par un plus récent peut avoir un vrai potentiel d'économie. La figure ci-contre provient des fiches techniques du site <https://www.topmotors.ch> et montre les rendements de moteurs électriques 4 pôles. Le rendement sert à quantifier quelle part de l'énergie consommée a été utile à la fonction devant être effectuée et quelle part a été perdue. Dans le cas d'un ventilateur, une valeur de 0.75 (75%) signifie que 3 quarts de l'énergie a permis au ventilateur de tourner et que les 25% restants ont entre autres été dissipés sous forme de chaleur.

Puissance nominale	IE0	IE1	IE2	IE3	IE4
en kW	Rendement en %				
0,12	40,0	50,0	59,1	64,8	69,8
0,18	48,4	57,0	64,7	69,9	74,7
0,2	50,2	58,5	65,9	71,1	75,8
0,25	53,8	61,5	68,5	73,5	77,9
0,37	59,2	66,0	72,7	77,3	81,1
0,4	60,2	66,8	73,5	78,0	81,7
0,55	64,0	70,0	77,1	80,8	83,9
0,75	66,5	72,1	79,6	82,5	85,7
1,1	70,0	75,0	81,4	84,1	87,2
1,5	72,6	77,2	82,8	85,3	88,2
2,2	75,6	79,7	84,3	86,7	89,5
3	77,8	81,5	85,5	87,7	90,4
4	79,7	83,1	86,6	88,6	91,1
5,5	81,6	84,7	87,7	89,6	91,9
7,5	83,2	86,0	88,7	90,4	92,6
11	85,1	87,6	89,8	91,4	93,3
15	86,4	88,7	90,6	92,1	93,9
18,5	87,2	89,3	91,2	92,6	94,2
22	87,9	89,9	91,6	93,0	94,5
30	88,8	90,7	92,3	93,6	94,9
37	89,4	91,2	92,7	93,9	95,2
45	90,0	91,7	93,1	94,2	95,4
55	90,5	92,1	93,5	94,6	95,7
75	91,2	92,7	94,0	95,0	96,0
90	91,6	93,0	94,2	95,2	96,1
110	92,0	93,3	94,5	95,4	96,3
132	92,2	93,5	94,7	95,6	96,4
160	92,6	93,8	94,9	95,8	96,6
ab 200	92,8	94,0	95,1	96,0	96,7

FIGURE 22 – Rendement des moteurs 4 pôles

La puissance et le type d'installation sont propres à chaque cave. Pour pouvoir déterminer le potentiel de cette mesure, au vu du peu de données présentes, seules les données récoltées lors des visites ont été utilisées. Une des caves visitées dont le volume produit était d'environ 300hl par an était équipée, dans chaque pièce devant être régulée, d'un groupe de climatisation possédant comme puissance de ventilation 3 moteurs de 85W ou 1 d'un peu moins de 250 W.

Sur cette base de puissance, les valeurs des autres archétypes ont été extrapolées.

- Le nombre d'heures de fonctionnement des moteurs est de 3500h par an
- 250hl : $P_{installée} = 4 \times 250W$
- 250hl : $P_{installée} = 5 \times 500W$
- 250hl : $P_{installée} = 8 \times 625W$
- 250hl : $P_{installée} = 12 \times 750W$

Actuellement, les moteurs devant être remplacés sont ceux de catégories inférieures à 3. Le choix entre l'installation d'un moteur IE3 ou IE4 devant être fait au cas par cas, le potentiel de chaque alternative a été calculé en prenant comme valeurs de rendement celles de la figure 22 (annexe A.4.4).

Volume	$W_{Éco.}$ entre IE1 et IE3	$W_{Éco.}$ entre IE2 et IE3	$W_{Éco.}$ entre IE1 et IE4	$W_{Éco.}$ entre IE2 et IE4
[hl]	[kWh/hl]	[kWh/hl]	[kWh/hl]	[kWh/hl]
250	1.7	0.7	2.3	1.3
800	1.4	0.5	1.8	0.9
2500	0.75	0.25	1	0.5
10000	0.35	0.1	0.45	0.2

TABLE 18 – Nombre de kilowattheures pouvant être économisés par hectolitre en remplaçant les moteurs des ventilations

6 Évaluation du potentiel économique des mesures

Afin de connaître le potentiel économique de chaque alternative proposée plus haut, une mesure de rentabilité d'investissement a été effectuée.

Pour déterminer cette rentabilité, un calcul de valeur actuelle nette (VAN) a permis d'évaluer si, sur la durée de vie d'une solution un gain financier était possible. L'intérêt de procéder de cette manière est de pouvoir hiérarchiser les mesures dans lesquelles investir en fonction des bénéfices possibles tout en tenant compte de la valeur qu'aura l'argent dans le futur.

La rentabilité d'une mesure dépendra des coûts d'investissement et d'entretien nécessaires. La première solution envisagée pour obtenir des prix proches de la réalité était de demander des offres à des entreprises, mais, par manque de temps, cela n'a pas été possible. Pour pouvoir quand même évaluer la rentabilité d'une mesure, un prix de mise en œuvre a été estimé en fonction de la complexité d'installation et également en fonction du prix d'appareils similaires trouvés sur des sites de fournisseurs. Les références des appareils choisis se trouvent en annexe A.5

Pour effectuer une évaluation de rentabilité selon le calcul de VAN, les informations suivantes sont nécessaires.

- Le coût d'investissement et le coût d'entretien : Cela correspond à la somme devant être apportée pour mettre en place l'installation ainsi que celle nécessaire à son bon maintien de fonctionnement.
- Flux monétaire de trésorerie ou cash flow : Dans le cas des mesures proposées, cela représente l'économie annuelle générée, soit les coûts avant mesure soustraits aux coûts après mise en place de la mesure.
- Le taux d'actualisation : Cela représente l'évolution de la valeur de l'argent investi et économisé rapporté à la date actuelle. Pour toutes les mesures, un taux de 5% a été choisi arbitrairement, ce pourcentage semble être utilisé lorsque des approximations sont faites.

$$VAN = -\text{coût}_{\text{invest.}} + \sum_{t=1}^n \frac{\text{gain}_{\text{annuel}} - \text{coût}_{\text{entretien.}}}{(1 + \text{taux})^t}$$

n = la durée de vie estimée de la mesure ou de l'appareil installé

Le gain annuel est obtenu en multipliant le nombre de kilowattheures économisés par hectolitre par le prix de l'électricité puis par le volume vinifié.

$$CHF_{\text{écono.}} = W_{\text{écono.}} * \text{Prix}_{\text{du kWh}} * \text{Volume}_{\text{vinifié}} \quad (7)$$

Afin de pouvoir estimer le potentiel des économies engendrées par la mise en œuvre des mesures avant la fin de l'échéance du projet, les solutions ont uniquement été évaluées pour l'archétype de cave vinifiant 800hl. Ce choix a été fait, car le nombre de caves vinifiant ce volume représente 26% des réponses obtenues lors du sondage effectué à la HES de Changins, soit la taille de production la plus représentative (fig : 8).

6.1 Free-Cooling

Un système de Free-Cooling forcé est un investissement dont les coûts peuvent grandement varier selon la configuration de la cave.

Si l'on souhaite réaliser une ventilation naturelle, il faut principalement installer des conduits d'entrée et d'extraction d'air ou éventuellement des fenêtres à ouverture motorisée. Pour rendre cette mesure la plus efficace possible, l'installation du conduit

d'entrée d'air doit être orientée au nord, ce qui peut poser des problèmes de mise en œuvre et engendrer des coûts supplémentaires.

Dans le cas où l'on souhaite forcer la circulation d'air, si aucun système n'est déjà présent, en plus de l'entrée et de l'extraction d'air, un système de ventilation doit être mis en place. Le principal point sur lequel il faut être attentif est l'efficacité de la ventilation. Il ne faut pas que les ventilateurs consomment autant que le groupe froid, car dans ce cas la mesure perd tout son sens.

Volume [hl]	$W_{Éco. cuve inox}$ [kWh/hl]
250	9
800	7.1
2500	5.1
10000	3.9

TABLE 19 – Nombre de kilowattheures économisés grâce à la mesure

- Coût d'investissement : 2000 CHF
Essentiellement le remplacement de la ventilation par un système plus efficace capable de ventiler des débits suffisants pour du Free-Cooling.
- Coût d'entretien annuel : 50 CHF
Nettoyage et maintenance des ventilateurs, conduits et filtres.
- Gain annuel : 1136 CHF
- Durée de vie de l'installation : 20 ans en cas d'entretien correct

$$VAN = -2000 + \sum_{n=1}^{20} \frac{1136 - 50}{(1 + 0.05)^n} = 11500CHF$$

Payback : 2 ans

(8)

En cas de Free-Cooling passif, la mesure devrait être rentabilisée en moins de 2 ans, cela permettrait d'économiser environ 11530 CHF sur la durée de vie de l'installation (20 ans), soit une économie annuelle d'environ 600 CHF (72ct. par hectolitre produit).

La dernière variante, où un échangeur sert d'intermédiaire entre la pièce à refroidir et l'extérieur, devrait être mise en place en cas de rénovation de la cave ou de remplacement du groupe froid pour diminuer les coûts d'installation, car l'investissement est plus élevé que le Free-Cooling direct même si les ventilateurs doivent être remplacés.

6.2 Stockage du froid

Les coûts pour la mise en place d'un réservoir de stockage sont principalement dus à l'achat du ballon, à son installation, à la modification du système de distribution ainsi qu'à la mise en place de la régulation. Les économies engendrées viennent de la réduction de la consommation et de la production de froid au tarif nocturne d'électricité. Le prix par kilowattheure pris en considération est de 13ct. entre 21h et 7h (source : <https://www.groupe-e.ch/fr/energie/electricite/clients-prives/basic>). Durant cette plage horaire l'hypothèse est faite que 25% de la consommation journalière de froid est stockée.

Volume [hl]	$W_{Éco. cuve inox}$ [kWh/hl]
250	1.8
800	1.6
2500	1
10000	0.8

TABLE 20 – Nombre de kilowattheures pouvant être économisés grâce à l’ajout d’un ballon tampon

- Coût d’investissement : 4000 CHF
Réservoir : 1900CHF (voir annexe A.5), autre 2100 CHF
- Coût d’entretien annuel : 50 CHF
- Gain annuel : 256 CHF (réduction de consommation) et 274 CHF (production nocturne)
- Durée de vie de l’installation : 20 ans

$$VAN = -4000 + \sum_{n=1}^{20} \frac{530 - 50}{(1 + 0.05)^n} = 1980CHF$$

Payback : 11 ans

(9)

Si un réservoir est installé, cela pourrait représenter une économie de 980 CHF sur 15 ans, soit 65 CHF par an. Dans le cas où la production de froid venait à être changée et que le ballon permettait de réduire la puissance à installer, cette valeur pourrait être revue à la hausse. Cependant, il est impératif de limiter le coût de mise en oeuvre et de bénéficier d’une tarification de nuit de l’énergie pour pouvoir maintenir cette solution rentable à long terme.

6.3 Remplacement ou installation d’un groupe froid

6.3.1 Remplacement du groupe froid

En fonction de la configuration du nouveau groupe froid, l’installation et la mise en service du système peuvent être faites sans que cela ne génère trop de frais. Le principal coût élevant le prix de cette mesure est l’achat du bloc de production de froid. De plus, cette mesure peut permettre de profiter des économies générées par d’autres solutions (fluide frigorigène plus performant, variateur de fréquence déjà intégré au groupe froid, etc.)

Volume [hl]	$W_{Éco. cuve inox}$ [kWh/hl]
250	3.7
800	2.9
2500	2.1
10000	1.6

TABLE 21 – Nombre de kilowattheures économisés grâce à l’amélioration du coefficient de performance frigorifique

En plus de 2.9kWh/hl économisés, s’ajoutent ceux d’un fluide plus performant (+2kWh/hl) ainsi que ceux générés par un variateur de fréquence (+1.2kWh/hl). Cela permet de prendre en compte, en plus de l’amélioration du COP_{froid} , les économies que d’autres composants du groupe froid pourraient générer.

- Coût d’investissement : 15000 CHF
Achat du groupe froid et installation simple
- Coût d’entretien annuel : 50 CHF
Nettoyage, dégivrage et contrôle annuel
- Gain annuel : 976 CHF
- Durée de vie de l’installation 20 ans

$$VAN = -15000 + \sum_{n=1}^{20} \frac{976 - 50}{(1 + 0.05)^n} = -3450CHF$$

Payback : 34 ans

(10)

Le remplacement du groupe froid ne permet pas de faire des économies financières. Au contraire, cela représente un investissement à effectuer. Cependant, cet appareil est indispensable aux processus de vinification et, en cas de défectuosité, il doit être immédiatement remplacé. C'est un coût récurrent, il est donc à prévoir.

Cette mesure a des répercussions sur la consommation de plusieurs autres appareils (ventilation, distribution). Il est possible que les résultats obtenus soient en dessous de ce que l'on obtiendrait dans la réalité et que cette solution soit moins onéreuse que prévu.

6.3.2 Installation d'un groupe froid

Dans le cas où la régulation en température de la cave et des cuves était effectuée par ruissellement d'eau, l'installation d'un groupe frigorifique ne va pas générer d'économie énergétique, mais va permettre de remplacer l'utilisation d'une ressource par une autre moins impactante sur l'environnement.

Cette mesure sera également plus coûteuse que la précédente, car aucune installation préalable n'aura été faite.

Pour pouvoir évaluer s'il y a un avantage économique à l'utilisation de l'une ou l'autre méthode, une estimation des coûts a été faite en se basant sur les chiffres du travail de diplôme effectué à Changins [14].

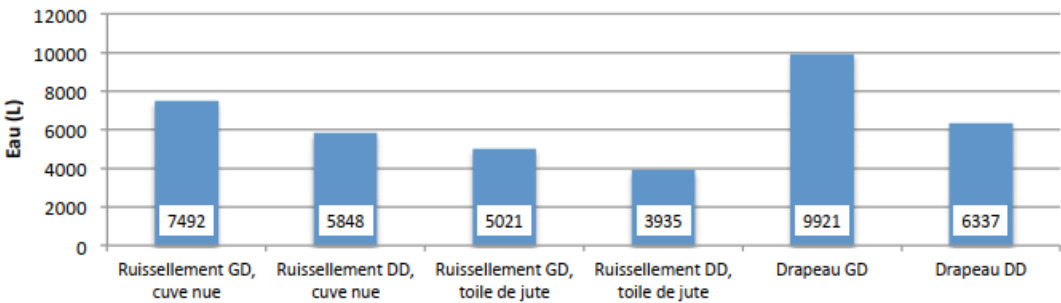


FIGURE 23 – Quantité d'eau nécessaire durant la fermentation alcoolique d'une cuve de 1000 litres

Les chiffres trouvés concernant le prix moyen du mètre cube d'eau potable varient entre 4CHF et 5CHF en tenant compte du prix d'acheminement, de la taxe d'épuration ainsi que des autres taxes [9]. Dans le cas où la méthode du ruissellement simple est utilisée, il faut environ 5800 litres d'eau pour produire 1000 litres de vin, soit à 4.50 CHF par m³, une facture de 2100 CHF par an.

L'installation d'un groupe froid revient à environ 20000 CHF et le coût annuel de l'électricité à environ 500 CHF (uniquement FA).

- Coût d'investissement : 20000 CHF
Achat du groupe froid et installation d'un nouveau système (nouvelle distribution, ouverture pour évacuation de la chaleur, etc.)
- Coût d'entretien annuel : 50 CHF
Nettoyage, dégivrage et contrôle annuel
- Gain annuel : 2100-500 = 1600 CHF
- Durée de vie de l'installation 20 ans

$$VAN = -20000 + \sum_{n=1}^{20} \frac{1600 - 50}{(1 + 0.05)^n} = -700CHF$$

Payback : 22 ans (11)

Le remplacement d'un système de refroidissement par ruissellement peut s'avérer rentable sur sa durée de vie si le prix ne dépasse pas les 20000 CHF (avec les

valeurs d'économie d'énergie considérées dans ce rapport). Dans le cas où l'investissement et l'entretien engendrent des coûts supérieurs aux bénéfices, il faut également considérer le fait de ne pas utiliser une quantité non négligeable d'eau. De plus, le contrôle et la maîtrise des températures en fermentation qu'apporte cette installation permettent de faciliter le travail et de diminuer le temps à investir dans cette étape.

6.4 Récupération de la chaleur sur le groupe froid

Le prix de cette installation est dépendant de la distance entre le groupe froid où la chaleur est récupérée et le boiler jusqu'où elle doit être acheminée. Un autre point pouvant faire grandement varier le prix est l'achat et l'intégration de l'échangeur de chaleur.

Volume [hl]	W [kWh/hl]
250 et 800	2.6
2500 et 10000	1.8

TABLE 22 – Potentiel d'énergie pouvant être utilisée pour le préchauffage de l'eau chaude sanitaire

- Coût d'investissement : 2000 CHF
- Coût d'entretien annuel : 50 CHF
- Gain annuel : 416 CHF
- Durée de vie de l'installation : 15 ans

$$VAN = -2000 + \sum_{n=1}^{15} \frac{416 - 50}{(1 + 0.05)^n} = 1800CHF$$

Payback : 7 ans

(12)

L'évaluation économique de cette mesure est très incertaine, car très peu de données ont été trouvées. L'estimation faite permet d'avoir un retour sur investissement positif après 7 ans et une économie totale d'un peu plus de 1800 CHF en 15 ans d'exploitation.

6.5 Variateur de fréquence sur compresseur du groupe froid

Quantité vinifiée [hl]	Kilowattheures économisés [kWh/hl]
250	2.6
800	1.2
2500	0.6
10000	0.54

TABLE 23 – Économie d'énergie envisageable pour la mesure d'installation d'un variateur de fréquence

- Coût d'investissement : 1000 CHF
Prix d'un variateur de fréquence 6kW et installation
- Coût d'entretien annuel : 0 CHF
- Gain annuel : 193 CHF
- Durée de vie de l'installation : de 15 à 25 ans

$$VAN = -1000 + \sum_{n=1}^{15} \frac{193}{(1 + 0.05)^n} = 1000CHF$$

Payback : 6 ans

(13)

L'ajout du variateur de fréquence permet d'économiser environ 1000 CHF en 15 ans, soit 70 CHF par an. l'appareil et l'installation sont amortis en 6 ans. Bien que l'économie soit faible, cette installation peut être mise en service sans trop de frais et est relativement vite amortie.

6.6 Remplacement du fluide frigorigène

Cette mesure est dépendante du fluide présent dans l'ancienne installation. Il n'existe pas forcément d'alternatives pouvant être installées sans avoir à remplacer d'anciens composants. Dans ce cas la solution à envisager est le remplacement de l'installation au complet. Si une alternative performante peut fonctionner avec les mêmes caractéristiques que le système précédent, les coûts de mise en place sont réduits, ce qui peut par exemple être le cas lors du remplacement du fluide "R404a" par son alternative "RS-50".

Volume [hl]	$W_{Éco. cuve inox}$ [kWh/hl]
250	2.3
800	2
2500	1.4
10000	1

TABLE 24 – Nombre de kilowattheures économisés grâce une réduction de 10% de la consommation du groupe froid

- Coût d'investissement : 2000 CHF
- Coût d'entretien annuel : 0 CHF
- Gain annuel : 320 CHF
- Durée de vie de l'installation : 15 ans

$$VAN = -2000 + \sum_{n=1}^{15} \frac{320}{(1 + 0.05)^n} = 1320CHF$$

Payback : 8 ans

(14)

Dans ce cas de figure, le remplacement du fluide est rentabilisé en 6 ans et représente une économie de 1320 CHF en 15 ans, soit 70 CHF par an. Pour pouvoir évaluer cette solution, un cas favorable a été considéré, c'est-à-dire un cas où le fluide peut être remplacé par une alternative plus efficace sans devoir changer des composants. Il est probable que ce cas de figure ne soit pas le plus courant et que cette mesure se révèle donc moins rentable dans la plupart des installations.

6.7 Isolation des conduites

Les pertes générées par une conduite mal ou pas isolée sont diminuées par calorifugeage. L'investissement nécessaire à cette mesure dépendra principalement du nombre de mètres à isoler. La mise en place de cette solution ne demandant pas de compétences particulières, elle peut être effectuée par une personne interne à la cave afin de réduire le coût.

Volume [hl]	$W_{écono. par mètre}$ [kWh/m]
250 et 800	36
2500 et 10000	52

TABLE 25 – Nombre de kilowattheures économisés par mètre de conduite isolée

- Coût d’investissement : 25CHF/m à isoler
- Coût d’entretien annuel : 0 CHF
- Gain annuel : 7.2 CHF
- Durée de vie de l’installation : 20 ans

$$VAN = -25 + \sum_{n=1}^{20} \frac{7.2}{(1 + 0.05)^n} = 65 \text{ CHF/m à isoler}$$

Payback : 4 ans

(15)

Le potentiel de cette solution augmente avec le nombre de mètres à isoler. Selon l’estimation faite, elle pourrait représenter 60 CHF d’économie par mètre sur sa durée de vie. Bien que l’économie semble faible, son coût d’installation quasi nul permet de l’amortir en un peu moins de 5 ans.

6.8 Remplacement du chauffe-eau électrique

Le chauffage de l’eau est nécessaire quel que soit le type de cave. Il est également l’un des principaux consommateurs électriques de la vinification. L’intérêt du boiler thermodynamique réside dans sa capacité à produire de la chaleur en la soutirant à l’air ambiant. L’installation de cet appareil dans le domaine vinicole ne pose donc pas de problème si la température de la pièce où il se situe ne doit pas être régulée. Dans ce cas, aucun ou peu de frais sont nécessaires à la mise en œuvre de cette installation.

Quantité vinifiée [hl]	Kilowattheures économisés [kWh/hl]
250 et 800	9
2500 et 10000	6

TABLE 26 – Économie d’énergie envisageable pour la mesure de remplacement du boiler par un chauffe-eau avec PAC intégré

- Coût d’investissement : 7200 CHF
- Coût d’entretien annuel : 100 CHF
- Gain annuel : 1440 CHF
- Durée de vie de l’installation : 15

$$VAN = -7200 + \sum_{n=1}^{15} \frac{1440 - 100}{(1 + 0.05)^n} = 6700CHF$$

Payback : 6 ans

(16)

Cette installation peut être amortie en 5 ans et pourrait représenter une économie de plus de 9500 CHF sur une durée de vie de 20 ans. Si l’on transpose cette économie à la production d’1 hectolitre, cela représente une réduction d’un peu plus de 60 centimes.

6.9 Remplacement des moteurs de ventilation

Comme expliqué dans l'évaluation énergétique de cette mesure, peu de données sont disponibles et il est probable que les hypothèses et extrapolations faites ne soient pas représentatives des installations réelles. Pour déterminer l'économie possible, le choix a été fait de se baser sur le prix moyen d'un moteur de 500W trouvé sur le commerce puis de déterminer le prix des alternatives plus performantes en prenant les valeurs fournies par le site <https://www.topmotors.ch/> (figure 24)

Volume	$W_{Éco.}$ entre IE1 et IE3	$W_{Éco.}$ entre IE1 et IE4
[hl]	[kWh/hl]	[kWh/hl]
250	1.7	2.3
800	1.4	1.8
2500	0.75	1
10000	0.35	0.45

TABLE 27 – Nombre de kilowattheures pouvant être économisés par hectolitre en remplaçant les moteurs des ventilations

Classe	IE2	IE3	IE4
Prix relatif	100%	113%	131%

Source : https://www.topmotors.ch/sites/default/files/2018-12/F_MB_29_Nouvelles_technologies_des_moteurs.pdf

FIGURE 24 – Comparaison des prix des classes de rendement de moteurs : valeur moyenne des prix spécifiques IE2, IE3, IE4 de chacun 0,12 kW à 1000 kW (Topmotors Market Report, 2018)

- Coût d'investissement : IE3 = 2200 CHF
IE4 = 2500
- Coût d'entretien annuel : 0 CHF
- Gain annuel : IE3 = 225 CHF
IE4 = 290 CHF
- Durée de vie de l'installation : 15 ans

Remplacement des moteurs IE1 par des IE3 :

$$VAN = -2200 + \sum_{n=1}^{15} \frac{225}{(1 + 0.05)^n} = 134CHFCHF$$

Payback : 14 ans (valeur proche de durée de vie)

(17)

Remplacement des moteurs IE1 par des IE4 :

$$VAN = -2500 + \sum_{n=1}^{15} \frac{290}{(1 + 0.05)^n} = 510CHF$$

Payback : 11 ans

(18)

En tenant compte que les valeurs obtenues peuvent différer de la réalité, avec les hypothèses faites, les deux variantes semblent quand même rentables.

L'installation d'un moteur IE3 est moins coûteuse au départ et, sur une période de fonctionnement de 15 ans, elle pourrait permettre d'économiser 135 CHF ce qui la rendrait rentable en 14 ans. La faible plus-value et la date d'amortissement proche de celle de fin vie ne permettent pas d'affirmer que cette solution doit être mise en place.

La solution avec le moteur IE4 est rentable en 11 ans et permet d'économiser 510 CHF sur 15 ans, ce qui représente une économie annuelle de 34 CHF, soit le double de l'autre alternative.

Remplacement des moteurs IE2 par des IE3 :

$$VAN = -2200 + \sum_{n=1}^{15} \frac{80}{(1 + 0.05)^n} = -1369CHFCHF \quad (19)$$

Remplacement des moteurs IE2 par des IE4 :

$$VAN = -2500 + \sum_{n=1}^{15} \frac{145}{(1 + 0.05)^n} = -990CHF \quad (20)$$

Les valeurs obtenues pour les différentes variantes de cette mesure semblent très défavorables, il est probable que dans la réalité cette solution ait de meilleurs résultats. Pour vérifier cela, il serait intéressant de réévaluer cette mesure avec des valeurs provenant de différentes caves.

7 Analyse des résultats et discussions

Cette partie reprend les résultats obtenus dans les deux précédentes sections. Elle analyse le potentiel de réduction énergétique par hectolitre produit ainsi que les répercussions économiques annuelles. Une synthèse énergétique globale a été faite pour toutes les tailles de caves utilisant des cuves inox. Une autre synthèse a été effectuée d'après le payback (temps avant amortissement) pour la typologie vinifiant 800 hectolitres, car elle semble être la plus pertinente en Suisse. L'analyse économique n'a également été effectuée que pour la typologie de 800 hl, car les autres n'ont pas pu être terminées avant l'échéance du projet.

7.1 Potentiel de réduction énergétique

Pour pouvoir analyser les résultats obtenus correctement, deux listes de mesures ont été faites. La première reprend l'ensemble des mesures listées et la seconde exclut celle concernant le remplacement du groupe froid. Cette distinction influence peu la consommation d'énergie, mais demande un investissement conséquent. Elle permettra de faire une comparaison entre le gain financier et celui énergétique. De plus, l'installation ou le remplacement du groupe froid sont les seules solutions qui ne semblent pas être rentable avant la durée de vie estimée.

Rappel des mesures :

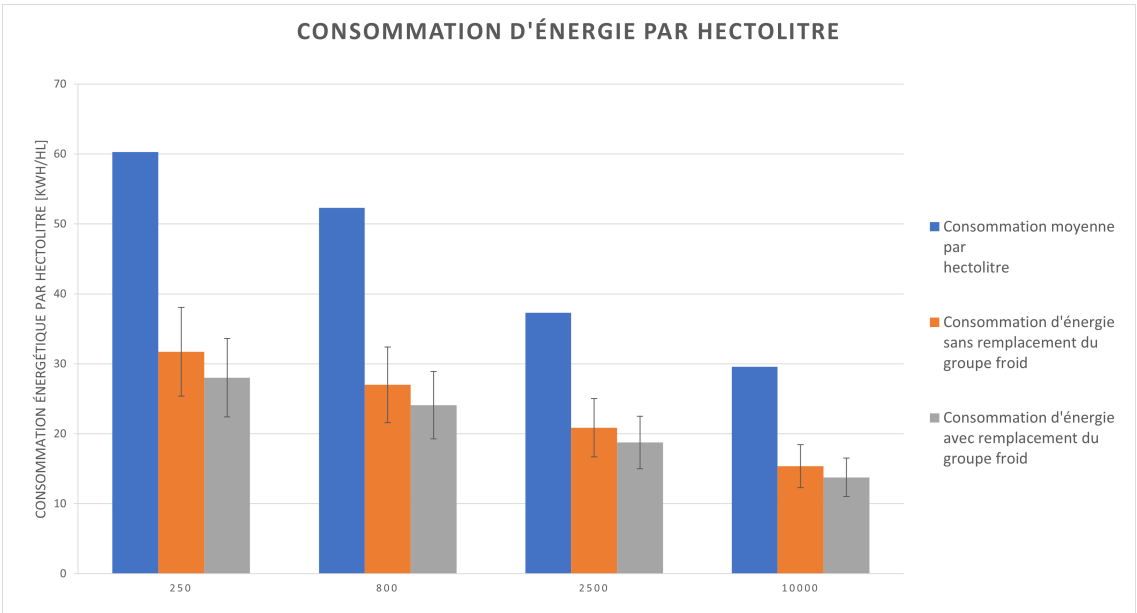
- Free-Cooling
- Stockage du froid
- Remplacement ou installation d'un groupe froid
- Récupération de la chaleur sur le groupe froid
- Variateur de fréquence sur compresseur du groupe froid
- Remplacement du fluide frigorigène du groupe froid
- Isolation des conduites
- Remplacement du chauffe-eau électrique

- Remplacement des moteurs de ventilation

La figure et le tableau suivant montrent les résultats obtenus pour les 4 archétypes de taille.

Volume vinifié	Consommation moyenne par hectolitre kWh par hl	Consommation d'énergie sans remplacement du groupe froid kWh par hl	Consommation d'énergie avec remplacement du groupe froid kWh par hl
250	60,3	31,7	28,0
800	52,3	27,0	24,1
2500	37,3	20,9	18,8
10000	29,6	15,4	13,8

(a)



(b)

FIGURE 24 – Graphique et tableau de la réduction estimée si toutes les mesures sont mises en places

La figure 24b montre l'énergie nécessaire à la production de 1 hectolitre (bleu), puis celles après mise en place des solutions. On constate que la mise en place de toutes les mesures pourrait permettre de réduire de 40% à 50% la consommation totale d'énergie. Ces valeurs représentent une réduction considérable, mais elles semblent plausibles. Cependant, le manque de données dans le domaine vinicole ne permet pas de les confirmer. Les barres d'erreur sur les consommations des mesures représentent une variation de $\pm 20\%$. Cette valeur a été choisie arbitrairement, mais paraît être une marge raisonnable de variation sur l'ensemble des solutions proposées.

Un second point permettant d'expliquer une telle réduction pourrait venir du fait que la liste de mesures comporte uniquement des solutions relativement techniques choisies pour leur possible potentiel d'efficacité. En ne tenant pas compte du prix, mettre en place la plupart de ces solutions représenterait probablement une baisse importante du nombre de kilowattheures consommés.

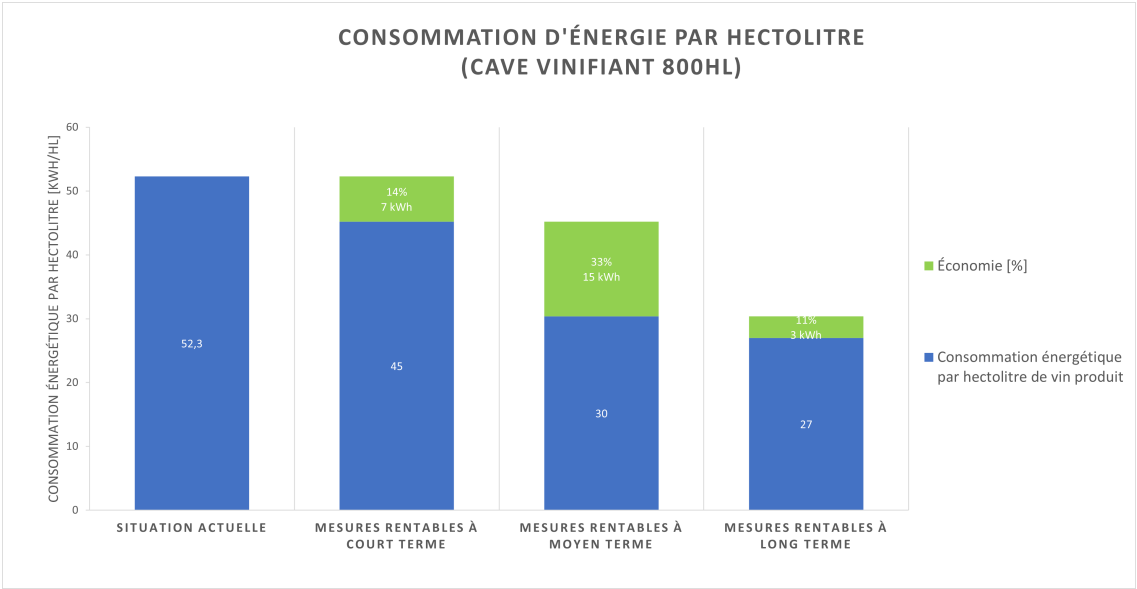
Le modèle de cave vinifiant 800 hectolitres étant celui dont le potentiel financier a également été développé, une autre représentation des économies énergétiques a été réalisée en fonction du payback. Si l'on souhaite mettre en place plusieurs mesures cette façon de procéder peut être une aide décisionnelle. Le payback définit le temps nécessaire à une mesure pour être rentable. En mettant en place les solutions ayant

un temps avant rentabilité court, la plus-value récupérée après payback peut être injectée dans la mise en place de la mesure suivante.

- Mesures rentables à court terme (moins de 5 ans)
 - Free-Cooling (2 ans)
- Mesures rentables à moyen terme (moins de 10 ans)
 - Remplacement du chauffe-eau électrique (6 ans)
 - Remplacement du fluide frigorigène du groupe froid (8 ans)
 - Variateur de fréquence sur compresseur du groupe froid (6 ans)
 - Récupération de la chaleur sur le groupe froid (7 ans)
- Mesures rentables à long terme (plus de 10 ans)
 - Remplacement des moteurs de ventilation (11 ans)
 - Stockage du froid (11 ans)

Pour cette analyse, la mesure concernant l’isolation des conduites n’a pas été prise en compte, car le potentiel de réduction énergétique de cette solution n’est pas dépendante du nombre d’hectolitres vinifié, mais du nombre de mètres devant être isolé. Il n’est donc pas pertinent de définir une longueur de conduite à calorifuger tant cette valeur peut varier d’une cave à l’autre.

La figure et le tableau sont les résultats obtenus pour la cave de 800hl.



(a)

Remplacement du chauffe-eau électrique	20%
Remplacement du fluide frigorigène	4%
Variateur de fréquence (Groupe froid)	3%
Récupération de la chaleur sur le groupe froid	6%

(b) répartition des 33% de réduction par mesure

Remplacement des moteurs de ventilation IE2 par IE4	3%
Stockage du froid	5%

(c) répartition des 8% de réduction par mesure

FIGURE 24 – Graphique du potentiel de réduction énergétique des mesures.

Le plus fort potentiel se trouve dans les solutions rentables à moyen terme, mais il faut tenir compte que cette catégorie comporte 4 mesures alors que les autres n’en ont que 1 à 2.

2 mesures ont un fort impact sur les réductions, la première est le Free-Cooling qui en plus de pouvoir réduire d'environ 14% la consommation totale, peut également être une mesure rentabilisée rapidement. La seconde est le remplacement de la production d'eau chaude, si elle est générée par un boiler classique, en cas de remplacement par un système thermodynamique cela pourrait représenter près de 20% de réduction rentable à moyen terme.

7.2 Analyse économique

L'analyse économique des solutions a été effectuée pour les mêmes critères que l'analyse énergétique afin que les deux puissent être comparés.

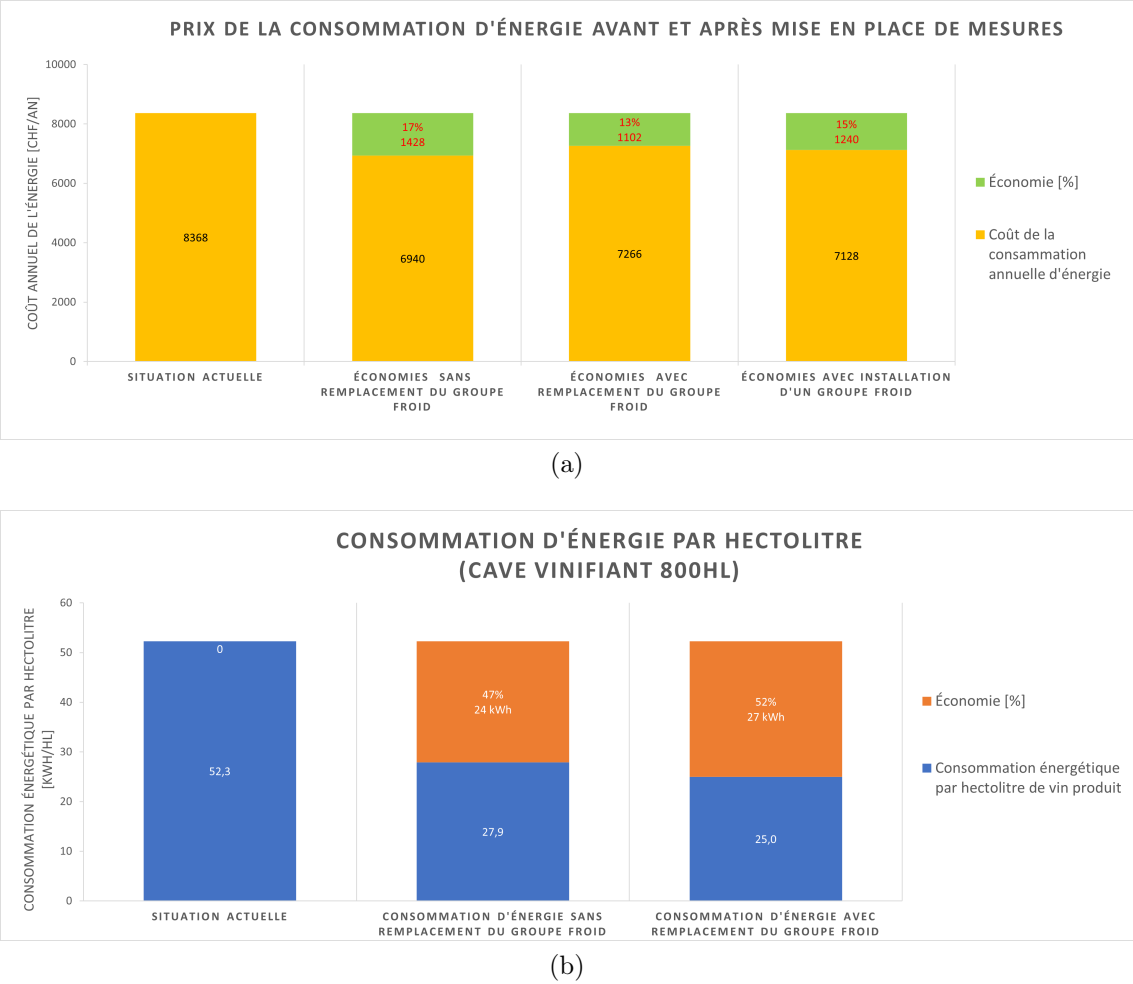
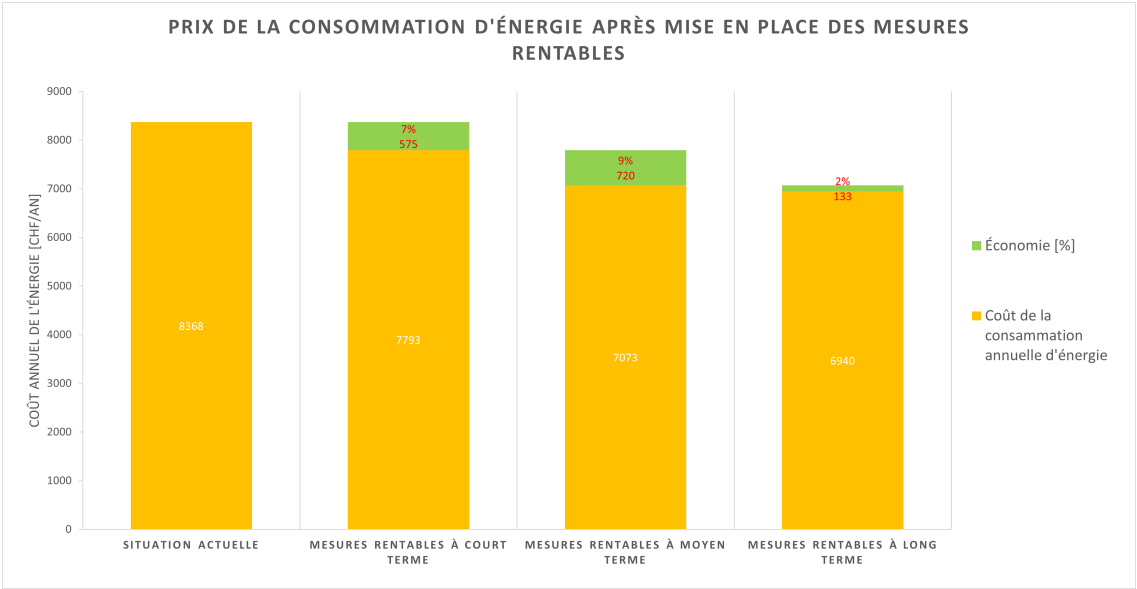


FIGURE 25 – Graphique du potentiel de réduction économique et énergétique.

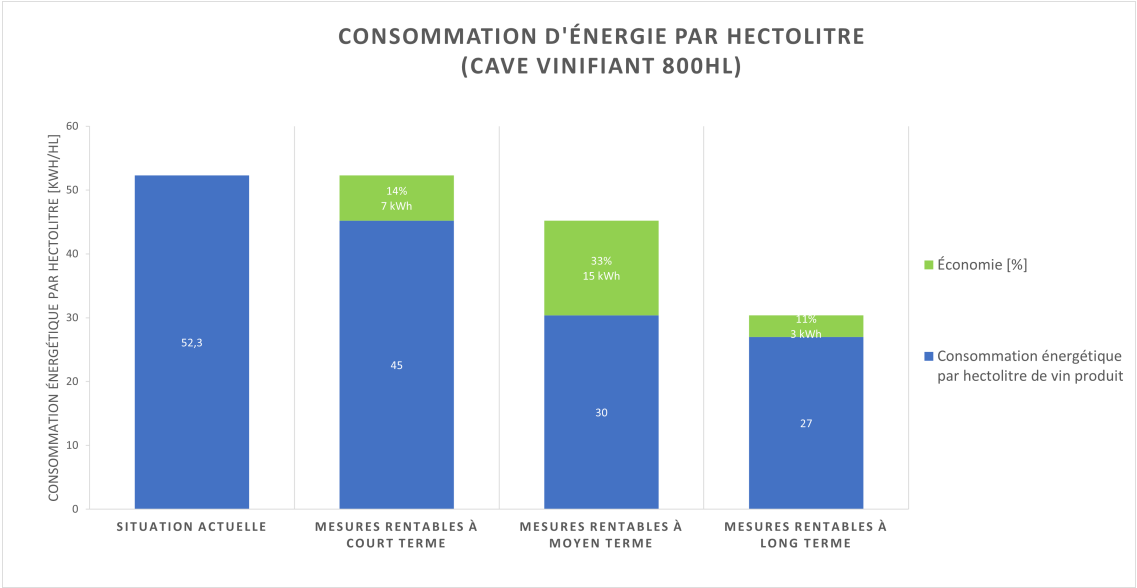
Cette figure compare la situation initialement définie avec celle potentiellement atteignable après mise en place des mesures.

Dans la partie énergétique, la réduction potentielle des kilowattheures consommés était comprise entre 40% et 50%. En comparant ces valeurs avec celles de l'économie financière, on constate que la réduction réelle que l'on peut espérer si l'on répercute les coûts d'installation et d'entretien sur la facture énergétique annuelle se situe plus entre 10% et 20%. Il est donc important de dissocier l'influence des solutions sur la part énergétique et sur celle économique, car une réduction importante sur l'une ne veut pas dire qu'elle le sera également sur l'autre.

Cette différence peut être constatée dans le cas où l'on remplace le groupe froid. Cette mesure permet de réduire davantage l'énergie à fournir par hectolitre, par contre elle diminue également les économies financières réalisables. Cela est dû au fort coût que cette installation engendre. Les résultats sont similaires si l'on segmente les solutions selon le payback.



(a)



(b)

FIGURE 26 – Graphique du potentiel de réduction économique et énergétique par temps de rentabilité.

Le tableau suivant indique pour chaque mesure, en pourcent, la réduction du nombre de kilowattheures par hectolitre ainsi que l’impact économique annuel.

Situation actuelle	-	Free-Cooling	Remplacement du chauffe-eau électrique	Remplacement du fluide frigorigène	Variateur de fréquence (Groupe froid)	Récupération de la chaleur sur le groupe froid	Remplacement des moteurs de ventilation IE2 par IE4	Stockage du froid	Remplacement groupe froid	Installation groupe froid
52 kWh	Pourcentage de réduction énergétique [%]	13,7%	17,3%	3,8%	2,3%	5,0%	1,7%	3,1%	5,6%	5,6%
8 370 CHF	Pourcentage de réduction économique [%]	6,9%	5,3%	1,0%	0,8%	1,4%	0,4%	1,2%	-2,1%	-0,4%

FIGURE 27 – Résumé de l’impact énergétique et économique de chaque mesure

Pour pouvoir représenter à la fois le potentiel énergétique et économique sur un seul et même graphique, une "Abatement Cost curve" reprenant chaque mesure a été utilisée.

Chaque rectangle représente une mesure, si la solution est rentable elle se situe sous l'axe X. Plus son potentiel de rentabilité est grand plus sa valeur est négative. Dans le cas où le rectangle est positif (selon l'axe Y) cela signifie qu'un investissement non rentabilisable est nécessaire afin de mettre place la mesure. L'unité utilisée est le Franc suisse par kilowattheure, cette valeur représente l'équivalent de réduction qu'aurait la mesure sur le prix du kWh consommé. La largeur de la solution représente son potentiel énergétique en kilowattheures économisables par an. L'avantage de cette représentation est qu'horizontalement le potentiel énergétique est lisible et qu'en multipliant cette valeur par celle de l'axe vertical on obtient également le potentiel économique annuel.

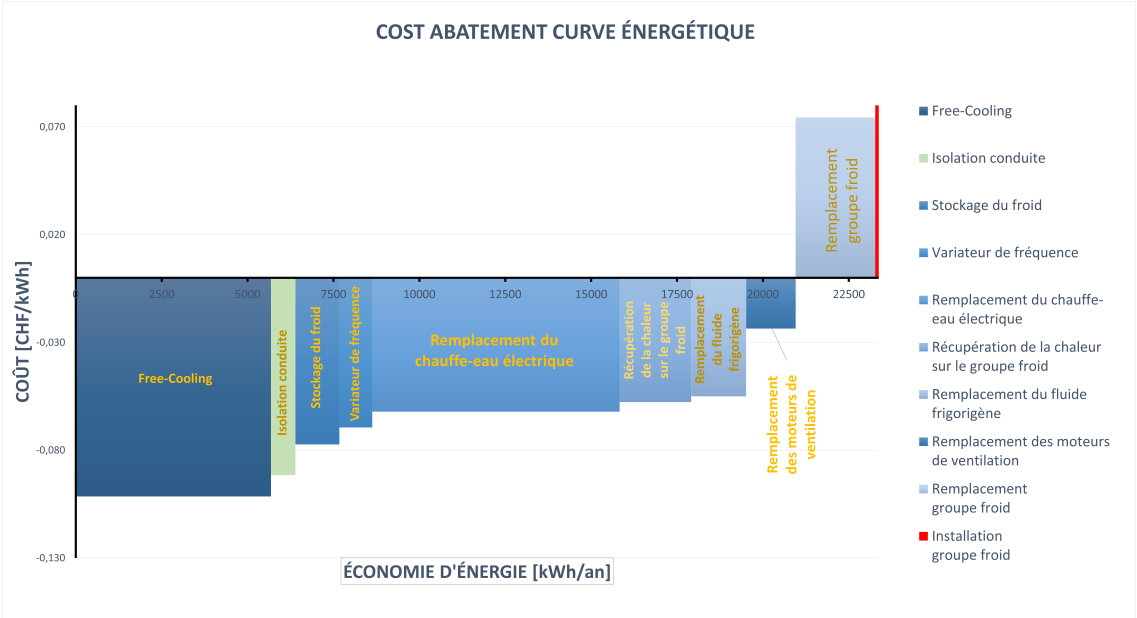


FIGURE 28 – Abatement Cost curve énergétique

Les mesures sont listées de la plus économiquement rentable à la plus coûteuse, cet ordre peut également être une manière de prioriser les investissements. La mesure concernant l'isolation des conduites est de couleur différente, car son potentiel économique n'est pas défini, sa hauteur est correcte, mais sa largeur variera avec le nombre de mètres à isoler, elle reste dans tous les cas une mesure très intéressante.

L'installation d'un groupe froid (en rouge) est une mesure qui intervient lors du remplacement d'un système utilisant une autre source d'énergie (p.ex. ruissellement d'eau), de ce fait il n'y pas réellement d'économie énergétique réalisée, car les 2 systèmes ne sont pas comparables.

On distingue 2 types de mesures, le premier comporte les solutions générant une économie financière forte, mais ayant un faible pouvoir d'économie énergétique. Le second type représente les mesures "plus larges que hautes", ces solutions sont intéressantes du point de vue de la consommation, mais moins économiquement, si des aides financières doivent être apportées il est probable que se soit vers ces mesures qu'il faille les orienter.

7.3 Discussion

Plusieurs constats peuvent être fait avec les informations et résultats obtenus. Le premier concerne les typologies de caves. Elles ont été définies grâce aux audits et aux rapports fournis, mais restent possiblement trop globales. Bien que les caves types aient été adaptées au fur et à mesure des visites et des nouveaux documents reçus, des données supplémentaires pourraient préciser les typologies ou en faire ressortir d'autres.

Des typologies définies, la plus pertinente reste la différenciation des volumes vinifiés, car des différences significatives apparaissent. Pour la zone géographique cela va dépendre de la solution mise en place, dans la liste de celles évaluées seul le potentiel du Free-Cooling semble être influencé par ce critère. Les performances du groupe peuvent également être influencées par la zone géographique, mais trop d'éléments doivent être déterminés pour chiffrer cette influence.

Concernant le critère qui différencie le type de cuves, il est difficile d'évaluer s'il est pertinent. Cette caractéristique a été choisie, car lors d'une rencontre avec un fournisseur de matériel selon lui, les cuves en bois et en inox représentaient environ le quart des ventes de récipients, valeur qui semblait être assez importante pour être prise en compte. Dans la définition des consommations types, le genre de cuves influence principalement la quantité d'eau nécessaire à l'entretien et donc énergétiquement la quantité d'eau devant être chauffée. Comme dit dans la partie "État de l'art", la qualité des données disponibles concernant cette ressource est faible. En effectuant des mesures ou en récoltant plus d'informations, il pourra être possible de dire si ce critère reste pertinent. Cette conclusion est valable uniquement pour une analyse énergétique, si l'on souhaite évaluer l'impact eau ou effectuer une analyse du cycle de vie, il est probable que cette différenciation doit être faite.

Concernant les consommations types définies, elles se basent uniquement sur des documents d'études, des données reçues de l'Agroscope de Changins ainsi que sur le peu de visites effectuées. Les ordres de grandeur des différentes sources correspondent, il est donc probable que les consommations soient proches de la réalité. Il faudrait cependant trouver plus de sources ou effectuer des mesures pour confirmer ces valeurs. Pour cela, il serait intéressant de placer des systèmes de monitoring énergétique des consommateurs, cette manière de procéder comporte l'avantage d'à la fois générer des données sur les postes énergétiques et d'inciter l'utilisateur à réduire sa consommation. Si cela est mis en place, ce système pourrait être une mesure efficace à mettre en place dans le futur. L'inconvénient de faire cela est que pour obtenir des données consistantes il faut installer ce système sur un nombre significatif de caves et l'exploiter durant minimum une année.

Dans la liste des mesures initiales, plusieurs n'ont pas eu le temps d'être évaluées. Il y a notamment, la solution concernant le remplacement du chauffage d'appoint qui semble très efficace. Le remplacement des pompes de circulation serait également une mesure à développer. Un poste de consommation énergivore dans les grandes caves semble être celui de l'air comprimé. Il y a également d'autres solutions, techniques ou non, n'étant pas directement liées au sujet, pouvant également avoir un impact positif sur le secteur. La mise en place de panneaux photovoltaïques, permettrait, par exemple, d'augmenter le potentiel d'économie monétaire des mesures, il reste à voir si les gains peuvent rendre le coût de cette installation rentable. Il faut aussi prendre compte que cela ne diminue en aucun cas l'énergie nécessaire à la production du vin, la ressource utilisée est simplement générée chez le consommateur.

Pour l'évaluation des mesures, il est important de rappeler que ce travail est une version se basant uniquement sur des données récoltées de différentes sources et qu'aucune mesure pratique n'ait pu être faite dans le temps dédié au projet.

Le potentiel de réduction énergétique des différentes mesures représente près de 50% de la consommation type définie. En ne prenant que les mesures rentables, sur les 7 considérées (sans l'isolation des conduites et le remplacement du groupe froid)

les 3 ayant le plus fort potentiel génèrent 30% de cette réduction. Si l'on compare cette valeur avec celle économique, en tenant compte du prix de l'installation et de l'entretien, les 3 mêmes mesures ne réduisent que de 13% la facture annuelle. Il y a une grande différence entre ce que l'on peut espérer comme réduction énergétique et l'impact que cette réduction aura financièrement, une diminution de 40% à 50% du nombre de kilowattheures utilisés n'est pas égale à une réduction équivalente en CHF. Même si l'on considère que ces valeurs peuvent varier de manière significative, il est peu probable qu'en cas de demande d'offres à des entreprises, les valeurs changent au point d'atteindre les chiffres du pourcentage énergétique. Ce constat affirme que le projet de soutien financier d'AgroCleanTech s'avère très pertinent.

8 Conclusion et suite du projet

Ce projet est une première évaluation de la situation actuelle, actuellement, le secteur vinicole manque ou rend difficile l'accès aux données concernant les caves, les pratiques ou habitudes courantes. Les archétypes définis restent relativement globaux et plus d'informations permettraient de les rendre plus précis, donc plus pertinents. Il en est de même pour les caves types utilisées pour l'évaluation des mesures. Des documents reçus et visites effectuées, il ressort qu'une grande différence de consommation est possible entre 2 caves ayant des volumes de production similaires. La majorité des exploitations semblent avoir une marge de réduction considérable, cela montre que le secteur vinicole possède un réel potentiel d'amélioration.

Concernant les mesures, il est frappant de noter les disparités qu'il peut y avoir entre le potentiel énergétique et celui économique. L'évaluation du nombre de kilowattheures nécessaires à la production de 1 hectolitre a pu être réduite de 50% en mettant en place diverses mesures. L'effet que ces mêmes mesures ont sur le potentiel économique n'est que de 20% de réduction. Sachant cela, convaincre un encaveur de mettre en place l'une ou l'autre de ses mesures semble compliqué si les répercussions ne sont que peu perceptibles sur la facture. Au vu des résultats obtenus, le projet d'aide financière pour le secteur vinicole est probablement le seul moyen de motiver les personnes concernées de procéder à certains changements.

Pour la suite du projet, il serait intéressant, dans un premier temps : d'ajouter d'autres mesures et de réévaluer le potentiel énergétique de chacune d'elles en essayant de diminuer les hypothèses faites. Pour cela, une méthode qui pourrait être pertinente serait de trouver des exploitants ayant déjà mis en place certaines solutions et d'évaluer l'effet qu'elles ont eue. En parallèle ou à la suite de cela, des demandes d'offres détaillées concernant les coûts d'installations et d'entretiens devront être faites, car c'est sur ce point que subsiste le plus d'incertitude.

A Annexe

A.1 Compréhension et analyse des principaux postes de consommation énergétique

A.1.1 Fermentation alcoolique

- Le programme prend en compte les points suivants :
- La chaleur générée durant la fermentation ainsi que les pertes thermiques par les parois sont prises en compte
 - La capacité calorifique du moût est semblable à celle l'eau
 - Fermentation des blancs à 20°C - Fermentation des rouges à 28°C - Fermentation à froid des blancs à 14°C
 - Le temps autorisé pour atteindre la température souhaitée est de 24h
 - Les besoins en froid pour chaque jour sont donnés en frigories/h

- Pour la simulation les considérations suivantes ont été faites :
- Sur le planning d'un mois, le 2/3 de la production est vinifiée (cela correspond à 6 semaines de réception des vendanges)
 - Proportion de vinification : 50% en blanc et 50% en rouge
 - La taille des cuves est semblable pour les blancs et les rouges

Les figures et calculs suivants reprennent les valeurs utilisées pour une cave vinifiant moins de 250hl par an, la même démarche a été effectuée pour chaque typologie de cave, tous les résultats et valeurs utilisées sont présentés ci-dessous.

Type de vinification	Volume de la cuve (en hl de moût)	Matériau	K (kcal/h/m2/°C)	Forme	Hauteur (en m)	Longueur (en m)	Surface d'échange (en m2)
Phase liquide (blancs, rosés, thermo)	20	Inox	10	Cylindrique	2		7.09
Phase solide (rouges)	20	Inox	10	Cylindrique	2		7.09

FIGURE 29 – Valeurs pour le volume de la cuve, sa matière et sa hauteur.

Le planning a été complété en essayant d'étaler la quantité réceptionnée homogènement sur tout le mois. Cela fait que la puissance frigorifique obtenue peut être inférieure à ce qui se retrouve en pratique. De plus, le faible volume vinifié pour cet archétype (250hl) à pour effet qu'en cas de petites modifications du planning les résultats obtenus varient de manière relativement grande. Pour pallier à cela, une majoration de 20% a été faite sur le résultat, ce pourcentage diminuant avec l'augmentation de la quantité produite (facteur de taille). L'augmentation de la puissance thermique considérée par apport aux résultats obtenus par simulation pour les autres tailles de caves est de +18% pour 800hl, +15% pour 2500hl et +10% pour 10000hl.

Planning de vendanges																														
	Semaine 1							Semaine 2							Semaine 3							Semaine 4							TOTAL	
	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D		
Itinéraire 1 : blancs et rosés fermentation à froid 14°C 🌬️	1													1															40	
Itinéraire 2 : blancs et rosés fermentation classique 18°C 🌬️						1												1								1			60	
Itinéraire 3 : rouges fermentation classique à 28°C 🌬️			1																										20	
Itinéraire 4 : rouges avec macération préfermentaire à froid 🌬️											1											1				1			60	
Itinéraire 5 : rouges issus de thermovinification 🌬️																													0	
TOTAL QUOTIDIEN (en hl)	20	0	20	0	0	20	0	0	0	0	20	0	0	20	0	0	0	0	20	0	0	20	0	0	0	40	0	0	0	180

FIGURE 30 – Planning de la réception des vendanges

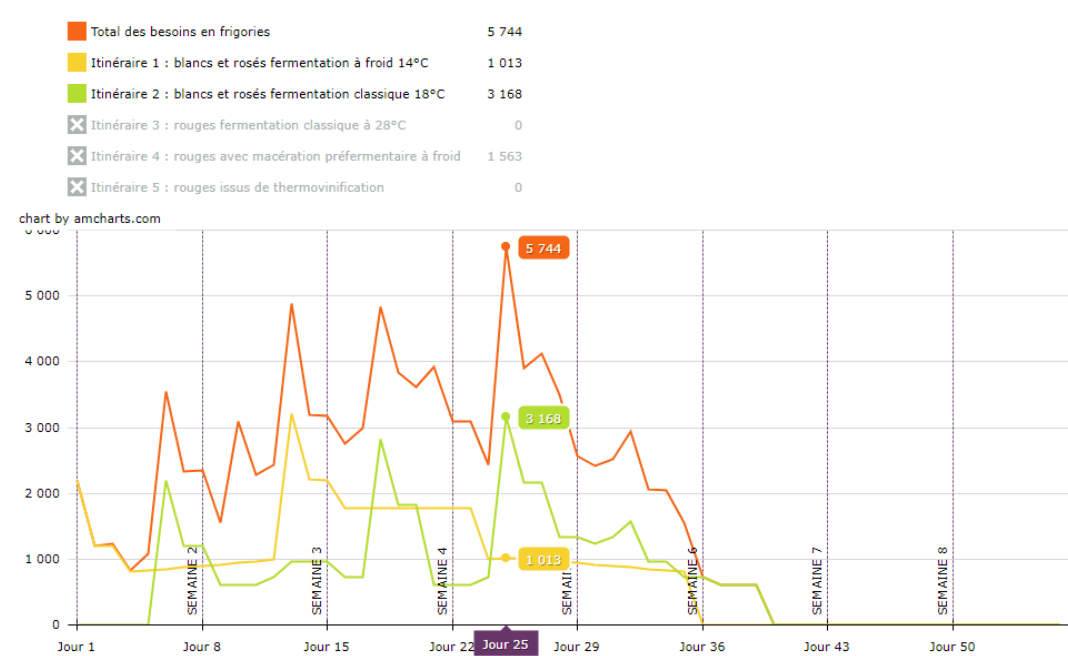


FIGURE 31 – Puissance frigorifique nécessaire

Pour quantifier l’énergie nécessaire à la production d’un hectolitre de vin, il a fallu transformer la puissance thermique obtenue en énergie électrique consommée.

L’EER (Energy Efficiency Ratio) ou COP_{froid} (coefficient de performance frigorifique) représente quelle énergie thermique est produite pour 1kWh électrique consommé. Les visites de caves et les catalogues fournisseurs affichent un COP_{froid} moyen de 3, c’est cette valeur qui a été considérée pour les calculs suivants. Elle reste cependant que théorique, en condition réelle ce coefficient variera en fonction des températures souhaitées et disponibles.

- Estimation de la puissance électrique nécessaire des groupes froids

$$P_{therm_{kW}} = P_{them_{frig/h}} + 20\% * 0.0012 = 7000 * 0.0012 = 8.4kW$$
$$P_{elec} = \frac{P_{therm_{kW}}}{COP_{froid}} = \frac{8.4}{3} = 2.8kW$$

Volume [hl]	P _{Cuve inox} [kW]	P _{Cuve bois} [kW]	P _{Cuve béton} [kW]
250	3	2.2	2
800	7	5	4
2500	18	16	15
10000	50	41	37

TABLE 28 – Estimation de la puissance du groupe froid à installer pour les différents volumes vinifiés et types de cuves

- Calculs de l’énergie à fournir pour la production d’un hectolitre de vin durant la fermentation alcoolique (FA)
- Pour trouver l’énergie nécessaire à la FA il a fallu convertir les puissances journalières fournies par la simulation (cf. figure 31)

$$W_{therm_{frigories}} = \sum_0^{N_{jours}} P_{thermique\ journaliere} * 24heures =$$
$$102244 * 24 = 2453856kW$$
$$W_{therm_{kWh}} = W_{therm_{frigories}} * 0.0012 = 2453856 * 0.0012 = 2944kWh$$

Pour obtenir l'énergie par hectolitre, la valeur obtenue doit être divisée par le volume total introduit dans le planning des vendanges, ce volume est inscrit dans la figure 30.

$$W_{therm. \text{ par hl}} = \frac{W_{therm_{kWh}}}{N_{hectolitres}} = \frac{2944}{180} = 16.4[kWh/hl]$$
$$P_{elec. \text{ par hl}} = \frac{W_{therm. \text{ par hl}}}{COP_{froid}} = \frac{16.4}{3} = 5.5[kWh/hl]$$

Volume [hl]	$W_{Cuve \text{ inox}}$ [kWh/hl]	$W_{Cuve \text{ bois}}$ [kWh/hl]	$W_{Cuve \text{ béton}}$ [kWh/hl]
250	5.5	3.9	3.2
800	5.5	3.8	3
2500	3.9	3.1	2.7
10000	2.5	2.1	1.8

TABLE 29 – Tableau des valeurs obtenues pour l'énergie nécessaire à la fermentation alcoolique (FA)

A.1.2 Fermentation malolactique

Les figures et calculs reprennent les valeurs utilisées pour une cave vinifiant moins de 250hl par an. La surface d'échange des cuves prises en compte est la même que celle indiquée dans la figure 29.

$$k_{Inox} \qquad \qquad \qquad 10$$
$$k_{bois} \qquad \qquad \qquad 6 \qquad \frac{kcal}{heure * m^2 * k}$$
$$k_{Béton} \qquad \qquad \qquad 4$$

Le coefficient k représente selon le matériau la capacité qu'a celui-ci à transmettre de la chaleur, plus la valeur de k est grande et plus la quantité d'énergie transmise sera grande, à l'inverse, plus elle sera petite et plus le matériau sera considéré comme un isolant thermique. Les valeurs de coefficients proviennent du calculateur cité plus haut.

$$1kcal = 0.00115kWh$$
$$W_{passant \text{ par les parois en 1 heure}} = k_{Inox} * S * \Delta T * \Delta t * 0.00115 = 10 * 7 * 2 * 1 * 0.00115 = 0.161[kWh]$$

(21)

Énergie nécessaire pour la production de 100 litres de vin :

$$W_{elec} = \frac{W_{passant \text{ par les parois en 1 heure}}}{COP_{PAC}} = \frac{0.161}{3} = 0.054kWh$$
$$W_{hl} = \frac{W_{elec} * N_{heures \text{ de fermentation}}}{N_{hl \text{ par cuve}}} = \frac{0.054kWh * 15heures * 40jours}{20hl}$$

$$= 1.6kWh/hl$$

(22)

Volume [hl]	Surface [m²]	$W_{Cuve \text{ inox}}$ [kWh/hl]	$W_{Cuve \text{ bois}}$ [kWh/hl]	$W_{Cuve \text{ béton}}$ [kWh/hl]
250	7	1.6	1.1	0.6
800	8.5	1.3	0.9	0.5
2500	19	0.9	0.6	0.35
10000	48	0.7	0.5	0.29

TABLE 30 – Tableau de valeurs obtenues pour l'énergie de la fermentation malolactique (FM)

A.1.3 Stabilisation

Énergie pour abaisser la température de 10°C

$$1joule = 2.8 * 10^{-7}kWh$$
$$Cp_{vin} = Cp_{eau} = 4187j/K$$
$$\rho_{vin} = \rho_{eau} = 1000kg/m^3$$
$$W_{baisse\ temp.} = m * Cp * \Delta T * 2.8 * 10^{-7} = \frac{V_{hl} * 100}{1000} * \rho * Cp * \Delta T * 2.8 * 10^{-7}$$
$$= \frac{250 * 100}{1000} * 1000 * 4187 * 10 * 2.8 * 10^{-7} = 293kWh$$

(23)

Les figures et calculs reprennent les valeurs utilisées pour une cave vinifiant moins de 250hl par an. La surface de cuve prise en compte est la même que celle indiquée dans la figure 29.

k_{Inox}	10	
k_{bois}	6	$\frac{kcal}{heure * m^2 * K}$
$k_{Béton}$	4	

$$1kcal = 0.00115kWh$$
$$W_{passant\ par\ les\ parois\ en\ 1\ heure} = k_{Inox} * S * \Delta T * \Delta t * 0.00115$$
$$= 10 * 7 * 10 * 1 * 0.00115 = 0.805[kWh]$$

Énergie nécessaire pour la production de 100 litres de vin :

$$W_{elec} = \frac{W_{passant\ par\ les\ parois\ en\ 1\ heure}}{COP_{froid}} = \frac{0.805}{3} = 0.268kWh$$
$$W_{hl} = \frac{W_{elec} * N_{heures\ de\ fermentation}}{N_{hl\ par\ cuve}} = \frac{0.268kWh * 18heures * 60jours}{20hl}$$
$$= 14.9kWh/hl$$

Volume [hl]	Surface [m²]	$W_{Cuve\ inox}$ [kWh/hl]	$W_{Cuve\ bois}$ [kWh/hl]	$W_{Cuve\ béton}$ [kWh/hl]
250	7	14.9	10.5	6.2
800	8.5	12.1	8.6	5
2500	19	8.3	5.9	3.5
10000	48	6.7	4.7	2.6

TABLE 31 – Tableau de valeurs obtenues pour l’énergie nécessaire à la stabilisation tartrique de 100 litres de vin

A.1.4 Stockage

$$\Delta T = 5^{\circ}C$$
$$1kcal = 0.00115kWh$$
$$W_{passant\ par\ les\ parois\ en\ 1\ heure} = k_{Inox} * S * \Delta T * \Delta t * 0.00115$$
$$= 10 * 7 * 5 * 1 * 0.00115 = 0.4[kWh]$$

(24)

Énergie nécessaire pour la production de 100 litres de vin :

$$W_{elec} = \frac{W_{passant\ par\ les\ parois\ en\ 1\ heure}}{COP_{froid}} = \frac{0.4}{3} = 0.133kWh$$
$$W_{hl} = \frac{W_{elec} * N_{heures\ de\ climatisation}}{N_{hl\ par\ cuve}} = \frac{0.133kWh * 400h}{20hl}$$
$$= 2.7Wh/hl$$

(25)

Volume [hl]	Surface [m²]	$W_{Cuve\ inox}$ [kWh/hl]	$W_{Cuve\ bois}$ [kWh/hl]	$W_{Cuve\ beton}$ [kWh/hl]
250	7	2.7	1.9	1.1
800	8.5	2.2	1.5	0.9
2500	19	1.5	1	0.6
10000	48	1.2	0.85	0.5

TABLE 32 – Tableau de valeurs obtenues pour l’énergie nécessaire au stockage du vin

A.1.5 Eau chaude nettoyage

La valeur de 5 litres d’eau potable utilisée pour produire 1 litre de vin a été reprise de la section 3.2, la part d’eau devant d’être chauffée a été estimée à environ 3 litres pour les volumes de 250hl et 800hl et à 2 litres pour 2500hl et 10’000hl. Les cuves en bois et en béton étant moins faciles à nettoyer que celle en inox, 100 litres d’eau supplémentaire ont été ajoutés aux valeurs précédentes.

Température initiale de l’eau10°C

Température finale de l’eau60°C

Cp_{eau}4187 j/k

L’énergie nécessaire à l’augmentation de la température de l’eau :

$$W_{chauffage\ eau} = m * Cp_{eau} * \Delta T * 2,8 * 10^{-7}[kWh]$$

Volume	$Nbre_{litre}$ (inox)	$Q_{Cuve\ inox}$	$Nbre_{litre}$ (bois et béton)	$Q_{Cuve\ bois}$	$Q_{Cuve\ beton}$
[hl]	[L]	[kWh/hl]	[L]	[kWh/hl]	[kWh/hl]
250	300	18	400	23	23
800	300	18	400	23	23
2500	200	12	300	18	18
10000	200	12	300	18	18

TABLE 33 – Nombre de kilowattheures par hectolitre nécessaire à la production d’eau chaude

A.2 Tableaux des simulations et résultats des besoins de frigories pour la fermentation alcoolique

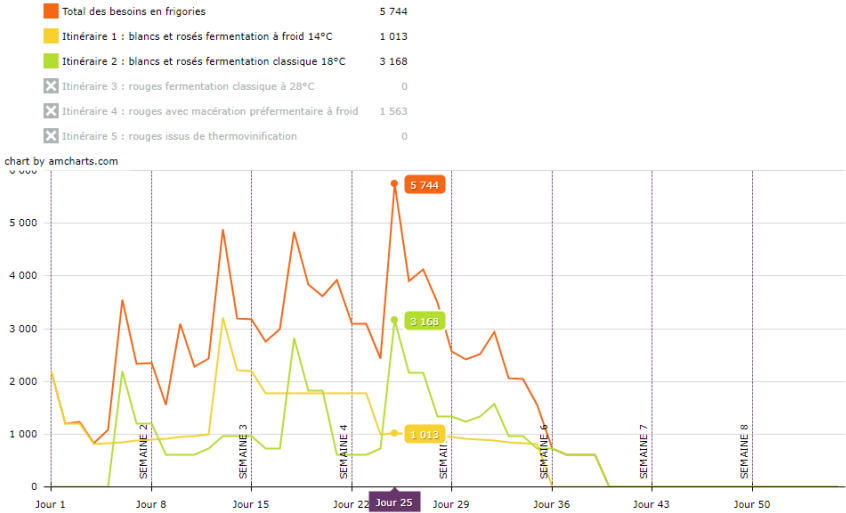
A.2.1 Production de 250hl de vin

Type de vinification	Volume de la cuve (en hl de moût)	Matériau	K (kcal/h/m2/°C)	Forme	Hauteur (en m)	Longueur (en m)	Surface d'échange (en m2)
Phase liquide (blancs, rosés, thermo)	20	Inox	10	Cylindrique	2		7.09
Phase solide (rouges)	20	Inox	10	Cylindrique	2		7.09

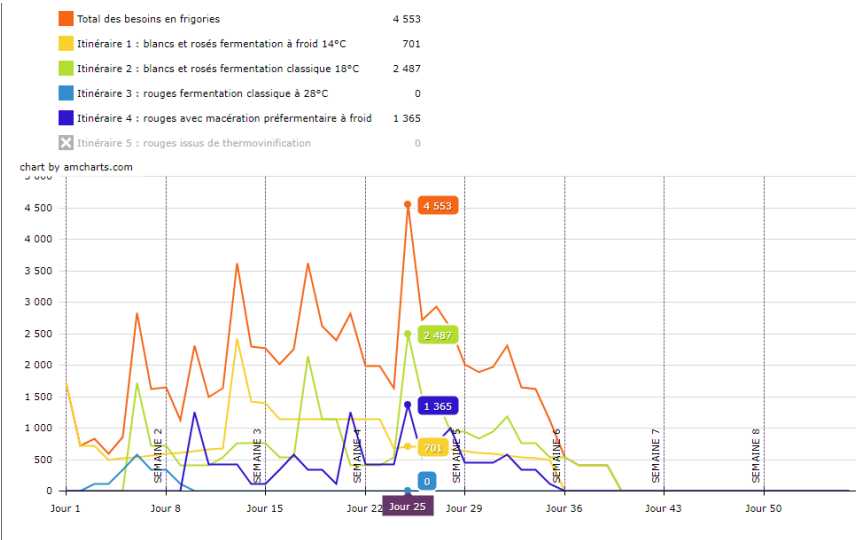
(a) Dimensions des cuves

Planning de vendanges																													
	Semaine 1							Semaine 2							Semaine 3							Semaine 4							TOTAL
	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	
Itinéraire 1 : blancs et rosés fermentation à froid 14°C 📄	1												1																40
Itinéraire 2 : blancs et rosés fermentation classique 18°C 📄						1													1							1			60
Itinéraire 3 : rouges fermentation classique à 28°C 📄			1																										20
Itinéraire 4 : rouges avec macération préfermentaire à froid 📄										1											1					1			60
Itinéraire 5 : rouges issus de thermovinification 📄																													0
TOTAL QUOTIDIEN (en hl)	20	0	20	0	0	20	0	0	0	20	0	0	20	0	0	0	0	20	0	0	20	0	0	0	40	0	0	0	180

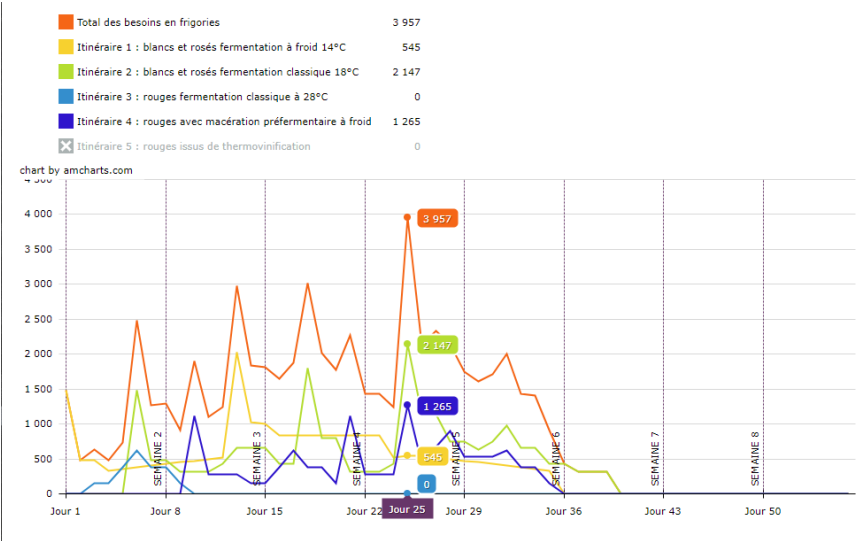
(b) Planning de la réception des vendanges



(c) Résultats cuverie inox.



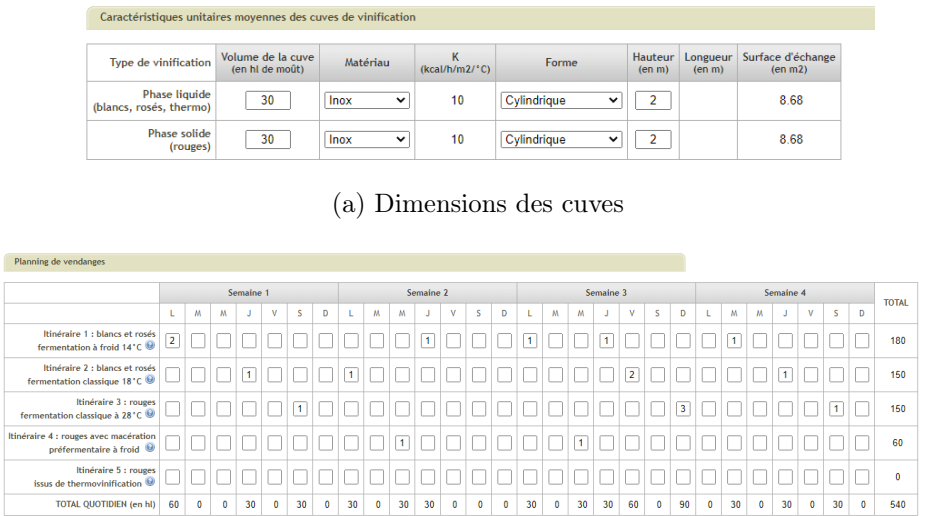
(d) Résultats cuverie bois.



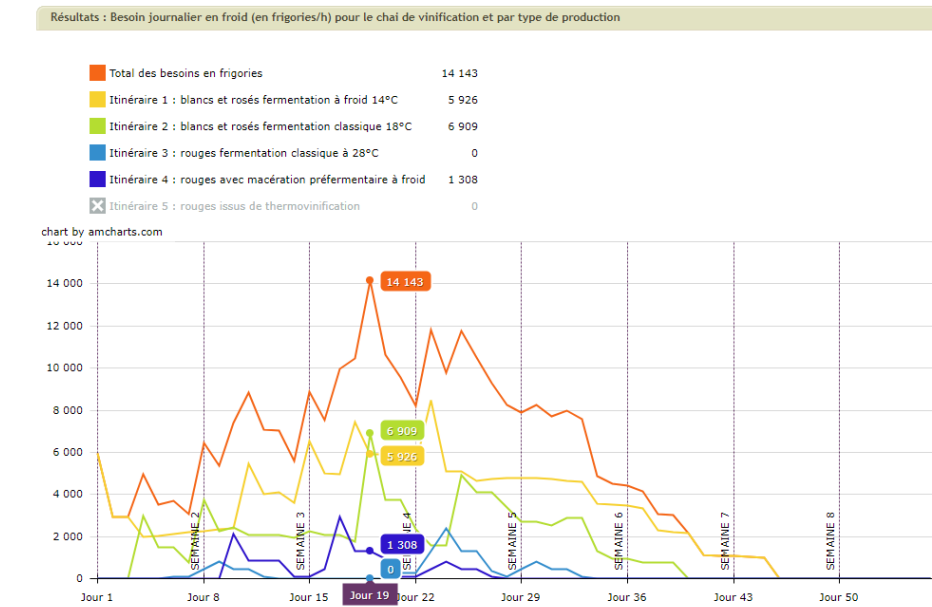
(e) Résultats cuverie béton.

FIGURE 31 – Besoins en frigorie pour une cave vinifiant 250hl

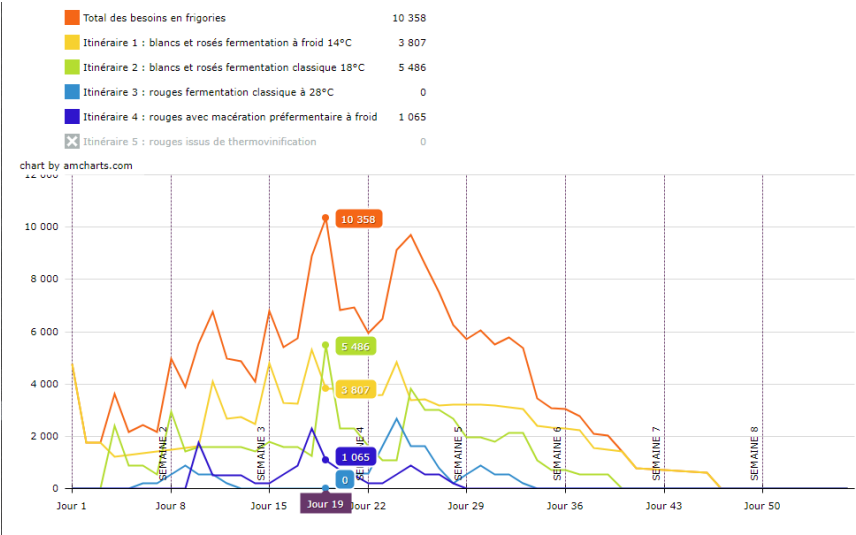
A.2.2 Production de 800hl de vin



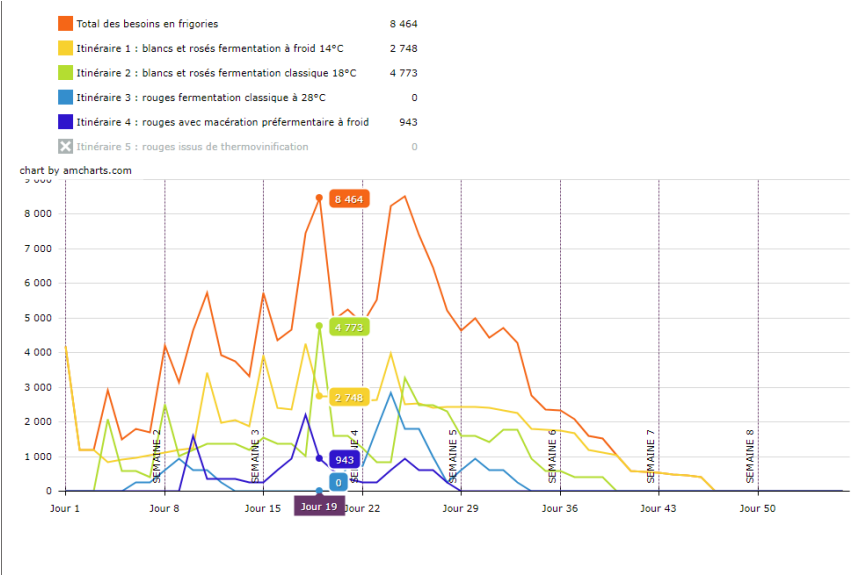
(b) Planning de la réception des vendanges



(c) Résultats cuverie inox.



(d) Résultats cuverie bois.



(e) Résultats cuverie béton.

FIGURE 31 – Besoins en frigorie pour une cave vinifiant 800hl

A.2.3 Production de 2500hl de vin

Caractéristiques unitaires moyennes des cuves de vinification

Type de vinification	Volume de la cuve (en hl de moût)	Matériau	K (kcal/h/m2/°C)	Forme	Hauteur (en m)	Longueur (en m)	Surface d'échange (en m2)
Phase liquide (blancs, rosés, thermo)	100	Inox	10	Cylindrique	3		19.42
Phase solide (rouges)	100	Inox	10	Cylindrique	3		19.42

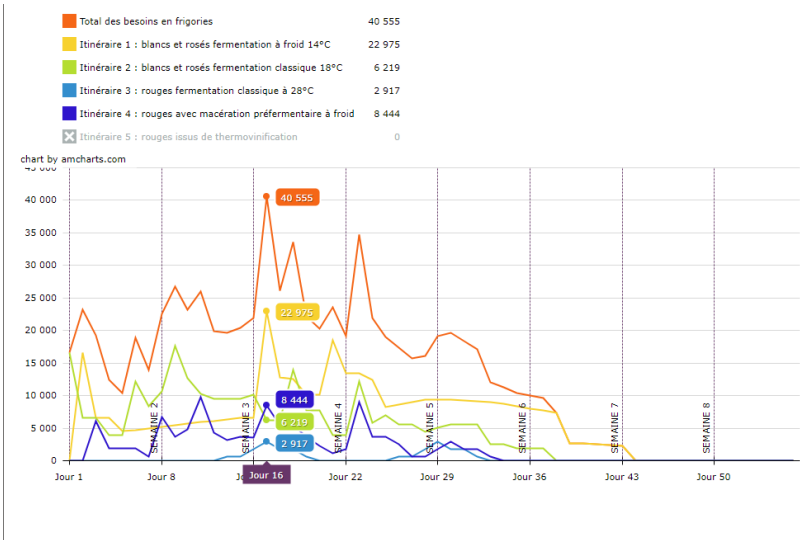
Hypothèses de calculs :

- L'outil intègre dans son calcul l'énergie nécessaire aux opérations de refroidissement, les pertes thermiques par la paroi des cuves et la chaleur générée en cours de fermentation.
- La capacité calorifique de la vendange ou du moût est assimilée à celle de l'eau (1 calorie)
- Le Titre Alcoolométrique de la vendange (TAP) utilisé pour les calculs est de 12% (202 g/l sucres)
- Les pertes thermiques au cours des opérations de refroidissement sont négligées.
- Les cuves de fermentation thermorégulées sont équipées d'un échangeur interne assurant un refroidissement en fermentation continu, 24h/24

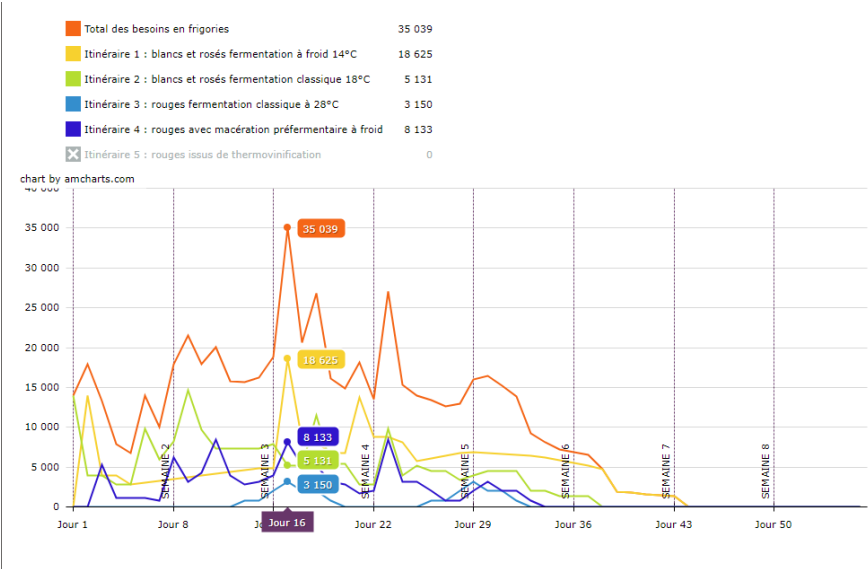
(a) Dimensions des cuves

Planning de vendanges																													
	Semaine 1							Semaine 2							Semaine 3							Semaine 4							TOTAL
	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	
Itinéraire 1 : blancs et rosés fermentation à froid 14°C 📄	☐	2	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	2	☐	☐	☐	☐	1	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	500
Itinéraire 2 : blancs et rosés fermentation classique 18°C 📄	2	☐	☐	☐	☐	1	☐	☐	1	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	1	☐	☐	☐	☐	1	☐	☐	☐	☐	☐	600
Itinéraire 3 : rouges fermentation classique à 28°C 📄	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	1	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	1	☐	☐	200
Itinéraire 4 : rouges avec macération préfermentaire à froid 📄	☐	☐	1	☐	☐	☐	☐	1	☐	☐	1	☐	☐	☐	☐	1	☐	☐	☐	☐	☐	☐	1	☐	☐	☐	☐	☐	500
Itinéraire 5 : rouges issus de thermovinification 📄	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	0
TOTAL QUOTIDIEN (en hl)	200	200	100	0	0	100	0	100	100	0	100	0	100	0	0	300	0	100	0	0	100	0	200	0	0	100	0	0	1800

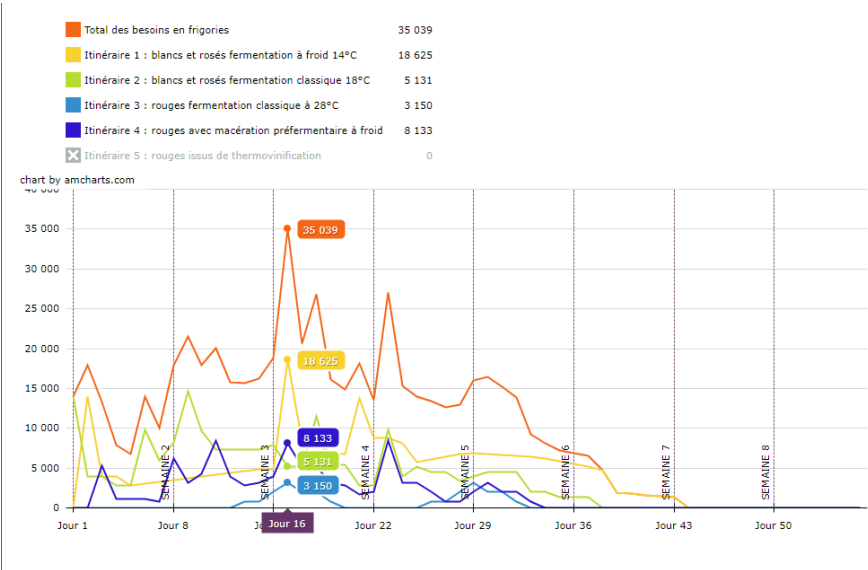
(b) Planning de la réception des vendanges



(c) Résultats cuverie inox.

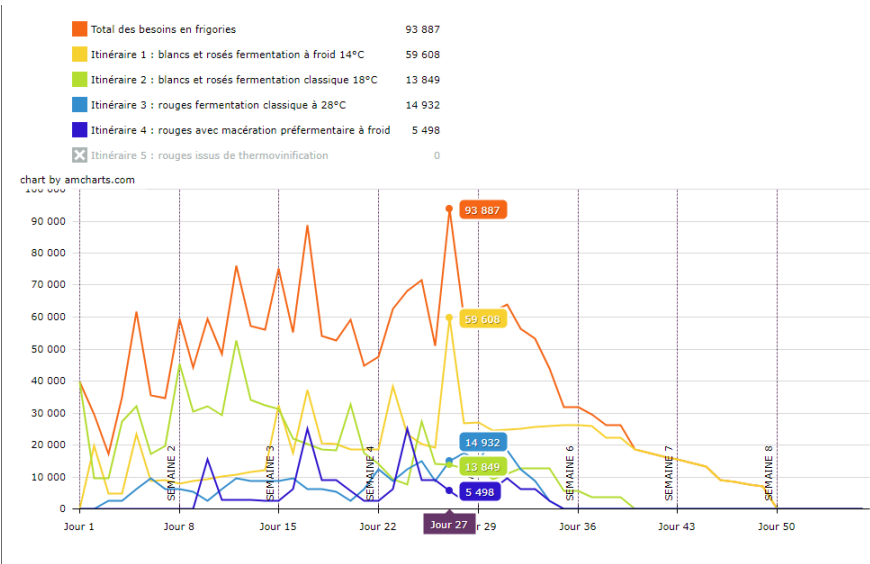


(d) Résultats cuverie bois.

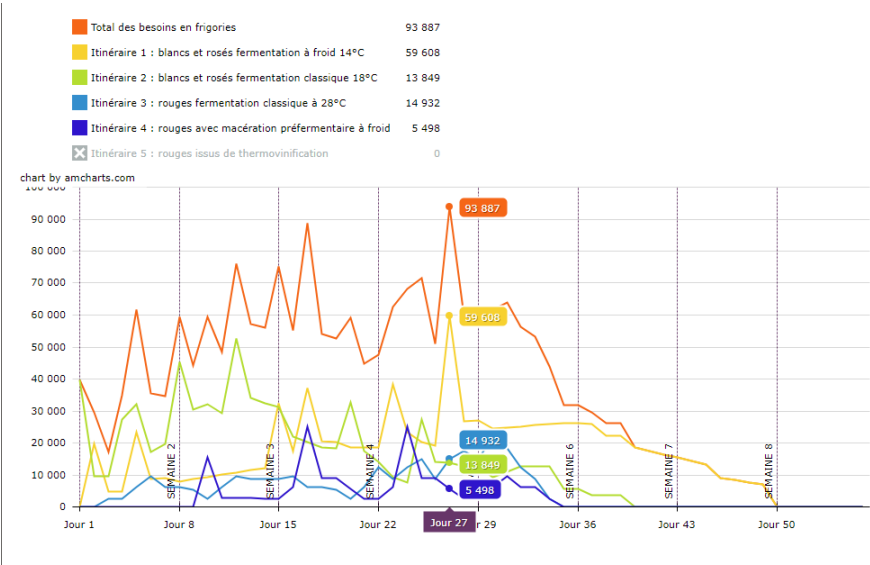


(e) Résultats cuverie béton.

FIGURE 31 – Besoins en frigorie pour une cave vinifiant 2500hl



(d) Résultats cuverie bois.



(e) Résultats cuverie béton.

FIGURE 31 – Besoins en frigorie pour une cave vinifiant 10000hl

A.2.5 Tableaux des consommations totales

Puissance FA	
Pmax (selon graphique "Résultats")	
Avec la marge due au planning des vendanges : ->8000	
7000	8,4
[frig/h]	[kW]

Énergie FM					
Échange thermique à travers une paroi inox en 1h		Échange thermique à travers une paroi bois en 1h		Échange thermique à travers une paroi béton en 1h	
$Q=k*S*\Delta T(vin-air)*\Delta temps$	$K_{inox}=10$ [kcal*h^-1*m^-2*k^-1]	$Q=k*S*\Delta T(vin-air)*\Delta temps$	$K_{bois}=7$ [kcal*h^-1*m^-2*k^-1]	$Q=k*S*\Delta T(vin-air)*\Delta temps$	$K_{béton}=4$ [kcal*h^-1*m^-2*k^-1]
140	0,161	98	0,1127	56	0,0644
[kcal]	[kWh]	[kcal]	[kWh]	[kcal]	[kWh]

(a) Puissance pour la fermentation alcoolique

(b) Puissance pour la fermentation alcoolique

Énergie stabilisation							
Énergie pour abaisser la température du vin		Échange thermique à travers une paroi inox en 1h		Échange thermique à travers une paroi bois en 1h		Échange thermique à travers une paroi béton en 1h	
$Q=m*c*\delta T$ de 10°C à 0°C pour 250hl		$Q=k*S*\Delta T(vin-air)*\Delta temps$	$K_{inox}=10$ [kcal*h^-1*m^-2*k^-1]	$Q=k*S*\Delta T(vin-air)*\Delta temps$	$K_{bois}=7$ [kcal*h^-1*m^-2*k^-1]	$Q=k*S*\Delta T(vin-air)*\Delta temps$	$K_{béton}=4$ [kcal*h^-1*m^-2*k^-1]
1046750000	293,09	700	0,805	490	0,5635	280	0,322
[J]	[kWh]	[kcal]	[kWh]	[kcal]	[kWh]	[kcal]	[kWh]

(c) Puissance pour la fermentation alcoolique

Poste de consommation	Puissance [kW]	Puissance par hl [kW/ hl]	Durée d'utilisation [h]	Consommation d'énergie [kWh/hl] Inox	Consommation d'énergie [kWh/hl] Bois	Consommation d'énergie [kWh/hl] Béton
Égrappage Foulage	4	0,4	3	1,2	1,2	1,2
Pressoir pneumatique	6	0,60	3	1,8	1,8	1,8
Groupe froid FA	2,8	0,011	720	8,1	6,5	5,6
Chauffage FM	X	X	600	1,6	1,1	0,6
Groupe froid stabilisation	X	X	1080	14,9	10,5	6,2
Pompes	2,5	0,5	7	3,5	3,5	3,5
Filtration	1	1	3	3	3	3
Stockage	3,2	0,01	400	5,1	5,1	5,1
Mise en bouteille & air comprimé	8	2,0	1	2	2	2
Production eau chaude	X	X	X	18	23	23
Éclairage Administration Autre	X	X	X	6,5	6,5	6,5
Somme	X	X	X	65,3	64,7	59,0

(d) Puissance pour la fermentation alcoolique

FIGURE 32 – Résultats pour une cave vinifiant 250hl

Puissance FA	
Pmax (selon graphique "Résultats")	
Avec la marge due au planning des vendanges : ->16000	
16000	19,2
[frig/h]	[kW]

Énergie FM					
Échange thermique à travers une paroi inox en 1h		Échange thermique à travers une paroi bois en 1h		Échange thermique à travers une paroi béton en 1h	
$Q=k*S*\Delta T(vin-air)*\Delta temps$	$K_{inox}=10$ [kcal*h^-1*m^-2*k^-1]	$Q=k*S*\Delta T(vin-air)*\Delta temps$	$K_{bois}=7$ [kcal*h^-1*m^-2*k^-1]	$Q=k*S*\Delta T(vin-air)*\Delta temps$	$K_{béton}=4$ [kcal*h^-1*m^-2*k^-1]
170	0,20	119	0,13685	68	0,0782
[kcal]	[kWh]	[kcal]	[kWh]	[kcal]	[kWh]

(a) Puissance pour la fermentation alcoolique

(b) Puissance pour la fermentation alcoolique

Energie stabilisation							
Energie pour abaisser la température du vin		Échange thermique à travers une paroi inox en 1h		Échange thermique à travers une paroi bois en 1h		Échange thermique à travers une paroi béton en 1h	
$Q=m*c*\Delta T$ de 10°C à 0°C pour 800hl		$Q=k*S*\Delta T(vin-air)*\Delta temps$	$K_{inox}=10$ [kcal*h^-1*m^-2*k^-1]	$Q=k*S*\Delta T(vin-air)*\Delta temps$	$K_{bois}=7$ [kcal*h^-1*m^-2*k^-1]	$Q=k*S*\Delta T(vin-air)*\Delta temps$	$K_{béton}=4$ [kcal*h^-1*m^-2*k^-1]
3349600000	938	850	0,98	595	0,68425	340	0,391
[j]	[kWh]	[kcal]	[kWh]	[kcal]	[kWh]	[kcal]	[kWh]

(c) Puissance pour la fermentation alcoolique

Poste de consommation	Puissance [kW]	Puissance par hl [kW/ hl]	Durée d'utilisation [h]	Consommation d'énergie [kWh/hl] Inox	Consommation d'énergie [kWh/hl] Bois	Consommation d'énergie [kWh/hl] Béton
Égrappage Foulage	4,5	0,3	3	0,9	0,9	0,9
Pressoir pneumatique	8	0,5	3	1,5	1,5	1,5
Groupe froid FA	6,4	0,008	720	5,8	5	4
Chauffage FM	X	X	600	1,3	0,9	0,5
Groupe froid stabilisation	X	X	1080	12,1	8,6	5,08
Pompes	3,5	0,35	7	2,5	2,5	2,5
Filtration	1,2	0,60	3	1,8	2	2
Stockage	6,8	0,01	400	3	3	3
Mise en bouteille & air comprimé	8	2,0	1	2,0	2	2
Production eau chaude	X	X	X	18	23	23
Éclairage Administration Autre	X	X	X	5	5	5
Somme	X	X	X	53,8	54,6	50,1

(d) Puissance pour la fermentation alcoolique

FIGURE 33 – Résultats pour une cave vinifiant 800hl

Puissance FA	
Pmax (selon graphique "Résultats")	
Avec la marge due au planning des vendanges : ->46000	
46000	55,2
[frig/h]	[kW]

Énergie FM					
Échange thermique à travers une paroi inox en 1h		Échange thermique à travers une paroi bois en 1h		Échange thermique à travers une paroi béton en 1h	
$Q=k*S*\Delta T(vin-air)*\Delta temps$	$K_{inox} = 10$ [kcal*h^-1*m^-2*k^-1]	$Q=k*S*\Delta T(vin-air)*\Delta temps$	$K_{bois} = 7$ [kcal*h^-1*m^-2*k^-1]	$Q=k*S*\Delta T(vin-air)*\Delta temps$	$K_{béton} = 4$ [kcal*h^-1*m^-2*k^-1]
380	0,437	266	0,3059	152	0,1748
[kcal]	[kWh]	[kcal]	[kWh]	[kcal]	[kWh]

(a) Puissance pour la fermentation alcoolique

(b) Puissance pour la fermentation alcoolique

Énergie stabilisation							
Energie pour abaisser la température du vin		Échange thermique à travers une paroi inox en 1h		Échange thermique à travers une paroi bois en 1h		Échange thermique à travers une paroi béton en 1h	
$Q=m*c*\Delta T$ de 10°C à 0°C pour 2500hl		$Q=k*S*\Delta T(vin-air)*\Delta temps$	$K_{inox} = 10$ [kcal*h^-1*m^-2*k^-1]	$Q=k*S*\Delta T(vin-air)*\Delta temps$	$K_{bois} = 7$ [kcal*h^-1*m^-2*k^-1]	$Q=k*S*\Delta T(vin-air)*\Delta temps$	$K_{béton} = 4$ [kcal*h^-1*m^-2*k^-1]
10467500000	2930,9	1900	2,185	1330	1,5295	760	0,874
[J]	[kWh]	[kcal]	[kWh]	[kcal]	[kWh]	[kcal]	[kWh]

(c) Puissance pour la fermentation alcoolique

Poste de consommation	Puissance [kW]	Puissance par hl [kW/ hl]	Durée d'utilisation [h]	Consommation d'énergie [kWh/hl] Inox	Consommation d'énergie [kWh/hl] Bois	Consommation d'énergie [kWh/hl] Béton
Égrappage Foulage	6	0,2	3	0,7	0,7	0,7
Pressoir pneumatique	11	0,44	3	1,3	1,3	1,3
Groupe froid FA	18,4	0,0074	720	5,3	4,2	3,7
Chauffage FM	X	X	600	0,9	0,61	0,35
Groupe froid stabilisation	X	X	1080	8,3	5,9	3,5
Pompes	5,5	0,3	7	1,9	1,9	1,9
Filtration	2,2	0,6	3	1,7	1,7	1,7
Stockage	20	0,01	400	3	3	3
Mise en bouteille & air comprimé	10	1,4	1	1,4	1,4	1,4
Production eau chaude	X	X	X	12	18	18
Éclairage Administration Autre	X	X	X	4	4	4
Somme	X	X	X	40,4	42,6	39,4

(d) Puissance pour la fermentation alcoolique

FIGURE 34 – Résultats pour une cave vinifiant 2500hl

Puissance FA	
Pmax (selon graphique "Résultats")	
Avec la marge due au planning des vendanges : ->125000	
125000	150
[frig/h]	[kW]

Énergie FM					
Échange thermique à travers une paroi inox en 1h		Échange thermique à travers une paroi bois en 1h		Échange thermique à travers une paroi béton en 1h	
$Q=k*S*\Delta T(vin-air)*\Delta teps$	$K_{inox}=10$ [kcal*h^-1*m^-2*k^-1]	$Q=k*S*\Delta T(vin-air)*\Delta teps$	$K_{bois}=7$ [kcal*h^-1*m^-2*k^-1]	$Q=k*S*\Delta T(vin-air)*\Delta teps$	$K_{béton}=4$ [kcal*h^-1*m^-2*k^-1]
960	1,104	672	0,7728	384	0,4416
[kcal]	[kWh]	[kcal]	[kWh]	[kcal]	[kWh]

(a) Puissance pour la fermentation alcoolique

(b) Puissance pour la fermentation alcoolique

Énergie stabilisation							
Energie pour abaisser la température du vin		Échange thermique à travers une paroi inox en 1h		Échange thermique à travers une paroi bois en 1h		Échange thermique à travers une paroi béton en 1h	
$Q=m*c*\Delta T$ de 10°C à 0°C pour 10000hl		$Q=k*S*\Delta T(vin-air)*\Delta teps$	$K_{inox}=10$ [kcal*h^-1*m^-2*k^-1]	$Q=k*S*\Delta T(vin-air)*\Delta teps$	$K_{bois}=7$ [kcal*h^-1*m^-2*k^-1]	$Q=k*S*\Delta T(vin-air)*\Delta teps$	$K_{béton}=4$ [kcal*h^-1*m^-2*k^-1]
10467500000	2930,9	4800	5,52	3360	3,864	1920	2,208
[J]	[kWh]	[kcal]	[kWh]	[kcal]	[kWh]	[kcal]	[kWh]

(c) Puissance pour la fermentation alcoolique

Poste de consommation	Puissance [kW]	Puissance par hectolitre [kW/ hl]	Durée d'utilisation [h]	Consommation d'énergie [kWh/hl] Inox	Consommation d'énergie [kWh/hl] Bois	Consommation d'énergie [kWh/hl] Béton
Égrappage Foulage	8	0,2	3	0,5	0,5	0,5
Pressoir pneumatique	14	0,3	3	0,8	0,8	0,8
Groupe froid FA	50	0,005	720,0	4	3	3
Chauffage FM	X	X	600	0,7	0,5	0,29
Groupe froid stabilisation	X	X	1080	6,7	4,7	2,6
Pompes	9	0,1	7	0,6	0,6	0,6
Filtration	3	0,3	3	0,9	1	1
Stockage	50	0,01	400	2	2	2
Mise en bouteille & air comprimé	18	0,9	1	0,9	0,9	0,9
Production eau chaude	X	X	X	12	18	18
Éclairage Administration Autre	X	X	X	3	3	3
Somme	X	X	X	31,5	34,4	31,8

(d) Puissance pour la fermentation alcoolique

FIGURE 35 – Résultats pour une cave vinifiant 10000hl

Processus	Avant la mesure	Après la mesure
Fermentation alcoolique (FA)	Utilisation du groupe froid 24/24	Utilisation du groupe froid 18/24
Stabilisation	Température initiale du liquide 10°C ΔT (pièce-liquide) 10°C	Température initiale du liquide 5°C ΔT (pièce-liquide) 5°C
Stockage	Utilisation du groupe froid 400 heures	Utilisation du groupe froid 300 heures

TABLE 34 – Hypothèses faites pour évaluer le potentiel de la mesure

A.4 Évaluation énergétique des mesures

A.4.1 Free-Cooling

L'énergie étant proportionnelle au temps d'utilisation, si ce dernier est réduit d'un certain facteur, l'énergie consommée l'est aussi. L'utilisation du groupe froid durant 18 heures par jour au lieu de 24 représente donc une diminution de 25% de la consommation.

Pour la stabilisation la température du liquide souhaitée est toujours de 0°C (cf. section 4.2.3), la température initiale et le ΔT ayant été divisé par 2 les besoins de froid sont donc divisés par le même facteur. La réduction de consommation pour la phase de stabilisation est donc de 50%.

Processus	Réduction
FA	25%
Stabilisation	50%
Stockage	25%

Impact sur la consommation totale par hectolitre produit.

Volume [hl]	$W_{Éco. cuve inox}$ [kWh/hl]	$W_{Éco. cuve bois}$ [kWh/hl]	$W_{Éco. cuve béton}$ [kWh/hl]
250	9	6.5	4.5
800	7.1	5.3	3.5
2500	5.1	4	2.7
10000	3.9	2.9	1.9

TABLE 35 – Nombre de kilowattheures économisés grâce à la mesure

A.4.2 Isolation des conduites

- Tube en acier inox non isolé
 - $\Delta T = 10^{\circ}C$
 - $\alpha_{acier} = 13[\frac{W}{m^2K}]$ (Coef. de transfert de chaleur par convection et rayonnement. Source : [htt](#)
 - e_{tube} = épaisseur du tube
- Tube en acier inox isolé avec mousse polyuréthane
 - $\Delta T = 10^{\circ}C$
 - $\lambda_{isolation} = 0.03[\frac{W}{m^2K}]$
 - $\alpha_{isolation} = 7.5[\frac{W}{m^2K}]$

Dimension des tubes considérés pour les différentes tailles de caves

- 250hl et 800hl
Sans isolation : Tube DN25 $D_{int} = 26mm$ $D_{ext} = 34mm$
 $e_{isolation} = 50mm$
- 2500hl et 10000
Sans isolation : Tube DN40 $D_{int} = 40mm$ $D_{ext} = 49mm$
 $e_{isolation} = 60mm$

L'équation suivante met en relation la puissance perdue par conduction et par convection pour un tube de 1 mètre de longueur.

$$P_{perdue} = \Delta T * \pi * \frac{(D_{ext} + 2 * e_{Tube})}{1000} * \left(\ln \left(\frac{(D_{ext} + 2 * e_{Tube})}{D_{ext}} \right) * \left(\frac{(D_{ext} + 2 * e_{Tube})}{2000 \lambda} \right) + \frac{1}{\alpha_{acier}} \right)^{-1}$$

Dans le cas ou le tube n'est pas isolé son épaisseur peut être négligée et l'équation simplifiée.

Tube de 34mm de diamètre extérieur

$$P_{perdu \text{ acier}} = \Delta T \alpha_{acier} * \frac{\pi * D_{ext}}{1000} = 10 * 13 * \frac{\pi * 34}{1000} = 13.9W/m$$

Tube de 49mm de diamètre extérieur

$$P_{perdu \text{ acier}} = \Delta T \alpha_{acier} * \frac{\pi * D_{ext}}{1000} = 10 * 13 * \frac{\pi * 49}{1000} = 20W/m$$

(26)

Le tableau suivant indique l'économie d'énergie possible par mètre de tube isolé pour un temps de fonctionnement estimé à 2800h par an.

Volume [hl]	$e_{isolation}$ [mm]	$P_{perdue \text{ tube acier}}$ [W/m]	$P_{perdue \text{ tube isolé}}$ [W/m]	$W_{écono. \text{ par mètre}}$ [kWh/m]
250 et 800	50	13.9	1.3	35.5
2500 et 10000	60	20	1.47	52

TABLE 36 – Nombre de kilowattheures économisés par mètre de conduite isolée

L'équation ne peut par contre pas être simplifiée en cas d'ajout d'isolation, car le l'épaisseur du tube comprend également l'épaisseur d'isolation.

Tube de 34mm de diamètre extérieur

$$P_{perdue \text{ isolation}} = 10 * \pi * \frac{(32 + 2 * 50)}{1000} * \left(\ln \left(\frac{(32 + 2 * 50)}{32} \right) * \left(\frac{(32 + 2 * 50)}{2000 * 0.03} \right) + \frac{1}{7.5} \right)^{-1} = 1.3W/m$$

Tube de 49mm de diamètre extérieur

$$P_{perdue \text{ isolation}} = 10 * \pi * \frac{(49 + 2 * 60)}{1000} * \left(\ln \left(\frac{(49 + 2 * 60)}{32} \right) * \left(\frac{(49 + 2 * 60)}{2000 * 0.03} \right) + \frac{1}{7.5} \right)^{-1} = 1.46W/m$$

(27)

A.4.3 Remplacement du chauffe-eau électrique

La quantité d'eau nécessaire à la production de 1 hectolitre de vin a été estimée à 500 litres, dont 300 devant être chauffés pour des caves de petite taille avec une cuverie inox, ces valeurs prennent en compte tous les besoins, de la réception des vendanges jusqu'à la mise en bouteille. La cuverie a une influence sur la quantité d'eau

nécessaire au nettoyage, car les matériaux utilisés le rendent plus ou moins compliqué, le volume vinifié influence également la quantité d’eau consommée. En annexe des tableaux utiles du site [matevi-france https://www.matevi-france.com/](https://www.matevi-france.com/) reprennent les caractéristiques des différents types de cuves.

- Pour des volumes allant jusqu’à 800hl
 - 300 litres d’eau chaude nécessaire par hectolitre de vin pour des cuves en inox
 - 400 litres d’eau chaude nécessaire par hectolitre de vin pour des cuves en bois et en béton
- Pour des volumes plus grands que 800hl
 - 200 litres d’eau chaude nécessaire par hectolitre de vin pour des cuves en inox
 - 300 litres d’eau chaude nécessaire par hectolitre de vin pour des cuves en bois et en béton

Les calculs suivants estiment l’économie d’énergie générée par cette mesure en prenant un coefficient de performance moyen de 2 et une augmentation de la température de l’eau de 50°C. Le coefficient pris est plus bas, car dans un chai il est probable que la température de la pièce où se situe le boiler ne soit par aussi élevée et stable que dans une maison.

Pour des volumes allant jusqu’à 800hl avec cuve inox :

$$Q_{therm.} = m_{eau} * Cp_{eau} * \Delta T = 300 * 4187 * 50 = 62805000[joules]$$
$$Q_{therm. \text{ en } kWh} = Q_{therm.} * 2,8 * 10^{-7} = 18kWh$$
$$Q_{elec. \text{ avec chauffe-eau thermodynamique}} = \frac{Q_{therm. \text{ en } kWh}}{2} = \frac{18}{2} = 9kWh$$
$$Q_{économisés} = Q_{therm. \text{ en } kWh} - Q_{elec. \text{ avec chauffe-eau thermodynamique}} = 9kWh \quad (28)$$

Quantité vinifiée [hl]	Kilowattheures économisés	
	Cuverie inox [kWh/hl]	Cuverie bois et béton [kWh/hl]
250 et 800	9	12
2500 et 10000	6	9

TABLE 37 – Économie d’énergie envisageable pour la mesure de remplacement du boiler par un chauffe-eau avec PAC intégré

A.4.4 Remplacement des moteurs de ventilation

Les moteurs de ventilation utilisés dans les caves visités étaient de petites puissances, de 100W à 500W, et le nombre installé par pièce était compris entre 1 et 3, il est difficile à dire si ces valeurs sont valables pour toutes les caves, car les installations sont propres à chaque chai.

Pour pouvoir tout de même évaluer un potentiel d’économie d’énergie, des valeurs se basant sur le tableau de rendements provenant de topmotors ont été prises et des extrapolations sur les puissances pouvant être installées ont été faites.

- Le nombre d’heures de fonctionnement des moteurs est de 3500h par an
- 250hl : $P_{installée} = 4x250W$
- 250hl : $P_{installée} = 5x500W$
- 250hl : $P_{installée} = 8x625W$
- 250hl : $P_{installée} = 12x750W$

Les calculs sont effectués pour la typologie de plus petite taille (250hl) et pour le remplacement d’un moteur de classe énergétique IE1 par un IE3.

$$Pertes_{IE1} = P_{installée} * t * (1 - \eta_{IE1}) = 4 * 0.25 * 3500 * (1 - 0.615)$$
$$= 1347.5 kWh$$

$$Pertes_{IE3} = P_{installée} * t * (1 - \eta_{IE3}) = 4 * 0.25 * 3500 * (1 - 0.735)$$
$$= 927 kWh$$

$$W_{économisée \text{ par } hl} = \frac{Pertes_{IE1} - Pertes_{IE3}}{hl_{vini\grave{f}.}} = \frac{1347.5 - 927.5}{250} = 1.68 kWh$$

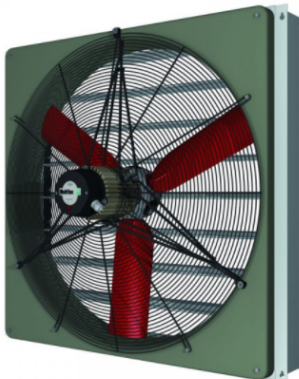
Volume	$W_{\acute{E}co.}$ entre IE1 et IE3	$W_{\acute{E}co.}$ entre IE2 et IE3	$W_{\acute{E}co.}$ entre IE1 et IE4	$W_{\acute{E}co.}$ entre IE2 et IE4
[hl]	[kWh/hl]	[kWh/hl]	[kWh/hl]	[kWh/hl]
250	1.7	0.7	2.3	1.3
800	1.4	0.5	1.8	0.9
2500	0.75	0.25	1	0.5
10000	0.35	0.1	0.45	0.2

TABLE 38 – Nombre de kilowattheures pouvant être économisés par hectolitre en remplaçant les moteurs des ventilations

A.5 Évaluation économique des mesures

A.5.1 Free-Cooling

Siepmann Ventilateur pour grandes pièces 400V



(a)

Informations sur le produit "Ventilateur pour grandes pièces 400V"

- Grands débits d'air
- Stabilité à haute pression
- Entraînement direct (sans courroie trapézoïdale)
- Grille de protection et capuchon de fermeture compris
- Non réglable
- 400 V / 37,7 W

(b)

Source : <https://www.hauptner.ch/fr/detail/index/sArticle/82613>

FIGURE 36 – Ventilateur pour grande pièce

A.5.2 Stockage du froid

Liste de prix : <https://asb-drives.eu/equipment/price.php?section=246>
Tarifs électricité SIG 2021 : https://media.sig-ge.ch/documents/tarifs_reglements/electricite/tarifs/tarifs_electricite_tous_clients.pdf

Réservoir tampon eau glacée

08 Boilers - accumulateurs - chauffe-eaux > Accumulateurs eau glacée



* = article non tenu de stock

Code article	Description	Remise	Colisage	Unité	Prix brut
BOI-150-TAMFROID	Réservoir tampon eau glacée Charot TAMFROID 150 litres - 4 bars*	R00	1	Pièce	1008,0000
BOI-300-TAMFROID	Réservoir tampon eau glacée Charot TAMFROID 300 litres - 4 bars*	R00	1	Pièce	1103,0000
BOI-500-TAMFROID	Réservoir tampon eau glacée Charot TAMFROID 500 litres - 4 bars*	R00	1	Pièce	1273,0000
BOI-750-TAMFROID	Réservoir tampon eau glacée Charot TAMFROID 750 litres - 4 bars*	R00	1	Pièce	1472,0000
BOI-1000-TAMFROID	Réservoir tampon eau glacée Charot TAMFROID 1000 litres - 4 bars*	R00	1	Pièce	1762,0000
BOI-1500-TAMFROID	Réservoir tampon eau glacée Charot TAMFROID 1500 litres - 4 bars*	R00	1	Pièce	2255,0000
BOI-2000-TAMFROID	Réservoir tampon eau glacée Charot TAMFROID 2000 litres - 4 bars*	R00	1	Pièce	2909,0000
BOI-2500-TAMFROID	Réservoir tampon eau glacée Charot TAMFROID 2500 litres - 4 bars*	R00	1	Pièce	3588,0000

Source : <https://moulan.catbuilder.info/contents/fr/accumulateurs-eau-glancee-reservoir-tampon-eau-glancee.asp>

FIGURE 37 – Variateur de fréquence pour groupe froid

A.5.3 variateur de fréquence



Économies d'énergie et allongement de la durée de vie des applications de réfrigération

Le VLT® Refrigeration Drive FC 103 est conçu pour favoriser une réduction significative des coûts du cycle de vie de vos systèmes de réfrigération. Il offre des caractéristiques améliorant l'efficacité et la fiabilité, des fonctions de contrôle de process intégrées et un environnement de mise en service spécialement conçus pour répondre aux besoins des applications de réfrigération. Il est également doté d'un assistant de configuration qui utilise des termes courants en réfrigération. Cela facilite la tâche des techniciens et des installateurs frigoristes lors de l'installation et de la mise en service.

Source : <https://www.danfoss.com/fr-fr/products/dds/low-voltage-drives/vlt-drives/vlt-refrigeration-drive-fc-103/#tab-overview>

FIGURE 38 – Ballon de stockage pour eau glacée

A.5.4 fluide

GAZ RS-50 (R442A)

Substitut du R404A, R507 et R22 : le RS-50 (R442A)

La nouvelle F-GAS 2014 est voté, elle interdira en 2020 l'utilisation en maintenance du R404A car son GWP est supérieur à 2500.

Mais cette contrainte législative va être bénéficière économiquement à tous les utilisateurs.

En changeant dès aujourd'hui le R404A par le RS-50 (R442A) :

- rendement énergétique augmente jusqu'à 33% de COP
- la capacité frigorifique augmente jusqu'à 42%
- le retour d'huile est amélioré.

l'amortissement de la charge se fait généralement en moins d'un an, et c'est tous les ans 20 à 30% de consommation électrique en moins !

C'est la première fois que client peut avoir un retour sur investissement sur un rétrofit, en plus de conserver son installation.

AVANTAGES :

Conserve l'installation actuelle au R404A

Même huiles POE et mêmes joints

Excellent retour d'huile / miscibilité des huiles,

Capacité frigorifique supérieure jusqu'à 49%

Augmentation du COP jusqu'à 42%

Economie d'énergie mesurée moyenne de 30%

Baisse du PRG de -52%

- (1888 selon GIEC-4 de 2007 base F-Gas)
- (1719 selon rapport GIEC-5 de 2013)

Idéal en réfrigération positive et négative.

Remplace aussi le R22 et ses substituts (si huile POE).

Prix proche du R410A/R134a donc bien inférieur au R404A

Disponible en grande quantité.

testé : en cas de fuites répétés, conserve les performances énergétiques des installations. Aucun changement significatif n'est démontré sur de nombreux test effectués.

INCONVENIENTS :

Adapter le détendeur au débit massique inférieur de 40%.

léger Glissement à intégré lors de la surchauffe.

Vérifier la température de refoulement en basse température.

Caractéristiques techniques

Code	App./T°	Type	GWP PRG	Glisst.	Capacité Frig. Clim	Capacité Frig.	COP	Condit°. (kg)	Fin rx Equipt.	Fin maintenance	Huile Compat.
R442A	RS-50 Substitut du R404A&R507 R22 H/M/B	HFC	1888	4,6		1477	1,94	R-32/31% R125/31% R134a/30% R152a/3% R227ea/ 5%	aucune (sauf GMS)	aucune	POE

Source : <https://www.framacold.com/fluide-frigorigene/substitut-gaz-refrigerant-fiche.php?id=15>

FIGURE 39 – Caractéristiques du fluide RS-50

Références

- [1] ADEME. *Fiche technique : Condenseurs de groupes froids*. URL : https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/condenseur_fiche-technique-integration-dans-industrie-2018.pdf.
- [2] Sarah Wettstein ; Matthias Stucki ; Matthias Meier ; Peter Schumacher ; Jürg Buchl ; Zürcher Hochschule für ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN ZHAW ; FORSCHUNGSINSTITUT FÜR BIOLOGISCHEN LANDBAU FiBL. « Ökobilanz von Schweizer Wein aus ÖLN - und biologischer Produktion ». In : (2016), p. 114. URL : <https://www.zhaw.ch/en/research/research-database/project-detailview/projektid/1731/>.
- [3] Chambre d'agriculture de BOURGOGNE. « Etat des lieux des consommations d'eau et d'énergie dans les chais ». In : (2012).
- [4] Guillaume Massard DAVID ROCHAT Ana Carvalho. « Performance environnementale des produits " vin rouge " et "tomate " à Genève ». In : (2009). URL : <https://www.ge.ch/document/2268/telecharger>.
- [5] Secteur Produits végétaux ELODIE COMBY OFAG. *Rapport agricole 2020*. <https://www.agrarbericht.ch/fr/marche/produits-vegetaux/vin.2020>.
- [6] ENERGIEPLUS-LESITE.BE. *Mettre en place un stockage d'énergie frigorifique*. URL : https://energieplus-lesite.be/concevoir/climatisation3/choisir-la-production-de-froid/mettre-en-place-un-stockage-d-energie-frigorifique-d1/#Choix_entre_les_différentes_technologies.
- [7] Carmen FERRARA et Giovanni DE FEO. « Life Cycle Assessment Application to the Wine Sector : A Critical Review ». In : *Sustainability* 10.2 (2018). ISSN : 2071-1050. DOI : 10.3390/su10020395. URL : <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/2/395>.
- [8] Joaquin FUENTES-PILA et al. « Best Practices for Improving Energy Efficiency (in agro-industries) ». In : (nov. 2015).
- [9] SI GENÈVE. URL : <https://ww2.sig-ge.ch/particuliers/offres/eau/composition-tarifs>.
- [10] Laure Van GYSEL. « Les impacts environnementaux en œnologie et les moyens d'action pour les réduire ». In : (2017). URL : http://www.oenoflair.ch/sites/default/files/pdf/n87_dossier_vert.pdf.
- [11] Nicolas Metayer JEAN-LUC BOCHU Charlotte Bordet. « REFERENCES PLANETE 2010 Fiche 6 – Production « Viticulture » ». In : (2011). URL : https://solagro.org/images/imagesCK/files/publications/f50_6viti.pdf.
- [12] Technical University of MADRID. « Current process description Wineries ». In : (nov. 2013). URL : <http://teslaproject.chil.me/download-doc/63247>.
- [13] Herrman Hoepke Institute for Life Sciences MDIPL.-ING. (FH) LUDGER NUPHAUS Technische Hochschule Bingen et AFC International (Bonn) ENIGNEERING. *Reduktion des Verbrauchs von Wasser und Energie*. https://psd-tvet.de/wp/?page_id=471. 2016.
- [14] Florent MORANDI. *Répertorier et analyser les applications d'écoconception de caves suisses*. 2014.
- [15] Belmira NETO, Ana DIAS et Marina MACHADO. « Life cycle assessment of the supply chain of a Portuguese wine : From viticulture to distribution ». In : *The International Journal of Life Cycle Assessment* 18 (mar. 2013), p. 590. DOI : 10.1007/s11367-012-0518-4.
- [16] VITIVAL PIERRE-JEAN DUC Amstein+Walthert Sion. *Utilisation raisonnée de l'énergie et de l'eau dans une cave*. 2012.

- [17] Programme SUISSEENERGIE. « Guide des fluides frigorigènes ». In : (2020). URL : <https://pubdb.bfe.admin.ch/fr/publication/download/8710>.
- [18] SWISSWINE.CH. *chiffres clés*. <https://swisswine.ch/fr/vignoble/chiffres-cles>. 2019.
- [19] VAREEDIA. *Analyse technico-économique des solutions de récupération de chaleur identifiées*. URL : <http://www.actalia.eu/wp-content/uploads/2016/01/Analyse-des-solutions-technologiques-.pdf>.
- [20] Raquel VELA et al. « Improved energy efficiency in wineries using data from audits ». In : *Ciência e Técnica Vitivinícola* 32 (jan. 2017), p. 62-71. DOI : 10.1051/ctv/20173201062. URL : http://oa.upm.es/49083/1/INVE_MEM_2017_267603.pdf.