



Audits énergétiques : levier pour l'efficacité énergétique

Patricia THAMON & Radhouan TLILI

RESTREINT

INTERNE

SECRET

Plan

1. Exemple d'audit utilité : amélioration de l'efficacité énergétique d'une centrale de production de froid industriel

- Présentation de la centrale de froid
- Collecte, mesures et analyse des données
- Présentation des solutions d'optimisations & outil d'aide à la décision
- Suivi des performances

2. Exemple d'audit d'un site industriel

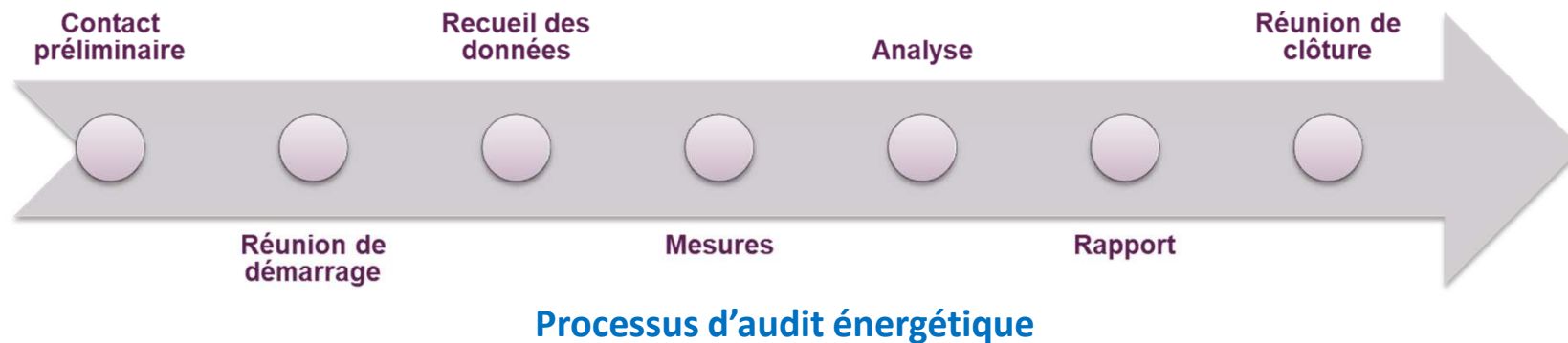
- Présentation du synoptique de production
- Analyse de la consommation énergétique
- Présentation des solutions d'optimisations
- Mise en place d'un plan de comptage et d'un tableau de bord

L'audit énergétique



Etude d'aide à la décision permettant de :

- ✓ Réaliser un bilan chiffré et détaillé des consommations et dépenses énergétiques de l'entreprise
- ✓ Répartir de façon optimale les consommations et les coûts des différentes énergies
- ✓ Prendre en compte, le coût énergétique dans sa comptabilité analytique (ex : connaissance du coût énergétique des produits fabriqués)
- ✓ Étudier la faisabilité technique et économique de solutions d'amélioration.



L'audit énergétique

Le processus



- Attentes du client (les objectifs; le domaine d'application et le périmètre ...)
- Le contexte de l'audit énergétique
- Engagement du client

Se mettre d'accord sur les objectifs de l'audit énergétique . L'adapter aux besoins, au contexte et aux contraintes de l'entreprise auditée.

- L'auditeur énergétique doit convenir avec l'organisme du champ d'application et de la limite de l'audit énergétique :
 - Les procédés inclus dans l'audit énergétique
 - Si les utilités fournies par des prestataires sont inclus dans l'audit énergétique
 - En fonction du degré d'approfondissement, il est recommandé de vérifier si un audit énergétique détaillé doit être effectué pour des procédés spécifiques. Dans ce cas une référence doit être faite à la norme applicable.

Exemples :

- ISO 14414, Évaluation énergétique des systèmes de pompage
- ISO 11011, Air comprimé – Efficacité énergétique – Évaluation

L'audit énergétique

Le processus



- Information des parties intéressées
 L'auditeur énergétique doit demander à l'organisme :
 - de désigner **le responsable de l'audit énergétique** en son sein ;
 - d'informer les personnels concernés sur les éventuelles obligations leur incombant à ce propos ;

- Modalités pratiques de l'audit énergétique
 - les accès aux locaux ; les règles de sécurité ; ...

▲
 S'organiser pour lancer un audit énergétique efficace en s'appuyant sur les personnes de l'entreprise , en disposant des moyens nécessaires

L'audit énergétique

Le processus



Historique de l'usage de l'énergie et contexte actuel

- la liste des équipements, processus et systèmes consommateurs d'énergie ;
- les données historiques ;
 - la consommation énergétique ;
 - les facteurs d'ajustement ;
 - les mesures associées correspondantes ;
- l'historique d'exploitation

Collecter les données, les vérifier et les compléter par le travail sur site

- L'auditeur énergétique doit demander les informations suivantes à l'organisme :
 - sur le site ;
 - sur les procédés de fourniture des utilités ;
 - sur les procédés de fabrication :
 - les caractéristiques et la qualité des produits ;
 - les conditions de fonctionnement actuelles (points de réglages) des procédés de fourniture des utilités et des produits ;
 - les conditions spécifiques et les contraintes pour les procédés et l'environnement (sécurité, pollution, hygiène, etc.).

L'audit énergétique

Le processus



- **Identifier et évaluer les possibilités d'amélioration de l'efficacité énergétique**

- réduction ou récupération des pertes en énergie
- remplacement, modification ou ajout d'équipements
- fonctionnement plus efficace et optimisation continue
- amélioration de la maintenance

- déploiement de programmes destinés à changer les comportements

- amélioration du management de l'énergie

L'audit énergétique

Le processus



Contenu du rapport

- le document de synthèse
- l'historique
- l'audit énergétique
- les opportunités d'amélioration de l'efficacité énergétique
- les hypothèses utilisées pour les calculs
- les conclusions

Observations sur :

- la cohérence et la qualité des données
- la justification des mesures
- les difficultés rencontrées

Conclusions de l'audit énergétique avec hiérarchisation des opportunités d'amélioration

L'audit énergétique

Le processus



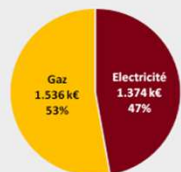
À la réunion de clôture, l'auditeur énergétique doit :

- ✓ remettre le rapport de l'audit énergétique ;
- ✓ présenter les résultats de l'audit énergétique de manière à faciliter les prises de décision de l'organisme ;
- ✓ être en mesure d'expliquer les résultats.

Identifier le degré d'approfondissement nécessaire...

Niv. 1

Cartographie : Facture énergétique



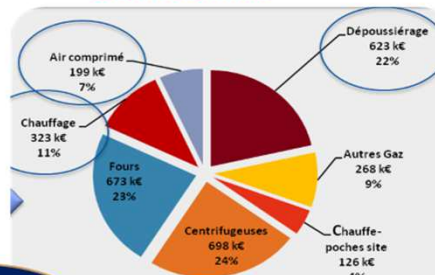
TOTAL 2 910 k€/an

- Electricité : 19,8 GWh
- Gaz : 47,1 GWh pcs

Source : Suivi des consommations Electricité et Gaz - Facturé



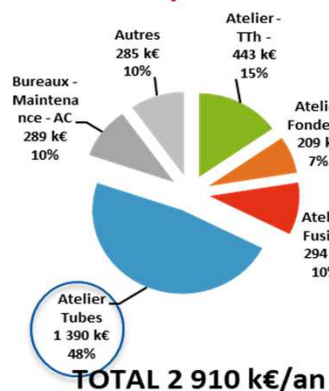
Cartographie : Utilités et groupes de machine



TOTAL 2 910 k€/an

Niv. 2

Cartographie : Ateliers et périmètres de responsabilités



TOTAL 2 910 k€/an

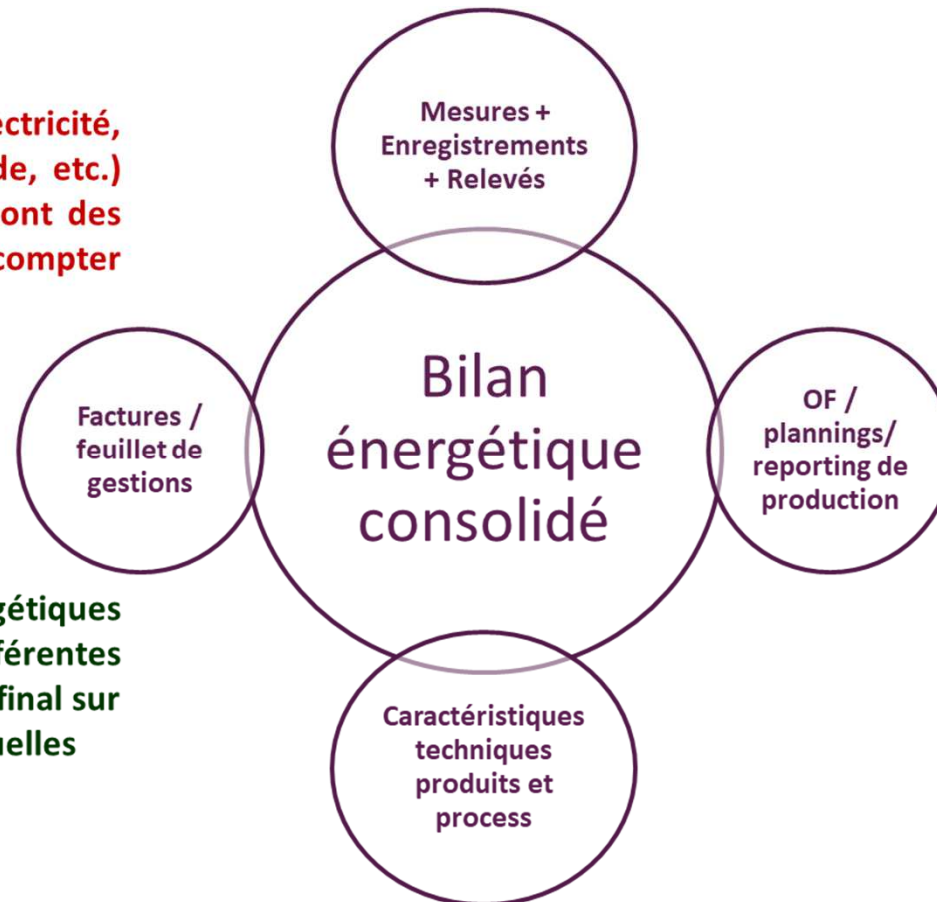


Niv. 3



Méthodologie pour réaliser le bilan énergétique consolidé

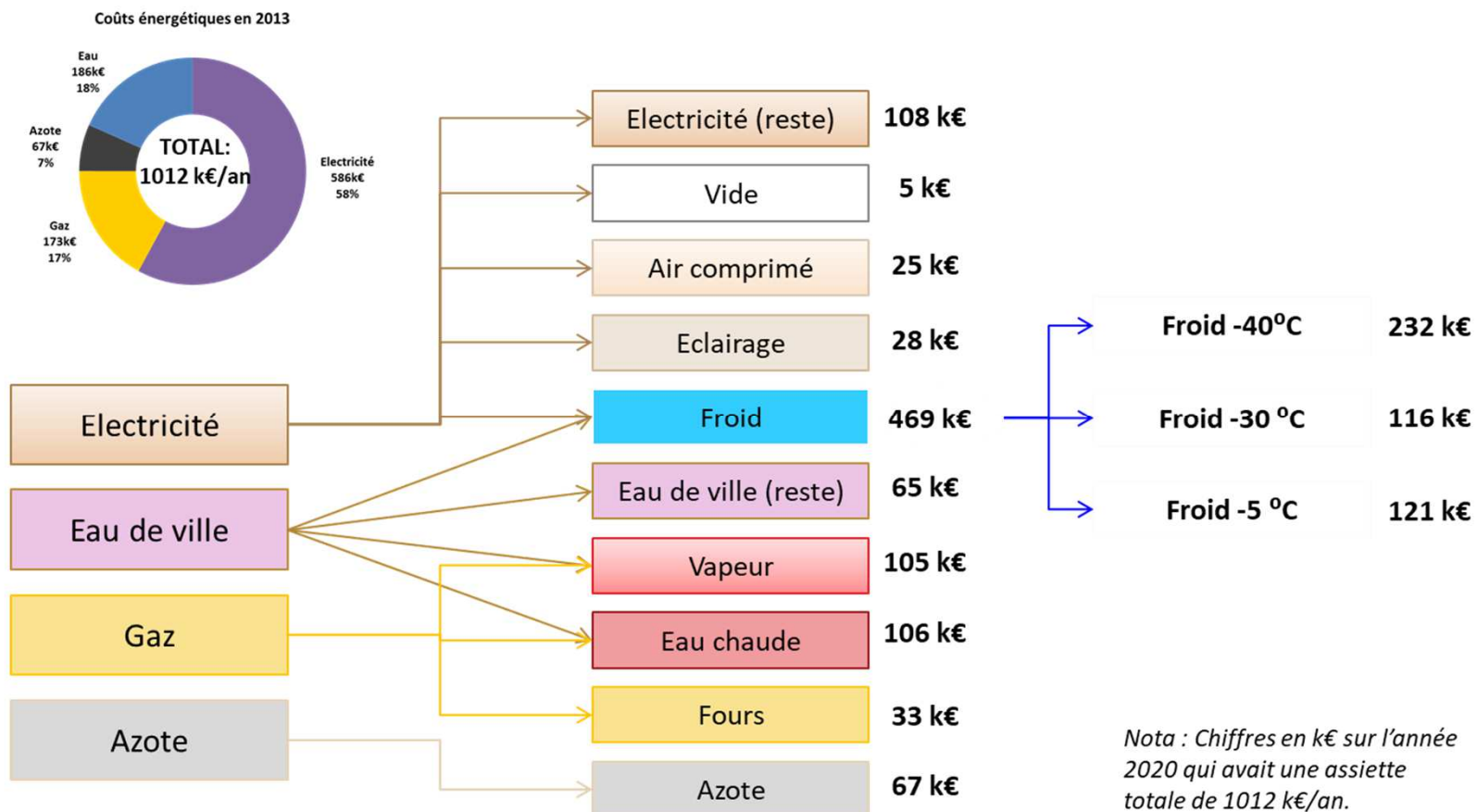
L'énergie (gaz, vapeur, électricité, chaleur, froid, air comprimé, vide, etc.) est difficile à quantifier car ce sont des grandeurs que l'on ne peut pas compter visuellement



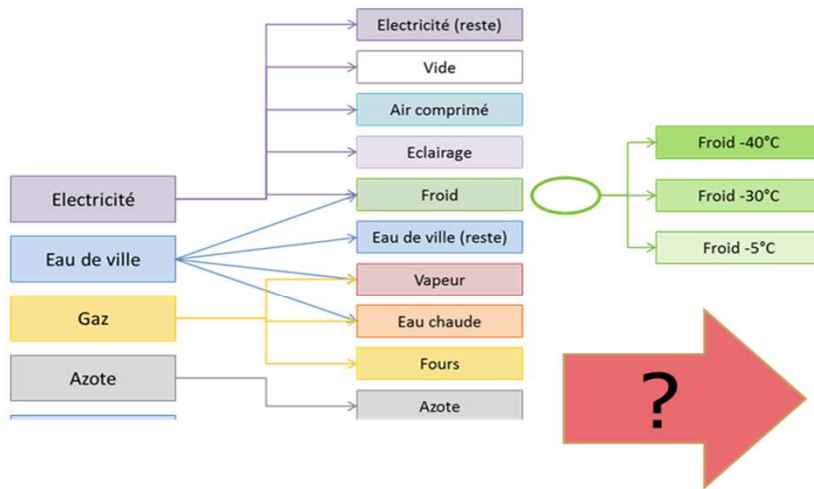
→ Evaluer ces grandeurs énergétiques en les calculant de différentes manières et en consolidant au final sur les factures mensuelles et annuelles

Construction du bilan énergétique

La cartographie énergétique appliquée aux utilités

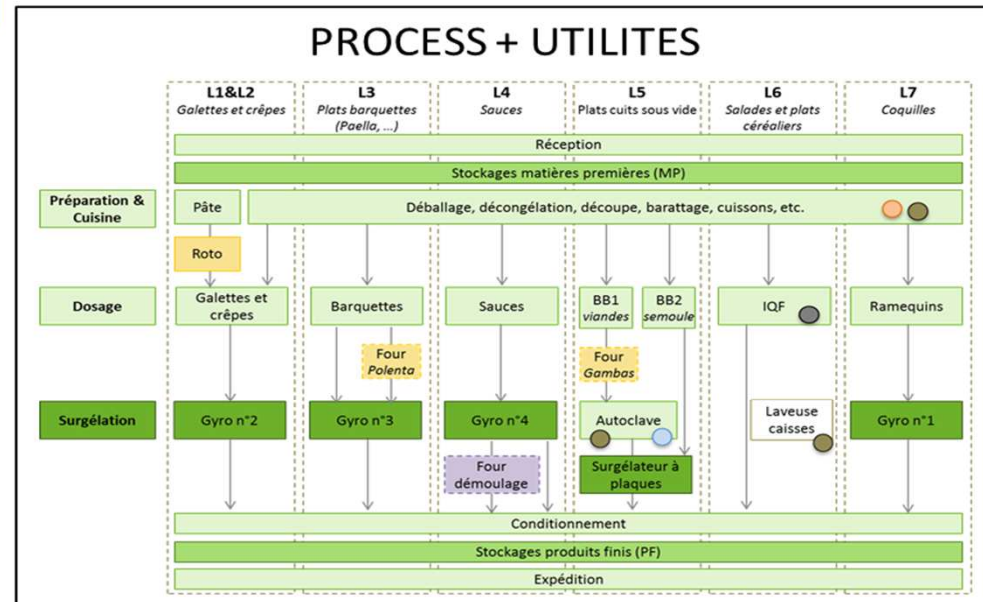


Construction du bilan énergétique



La répartition des consommations par ligne de production a été consolidée grâce à :

- des analyses de corrélations entre le planning journalier de production et les consommations associées
- l'analyse statistique a été challengée en regard des puissances installée et mesurée pondérées par un temps d'ouverture de chacune des lignes

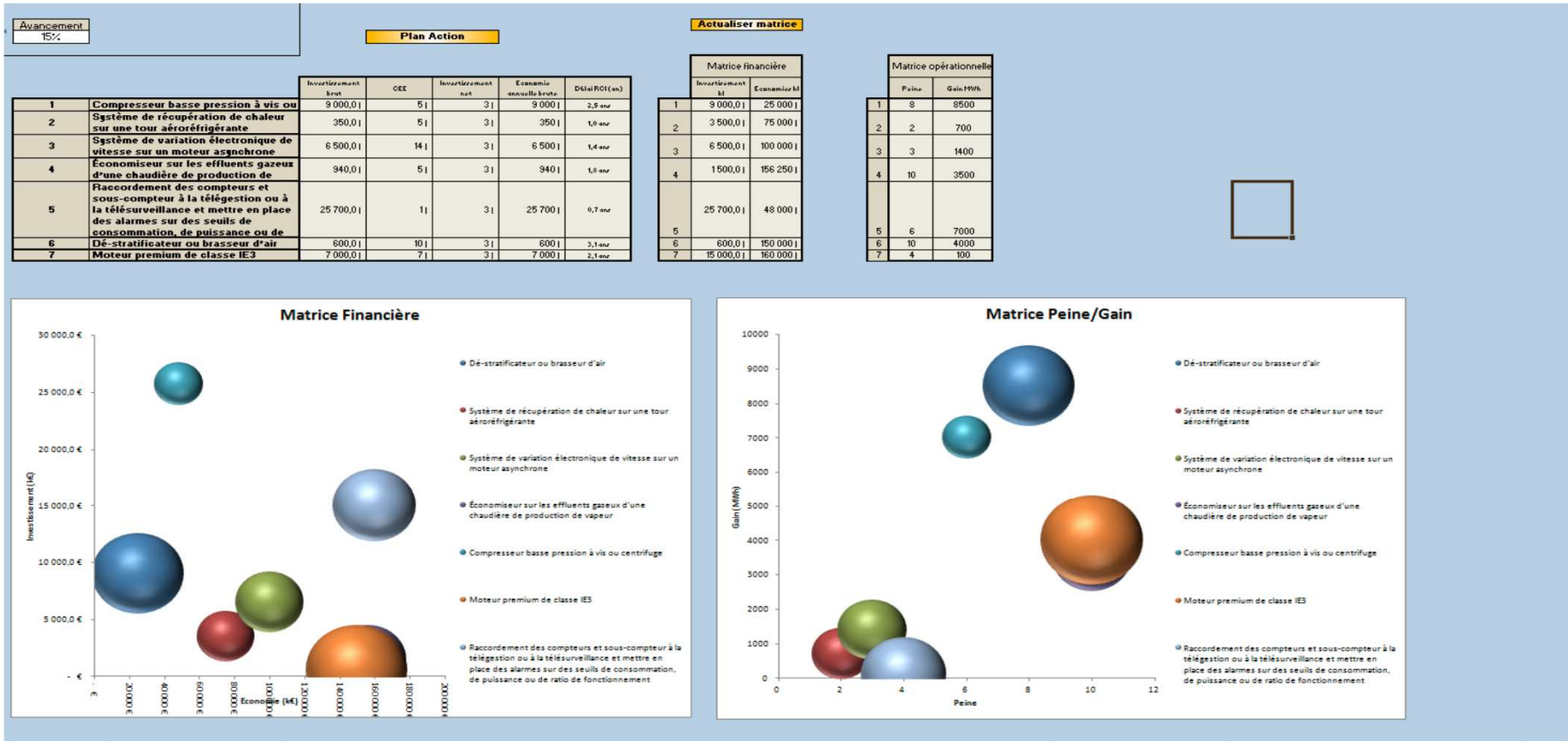


Construction du bilan énergétique

La cartographie énergétique appliquée aux utilités et au process

k€/an	Electricité	Froid				Vide	AC	Eclairage	Azote	Vapeur		Four	Eau chaude		Eau froide	Total
		Froid -40°C	Froid -30°C	Froid -5°C	Eau					Gaz	Eau		Gaz	Eau		
Stockages MP	14		28	44	9			5								100
L1 & L2	25	77		23	12		X	3		26	1	32	14	25	10	255
L3	11	43		8	6	0	X	2		19	1	1	7	12	3	115
L4	7	24		9	4		X	1		5	0		5	8	7	72
L5	6	28		6	4	5	X	1		16	0	0	2	4	14	94
L6	15			9	1		X	2	67	24	1		3	5	1	132
L7	5	35		5	5		X	1		4	0		1	2	16	77
Stockages PF	11		64	4	8			9								97
Bureaux/locaux	14		12	0	1			4		7	0		6	11	14	70
Total électricité	108	207	104	109		5	25	28								586
Total gaz										102		33	38			173
Total eau de ville					49						3			68	65	186
Total azote								67								67
Total	108	469					58	67		105	33	106	65			1012

Arbitrer entre RSI et difficulté de mise en œuvre...



1

Amélioration de l'efficacité énergétique d'une centrale de production de froid industriel

08/10/2021

1. Présentation de la centrale de production de froid

11,2 MW

Groupes Extérieurs :



GF N°1 - TRANE RTAC 375 - 1 275 kW
 GF N°2 - TRANE RTAC 375 - 1 275 kW
 GF N°3 - TRANE RTAC 375 - 1 275 kW

Groupes Intérieurs :



GF N°5 - TRANE RTHD D1 - 1 100 kW
 GF N°6 - TRANE CVGB80 - 3 150 kW
 GF N°7 - TRANE CVGB80 - 3 150 kW

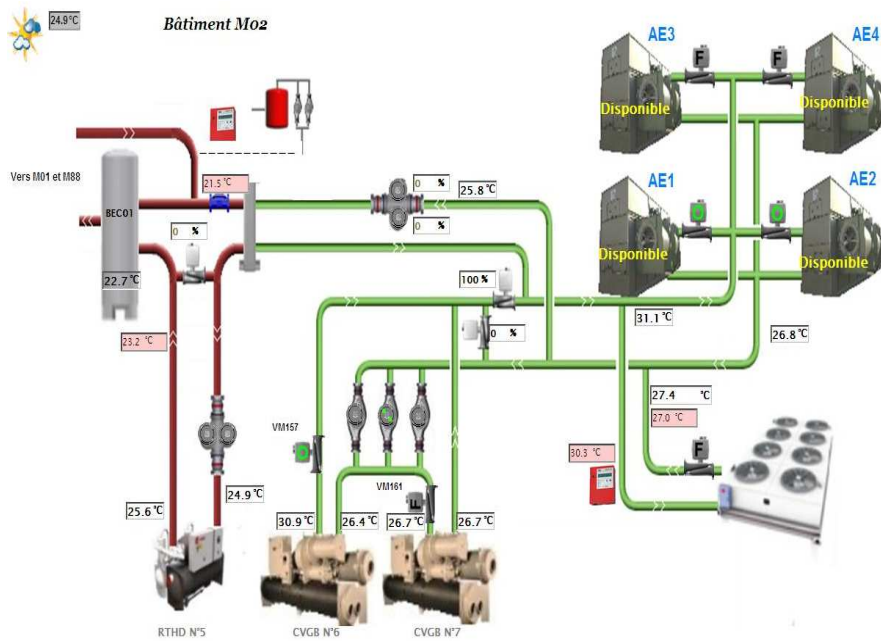
Centrale : GF TRANE (R134a)

n°GF	R134a (kg)	N° série	N°MODELE	ANNE E	Technologie	Cond .	Débit EG nominal	régime d'eau / Cond.	P élec comp
GF1	397	EKP1091	RTAC 375	2007	GF à vis	Air	200 m ³ /h	EG 11/5°C Air 35°C	388,5 kW
GF2	397	EKP1092					200 m ³ /h		
GF3	397	EKP1090					200 m ³ /h		
GF5	318	EKP 2419	RTHD D1 G1	1988	GF Centrifuge	Eau	200 m ³ /h	EG 10/5°C Eau 43/48°C	265 / 175 kW
GF6	950	E83972	CVGD80				1992		
GF7	950	EKC0429		400 m ³ /h					

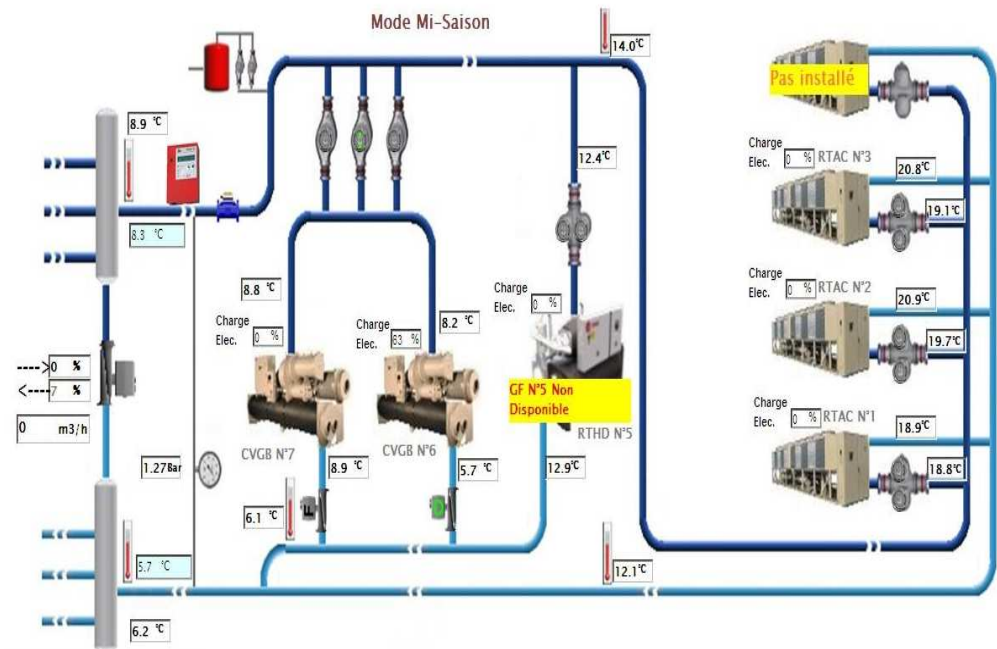
Equipement	Nombre	Marque	Type
TAR circuit fermé	4	JACIR	KSF 1800 QK 220T B
Dry cooler (hiver/évacuer l'excédent de chaleur produite par le condenseur du GF 5)	1	JACIR	H07 3C46
Pompes de circulation	11	TAG Pxxx	
Vanne - by-pass	1		

1. Présentation de la centrale de production de froid

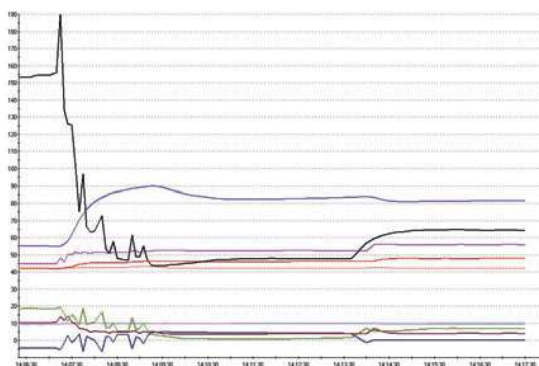
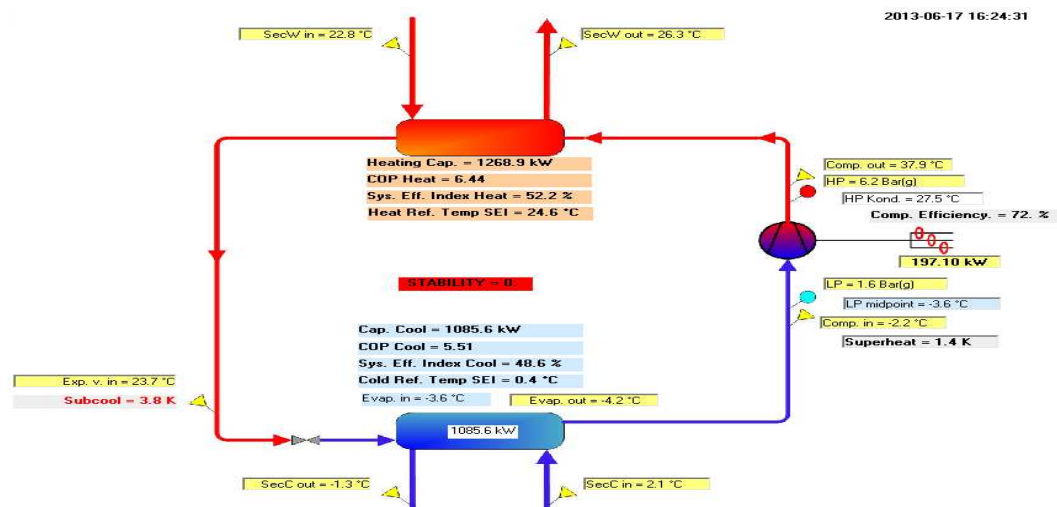
Partie Condenseur



Partie Evaporateur

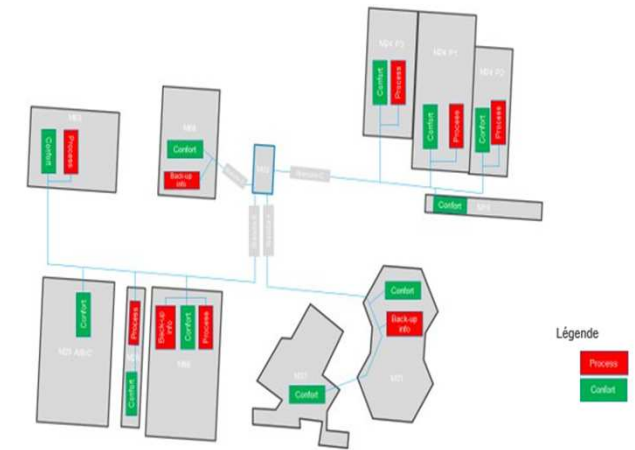
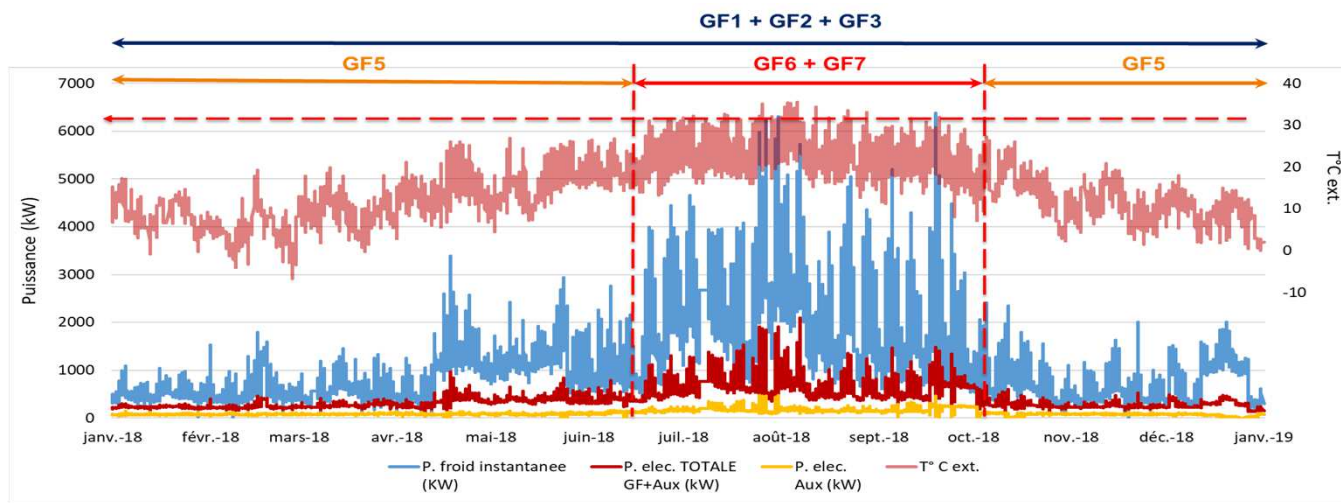
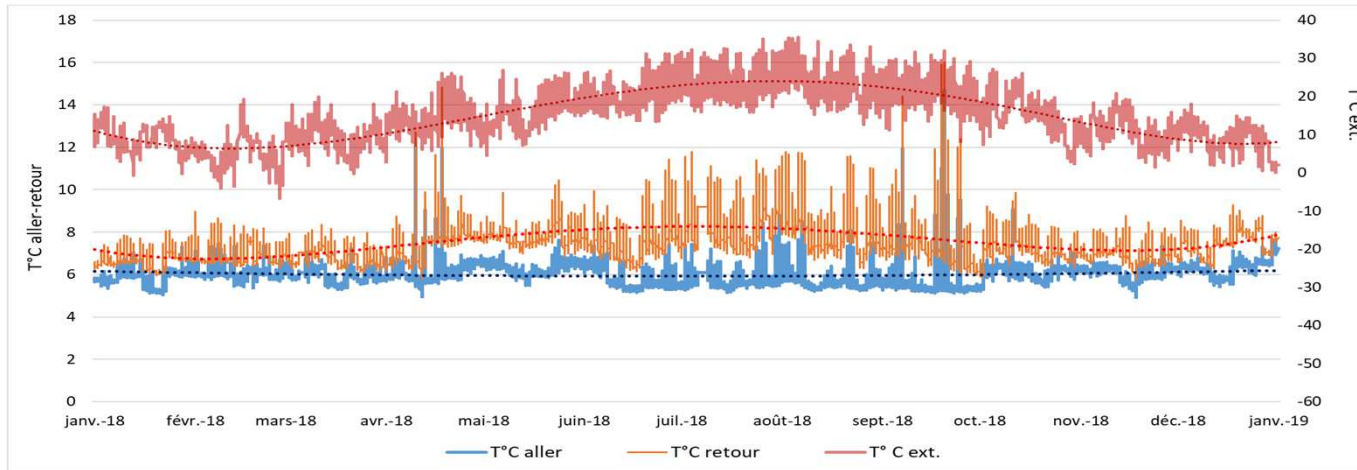


2. Collecte, mesures et analyse des données



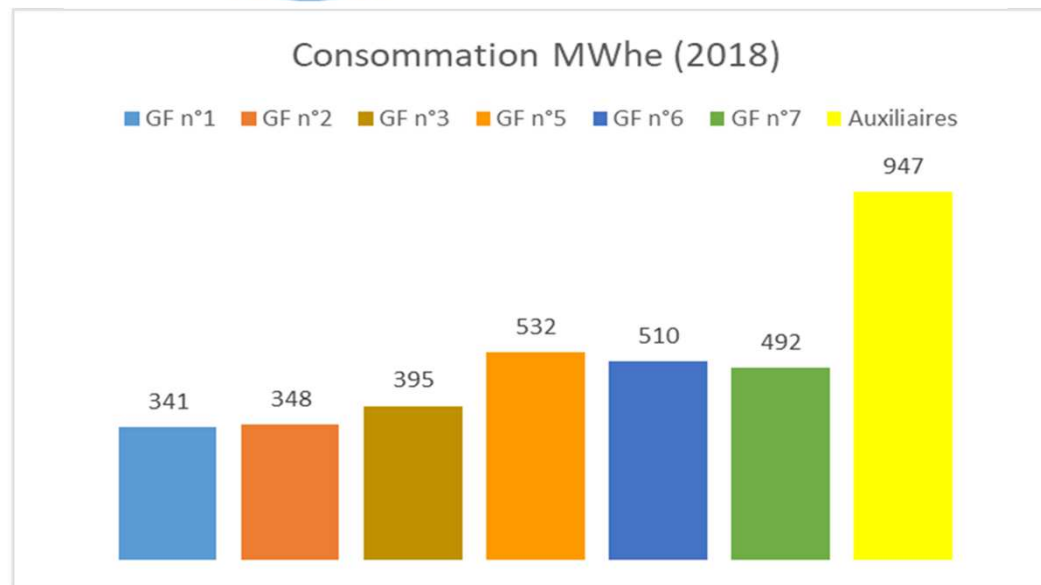
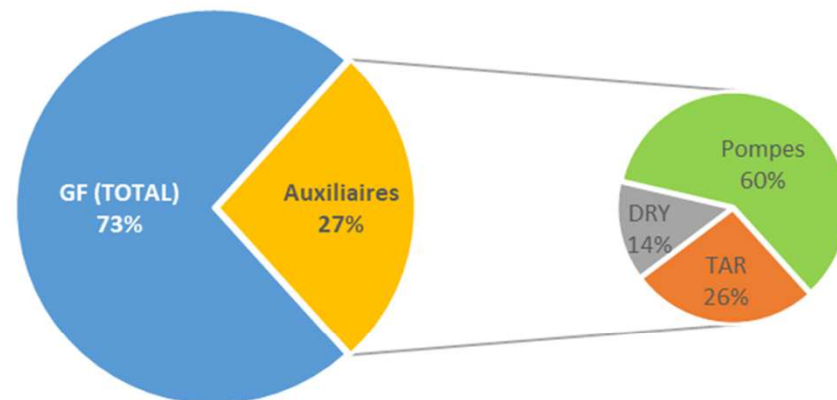
Performance Inspection with ClimaCheck															
Equipment	Model	Year	Serial No.	Capacity (kW)	Capacity (ton)	Capacity (hp)	Capacity (Btu/h)	Capacity (kcal/h)	Capacity (kWh/day)	Capacity (kWh/year)	Capacity (kWh/1000kWh)	Capacity (kWh/1000kWh)	Capacity (kWh/1000kWh)	Capacity (kWh/1000kWh)	Capacity (kWh/1000kWh)
00000001	00000001	2013	1234	1085.6	25.0	1463	1268.9	1268.9	1268.9	1268.9	1268.9	1268.9	1268.9	1268.9	1268.9
00000002	00000002	2013	5678	197.1	4.7	268	197.1	197.1	197.1	197.1	197.1	197.1	197.1	197.1	197.1

2. Collecte, mesures et analyse des données



2. Collecte, mesures et analyse des données

Référence		Consommation (MWhe/an)
GF n°1		341
GF n°2		348
GF n°3		395
GF n°5		532
GF n°6		510
GF n°7		492
Auxiliaires	TAR	250
	DRY	132
	Pompes	565
TOTAL		3 564 MWhe/an (278 k€/an)

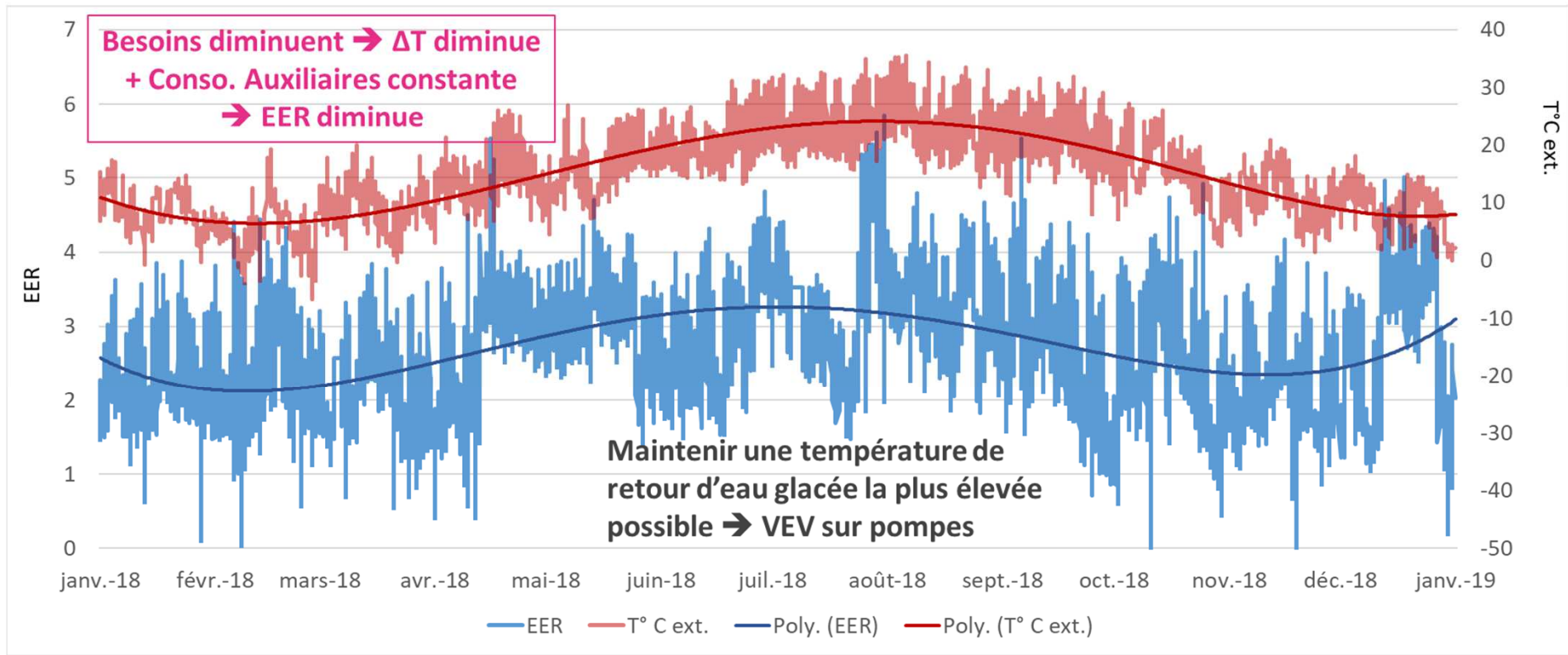


2. Collecte, mesures et analyse des données

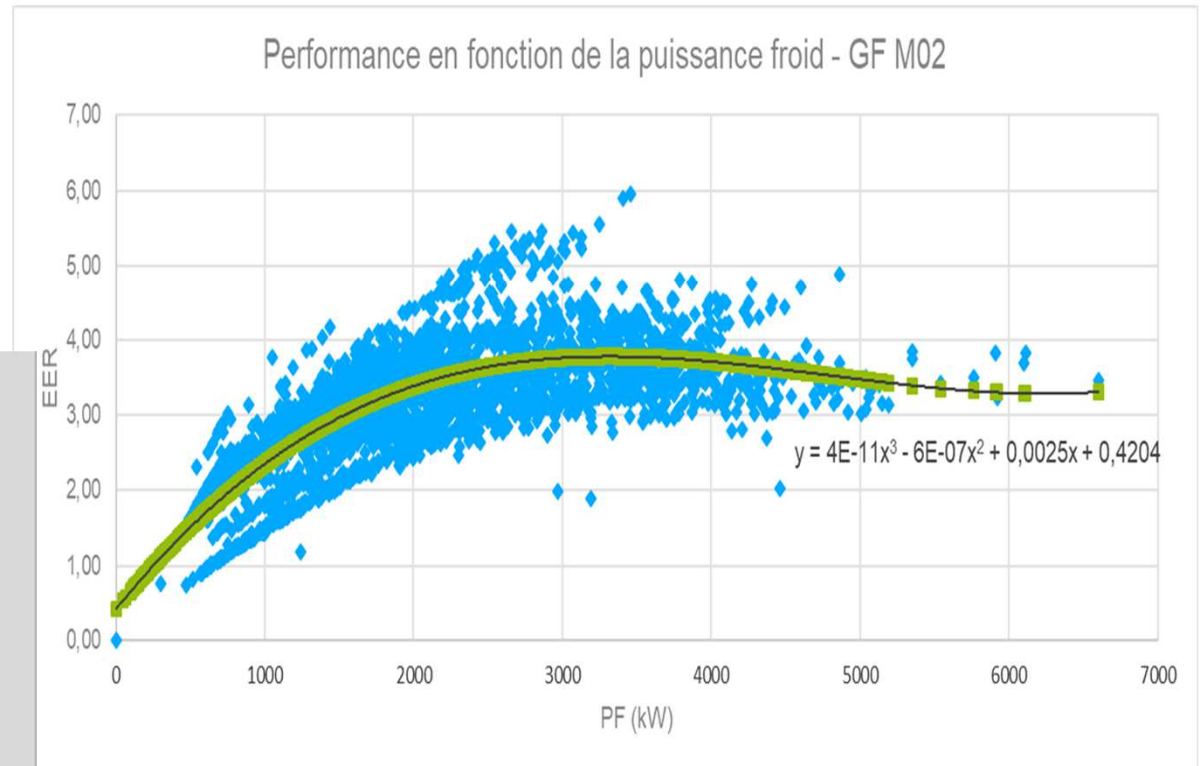
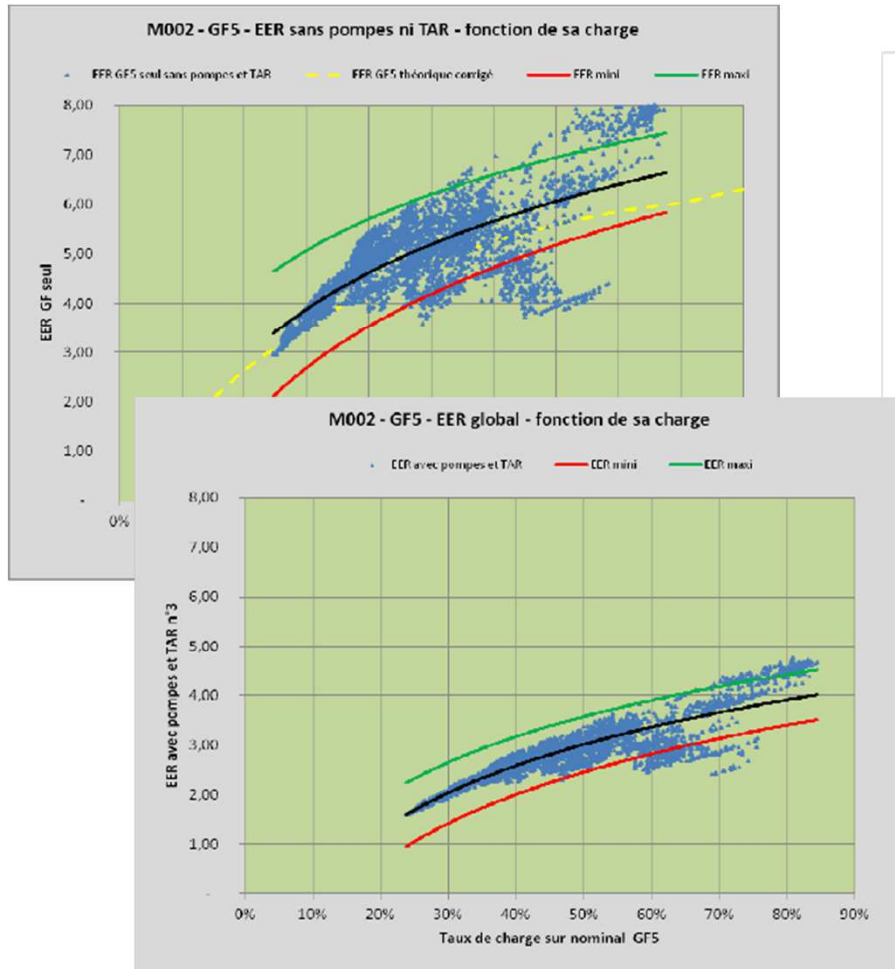
$$EER_{comp.} = P_{frigo} (KW) / P_{elec. comp.} (KW)$$

$$SEER = \sum d'énergie frigorifique (KWh) / \sum d'énergie électrique (KWh)$$

SEER global de 2,9
Performances relativement basses



2. Collecte, mesures et analyse des données



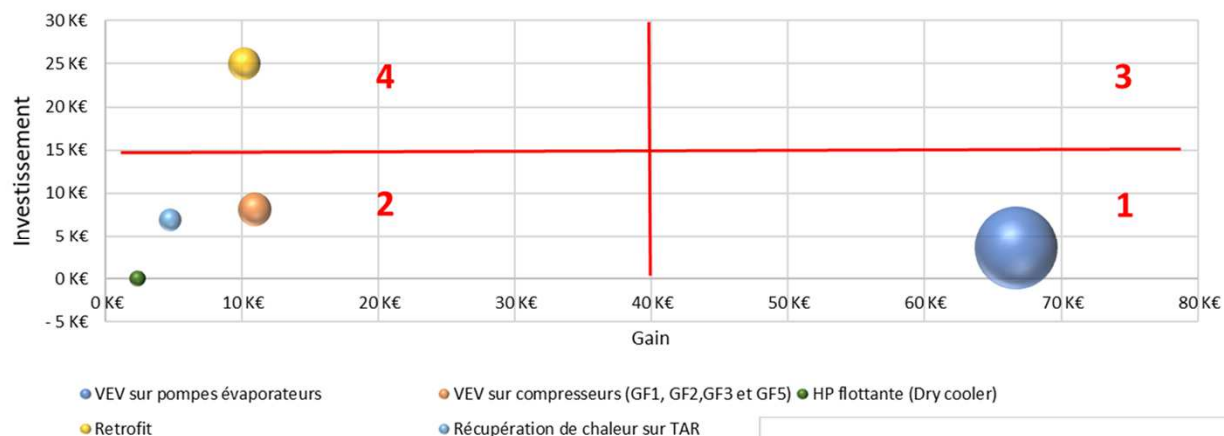
3. Solutions d'optimisations & outil d'aide à la décision

Actions d'amélioration	Désignation	Economie/an				CAPEX K€ HT	TR (an)	CEE		TR avec CEE	€/MWh	€/tCO ₂
		%	MWhe	K€ HT	teq CO ₂			MWh Cumac	k€ HT			
VEV sur pompes / Régulation	Variation de débit d'eau dans l'évaporateur en fonction de la charge frigorifique	24% sur consommation électrique	855	66,7	45,0	20	0,3 ans	2976	16	0,1 ans	4 €/MWh	81 €/tCO ₂
VEV sur compresseurs (GF1, GF2, GF3 et GF5)	Régulation de la charge du compresseur par variateur + tiroir au lieu de tiroir seul	8% sur consommation (VEV) (KW)	64	6,4	3,2	64	5,8 ans	10157	56	0,7 ans	58 €/MWh	1 101 €/tCO ₂
HP flottante (Dry cooler)	Système de régulation permettant la fluctuation de la pression de condensation en fonction de la température extérieure	15% sur compresseurs (5 mois) -5% ventilateurs	31	2,4	1,6	5	2,1 ans	3790	21	Immédiat	-519 €/MWh	-9 870 €/tCO ₂
Récupération de chaleur sur TAR	Valorisation de la chaleur via une PAC (120 KW) pour produire l'EC (été 81 MWhe)	25% sur TAR Economie sur l'EC	61	4,8	3,2	35	7,4 ans	5100	28	1,5 ans	114 €/MWh	2 166 €/tCO ₂
Rétrofit	Remplacement du R134a par 1234ze (HFO)	3,8% sur SEER	130	10,2	6,9	25	2,5 ans			2,5 ans	192 €/MWh	3 642 €/tCO ₂
Remplacement 1 GF centrifuge (GF 6)	Groupe Froid centrifuge (R1234ze) de 1850 kW SEER = 5,55	52% sur consommation électrique (GF6)	265	20,7	14	415	20,1 ans	36047	198	10,5 ans	817 €/MWh	15 533 €/tCO ₂

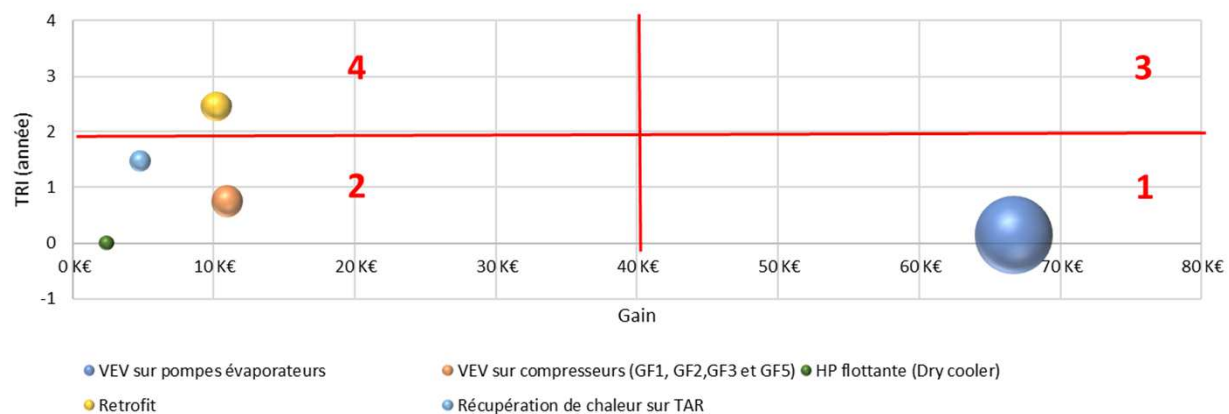
**31 % d'économie (85 K€ HT)
avec un TR global < 1 an (0,2 an)**

3. Solutions d'optimisations & outil d'aide à la décision

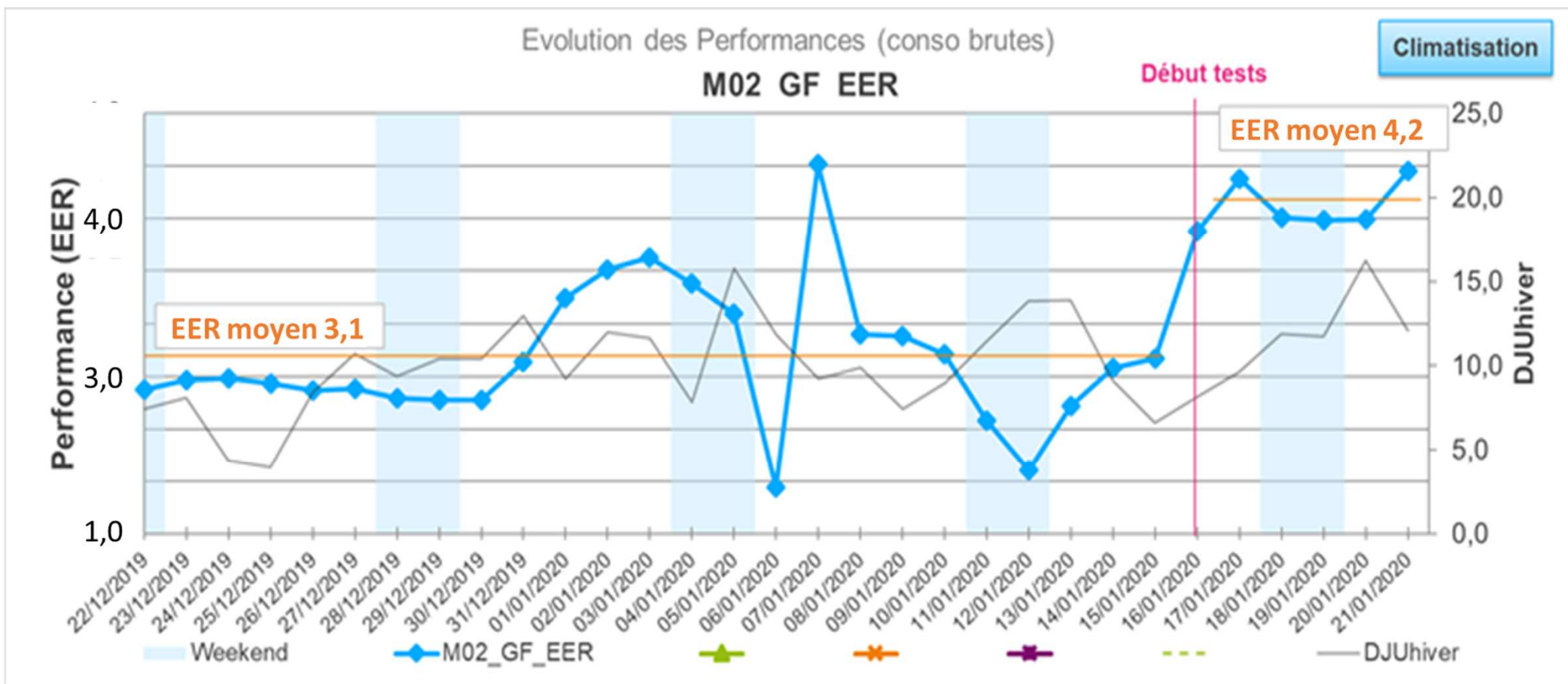
Gain Vs CAPEX (avec CEE)



Gain Vs TRI



4. Suivi des performances

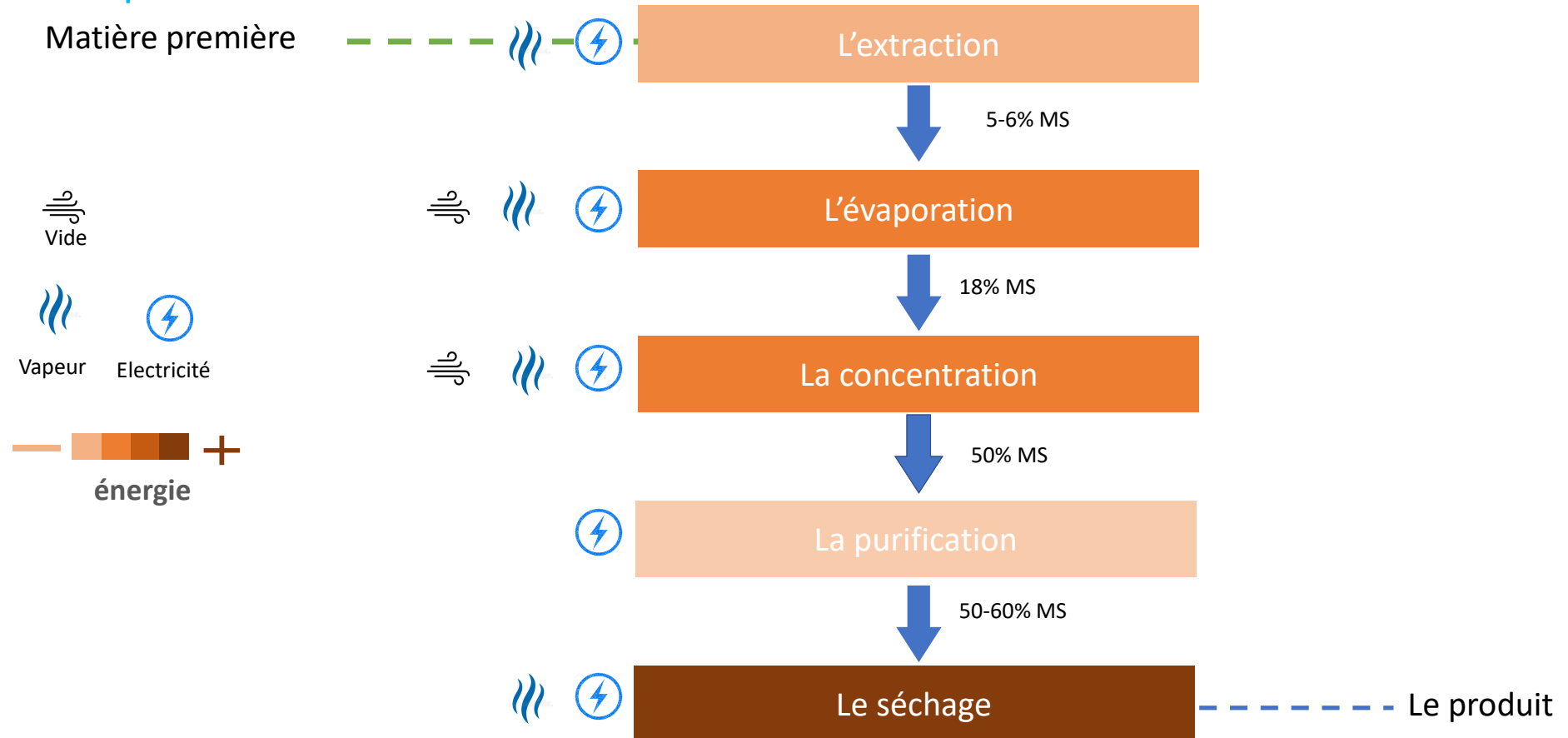


2

Exemple d'audit d'un site industriel

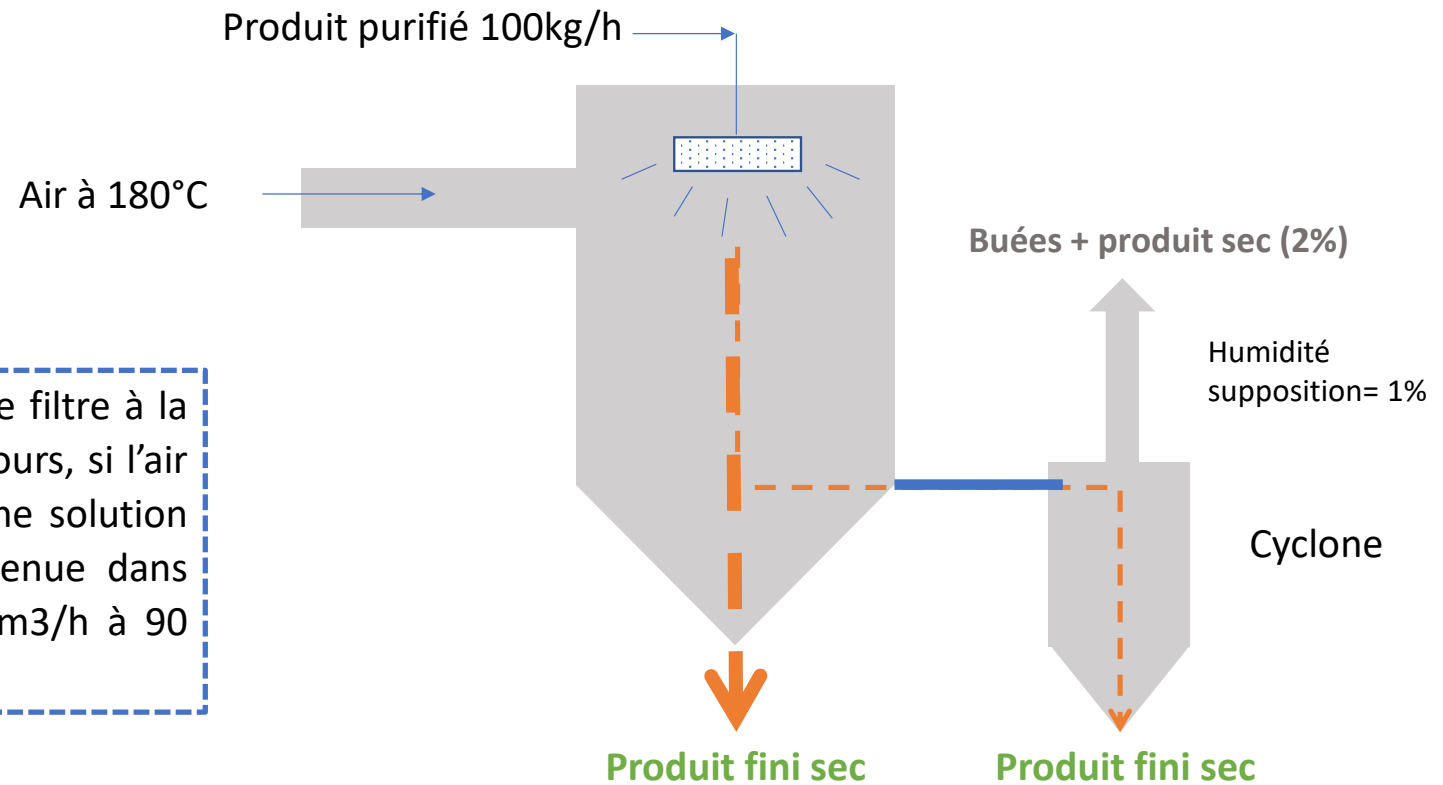
1. Présentation du synoptique de production / Process

Les étapes de transformation



1. Présentation du synoptique de production / Process

Séchage: atomiseur



Un projet de mise en place de filtre à la sortie de l'atomiseur est en cours, si l'air est filtré, il faut réfléchir à une solution pour réutiliser l'énergie contenue dans l'air chaud (débit de 5 000Nm³/h à 90 °C)

1. Présentation du synoptique de production / Process

Séchage: atomiseur

Calcul de l'énergie contenue dans 180°C d'air:

$$P = \frac{dm}{dt} \times C_{pair} \times (T2 - T1)$$

$$1,79 \times 1 \times (180 - 20) = 286,4 \text{ KW}$$

Calcul de l'énergie en sortie cyclone:

L'humidité relative dans l'atomiseur est d'environ 6 g eau/Kg d'air sec

C'est qui donne en humidité absolue une valeur d'environ 1% en sortie cyclone

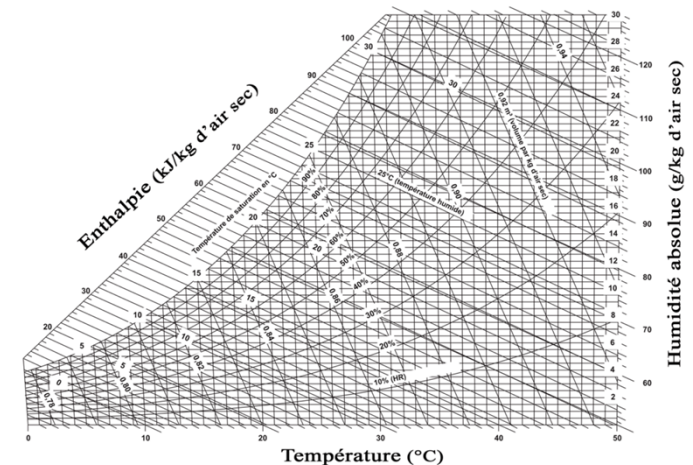
Par lecture graphique on a alors (H l'enthalpie) pour une sortie échangeur à 20°C:

$$P = \dot{m} \times \Delta H$$

$$P = 1,79 \times (214,57 - 23,75)$$

$$P = 125,9 \text{ KW}$$

Diagramme psychrométrique

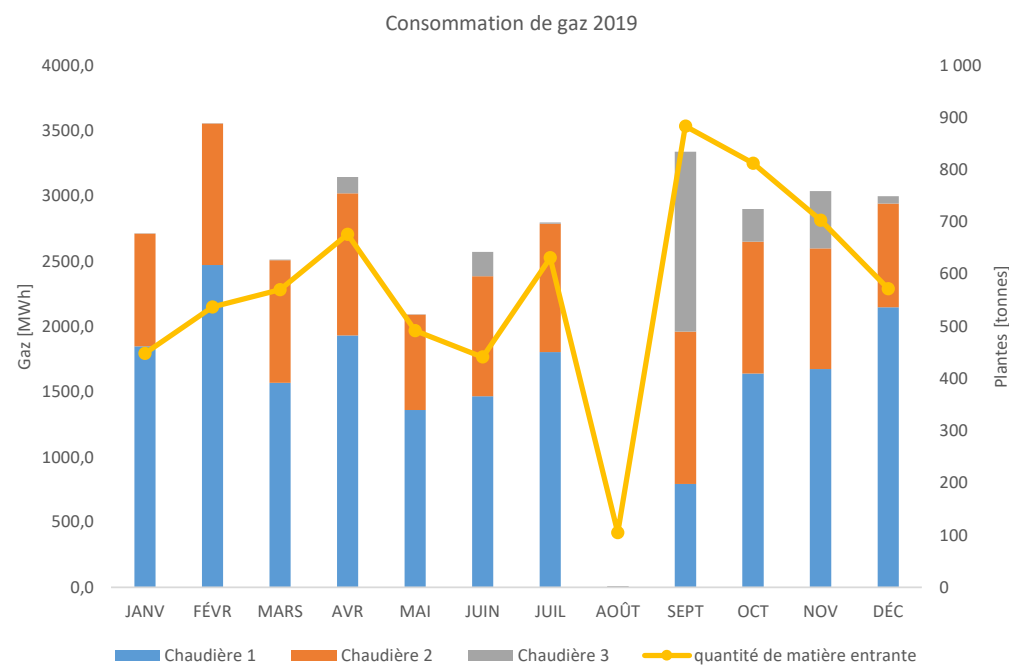
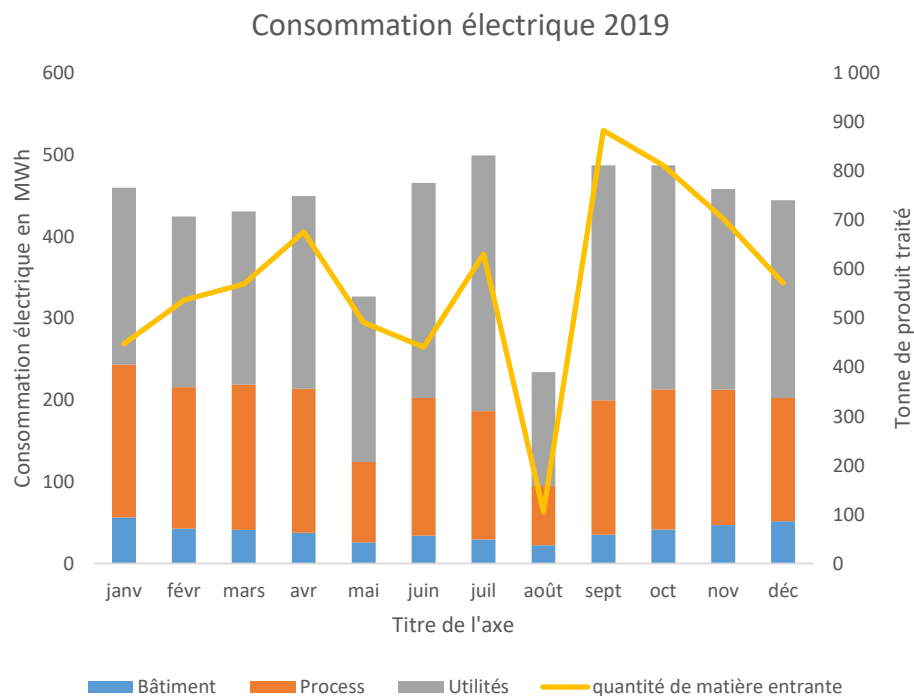


Si on suppose une efficacité d'échangeur à 0,8 on a 100,72 KW

2. Analyse de la consommation énergétique

Consommation électrique et gaz 2019

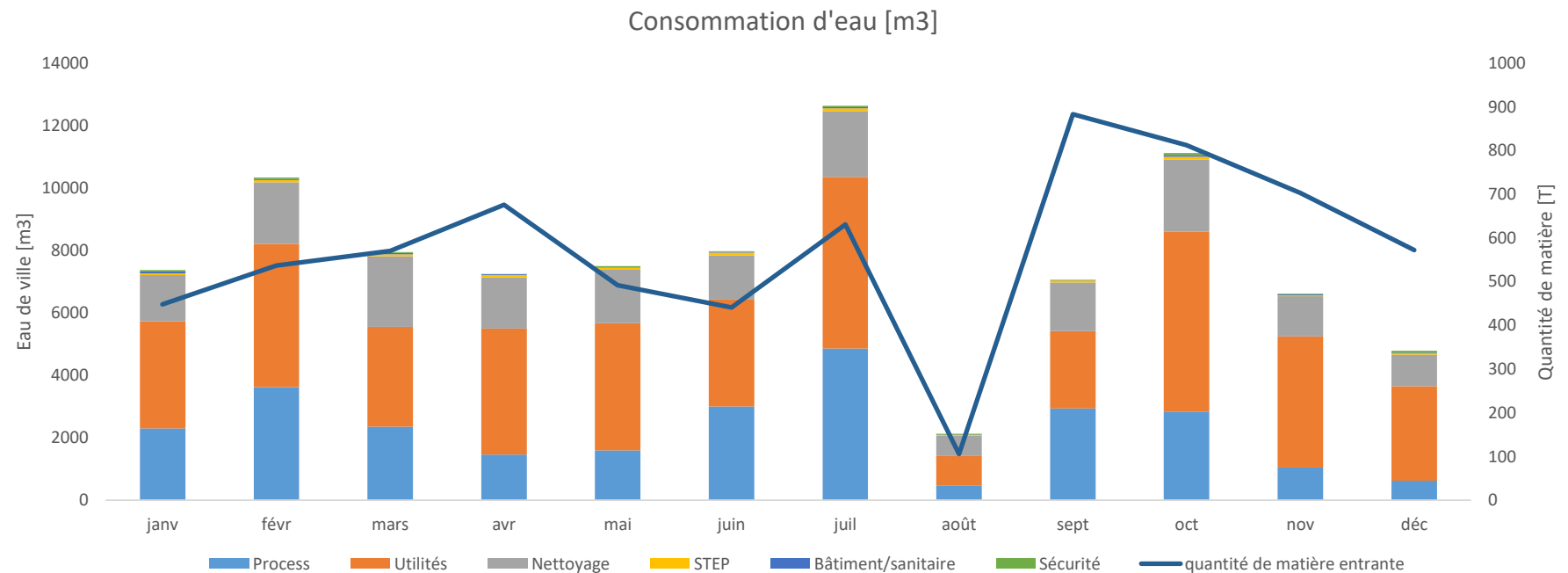
Les profils de consommation d'électricité pour l'année 2019 présentent de fortes variations qui paraissent assez bien corrélées à la production pour l'électricité



2. Analyse de la consommation énergétique

Consommation d'eau

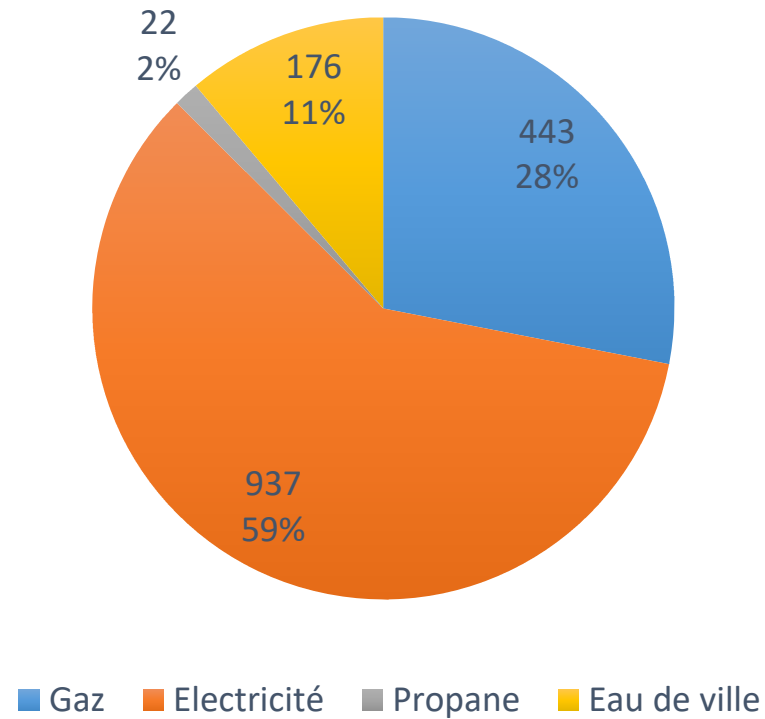
Le site dispose de 2 compteurs général, et de quelques compteurs d'usage disposés dans l'usine. Une reconstitution de la consommation d'eau par type d'usage a été réalisée et est présentée ci-dessous pour 2019:



2. Analyse de la consommation énergétique

Répartition des coûts hors matière première

Répartition des coûts hors matière première (K€)



2. Analyse de la consommation énergétique

Indicateurs de performance énergétique

GAZ

2019	IPE gaz [KWh/T]	quantité de matière entrante
janv	6 051	448
févr	6 620	537
mars	4 405	570
avr	4 649	676
mai	4 249	492
juin	5 828	441
juil	4 430	631
août	88	105
sept	3 780	883
oct	3 569	812
nov	4 318	703
déc	5 239	572

	IPE gaz [KWh/T]
Moyenne IPE général +600 T	4149
Moyenne IPE général -600 T	4991

Electricité

2019	IPE Total Electricité global [KWh/T]	quantité de matière entrante
janv	1026	448
févr	791	537
mars	756	570
avr	665	676
mai	664	492
juin	1056	441
juil	791	631
août	2232	105
sept	552	883
oct	600	812
nov	652	703
déc	777	572

	IPE électricité [KWh/T]
Moyenne IPE général +600 T	652
Moyenne IPE général -600 T	747

3. Présentation des solutions d'optimisations

Projet	Investissement	Subventions	TRI	Economies
Mise en place d'un tableau de bord	28 500€ HT	CEE : 43 738 €	Immédiat	/
Mise en place de HP Flottant sur 2 groupes froid	24 000	CEE: 28 639 €	~ 9 mois	3 362 € / an
Mise en place de 6 débitmètres sur les réseaux d'air comprimé	25 854 €	/	1 an	26 000€ /an
Récupération de chaleur 6 MW au niveau des TAR	1 644 385 €	CEE: 2 142 000 €	-1 an	A définir
Récupération de chaleur 500 KW au niveau des TAR	A définir	CEE: 165 750 €	A définir	A définir
Valorisation du biogaz	135 000 €HT + 80 000 €HT (transport du biogaz)	CEE: [122k€ - 145 k€]* HT	~ 2 ans	42 992 €/ an
Récupération de chaleur au niveau des rejets d'eau STEP pour chauffer l'eau entrée méthaniseur	89 865€ HT	CEE: 27 000 €	10 ans	6 000 €/an
Mise en place de variateur de vitesse sur les pompes TAR	31 500 €	CEE: 2 604 €	A définir	A définir
Mise en place de 4 PAC à la place des TAR et GF	1 982 353 €	Plan de relance	A définir	A définir
Mise en place de 2 PAC à la place des TAR	991 177 €	Plan de relance	A définir	A définir
Intégration du BIM	18 622,00 €- 39 862 €			

4. Mise en place d'un plan de comptage et d'un tableau de bord

Le but d'un plan de comptage de l'énergie est de définir un certain nombre de mesurages pertinents qui permettront de connaître, analyser, piloter et suivre dans le temps l'ensemble des paramètres mesurables liés aux consommations et donc à la performance énergétique.

L'intérêt :

- ➔ Réduire les coûts de production en utilisant des indicateurs pertinents bien définis et correctement suivis,
- ➔ Mieux comptabiliser l'énergie,
- ➔ Accroître la qualité de fabrication et la sécurité en améliorant la conduite des procédés et la traçabilité grâce à une gestion centralisée automatique,
- ➔ Valoriser sa politique d'optimisation énergétique et environnementale en interne comme à l'extérieur.

Les étapes pour la mise en place d'un plan de comptage et d'un tableau de bord

1 Analyse des compteurs existant:

- Il existe plusieurs compteurs sur site mais il en manque, notamment des compteurs connectés, pour éviter les tournées de relevé (compteurs électriques)
- Des compteurs eau connectés à mettre en place
- Des débitmètres vapeur à mettre en place
- Des débitmètres pour l'air comprimé à mettre en place

Les compteurs peuvent être remplacés ou mis en place au fur et à mesure, sauf les débitmètres air comprimé qui sont nécessaires pour le suivi des fuites d'air comprimé.

En effet sur le tableau de bord, il est possible d'effectuer des calculs pour estimer automatiquement les consommations, mais ils ne seront jamais aussi précis que la consommation réelle.



DASHBOARD

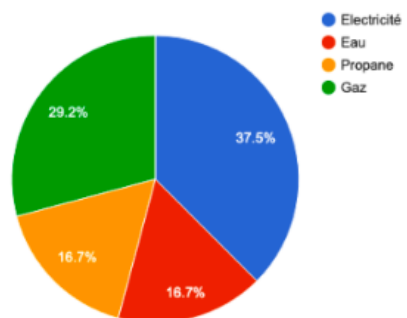
Une année

23 décembre 2019

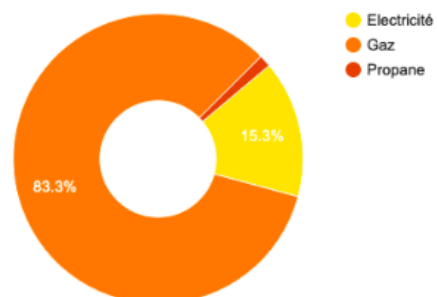
23 décembre 2020

APPLIQUER

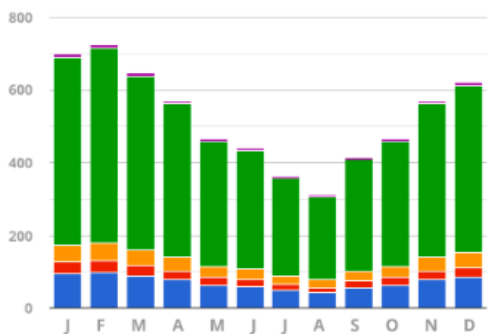
Consommation



Consommation

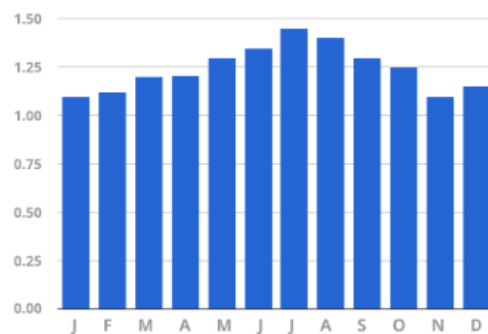


Indice Performance Energétique kWh / tonne



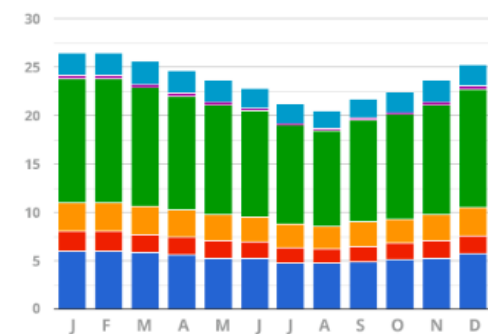
■ Propane ■ Électricité utilisés ■ Électricité
■ Gaz ■ Électricité process

Indice Performance Energétique m³ / tonne



■ Eau

Indice Performance Energétique € / tonne



■ Eau ■ Gaz ■ Électricité process
■ Propane ■ Électricité utilisés ■ Électricité

DASHBOARD

CONSOMMATIONS

EAU

ELECTRICITÉ

GAZ

PROPANE

UTILITÉS

CHAUDIÈRES

GROUPES FROID

COMPRESSEURS D'AIR

TAR

PROCESS

BROYEURS

EXTRACTEURS

EVAPORATEURS

PURIFICATEURS

SÈCHEURS

COÛTS

PILOTAGE

ALARMES 24

CHARLES

**Merci de votre
attention**