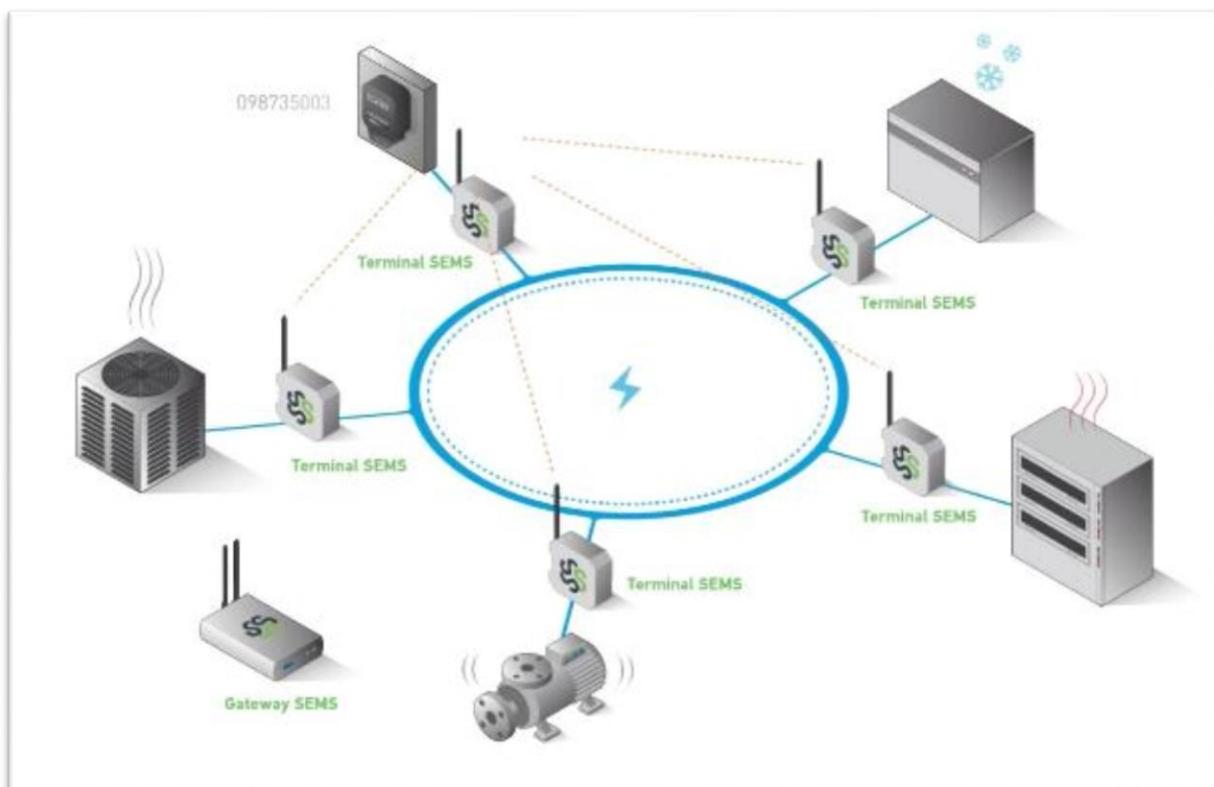


Rapport final du 30 juin 2017

Intelligence collective pour un délestage dynamique de la charge





Intelligence collective pour un délestage dynamique de la charge



Date : 30 juin 2017

Lieu : Berne

Prestataire de subventions :

Confédération suisse, représentée par
L'Office fédéral de l'énergie OFEN
Programme pilote, de démonstration et Programme-phare
CH-3003 Berne
www.ofen.admin.ch

Bénéficiaires de la subvention :

Usines Métallurgiques de Vallorbe SA
Rue du Moutier 49, CH-1337 Vallorbe
www.vallorbe.com

Stignergy SA
Avenue des Sciences 13, CH-1400 Yverdon-les-Bains
www.stignergy.ch

Romande Energie SA
Rue de Lausanne 53, CH-1110 Morges
www.romande-energie.ch

Auteurs :

Sami Najjar, Stignergy SA, sami.najjar@stignergy.ch
Alexandre Wetzel, Stignergy SA, alexandre.wetzel@stignergy.ch
Cynthia Cavin, Romande Energie SA, cynthia.cavin@romande-energie.ch
Richard Fayolle, Usines Métallurgiques de Vallorbe SA, richard.fayolle@vallorbe.com

Direction du programme de l'OFEN : Yasmine Calisesi, yasmine.calisesi@bfe.admin.ch

Suivi du projet pour l'OFEN : Michael Moser, michael.moser@bfe.admin.ch

Numéro du contrat de l'OFEN : SI/501270-01

Les auteurs sont seuls responsables du contenu et des conclusions de ce rapport.

Office fédéral de l'énergie OFEN

Mühlestrasse 4, 3063 Ittigen, Adresse postale : 3003 Berne
Tél. +41 58 462 56 11 · fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.ofen.admin.ch



ZUSAMMENFASSUNG

Das Projekt in Partnerschaft mit Romande Energie umfasst die Installation und Inbetriebnahme eines Smart Energy Management System (SEMS) von Stignergy in einer Industrieanlage in den Metallfabriken von Vallorbe (fr.: „Usines Métallurgiques de Vallorbe“, UMV). SEMS basiert auf einer bioinspirierten Schwarmintelligenz-Technologie und dient der Steuerung und dynamischen Reduzierung der monatlichen Spitzenleistung (viertelstündliche Spitzenleistung) von gewerblichen Elektroanlagen durch die dynamische Verteilung des Stromverbrauchs von Großverbrauchsgeräte über den Tag, ohne den Herstellungsprozess der zu steuernden Geräte und Maschinen zu stören. Durch das Vermeiden von Stromspitzen, die Störungen und Instabilitäten im Stromnetz hervorrufen, ermöglicht SEMS somit erhebliche Einsparungen bei den Stromkosten für Unternehmen, von bis zu 15% oder sogar noch mehr. Dieser Bericht präsentiert die Ergebnisse der Installation von SEMS in den UMV im Rahmen eines Demonstrationsprojekts des Bundesamts für Energie (BFE) sowie Vorschläge für Verbesserungsmaßnahmen, die einen optimalen Einsatz von SEMS für die Reduzierung der Last und Stromkosten ermöglichen.

RÉSUMÉ

En partenariat avec Romande Energie, le projet consiste à l'installation et la mise en service du Smart Energy Management System (SEMS) de Stignergy sur un site industriel, soit le site des Usines Métallurgiques de Vallorbe (UMV). Basé sur une technique d'intelligence collective bio-inspirée, SEMS contrôle et réduit dynamiquement les pics de puissance mensuelle (pic de puissance ¼ horaire) des installations électriques des professionnels en répartissant dynamiquement à travers la journée le courant des appareils gros consommateurs sans perturber les processus de production des appareils et machines contrôlées. SEMS permet ainsi de réaliser de substantielles économies sur les factures d'électricité des entreprises, jusqu'à 15% et plus, en évitant les pics de puissance, sources de perturbations et d'instabilités du réseau électrique. Ce rapport présente les résultats obtenus grâce à l'installation de SEMS aux UMV dans le cadre d'un projet démonstrateur soutenu par l'Office Fédéral de l'Energie (OFEN), ainsi que les propositions d'actions d'améliorations à mettre en place par les UMV afin d'atteindre les résultats optimaux que peut réaliser SEMS pour réduire la charge et réaliser des économies d'énergie.

ABSTRACT

In partnership with Romande Energie, the project consists in the installation and the commissioning of the Smart Energy Management System (SEMS) of Stignergy for an industrial site: the Usines Métallurgiques de Vallorbe (UMV). Based on a technique of bio-inspired collective intelligence, SEMS controls dynamically the appliances energy consumption to optimize the monthly energy peak demand (15-minute period peak demand) of electrical installations for professional energy consumers by scheduling over the day the consumption of the biggest electrical loads without disrupting the production processes of the controlled appliances. SEMS reduce the electricity costs up to 15% and even more for business companies by avoiding the energy peaks demand generating disturbances and instabilities on the grid.

This report presents the final results obtained by the installation of SEMS in the UMV site as part of a demonstrator project supported by the Federal Office of Energy (FOE) and proposals to the UMV of the improvement actions to be implemented to achieve the optimum results of the peak demand reduction and the energy savings that SEMS can realize.



SOMMAIRE

ZUSAMMENFASSUNG	3
RÉSUMÉ	3
ABSTRACT	3
SOMMAIRE	4
LISTE DES ABRÉVIATIONS.....	5
1. CONTEXTE	6
2. BUT DU PROJET.....	7
3. FONDEMENTS ET CONDITIONS-CADRE	8
3.1 Situation de départ de l'appel de puissance aux UMV	8
3.2 Principe de facturation	11
4. CONCEPT – DESCRIPTION DE L'INSTALLATION	12
4.1 Le système SEMS.....	12
4.2 Installation de SEMS aux UMV	15
5. PROCÉDURE ET MÉTHODOLOGIE	16
5.1 Mesure télémétrique pour le contrôle de l'environnement piloté	16
5.2 Analyse et détermination de l'impact de SEMS aux UMV	17
5.3 Principe du calcul d'économie d'énergie.....	18
6. RÉSULTATS	18
6.1 Réduction de la puissance aux UMV	18
6.1.1 Rappel des objectifs de réduction de la puissance aux UMV par SEMS	18
6.1.2 Puissance installée pilotable par SEMS	19
6.1.3 Les changements dans l'installation des UMV	20
6.1.4 Potentiel de réduction de la puissance ¼ horaire	21
6.1.5 Exemple : Analyse des résultats de SEMS pour le mois de juillet 2016	37
6.1.6 Récapitulatif de la réduction de puissance réalisée par SEMS	48
6.2 Économie d'énergie	49
6.2.1 Le Mode ECO	49
6.2.2 Récapitulatif des économies d'énergie réalisées par SEMS	51
7. DISCUSSION / ÉVALUATION DES RÉSULTATS / ENSEIGNEMENTS	52
7.1 Discussion	52
7.2 Évaluation des résultats	52
7.3 Enseignements	53
7.3.1 SEMS, un outil de monitoring et de maintenance	54
7.3.2 Avantages de SEMS par rapport aux systèmes existants	55
8. PERSPECTIVES D'AMÉLIORATION	57
8.1 Installation de nouveaux fours de trempe	57
8.2 Installation d'un variateur de fréquence pour la ventilation.....	58
8.3 Amélioration du contrôle des compresseurs.....	59
8.4 Perspectives des résultats des améliorations au sein des UMV	59
9. EXPERTISES	62
9.1 Expertise de Romande Energie	62
9.2 Expertise des UMV	63
10. CONCLUSIONS	64
11. ANNEXES	66
11.1 Analyse de l'impact des actions SEMS du 15 juillet 2016	66
11.2 Analyse de l'impact des actions SEMS du 14 juillet 2016	76
11.3 Analyse de l'impact des actions SEMS du 14 juillet 2016	82



LISTE DES ABRÉVIATIONS

UMV : Usines Métallurgiques de Vallorbe

HEIG-VD : Haute École d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud

GRD : Gestionnaire du Réseau de Distribution

SEMS : Smart Energy Management System

TECO: Telemetry for Energy Control & Optimization, système de télémetrie de SEMS pour la relève et la transmission de mesures de température, d'humidité, de pression d'air dans une cuve, des toxines et pollutions dans l'air et différents types de capteurs et sondes.

G : Grappe SEMS, composée d'un ou plusieurs Terminaux, SEMS-IG et un Bridge

SEMS-IG : Interface d'isolation galvanique

B : Bridge SEMS

GW : Gateway SEMS

T : Terminal SEMS

S-C : Comptage général par un sous-compteur SEMS

SEMS_IG : Interface de communication Modbus/RS485 avec isolation galvanique jusqu'à 1'000m

VdF : Variateur de fréquence

HP : Heure pleine

HC : Heure creuse

DP : Zone de pression, il s'agit d'une plage de pression d'air dans une cuve

DUP : Durée d'Utilisation de la Puissance

PRedMin : Puissance ¼ horaire réduite

PPicRec : Puissance reconstituée maximum du mois

PPicMes : Puissance mesurée maximum du mois

KM : Contacteur

Comp : Compresseur



1. CONTEXTE

Face à l'augmentation des dépenses énergétiques, à une réglementation environnementale plus stricte et à une prise de conscience collective en matière de développement durable, il est aujourd'hui devenu nécessaire de mettre en œuvre un plan d'économie d'énergie. En effet, la maîtrise des coûts énergétiques représente un enjeu majeur pour tous les secteurs économiques. Les entreprises qui souhaitent réduire leur facture d'électricité et ainsi augmenter leur productivité, sont de ce fait à la recherche de solutions et techniques efficaces et fiables.

La facturation d'électricité du secteur commercial et industriel inclut l'énergie consommée et la demande de puissance appelée « pic de puissance ¼ horaire ». L'énergie consommée est comptée durant la période de facturation (mesurée en kWh), alors que le pic de puissance est calculé sur la base de la plus grande quantité d'électricité consommée durant une période de 15 minutes dans le mois (pic ¼ horaire, converti en kW). Le pic de puissance rétribue notamment le gestionnaire du réseau de distribution (GRD) pour l'infrastructure qui doit être mise à disposition afin que son réseau supporte les appels momentanés de puissance.

Le problème majeur du GRD consiste à maintenir continuellement l'équilibre entre production et consommation en planifiant la production d'énergie de façon à pouvoir répondre à l'évolution de la courbe de charge du réseau. Il est donc dans l'intérêt commun du GRD et du consommateur de limiter les variations soudaines de charge d'où l'importance d'un système efficace pour gérer la pointe quart-horaire en particulier et pour contrôler et optimiser la consommation d'énergie électrique en général.

Basée au cœur d'Y-Parc d'Yverdon-les-Bains, Stignergy est active dans le domaine de l'efficacité énergétique pour les professionnels. Depuis début 2010 et après 4 ans de recherches et de développements au sein de l'école d'ingénieur d'Yverdon (HEIG-VD) et 2 ans d'industrialisation, Stignergy offre sa technologie innovante, le Smart Energy Management System - SEMS à des secteurs tels que l'industrie et l'hôtellerie pour :

- La réduction de la charge (les pics de puissances [kW]) et de la consommation de l'énergie électrique [kWh].
- Le monitoring énergétique : électricité, eau, thermique, gaz, etc. ;
- La télémétrie : température, humidité, pression, qualité de l'air, etc. ;
- La gestion du stockage de l'énergie électrique produite localement ;
- Des prestations de services énergétiques : diagnostics, analyses, conseils et mise en place d'un plan d'efficacité énergétique.

Le Smart Energy Management System (SEMS) de Stignergy est un concept novateur pour le monitoring, le contrôle et l'optimisation de la demande d'énergie électrique des installations des consommateurs professionnels. Il permet donc au professionnel de réaliser de substantielles économies sur leurs factures d'électricité. L'économie potentiel peut aller jusqu'à 15% de la facture totale d'électricité. De plus, SEMS permet d'éviter les pics de puissance qui sont sources de perturbations et de congestions du réseau de distribution.

En étroite collaboration avec Romande Energie SA et le soutien de l'Office Fédérale de l'Énergie (OFEN) ce projet de démonstration consiste à intégrer SEMS sur l'installation du site de Usines Métallurgiques de Vallorbe (UMV) et à analyser les résultats en vue d'améliorer l'efficacité énergétique du site et ceci sans perturber les processus de production des appareils et machines contrôlées par SEMS, primordial pour les industries.

Fondé à Vallorbe en 1899 suite à la fusion de ces divers ateliers, les Usines Métallurgiques de Vallorbe SA (UMV) sont actives dans l'industrie métallurgique et compte 20'000 m² d'usines pour fabriquer limes, râpes, rifloirs, échoppes, burins et outils de coupe. Ses produits sont commercialisés dans le monde entier.



© Usines Métallurgiques de Vallorbe

Figure 1 : Site des Usines Métallurgiques de Vallorbe.

Pour les UMV, le projet SEMS s'inscrit dans leur projet anti gaspillage appelé « projet Frêne ». Il est considéré comme un projet stratégique du projet « Frêne » qui vise à éliminer tout gaspillage et mauvaise utilisation des ressources dans la production tels que l'énergie électrique, l'eau et les matières premières. Ainsi l'installation du système SEMS restera en place après la fin du projet.

2. BUT DU PROJET

Le but du projet sur le site des UMV est de réduire les pics de puissances quart-horaire ainsi que supprimer les consommations électriques inutiles et ceci sans perturber les processus de production des appareils et machines contrôlée par SEMS, primordial pour les industries.

Pendant la phase d'étude du projet et sur la base des plaquettes signalétiques ainsi que des informations transmises par le responsable technique des UMV, nous avons identifié les appareils gros consommateurs d'énergie et qui représentent un potentiel important pour réaliser des économies grâce au système SEMS.

La puissance contrôlable par SEMS est de 1'619kW. Après une analyse préliminaire, nous avons fixé le potentiel de réduction de la puissance contrôlable par SEMS entre 10 à 20% représentant une période d'amortissement comprise entre 19 et 37 mois selon les coûts amortissables des modules du système et de leurs installations prévues pendant la phase d'étude préliminaire du projet. Sur cette base, nous avons défini deux scénarios Min/Max possible. Ainsi, le tableau ci-dessous représente le potentiel d'économie mensuelle des deux scénarios de réduction de la puissance ¼ horaire, soit un scénario à 10% et un 2^{ème} à 20% de réduction de la puissance contrôlable.

Désignation	Puissance Nominale Contrôlable [kW]	Réduction [%]	Réduction [kW]	Prix kW HT [CHF]	Économie HT [CHF/mois]
Scénario_1	1'619	20%	335.8	9.45	3'173.31
Scénario_2	1'619	10%	167.9	9.45	1'586.65

Tableau 1 : Scénarios Min/Max de réduction de la puissance ¼ horaire par SEMS.

D'après le tableau 1 ci-dessus, le potentiel d'**économies annuelles** de la composante puissance ¼ horaire des deux scénarios Min/Max est respectivement de **CHF 38'079.-** pour le scénario_1 et de **CHF 19'040.-** pour le scénario_2.



3. FONDEMENTS ET CONDITIONS-CADRE

3.1 Situation de départ de l'appel de puissance aux UMV

La situation de départ d'appel de puissance de l'installation du site des Usines Métallurgiques de Vallorbe (UMV) est présentée par la courbe de charge de l'année 2014 du graphique ci-dessous.

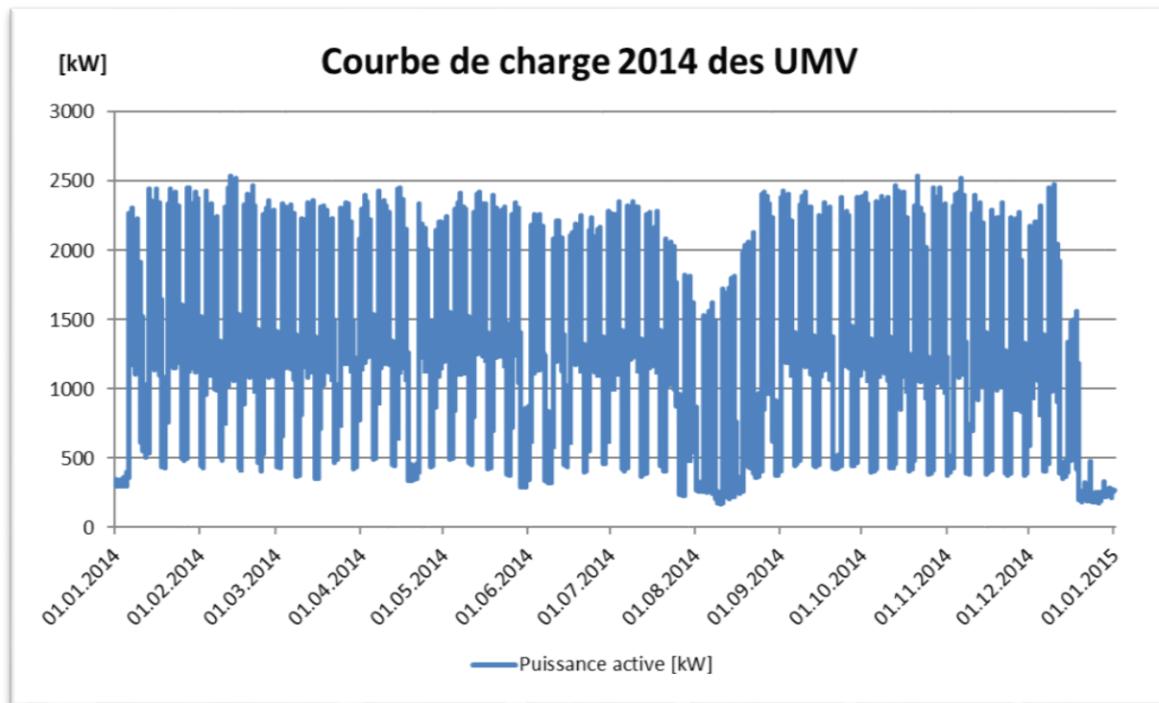


Figure 2 : Courbe de charge 2014 des UMV.

Le maximum de la puissance quart-horaire mensuelle pour l'année 2014 des UMV est présenté dans le graphique ci-dessous.

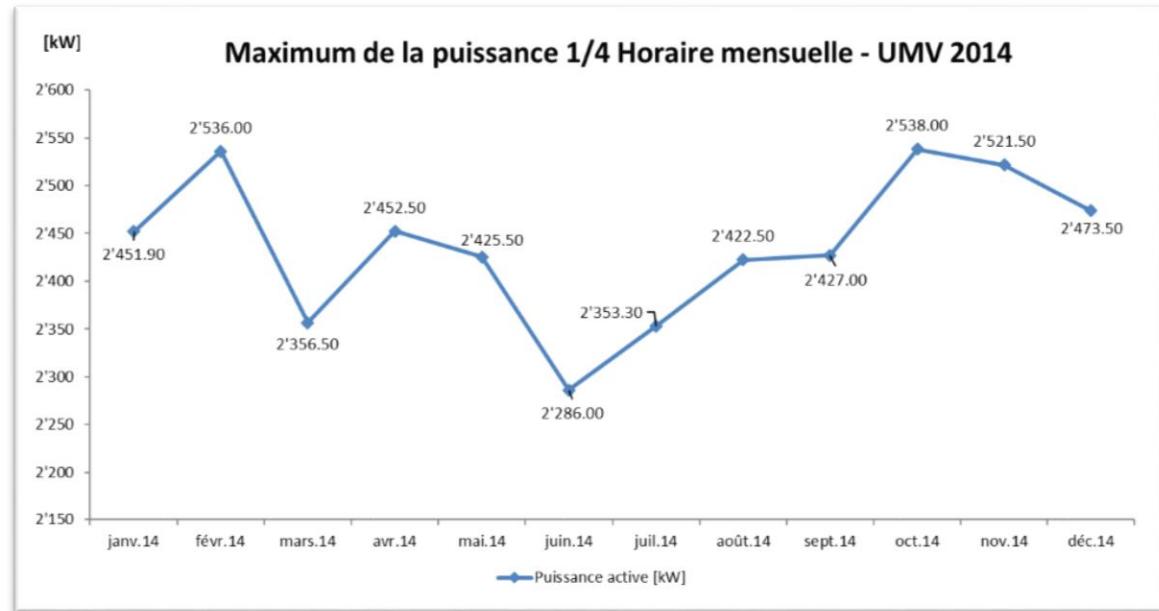


Figure 3 : Maximum de la puissance ¼ horaire mensuelle de l'année 2014 des UMV.



Intelligence collective pour un délestage dynamique de la charge

Les coûts de la puissance mensuelle en francs de l'année 2014 du site de Vallorbe des UMV varient entre CHF 23'400 et près de CHF 26'000 par mois et sont présentés dans le graphique ci-dessous :

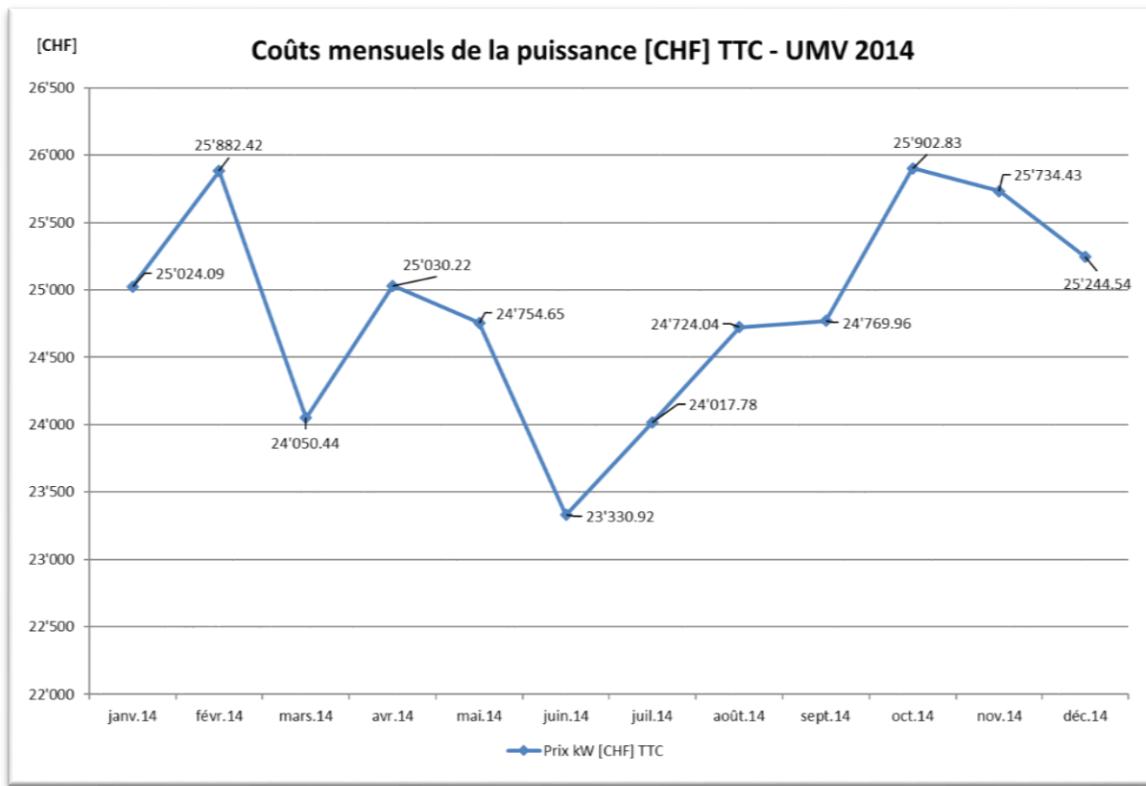


Figure 4 : Les coûts de la puissance mensuelle de l'année 2014 des UMV.

Le graphique ci-dessous présente la courbe de charge d'une journée typique de l'activité des UMV.

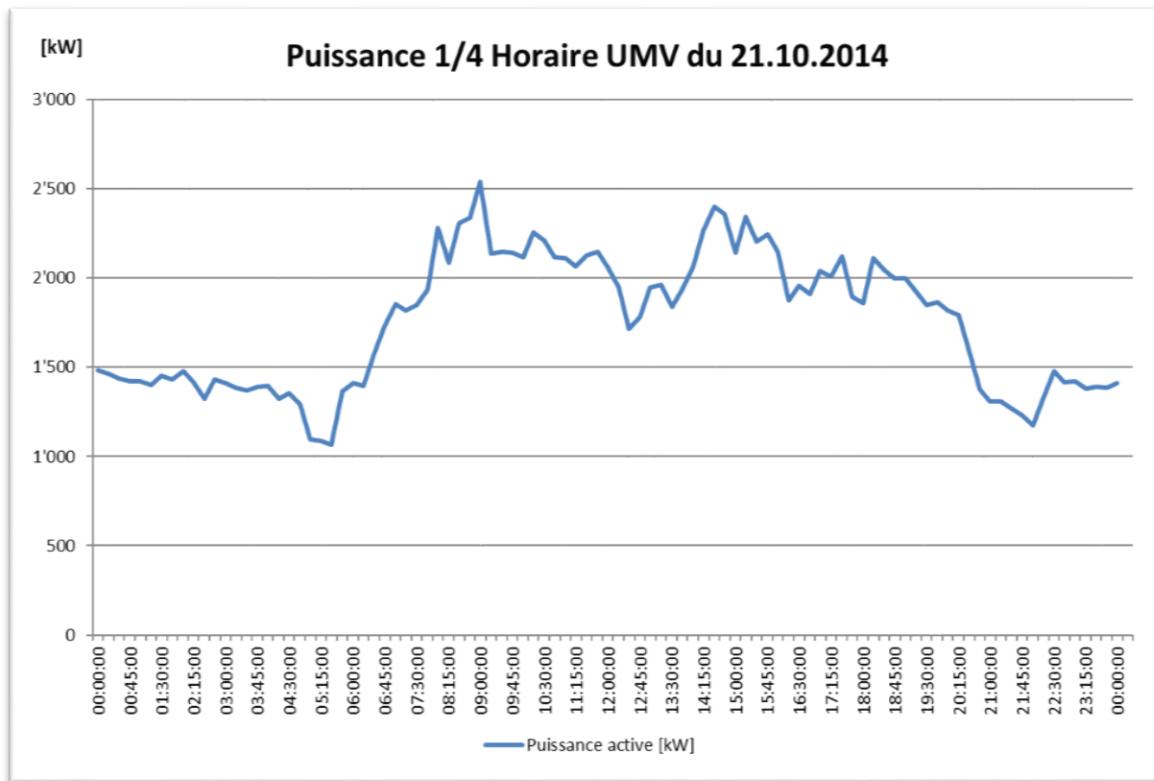


Figure 5 : présente la courbe de charge d'une journée typique de l'activité des UMV.



Intelligence collective pour un délestage dynamique de la charge

L'analyse de la courbe de charge d'une journée typique de l'activité des UMV est présentée dans le graphique ci-dessous, et montre le potentiel d'optimisation de la charge des installations du site.

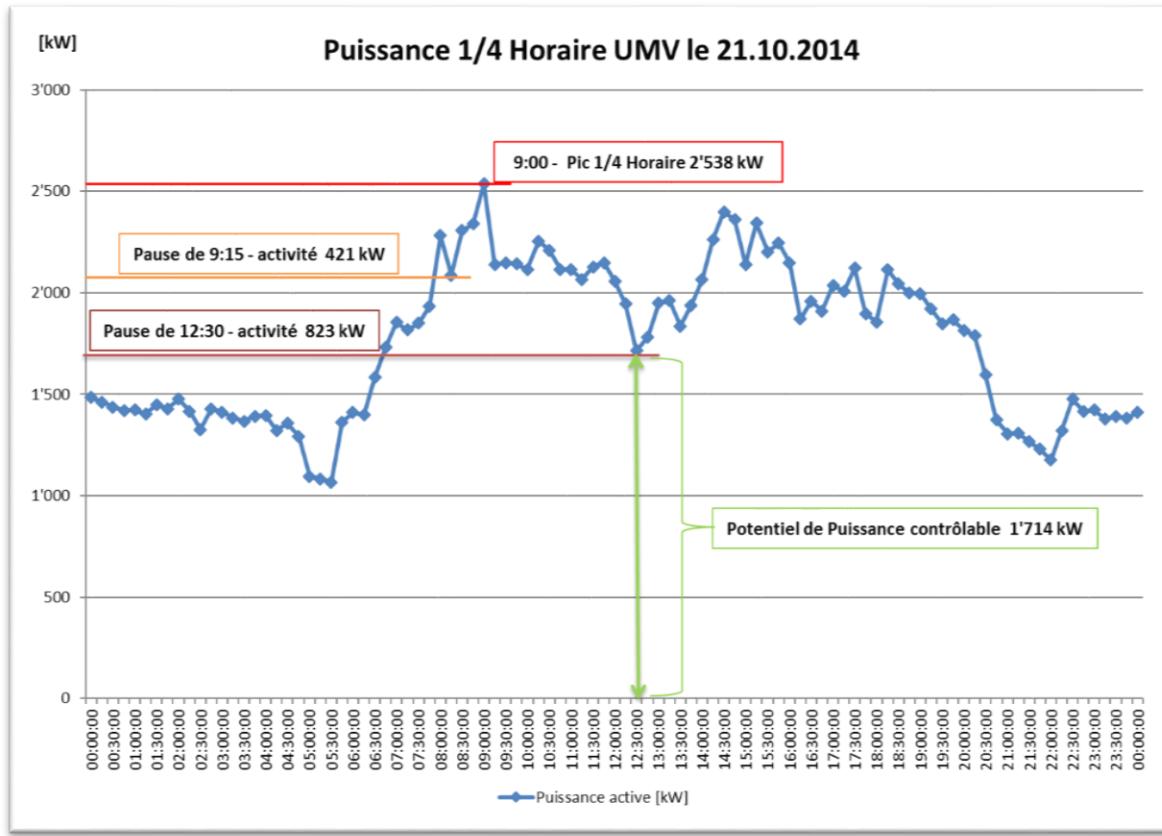


Figure 6 : Analyse de la courbe de charge d'une journée typique.

Les appareils gros consommateurs contrôlables par SEMS et qui représentent un potentiel important pour réaliser des économies grâce au système SEMS sont présentés dans le tableau ci-dessous :

#	Désignation	Puissance nominale contrôlable par SEMS [kW]	% de la puissance nominal par rapport au total de la puissance contrôlable [%]
1	Four tunnel passage	100	6.18%
2	Four de trempe bain de sel 23	65	4.01%
3	Four de trempe bain de sel 26	65	4.01%
4	Four de trempe bain de sel 25	65	4.01%
5	Four de trempe bain de sel 4	65	4.01%
6	Four de trempe cloche	92	5.68%
7	Four de trempe solo passage	92	5.68%
8	Bain de traitement cuve 3 et 4	25	1.54%
9	Ventilation filtre bleu	65	4.01%
10	Compresseur 1	160	9.88%
11	Compresseur 2	160	9.88%
12	Compresseur 3	160	9.88%
13	Compresseur 4	160	9.88%
14	Compresseur 5	160	9.88%
15	Compresseur 6	160	9.88%
16	Assécheur (comp. de froid)	25	1.54%
Total puissance [kW]		1'619	100%

Tableau 2 : La liste des appareils contrôlables par SEMS.



3.2 Principe de facturation

La tarification ci-dessous est celle appliquée en 2016 aux UMV et sert de base pour nos calculs afin de déterminer les économies réalisées par le système SEMS.

Énergie	cts/kWh hors TVA
Heures pleines, cts/kWh hors TVA	4.99
Heures creuses ¹ , cts/kWh hors TVA	3.41
Acheminement	cts/kWh hors TVA
Heures pleines, cts/kWh hors TVA	2.66
Heures creuses ¹ , cts/kWh hors TVA	1.10
Puissance	CHF/kW hors TVA
Puissance,	9.45
Taxes	cts/kWh hors TVA
Émolument communal usage du sol	0.70
Émolument cantonal COSSEL	0.02
Taxe cantonale efficacité énergétique	0.18
Émolument fédéral Len	1.30
Swissgrid – Services système	0.45
Sous-total taxes	2.65

Tableau 3 : Tarifs 2016 des UMV.

Pour notre base de calculs, nous utilisons les tarifs simplifiés présentés dans le tableau suivant.

Tarifs 2016 simplifiés	
Heure pleines	cts/kWh hors TVA
Énergie	4.99
Acheminement	2.66
Taxes	2.65
Total	10.30
Heures creuses	cts/kWh hors TVA
Énergie	3.41
Acheminement	1.10
Taxes	2.65
Total	7.16
Acheminement	CHF/kW hors TVA
Puissance	9.45

Tableau 4 : Tarifs 2016 simplifiés des UMV.

¹ Les heures creuses sont appliquées de 22h00 à 06h00, 7 jours sur 7.



4. CONCEPT – DESCRIPTION DE L'INSTALLATION

4.1 Le système SEMS

SEMS est un système décentralisé d'équilibrage dynamique de la charge permettant de réduire les pics de puissances. Les modules SEMS apprennent et supervisent par eux-mêmes la consommation des appareils gros consommateurs d'énergie auxquels ils sont connectés et, au moyen d'un régulateur local, contrôlent automatiquement leur activation afin d'éviter des pics de charge. SEMS est constitué principalement de 4 différents modules électroniques :

1. **Les Terminaux SEMS** sont des modules intelligents, dans lesquels un algorithme distribué s'exécute. Chaque Terminal est branché en série sur l'alimentation d'un appareil, pour mesurer sa consommation et contrôler son activité. Cet appareil est en règle générale un consommateur important de l'installation électrique. Un Terminal supplémentaire mesure la consommation globale de l'installation pour tenir compte des appareils non contrôlés. Tous les Terminaux sont synchronisés et communiquent entre eux, et ont ainsi une vue globale mais détaillée de la consommation de l'installation. Chaque minute, chaque Terminal prend une décision individuelle concernant son appareil, le résultat de l'ensemble de ces décisions contribue à réduire le pic de puissance. L'architecture du système SEMS est hiérarchique et modulaire ; les terminaux sont regroupés par grappes (voir la Figure 7). Typiquement, une grappe de terminaux est souvent installée dans le tableau électrique de l'installation à contrôler.
2. **Le Bridge SEMS** sert à transmettre les données reçues par son interface RS485, grâce à son modem radio fréquence. Ainsi, le Bridge SEMS permet la communication en réseau radio fréquence entre un ou plusieurs Terminaux SEMS, les compteurs à impulsions, les capteurs munis d'interface RS485 compatible Modbus et la Gateway SEMS.
3. **Le SEMS_IG** est un module qui assure une communication RS485 ou Modbus avec une isolation galvanique allant jusqu'à 2.5KV, le SEMS_IG peut être raccordé à une grappe de Terminaux ou à un seul Terminal pour étendre leur communication jusqu'à 1.2 Km.
4. **La Gateway SEMS** est une passerelle qui collecte grâce à son modem radio fréquence toutes les données échangées entre les Terminaux SEMS, le compteur à impulsions et les mesures des capteurs envoyées par les Bridges SEMS. La Gateway SEMS stocke localement toutes les données collectées et peut communiquer avec un serveur distant par une simple connexion IP, par Ethernet ou Wifi.

La communication entre les modules du système SEMS se fait en deux étapes :

- Communication RS485 entre tous les terminaux d'une grappe
- Communication radio ou RS485 entre la Gateway et les bridges SEMS qui sont des modules équipés d'un module radio fréquence.

Certaines grappes peuvent être réduites à un seul Terminal dans le cas où l'appareil à contrôler est distant des autres et ne peut être contrôlé depuis le tableau électrique. Par exemple, un climatiseur ou une machine de ventilation situé sur le toit d'un bâtiment.

Cette structure est illustrée par la figure du graphique ci-dessous.

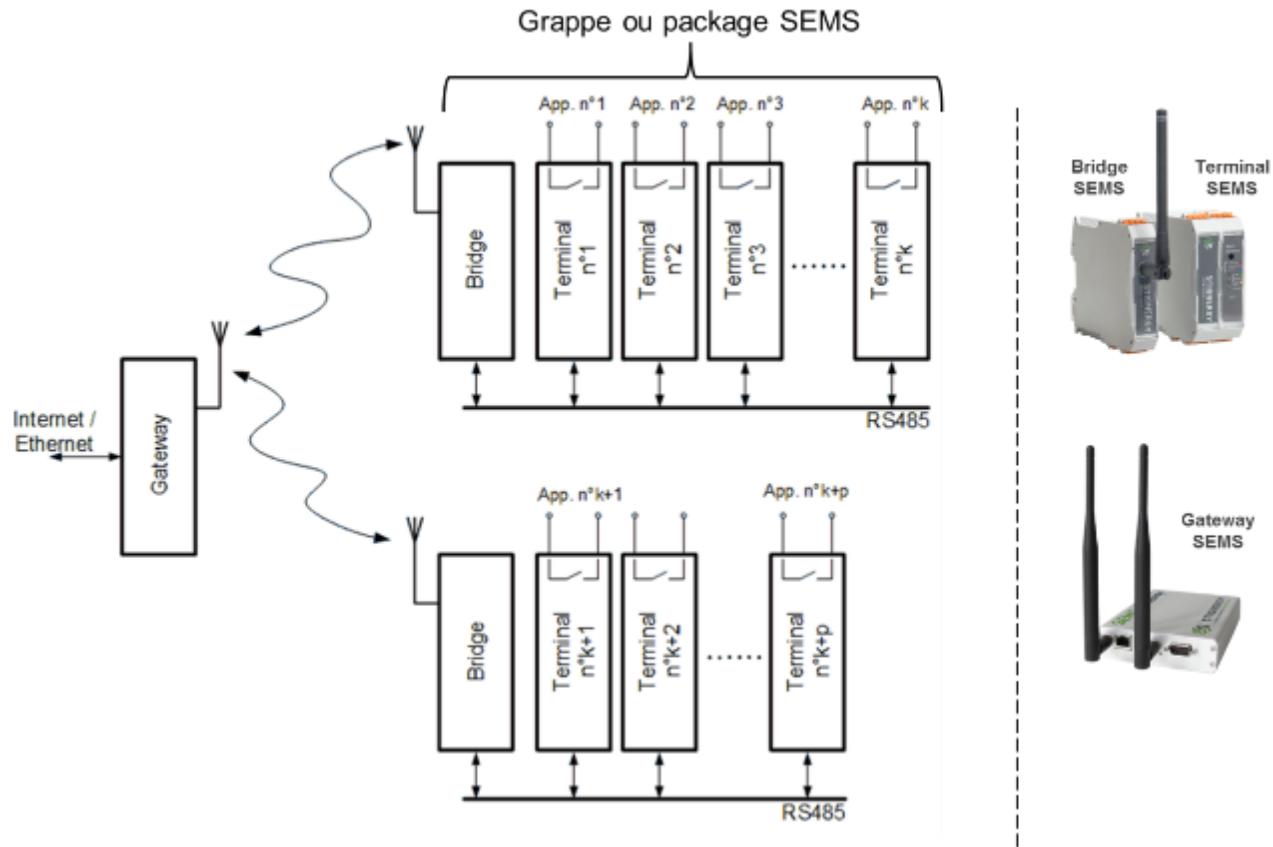


Figure 7 : Structure et configuration de l'architecture de branchement de SEMS.

SEMS est un système de monitoring, de contrôle et d'optimisation parfaitement dynamique. Il réduit de manière automatique et auto adaptative les appels de puissance de la consommation d'énergie des appareils et équipements électriques tels que les fours, les chauffages, les ventilateurs, les climatiseurs, les compresseurs, les groupes de froids, les réfrigérateurs, les congélateurs, les pompes, les moteurs, les chargeurs de batterie, etc. permettant ainsi de minimiser l'impact financier de la puissance quart horaire sur la facture d'électricité.



Figure 8 : le système SEMS.

Outre l'optimisation dynamique de la demande d'énergie, un site web dynamique avec un accès sécurisé appelé le SEMS Live Dashboard permet de visualiser à distance et en détail le comportement de l'installation sous surveillance pour détecter les consommations inutiles et permet d'agir à distance ou de manière programmable sur chaque appareil électrique.



Figure 9 : SEMS Live Dashboard.

Les principaux bénéfices du SEMS Live Dashboard :

- La visualisation de la courbe de charge sous forme de graphiques et la possibilité d'exporter les données mesurées dans un fichier Excel.
- La visualisation sous forme de graphiques de tous les paramètres électriques de l'installation et des appareils contrôlés avec la possibilité d'exporter toutes les données mesurées dans un fichier Excel.
- La visualisation sous forme de graphiques de tous les mesures de capteurs de températures, d'humidités, de pressions d'air dans la cuve, de toxines et pollutions de l'air, etc. avec la possibilité d'exporter toutes les données mesurées dans un fichier Excel.
- Le contrôle et le pilotage à distance des appareils et équipements électriques par des minuteurs.
- La maintenance préventive des équipements électriques grâce à un système d'alerte et de gestion automatique des alarmes, ce qui constitue un outil pour améliorer la qualité du service offert par les services techniques en termes de maintenance et de sécurité des personnes.
- Le diagnostic et la détection des pannes et des anomalies des équipements.
- L'évaluation de l'équivalent CO₂ de la consommation de l'énergie électrique du site.
- La génération de rapport d'analyse et de bilans énergétiques.



4.2 Installation de SEMS aux UMV

Le système SEMS a été installé sur le site des Usines Métallurgiques de Vallorbe avec le déploiement de 9 Bridges SEMS permettant la communication des Terminaux SEMS entre eux pour le contrôle et l'optimisation des 16 appareils gros consommateurs d'énergie électrique contrôlées par le système SEMS installé sur le site des UMV.

L'installation des modules du système SEMS est résumée dans le tableau ci-dessous :

Grappe SEMS	Bridge SEMS	Terminal SEMS	Installation	Puissance nominale [kW]
G1	B1	S-C 1	Compteur principal	-
G2	B2	S-C 2	Compteur principal (station de secours)	-
G3	B3	T1	Four passage 1 (7 zones)	100
G4a	B4	T2	Four 23	65
		T3	Four 26	65
		T4	Four 3	65
		T5	Four 4	65
		T6	Compresseur 1	160
G4b		T7	Compresseur 2	160
		G5	B5	T8
G6	B6	T9	Four cloche (3 zones)	92
		T10		
		T11		
G7	B7	T12	Four passage 2 (5 zones)	92
		T13	Bain de traitement 1 (2 corps de chauffe)	25
		T14		
		T16	Bain de traitement 2 (2 corps de chauffe)	25
		T17		
G9	B9	T18	Compresseur 3	160
		T19	Compresseur 4	160
		T20	Compresseur 5	160
		T21	Compresseur 6	160
		T22	Compresseur de froid	25
Total				1'634

Tableau 5 : Liste des appareils contrôlés par SEMS.



L'installation du système SEMS est présentée dans le plan du site des UMV ci-dessous :



Figure 10 : Installation de SEMS aux UMV.

5. PROCÉDURE ET MÉTHODOLOGIE

5.1 Mesure télémétrique pour le contrôle de l'environnement piloté

Ce projet démonstrateur vise à tester le système SEMS dans un environnement industriel. Étant donné que certains systèmes pilotés par SEMS contribuent au processus de fabrication, il est essentiel de prévoir des mesures de contrôle afin de garantir que les actions des Terminaux SEMS n'influence pas la production (quantité et qualité de pièces doivent rester inchangées). Ainsi, nous avons prévu d'intégrer et d'installer avec le système SEMS de base le système SEMS TECO pour Telemetry for Energy Control and Optimization. Il s'agit d'un système d'acquisition de données par des sondes de mesure de l'environnement contrôlé par les Terminaux SEMS. Le SEMS TECO mesure et relève les différentes sondes de températures des fours, la pression de l'air dans la cuve pour le contrôle du groupe compresseurs d'air et les toxiques dans l'air pour contrôler la ventilation. Ces mesures sont transmises et enregistrées sur le serveur distant de Stignergy via la Gateway SEMS afin de pouvoir les afficher dans le SEMS Live Dashboard pour le contrôle et l'analyse des résultats.

Au départ du projet le SEMS TECO avait un rôle de contrôle et de vérification des actions des Terminaux SEMS afin de garantir le respect des paramètres de flexibilités et de contraintes de certains appareils ou processus pilotés par SEMS et qui sont en relation directe à la production, donc à la marge des affaires du client et même dans certains cas de sécurité pour les opérateurs des machines. Dans ces conditions la marge de tolérance au non-respect des contraintes est quasiment nul. Ainsi, le SEMS TECO représente un élément important de fiabilité et d'efficacité du système SEMS. Pour des raisons de maîtrise des coûts de monitoring du système SEMS, nous avons automatiser ce processus de contrôle des actions SEMS avec la mesure de



l'environnement contrôlé et nous avons intégré ainsi, la réception des données et des mesures de SEMS TECO dans les Terminaux concernés comme une partie intégrante du système SEMS.

5.2 Analyse et détermination de l'impact de SEMS aux UMV

Afin de déterminer l'impact des actions SEMS, nous effectuons un processus de « reverse engineering » pour déterminer quel aurait été la consommation si aucune action n'avait été prise par SEMS. Ce processus nous permet également de vérifier que les bonnes actions ont été prises au bon moment et d'améliorer les mécanismes de décision.

Pour mesurer l'impact de SEMS sur la courbe de charge du mois analysé et pour déterminer le gain de puissance, nous reconstituons la courbe de charge de chaque jour du mois concerné. Ensuite, nous effectuons une comparaison entre la puissance quart horaire la plus élevée reconstituée et la puissance quart horaire la plus élevée mesurée du mois étudié.

Le graphique ci-dessous présente comment la réduction de puissance quart horaire de la charge globale du site réalisé par SEMS pour chaque mois a été déterminée.

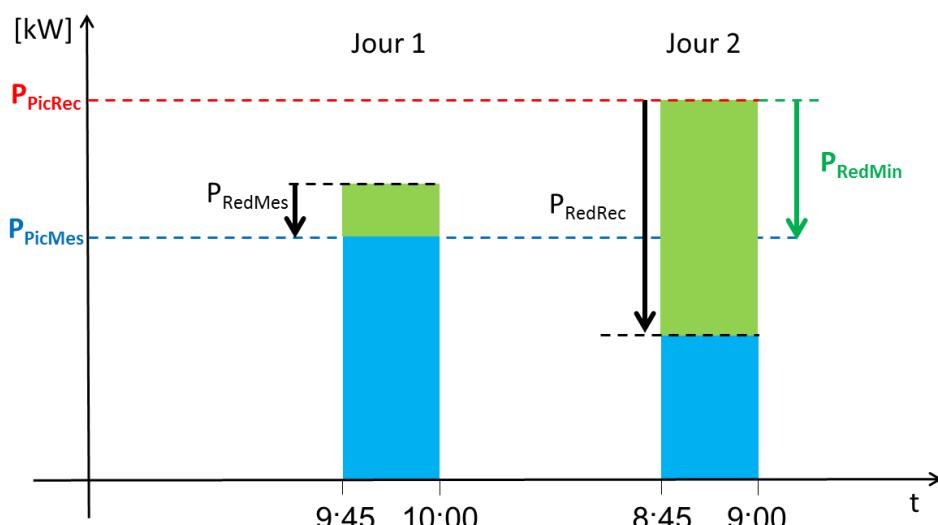


Figure 11 : Détermination de la réduction de puissance.

En bleu sont présentées les puissances mesurées réellement par le système SEMS et le compteur électrique du fournisseur d'énergie du site. La valeur la plus élevée du mois est prise en compte pour la facturation. En vert, nous représentons la puissance réduite par SEMS déterminée grâce à notre processus de reverse engineering.

L'addition des valeurs en bleue et verte détermine quel aurait été le pic de puissance si SEMS n'avait pas pris de décisions.

Nous recherchons ensuite la valeur reconstituée. Ainsi le gain de puissance se calcule de la manière suivante :

$$P_{RedMin} = P_{PicRec} - P_{PicMes}$$

Où

P_{RedMin} : Puissance ¼ horaire réduite

P_{PicRec} : Puissance reconstituée maximum du mois

P_{PicMes} : Puissance mesurée maximum du mois



5.3 Principe du calcul d'économie d'énergie

Pour déterminer l'économie d'énergie d'un appareil en mode économie « Mode ECO », nous comparons simplement deux périodes de mesures où l'appareil a fonctionné dans les mêmes conditions mais une fois avec le « Mode ECO » enclenché et une autre fois sans.

Afin de déterminer le début de la période, nous nous basons sur l'heure d'enclenchement du « Mode ECO » et vérifions que la température de maintien (température relevée par le module SEMS TECO) est la même sur les deux périodes. Pour déterminer la fin de la période d'analyse, nous recherchons le moment après la fin du mode économie où la température est à nouveau identique sur les deux périodes.

Nous calculons ensuite l'énergie consommée durant chaque période pour déterminer le gain. Nous estimons ensuite le gain d'énergie par heure pour nous permettre de calculer l'économie d'énergie annuelle par appareil.

6. RÉSULTATS

6.1 Réduction de la puissance aux UMV

6.1.1 Rappel des objectifs de réduction de la puissance aux UMV par SEMS

Dans le cadre de la pré-étude du projet et avant l'installation du système SEMS aux UMV, nous avions fixé les objectifs de réduction de la puissance $\frac{1}{4}$ horaire de la courbe de charge des UMV. Ces objectifs sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Désignation	Puissance Nominale Contrôlable [kW]	Réduction [%]	Réduction [kW]	Prix kW HT [CHF]	Économie mensuelle HT [CHF/mois]	Économie annuelle HT [CHF/année]
Scénario_1	1'619	20%	335.8	9.45	3'173.31	38'080
Scénario_2	1'619	10%	167.9	9.45	1'586.65	19'040

Tableau 6 : Les objectifs de réduction par SEMS de la puissance $\frac{1}{4}$ horaire aux UMV.

Les objectifs SEMS de réduction de la puissance $\frac{1}{4}$ horaire par rapport à la facture du mois de novembre 2015 sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Pic de puissance mensuelle - novembre 2015	2'220 kW
Coûts de la puissance	20'979.- CHF (HTVA)
16 appareils contrôlables par SEMS	1'634 kW \approx 73.6 % du pic (2'220 kW)
Objectif mensuel de réduction de la puissance	168 à 336 kW/mois
Objectif d'économie annuelle	19'000 à 38'000 CHF/an
Réduction par rapport au pic du mois de novembre 2015	7.57% à 15.14%
Investissement de départ pour l'installation du système SEMS ²	59'500 CHF
Amortissement prévu de SEMS	19 à 37 mois

Tableau 7 : Les objectifs de réduction par SEMS de la puissance $\frac{1}{4}$ horaire aux UMV par rapport à la facture d'électricité du mois de novembre 2015.

² Coûts des modules SEMS selon le budget prévu au départ du projet, y compris l'installation et la fourniture électrique. La planification, la gestion de projet, l'ingénierie et le système TECO ne sont pas inclus dans le calcul de l'amortissement et constituent la part non amortissable couverte par la subvention de l'OFEN.



6.1.2 Puissance installée pilotable par SEMS

Le tableau ci-dessus présente la liste des puissances installées contrôlables par le système SEMS :

#	Désignation	Puissance initiale Contrôlable par SEMS [kW]	Puissance installée Contrôlable par SEMS [kW]	Puissance par rapport à la puissance installée contrôlable par SEMS [%]
1	Four tunnel passage	100	100	6.12%
2	Four de trempe bain de sel 23	65	65	3.98%
3	Four de trempe bain de sel 26	65	65	3.98%
4	Four de trempe bain de sel 25	65	65	3.98%
5	Four de trempe bain de sel 4	65	65	3.98%
6	Four de trempe cloche	92	92	5.63%
7	Four de trempe solo passage	92	92	5.63%
8	Bain de traitement cuve 3 et 4	25	50	3.06%
9	Ventilation filtre bleu	65	55	3.37%
10	Compresseur 1	160	160	9.79%
11	Compresseur 2	160	160	9.79%
12	Compresseur 3	160	160	9.79%
13	Compresseur 4	160	160	9.79%
14	Compresseur 5	160	160	9.79%
15	Compresseur 6	160	160	9.79%
16	Assécheur (comp. de froid)	25	25	1.53%
Total puissance [kW]		1619	1'634	100%

Tableau 8 : Liste des appareils contrôlés par SEMS.

La puissance nominale représente la puissance maximale relevée à partir des plaquettes signalétiques des appareils contrôlés par SEMS. La puissance contrôlée par SEMS représente la puissance maximale mesurée pour chaque Terminal SEMS et la puissance que nous appelons effective représente la puissance sur laquelle SEMS peut appliquer des actions. Dans le cas d'un four passage, SEMS applique des actions sur les corps de chauffe et n'intervient pas sur le moteur du ruban ou du tapis.



6.1.3 Les changements dans l'installation des UMV

Le tableau ci-dessous résume les changements qui ont eu lieu pour les appareils contrôlés par SEMS en début de la phase d'optimisation (avril 2016).

Groupe SEMS	Bridge SEMS	Terminal SEMS	Installation	Puissance Nominal [kW]
G3	B3	T1	Four tunnel passage	100
G4a	B4	T2	Four à sel 23 ⁽¹⁾	0
		T3	Four à sel 26 ⁽²⁾	75
		T4	Four à sel 25 ⁽³⁾	90
		T5	Four à sel 4 (SAFED)	65
G4b		T6	Compresseur 2770	0
		T7	Compresseur 6621 ⁽⁴⁾	160
G5	B5	T8	Ventilation filtre bleu	55
G6	B6	T9 T10 T11	Four Solo Cloche Zone 1 (bas) Zone 2 (milieu) Zone 3 (haut)	92
		T12	Four Solo Passage (5 zones)	92
G7	B7	T13 T14	Bain de traitement cuve 4 KM1 KM2	25
		T16 T17	Bain de traitement cuve 3 KM1 KM2	25
G9	B9	T18	Compresseur 2773	160
		T19	Compresseur 6560	160
		T20	Compresseur 6032	160
		T21	Compresseur 350	160
		T22	Assécheur (Compresseur de froid)	25
Total				1'444

Tableau 9 : Mise à jour de la liste des appareils contrôlés par SEMS.

Nous avons enregistré une baisse de 190 kW de la puissance nominale totale contrôlable par SEMS, ce qui représente une baisse de 11.6% de la puissance nominale contrôlable prévue au début du projet. Cette baisse est due aux changements de fonctionnement des appareils suivants :

1. Le four à sel 23 avec une puissance nominale de 65 kW est en arrêt depuis le début du projet. Il n'est pas prévu qu'il fonctionnera dans le futur. Il sera remplacé par un four de trempe de nouvelle génération, le même modèle que celui du four 4 (SAFED).
2. Le four à sel 26 avec une puissance nominale de 65 kW a subi un remplacement de ses corps de chauffe avec une nouvelle puissance nominale de 10kW de plus, pour passer à 75kW.
3. Le four à sel 25 avec une puissance nominale de 65 kW a subi un remplacement de ses corps de chauffe avec une nouvelle puissance nominale de 25 kW de plus, pour passer à 90 kW.
4. Le compresseur 6621 était en maintenance depuis le début du projet et n'a jamais fonctionné depuis à ce jour. Suite à un projet visant le remplacement des compresseurs existants par d'autres avec une technologie différente, celui-ci ne va pas être remis en service.



6.1.4 Potentiel de réduction de la puissance ¼ horaire

Nous avons classé l'ensemble des appareils contrôlés par SEMS aux UMV en quatre groupes :

1. Un groupe des compresseurs d'air comprimé avec un total de puissance nominal de 800 kW
2. Un groupe thermique avec un total de puissance nominal de 619 kW
3. Un groupe Assécheur d'air, qui est un compresseur de froid d'une puissance nominale de 25 kW
4. Groupe ventilation de 55 kW de puissance nominale

6.1.4.1 Gestion du groupe compresseurs

Avec une puissance de 800 kW, la consommation du groupe compresseurs joue un très grand rôle dans le pic de puissance. À chaque pic de puissance mesuré aux UMV, nous avons observé souvent le fonctionnement des 5 compresseurs en même temps.

Les compresseurs sont gérés par un système existant de gestion de la production d'air comprimé appelé « AirLeader ». En fonctionnement normal, le système « AirLeader » essaie de maintenir la pression d'air dans la cuve dans la zone de pression DP1 présentée dans le tableau ci-dessous :

DP	Pression minimum [bar]	Pression maximum [bar]
1	6.5	7.0

Tableau 10 : Zone de pression (DP) de fonctionnement par défaut.

Le fonctionnement de « AirLeader » est simple. Il demande aux compresseurs de produire de l'air jusqu'à la pression maximum puis arrête de compresser jusqu'à ce que la pression arrive à la valeur de pression minimum, moment où il relance la compression. « AirLeader » prédit l'évolution de pression et n'interrompt pas à chaque fois tous les compresseurs mais garde en fonctionnement le nombre de compresseur qu'il estime nécessaire. Cependant lorsqu'apparaît une forte variation de pression et que la pression chute en dessous de la pression minimum, « AirLeader » actionne immédiatement tous les compresseurs pour garantir au plus vite un retour de la pression dans la zone de pression choisie et n'arrête pas ces compresseurs que lorsque la pression maximum est atteinte.

Ce comportement brusque d'activation de tous les compresseurs en même temps crée des pics de consommation. Chaque compresseur ayant la puissance de fonctionnement d'environ 153 kW, la mise en marche de cinq compresseurs ensemble pendant deux minutes représente un impact de 102kW³ sur la puissance quart horaire.

Contraintes

- La pression d'air dans la cuve doit toujours permettre la production. Elle ne doit ni être trop basse ce qui bloquerait la production, ni trop haute ce qui pourrait endommager les compresseurs. Elle doit rester dans la zone de pression DP1.
- La solution choisie ne doit pas désactiver le système « AirLeader ».

Flexibilité

- Le nombre de compresseurs en fonctionnement et leurs moments d'activation ne sont pas critique tant que la pression d'air dans la cuve est garantie.

Solutions adoptées

Afin de réduire ces pics de puissance générés par des démarrages brusques et surtout inutiles de certains compresseurs, l'algorithme SEMS est paramétré pour :

1. Une mise à vide sélective des compresseurs pour éviter un fonctionnement simultané de 5 compresseurs
2. Une gestion dynamique des zones de pression (DP)

³ La moyenne de puissance de 5 compresseurs à 153kW fonctionnant pendant 2 minutes sur 15 minutes correspond à 102kW.



La mise à vide sélective

L'objectif du système SEMS est avant tout de garantir une pression suffisante dans la cuve de consommation d'air comprimé en évitant le démarrage simultané des compresseurs lors des moments critiques de la journée où un pic pourrait se produire. Le but est de laisser fonctionner deux à trois compresseurs en permanence et de ne laisser démarrer les cinq compresseurs qu'en cas critiques pouvant perturber les processus de production nécessitant d'air comprimé pour leurs fonctionnements.

L'objectif est représenté dans la Figure 12. Il vise à adoucir la courbe de pression en maintenant plusieurs compresseurs en fonctionnement tout en évitant des arrêts et des redémarrages groupés de cinq compresseurs.

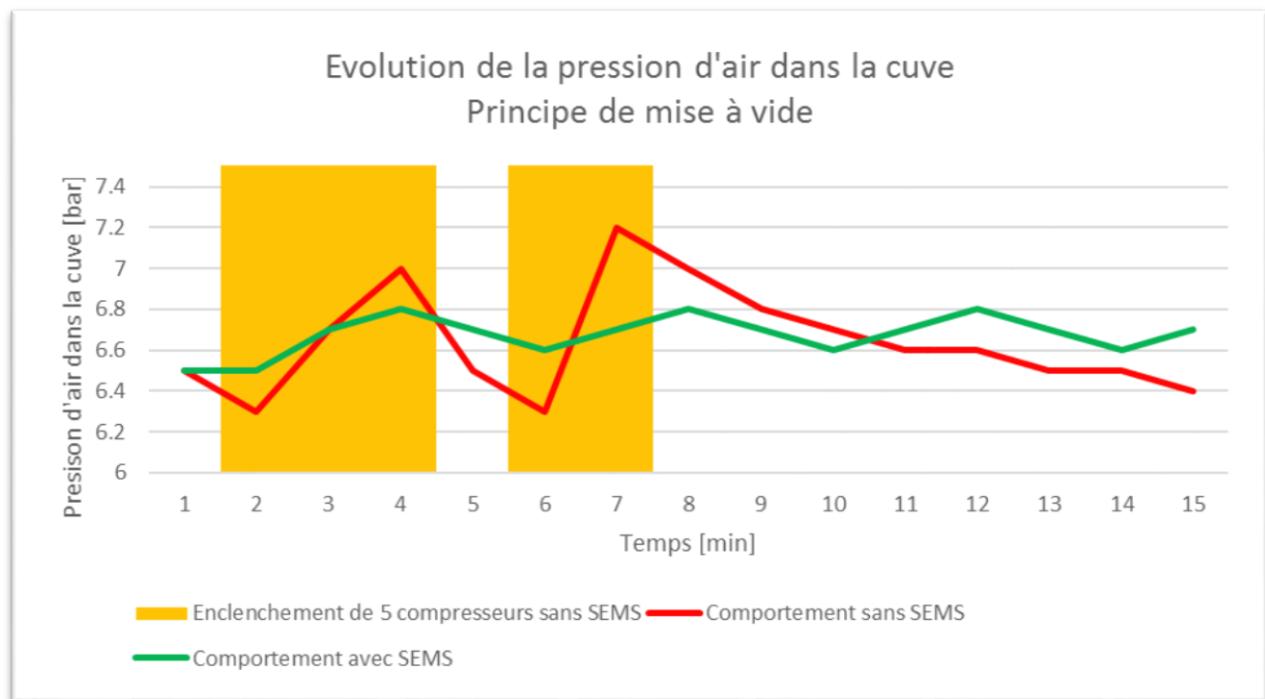


Figure 12 : Exemple d'évolution de la pression dans la cuve avec et sans « mise à vide ».

Chaque Terminal SEMS a la possibilité de mettre en « marche à vide » le compresseur qu'il mesure et pilote, permettant de réduire sa puissance de fonctionnement à 40 kW au lieu des 153 kW. Si tous les compresseurs ne fonctionnent pas en même temps et qu'un compresseur est mis en « marche à vide », « l'AirLeader » actionnera un compresseur de plus, en compensation, pour atteindre ses objectifs de pression. Il faudra donc aussi le mettre en « marche à vide » si l'on désire garantir un nombre spécifique de compresseurs en marche.

Le Terminal SEMS contrôle la mise à vide du compresseur mais pas son enclenchement ni son déclanchement qui restent sous la supervision du « AirLeader ».

Le tableau ci-dessous présente le résumé de toute les possibilités du potentiel de la réduction de la puissance que peut réaliser SEMS par les actions de la mise à vide sélective des compresseurs :



Fonctionnement des compresseurs avant les actions de SEMS		Fonctionnement des compresseurs avec les actions de SEMS							
Nombre de compresseurs	Puissance [kW]	Ne laisser que 4 compresseurs en marche		Ne laisser que 3 compresseurs en marche		Ne laisser que 2 compresseurs en marche		Ne laisser que 1 compresseur en marche	
		Puissance active [kW]	Gain [kW]	Puissance active [kW]	Gain [kW]	Puissance active [kW]	Gain [kW]	Puissance active [kW]	Gain [kW]
5	153*5 = 765	153*4+40 = 652	113	153*3+40*2=539	226	153*2+40*3 = 426	339	153+40*4 = 313	452
4	153*4 = 612			153*3+40*2=539	73	153*2+40*3=426	186	153+40*4 = 313	299
3	153*3 = 459					153*2+40*3=426	33	153+40*4 = 313	146
2	153*4 = 306							153+40*4 = 313	-7

Tableau 11 : Résumé de toutes les possibilités de commande SEMS de « marche à vide » sur les compresseurs.

Par exemple, pour diminuer la puissance quart horaire de 100kW il suffirait de mettre à vide deux compresseurs pendant 7 minutes lorsqu'il y en a cinq qui fonctionnent en même temps sans SEMS, pour observer une réduction de $226\text{kW} \cdot 7/15 = 105.5 \text{ kW}$ sur le quart horaire.

Nous observons aussi que l'interruption d'un compresseur lorsqu'il n'y en a que deux en fonctionnement sans SEMS, ne fournit aucune réduction (gain) de puissance.



Pour garantir le bon fonctionnement de l'installation aux UMV, et en respectant les contraintes, nous avons choisi d'exécuter la mise à vide sur trois compresseurs seulement en respectant les consignes de pression suivante :

Référence compresseur	Pression en-dessous de laquelle le compresseur ne peut pas être mis à vide [bar]	Pression en-dessus de laquelle le compresseur peut être mis à vide [bar]
2773	6.5	6.7
6023	6.6	6.8
350	6.7	6.9
6650	-	-
2770	-	-

Tableau 12 : Contraintes et flexibilités pour la mise à vide des compresseurs.

Nous avons rapidement observé que cette solution de contrôle fonctionnait bien et garantissait le fonctionnement correct de la production mais qu'on pouvait encore améliorer les gains de puissance en supprimant la consommation de 40kW lors de la mise à vide. C'est pourquoi nous avons ajouté à ce contrôle la gestion dynamique des zones de pression (DP).

Gestion dynamique des zones de pression (DP)

L'idée de cette gestion dynamique de DP est de demander au système « AirLeader » d'augmenter sa production d'air comprimé lors de quart horaire non critique afin de charger au maximum la cuve d'air comprimé pour permettre de démarrer le quart d'heure suivant estimé comme potentiellement élevé en termes de puissance par le système SEMS avec le maximum de réserve. De plus, nous utilisons aussi un DP ou la production d'air est réduite, afin de produire ce qu'il faut pour répondre à la consommation d'air comprimé sans pour autant utiliser les compresseurs pour charger la cuve. Ainsi pour les quarts d'heure les plus élevé, le système SEMS va « pré-charger » la cuve et diminuer la production d'air, le tout en garantissant le fonctionnement normal des installations.

Pour exécuter ce contrôle nous avons créé deux nouvelles zones de pression DP2 et DP4 comme suit :

DP	Description	Pression de consigne minimum [bar]	Pression de consigne maximum [bar]
DP1	DP par défaut	6.5	7.0
DP2	DP pour effectuer une réserve	6.8	7.2
DP4	DP de production réduite	6.5	6.8

Tableau 13 : Zone de pression (DP) du « AirLeader ».

Sur le boîtier de contrôle du « AirLeader » nous avons la possibilité de forcer l'application du DP grâce à des entrées logiques. Nous avons donc relié le Terminal SEMS le plus proche du « AirLeader », celui qui contrôle le compresseur 6023, à ces entrées. Les deux figures suivantes illustrent le fonctionnement de la gestion dynamique des DP

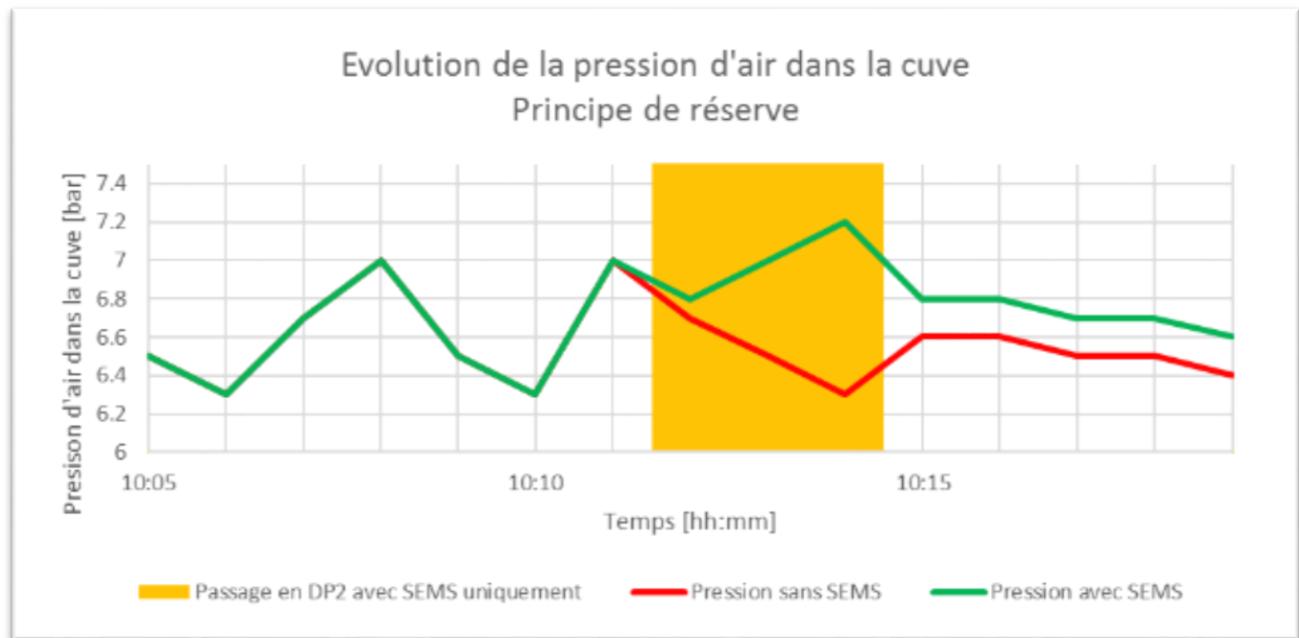


Figure 13 : Illustration du principe de réserve.

Le quart d'heure de 10h00 à 10h15 n'étant pas critique pour le pic de puissance, SEMS demande à « AirLeader » de passer en DP2 juste avant la fin du quart horaire. Ce qui a pour effet de démarrer les compresseurs éteint et de créer une réserve d'air pour le quart d'heure de 10h15 à 10h30.

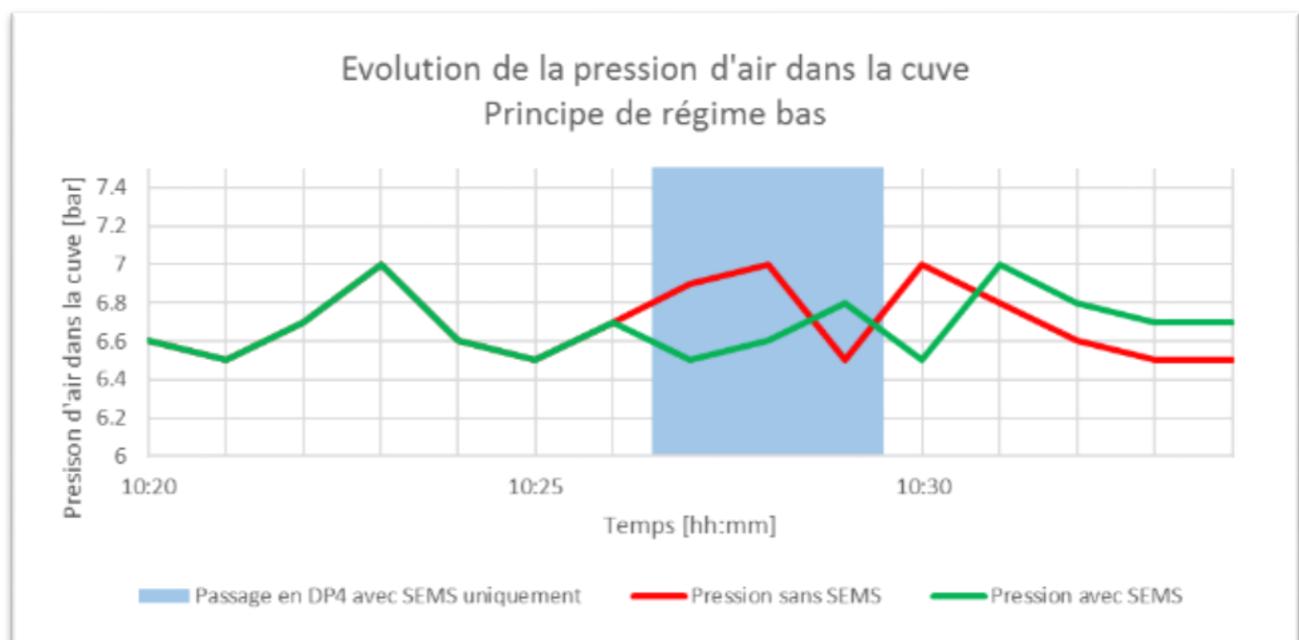


Figure 14 : Illustration du principe de régime bas.

Le quart d'heure de 10h15 à 10h30 étant élevé, SEMS demande à « AirLeader » de passer en DP4. Cela va interrompre la charge des compresseurs dès que la pression de la cuve est plus élevée que 6.8 bar et va maintenir un régime bas entre 6.5 et 6.8 bar en évitant de produire plus que nécessaire. Dès que le prochain quart d'heure arrive, SEMS repasse en DP1 et laisse « AirLeader » gérer seul la pression dans la cuve.

La combinaison de ces différents principes permet la meilleure gestion de la charge du groupe compresseur afin de réduire au maximum leur impact lors des quarts d'heures les plus élevés.



Afin de montrer l'impact des décisions SEMS sur le groupe des compresseurs, nous utilisons une mesure réelle du 20 juin 2016 et analysons les résultats.

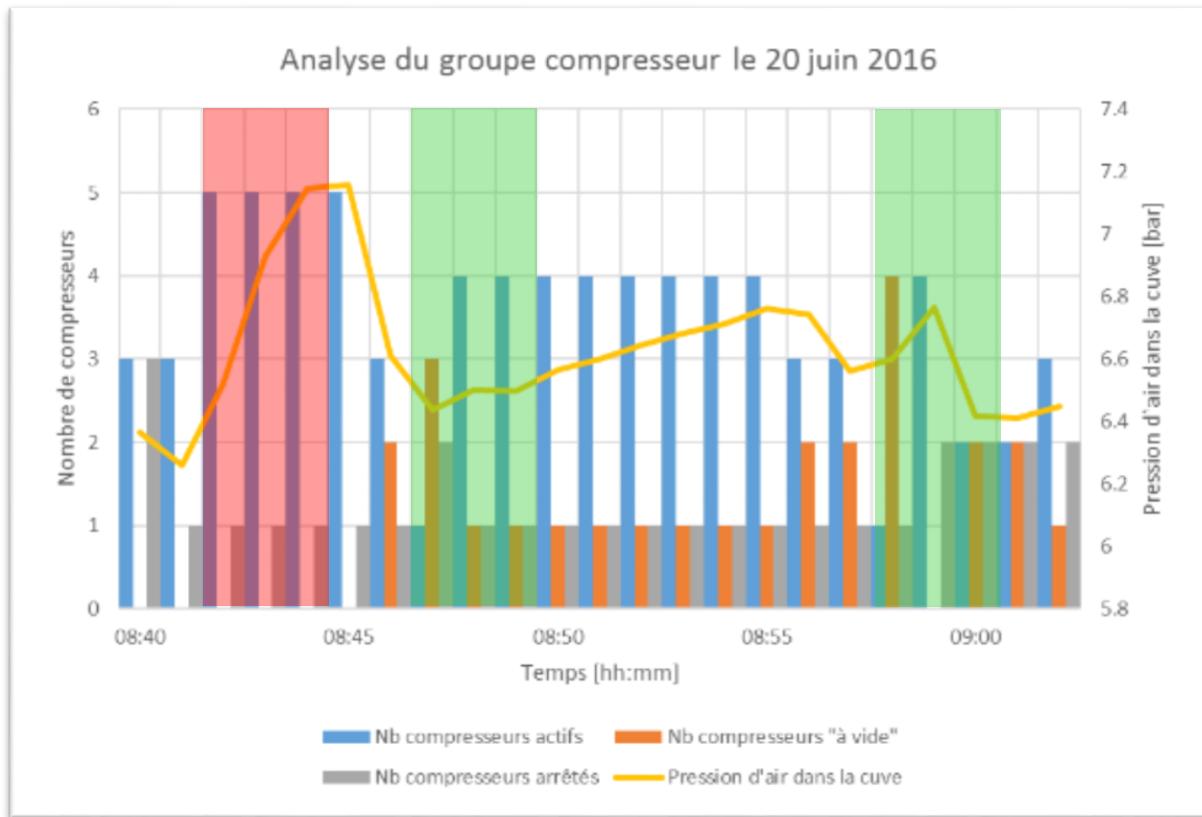


Figure 15 : Analyse du comportement du groupe compresseur avec les actions SEMS.

La réserve d'air comprimé s'est exécutée correctement avant le début du quart horaire de 08h45 à 09h00, amenant la pression d'air dans la cuve à 7.15 bar. Cette réserve nous offre déjà une réduction de puissance des compresseurs de 35.7 kW sur le quart horaire. Ci-dessous, nous analysons l'impact de la décision du passage en DP4.

Heure [hh:mm]	DP sélectionné	Nombre de compresseur mis à vide suite à la décision	Nombre de compresseur arrêté suite à la décision	Gain de puissance [kW]	Gain de puissance sur le quart horaire [kW]
08:47	4	2	1	379	25.3
08:58	4	2	0	226	15.1
08:59	4	0	1	153	10.2
09:00	4	2	1	379	25.3
Total					75.8

Tableau 14 : Analyse de la prise de décision de passage en DP4.

A 08h47 « AirLeader » interrompt sa production d'air comprimé en mettant deux compresseurs à vide et un en arrêt. La deuxième prise de décision de passage en DP4, permet à « AirLeader » d'optimiser sa production en arrêtant complètement un compresseur, car il n'est pas nécessaire pour atteindre l'objectif de 6,8bar de la consigne DP4. En combinant les deux actions, nous obtenons le gain suivant sur le quart horaire :

Action SEMS	Gain de puissance sur le quart horaire [kW]
Passage en DP2 – Réserve	35.7
Passage en DP4 – Régime bas	75.8
Total	111.5

Tableau 15 : Aperçu des gains du groupe compresseur sur le quart horaire.



Grace à l'implémentation de la gestion dynamique des zones de pression (DP), le gain de puissance mesuré des compresseurs a atteint 135.6 kW le 15 juillet 2016 par SEMS pendant le quart d'heure critique de la journée.

Récapitulatif de gains de puissance du groupe compresseur

Mode de fonctionnement	Gain sur la puissance ¼ horaire [kW]
Production	135.6

Tableau 16 : Récapitulatif des gains de puissance pour le groupe compresseur.

6.1.4.2 Gestion du groupe thermique

Pour chaque four, nous avons relevé les consignes de température, de sécurité et de flexibilité offerte pour garantir la production sans perturbation.

Grâce aux sondes de températures existantes, le SEMS-TECO relève les mesures des températures en temps réel, ainsi nous avons déterminé l'inertie des fours après des actions de délestage toujours plus longue jusqu'à atteindre les limites de température tolérée pour la production. Nous relevons aussi le temps nécessaire à chaque four pour revenir à sa température de consigne. Cette analyse nous a permis de déterminer le temps maximum d'application de décision sur chaque four mais aussi le temps pendant lequel nous ne devons plus interagir sur le four après une action de délestage.

Contraintes :

- Le délestage ne doit pas modifier la température du four en dessous d'une valeur définie pour garantir la production
- Dans certain cas, la température ne doit pas non plus diminuer en dessous de certaines valeurs sous peine d'endommager le four et ceci même en dehors des heures de production.

Flexibilité :

- Le corps de chauffe peut être arrêté à n'importe quel moment sans risque d'endommagement.

Lorsqu'il y a plusieurs zones de chauffe, la procédure est la même que pour un four simple à une seule zone de chauffe, mais elle doit être répétée pour chaque zone ou bloc de zones. Lorsqu'un four est composé de multiples zones de chauffe avec des consignes de température différente pour chaque zone, le Terminal SEMS ne peut pas simplement appliquer une commande générale OFF sur l'ensemble du four.

En effet, l'inertie thermique de chaque zone est différente et une interruption de 5 minutes peut induire une variation de 2°C dans une zone et une variation de 25°C dans une autre. C'est pourquoi, dans le cas des fours à plusieurs zones de chauffe, nous avons séparé le contrôle des zones en trois blocs.

- L'entrée
- Le milieu
- La sortie

La zone offrant le plus d'inertie thermique est celle du milieu et c'est elle qui nous offre le plus de flexibilité de délestage, permettant la diminution de la puissance tout en préservant la qualité de production.

Les zones d'entrée et de sortie, étant directement exposées à l'air ambiant, perdent rapidement leur température lors d'actions des Terminaux SEMS.

En fonction du four et de l'inertie de chaque zone, l'algorithme SEMS peut effectuer des délestages de durées différentes sur chaque zone pour permettre le gain de puissance maximum tout en respectant les contraintes de température lors des pics de puissance.

Pour le groupe thermique le potentiel de réduction de la puissance ¼ horaire dépend fortement du mode de fonctionnement à lequel se trouve les fours et les corps de chauffe au moment des pics ¼ horaire les plus élevés de la journée, ces modes de fonctionnement sont :

- Le mode de chauffe
- Le mode de production
- Le mode de maintien



Utilisation de la régulation au lieu du délestage

Le délestage permet en une action d'interrompre le fonctionnement d'un appareil pendant une certaine période. Dans le cas de processus thermique les trois modes de fonctionnement mentionnés ci-dessus se comportent chacun de manière différente lors du délestage. Le mode de chauffe, de production et de maintien.

Pour simplifier la présentation de ces différents comportements, nous présentons le cas d'un appareil disposant d'un corps de chauffe de 60kW. En mode de chauffe, la température augmente en permanence et le corps de chauffe fonctionne à 100% en consommant 60 kW en permanence.

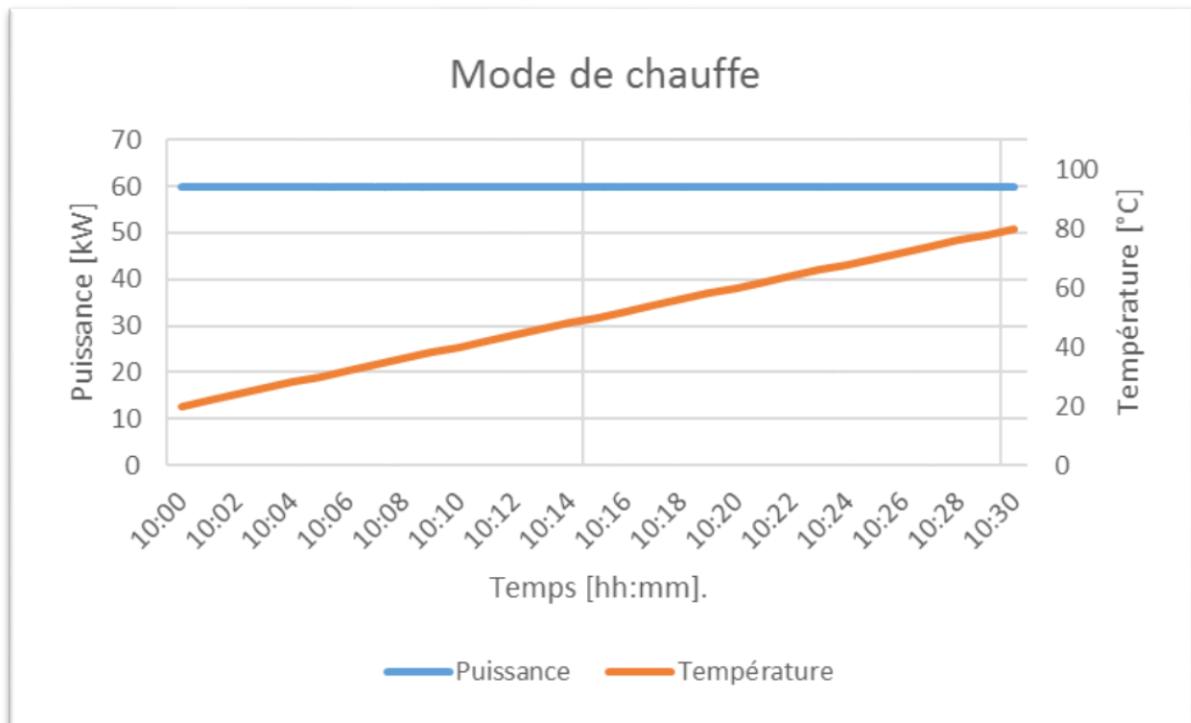


Figure 16 : Consommation et évolution de la température en mode de chauffe.

En mode de production, la température de consigne est déjà atteinte et est maintenue. Dans notre cas, le corps de chauffe fonctionne à 2/3 de sa puissance, à 40kW.

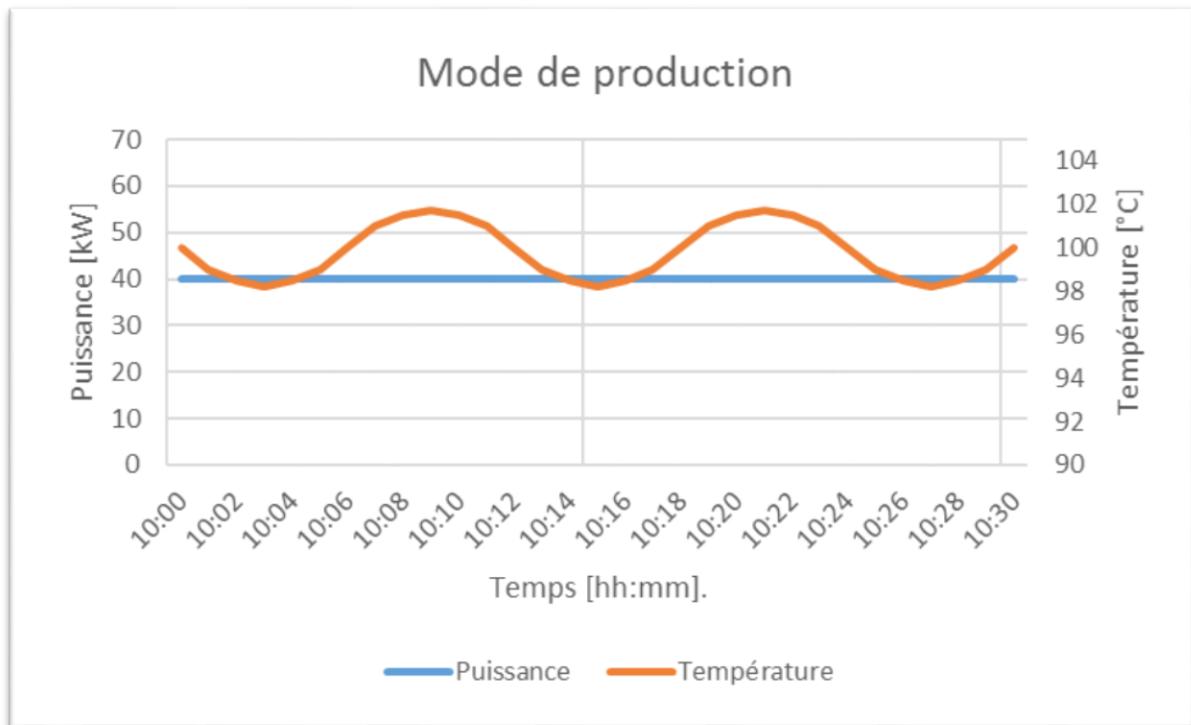


Figure 17 : Consommation et évolution de la température en mode de production.

Même comportement en mode de maintien, l'appareil n'est pas utilisé pour la production mais reste maintenu à une température plus basse que la consigne de production. Dans notre cas, le corps de chauffe fonctionne à 1/3 de sa puissance, à 20kW.

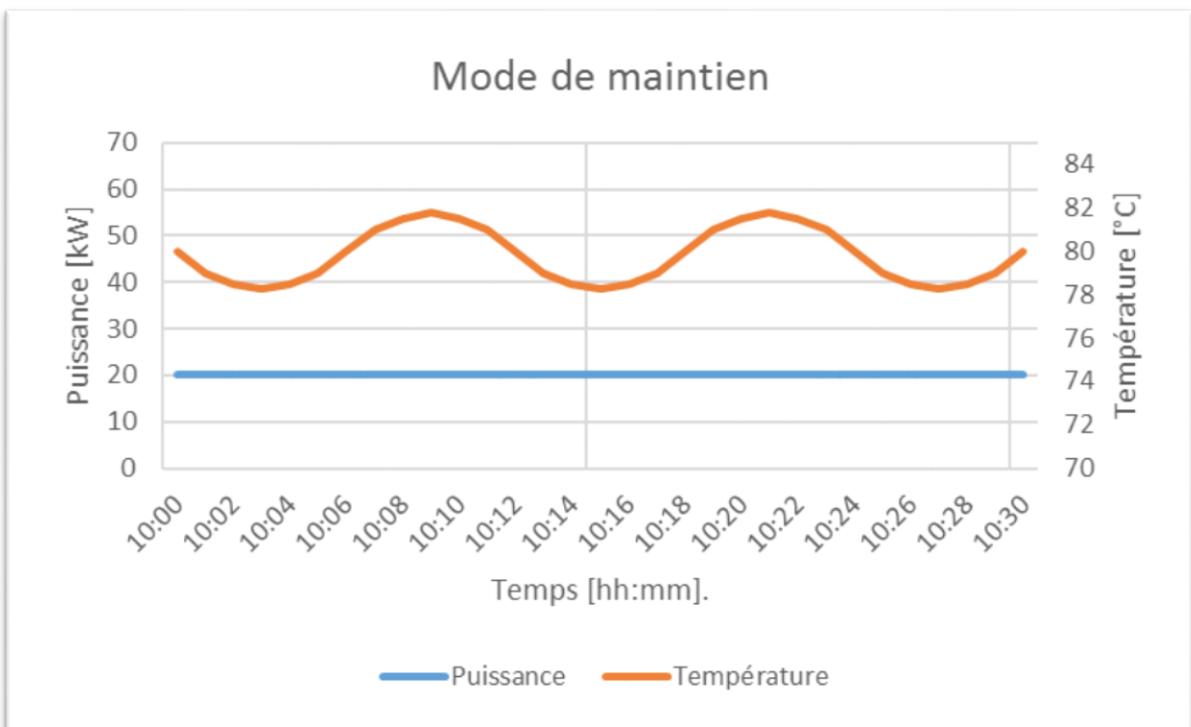


Figure 18 : Consommation et évolution de la température en mode de maintien.



Pour chacun de ces modes, nous déterminons les puissance quart horaire :

Mode de fonctionnement	Puissance quart horaire [kW]	
	10h15	10h30
Chauffe	60	60
Production	40	40
Maintien	20	20

Tableau 17 : Puissance quart horaire en fonction du mode de l'appareil.

Lors d'un délestage le comportement du corps de chauffe et le gain en puissance varie fortement. Nous appliquons la même action de délestage de 5 minutes dans chaque cas. Lorsque la température est en dessous de la consigne, le corps de chauffe redémarre au maximum de sa puissance pour compenser la variation de température dû au délestage.

Les 3 graphiques de la figure ci-dessous présente la consommation et la variation de température dans chaque mode suite à une action de délestage de 5 minutes.

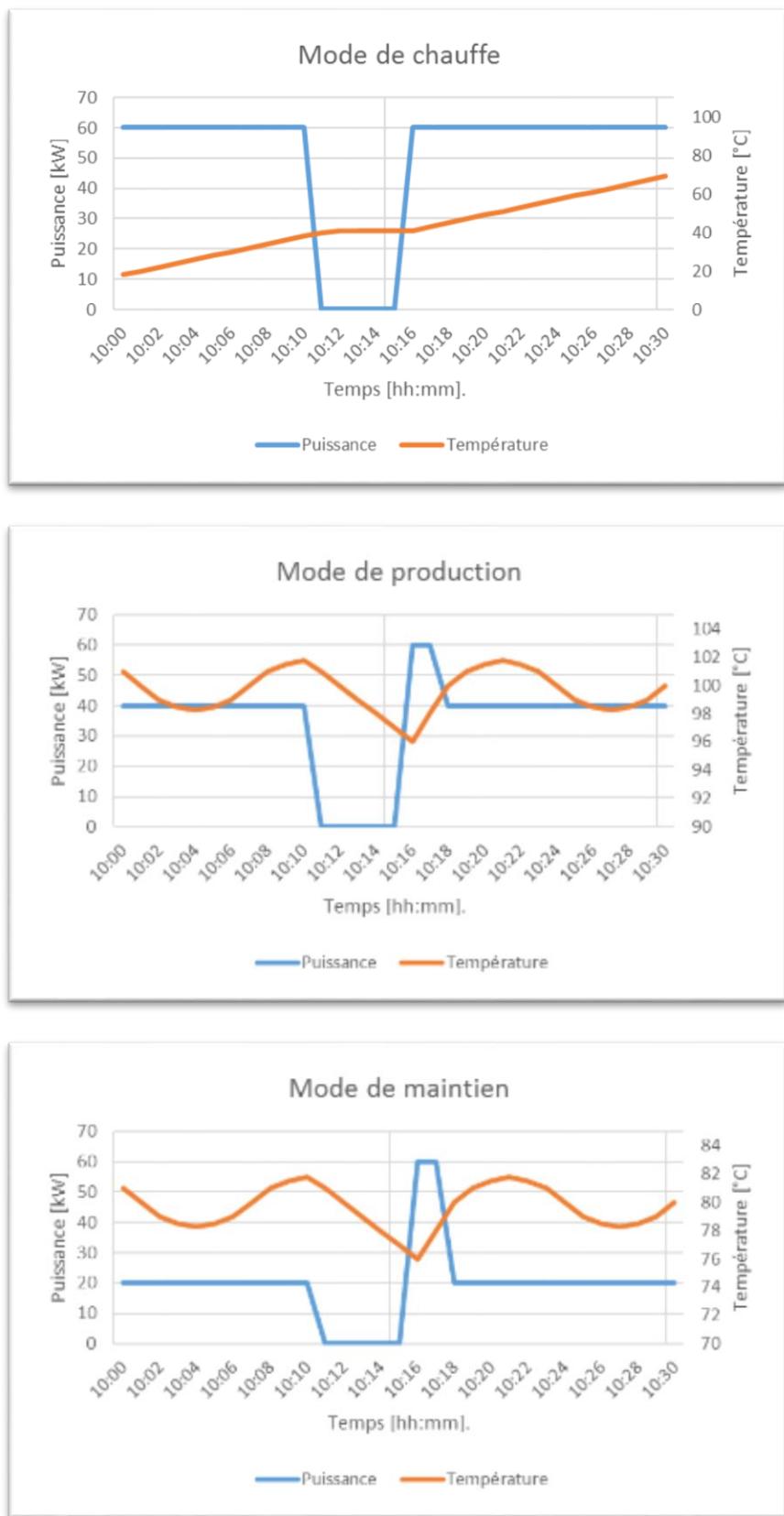


Figure 19 : Consommation et variation de température dans chaque mode suite à une action de délestage de 5 minutes.



Nous déterminons la puissance quart horaire et les gains du délestage dans chaque situation.

Mode de fonctionnement	Puissance quart horaire [kW]		Gains sur la puissance quart horaire [kW]	
	10:15	10:30	10:15	10:30
Chaud	40	60	20	0
Production	26.7	42.7	13.3	-2.7
Maintien	13.3	25.3	6.7	-5.3

Tableau 18 : Puissance quart horaire en fonction du mode de l'appareil suite à un délestage de 5 minutes.

Le gain le plus important se présentant en mode de chauffe à 20kW. Dans le cas de la production et le maintien, la chauffe crée une forte augmentation de la puissance dans le quart d'heure suivant. Cela ne crée aucun problème si le quart d'heure à délester est celui de 10h15 et que celui de 10h30 n'est pas élevé. Cependant, lorsque plusieurs quarts d'heure sont élevés et qu'il faut en délester plusieurs d'affiliée, les gains de puissance ne sont plus identiques pour les mêmes actions de délestage en mode production et maintien. Comme présenté dans la situation suivante où le délestage est appliqué sur les quarts d'heure de 10h15 et 10h30.

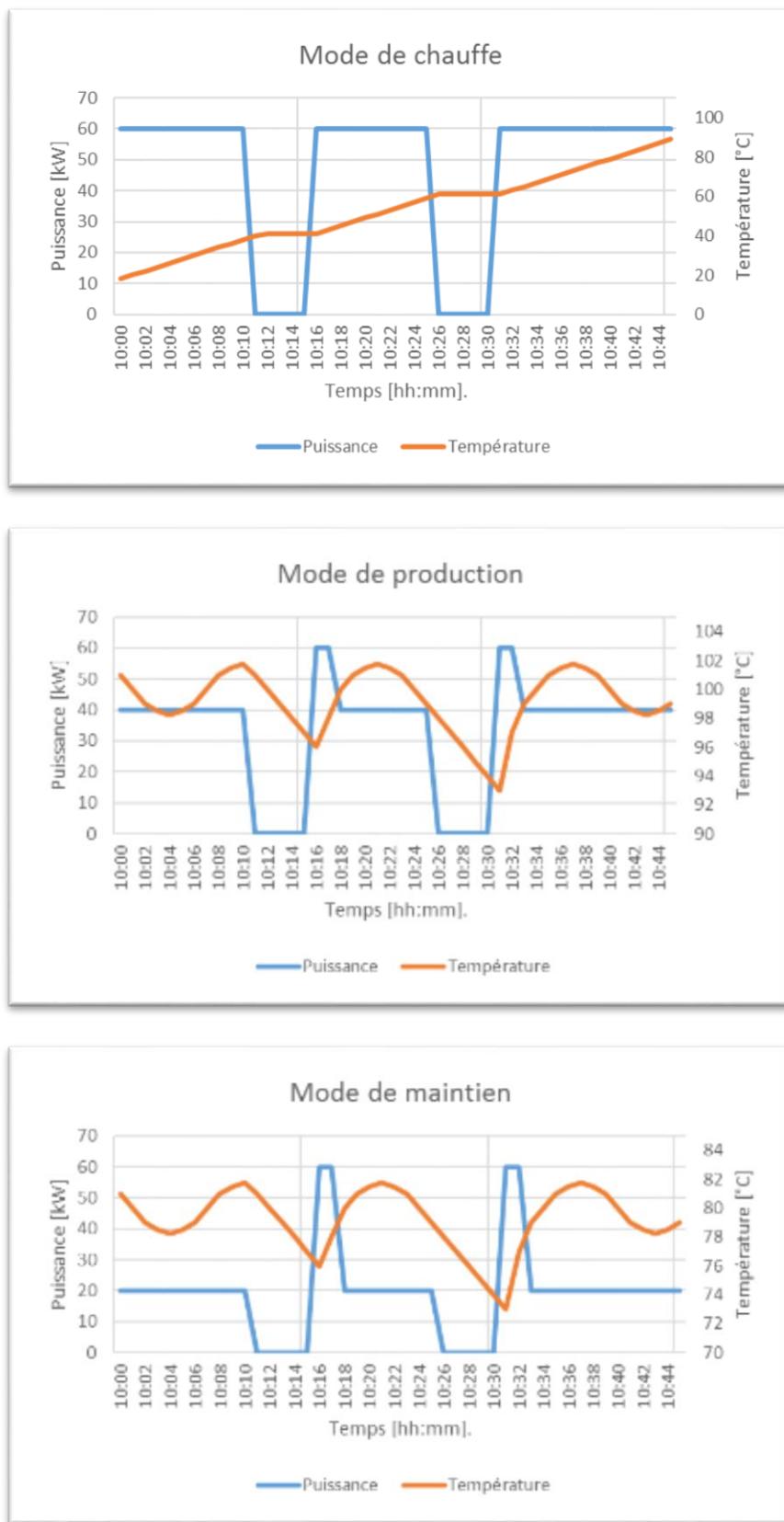


Figure 20 : Consommation et variation de température dans chaque mode suite à deux actions de délestage de 5 minutes.



Mode de fonctionnement	Puissance quart horaire [kW]			Gains sur la puissance quart horaire [kW]		
	10:15	10:30	10:45	10:15	10:30	10:45
Chauffe	40	40	60	20	20	0
Production	26.7	29.3	42.7	13.3	10.7	-2.7
Maintien	13.3	18.7	25.3	6.7	1.3	-5.3

Tableau 19 : Puissance quart horaire en fonction du mode de l'appareil suite à deux délestages de 5 minutes dans deux quarts d'heure différents.

En mode de chauffe le gain reste le même avec plusieurs délestages d'affilée, contrairement au deux autres modes. Afin de garantir un gain de puissance optimal pour chaque quart d'heure nous appliquons le mode régulation de l'algorithme SEMS pour les modes de production et de maintien.

Au moment de quarts d'heure critiques, nous appliquons une régulation permettant de diminuer la puissance quart horaire de manière régulière sur les quarts d'heure, afin de contrôler la puissance consommée.

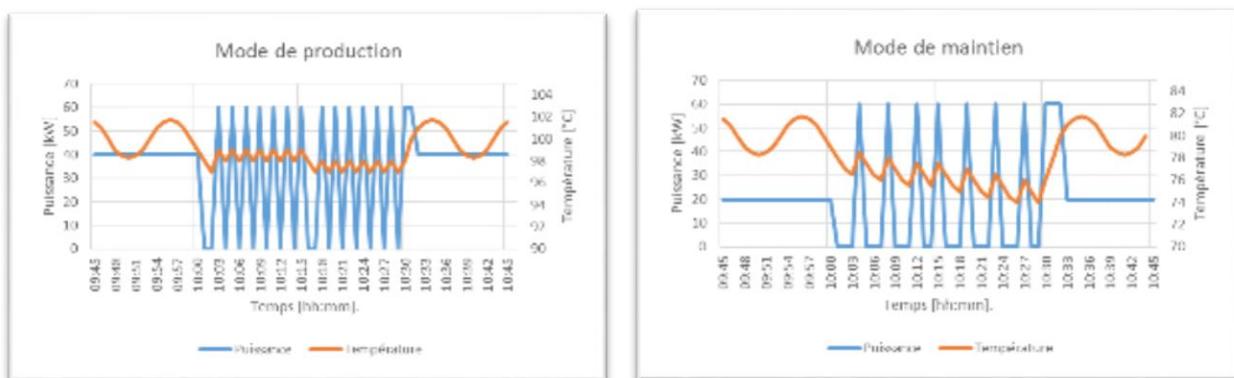


Figure 21 : Consommation et variation de température dans le mode de production et de maintien suite à une action de régulation.

En fonction du cycle de fonctionnement choisi, le gain peut être plus ou moins grand. Le choix du cycle dépend principalement de deux facteurs :

1. La durée maximum d'application de la régulation, il s'agit du nombre de quart d'heure d'affilée nécessitant des actions de délestage.
2. La flexibilité offerte par l'appareils au niveau de la température. En diminuant la puissance sur plusieurs quarts d'heure, la température aura tendance à diminuer légèrement au fil du temps.

Dans l'exemple ci-dessus, nous avons appliqué les cycles de fonctionnement « duty cycle » suivants :

Mode de fonctionnement	Duty cycle appliquée [%]
Production	46.7
Maintien	26.7

Tableau 20 : Duty cycle appliqué en mode de production et de maintien.

Ce qui nous donne les puissances quart horaire et les gains suivants :

Mode de fonctionnement	Puissance quart horaire [kW]				Gains sur la puissance quart horaire [kW]			
	10:00	10:15	10:30	10:45	10:00	10:15	10:30	10:45
Production	40	28	28	41.3	0	12	12	-1.3
Maintien	20	16	16	22.9	0	4	4	-2.9

Tableau 21 : Puissance quart horaire en fonction du mode de l'appareil suite à une régulation sur deux quarts d'heure successifs (10h15 et 10h30).



La régulation permet ainsi de garantir le gain de puissance. Contrairement au délestage qui dans certains cas fournit de meilleurs gains, mais qui ne peut pas les garantir à chaque quart d'heure.

Mode de fonctionnement	Gain de puissance maximum sur le quart horaire [kW]		Gain de puissance minimum sur le quart horaire [kW]	
	Délestage	Régulation	Délestage	Régulation
Production	13.3	12	10.7	12
Maintien	6.7	4	1.3	4

Tableau 22 : Comparaison des performances du délestage par rapport à la régulation.

Dans l'ensemble, la régulation offre un gain maximum un peu plus faible que le simple délestage mais garanti un gain pour le contrôle du pic de puissance sur tous les quarts horaires contrôlés.

Application de la régulation et du délestage

Pour l'application des actions de régulation combinées avec un délestage dynamique pour le contrôle et la réduction optimale de la puissance, le Terminal SEMS analyse en temps réel la consommation de l'appareil qu'il pilote et détermine automatiquement son mode de fonctionnement d'après les profils de charges définis aussi automatiquement lors de la phase d'apprentissage, pour associer le bon profil et les meilleures actions correspondantes.

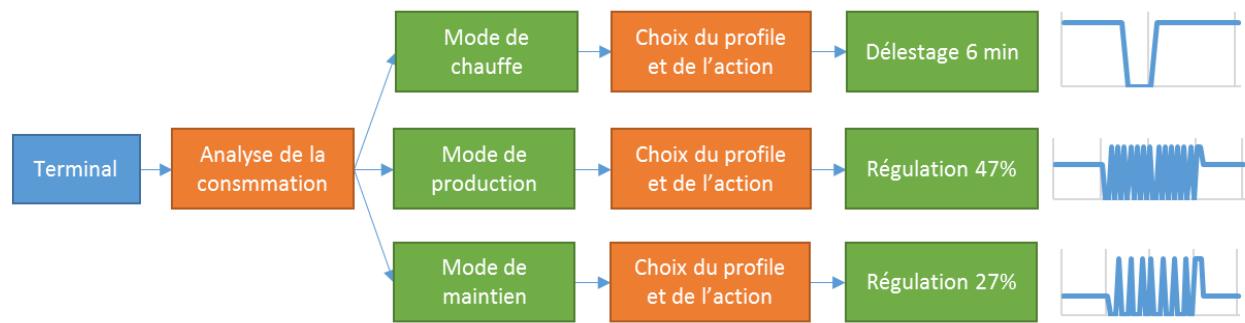


Figure 22 : Diagramme du principe de l'application de la régulation et du délestage dynamique pour les appareils thermiques.



Le potentiel de réduction totale de la puissance par SEMS est résumé dans le tableau ci-dessous :

Liste des appareils	Puissance nominale [kW]	Puissance contrôlée par SEMS [kW]	Puissance Effective contrôlée par SEMS [kW]	Réduction maximum de la puissance ¼ horaire [kW]
Four tunnel passage	100	74	54	40
Four de trempe 23	0	0	0	0
Four de trempe 26	75	75	75	10
Four de trempe 25	90	90	90	5.8
Four de trempe 4	65	65	65	25.3
Four de trempe cloche	92	60	60	9.5
Four de trempe solo passage	92	84	40	9.3
Bain de traitement 1 – Corps de chauffe 1	12.5	12.5	12.5	6.9
Bain de traitement 1 – Corps de chauffe 2	12.5	12.5	12.5	6.9
Bain de traitement 2 – Corps de chauffe 1	12.5	12.5	12.5	6.9
Bain de traitement 2 – Corps de chauffe 2	12.5	12.5	12.5	6.9
Groupe compresseur	800	765	765	135.6
Compresseur de froid	25	15	15	8.4
Ventilation	55	45	0 (La ventilation ne peut pas être interrompue)	0 (La ventilation ne peut pas être interrompue)
TOTAL [kW]	1'444	1'323	1'214	271.5
% par rapport au 2'220 kW, le pic du mois de novembre 2015 (Référence de l'objectif)	65.05%	59.59%	54.7%	12.23%

Tableau 23 : Potentiel de réduction de la puissance des appareils contrôlés toutes actions confondues.



6.1.5 Exemple : Analyse des résultats de SEMS pour le mois de juillet 2016

Les réductions de puissance présentées ci-dessus ont été mesurées et sont les résultats des actions de SEMS. Dans l'annexe 11.1 et 11.2, nous présentons en détail la composition du pic du mois de juillet 2016 et l'impact des actions de SEMS sur la charge de chaque appareil présent au moment du pic, et ceci à titre d'exemple pour le mois du juillet 2016. Cette analyse a été réalisée pour les 12 mois de la phase d'optimisation de SEMS du projet démonstrateur aux UMV, d'avril 2016 à mai 2017.

Tous les graphiques présentés dans l'analyse ci-dessous sont des copies conformes du SEMS Live Dashboard du site des UMV ou des autres outils d'analyse mis en place par Stignergy.



Pic de puissance mesuré et enregistré du mois de juillet 2016

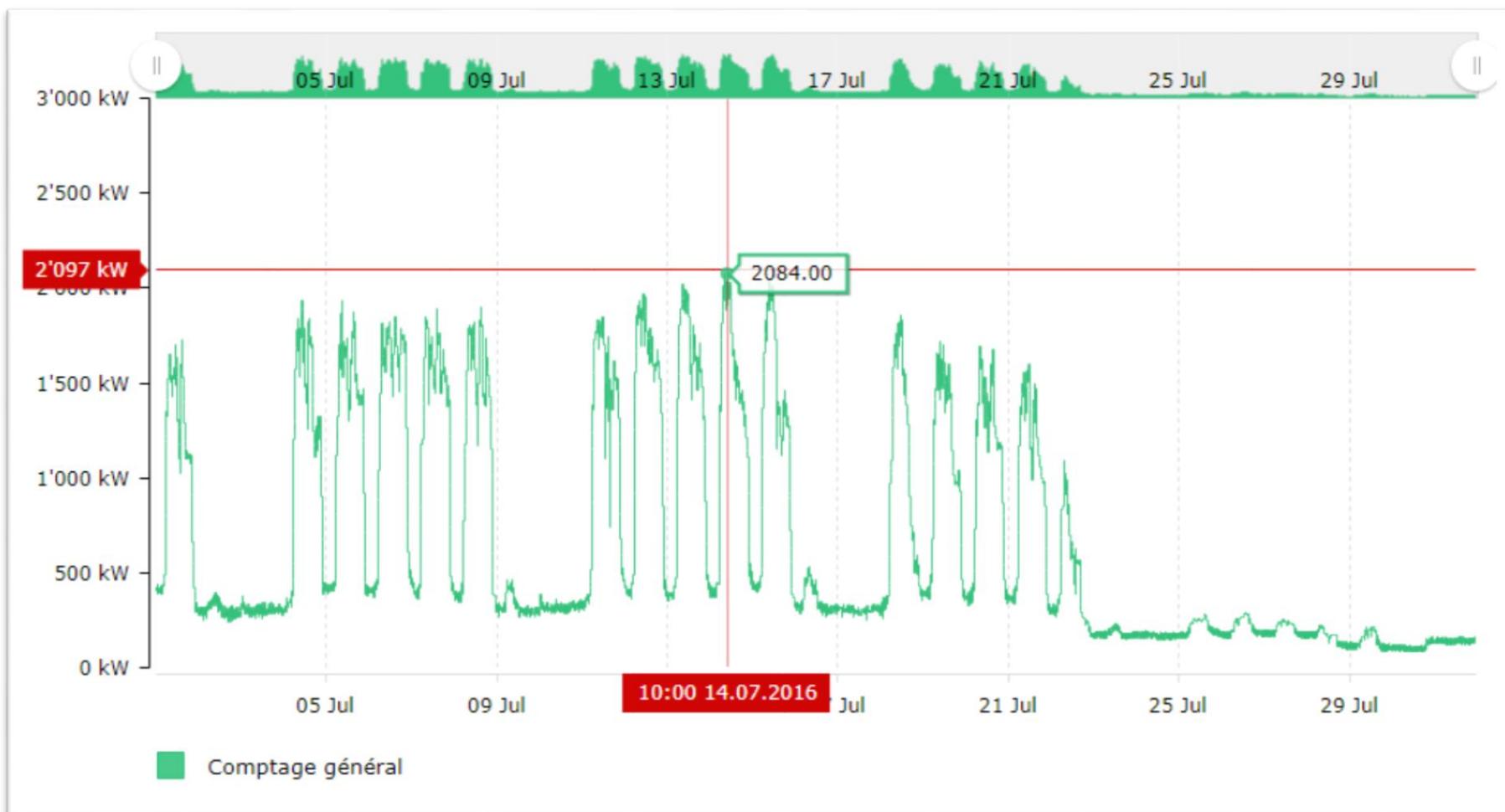


Figure 23 : Courbe de charge du mois de juillet 2016, avec le pic maximum de 2'084 kW mesuré le 14 juillet 2016 à 10h00.



Courbe de charge mesurée et enregistrée le 14 juillet 2016

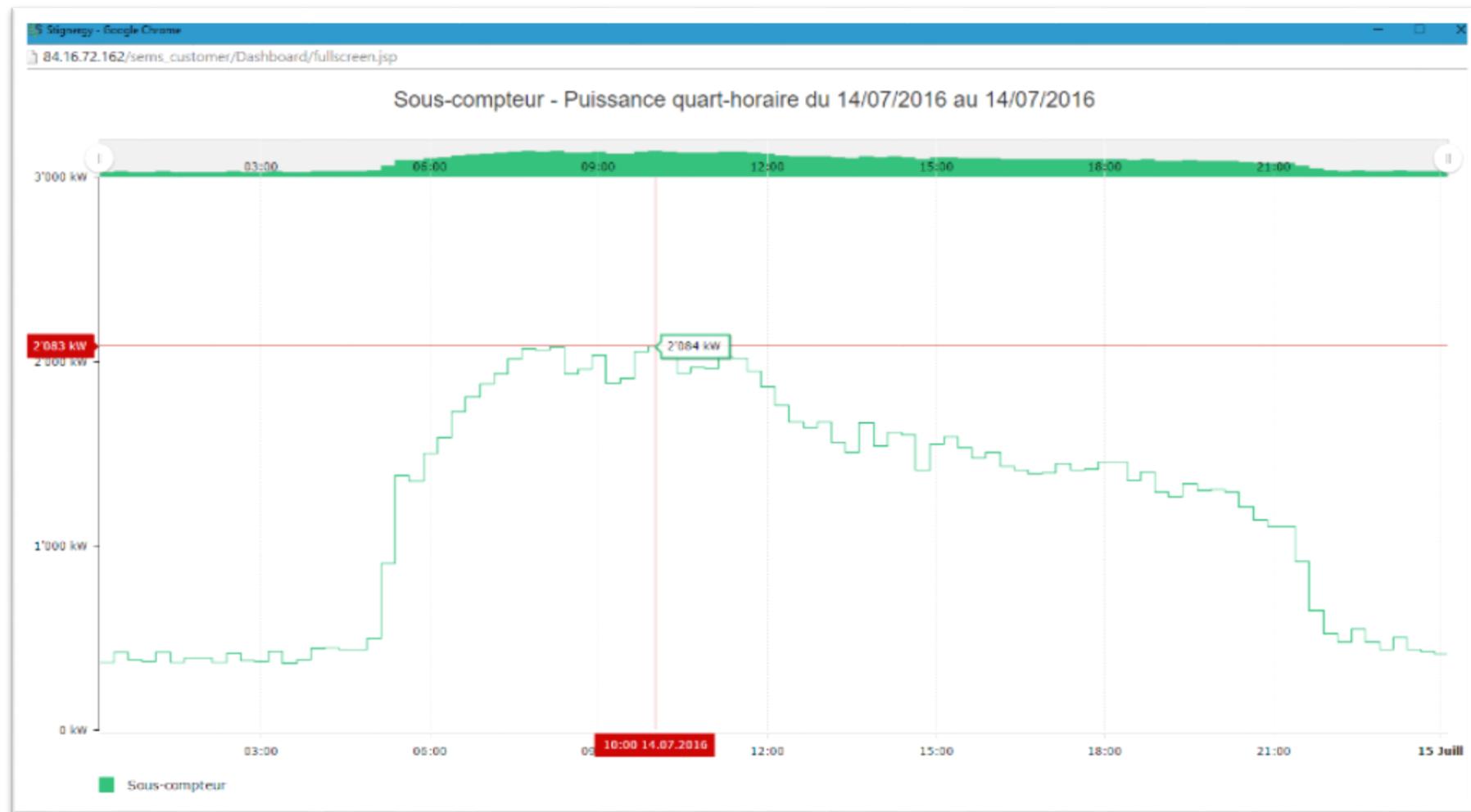


Figure 24 : Courbe de charge mesurée le 14 juillet 2016 avec un pic de puissance de 2'084 kW à 10:00.



Graphique en barres de la courbe de charge enregistrée le 14 juillet 2016

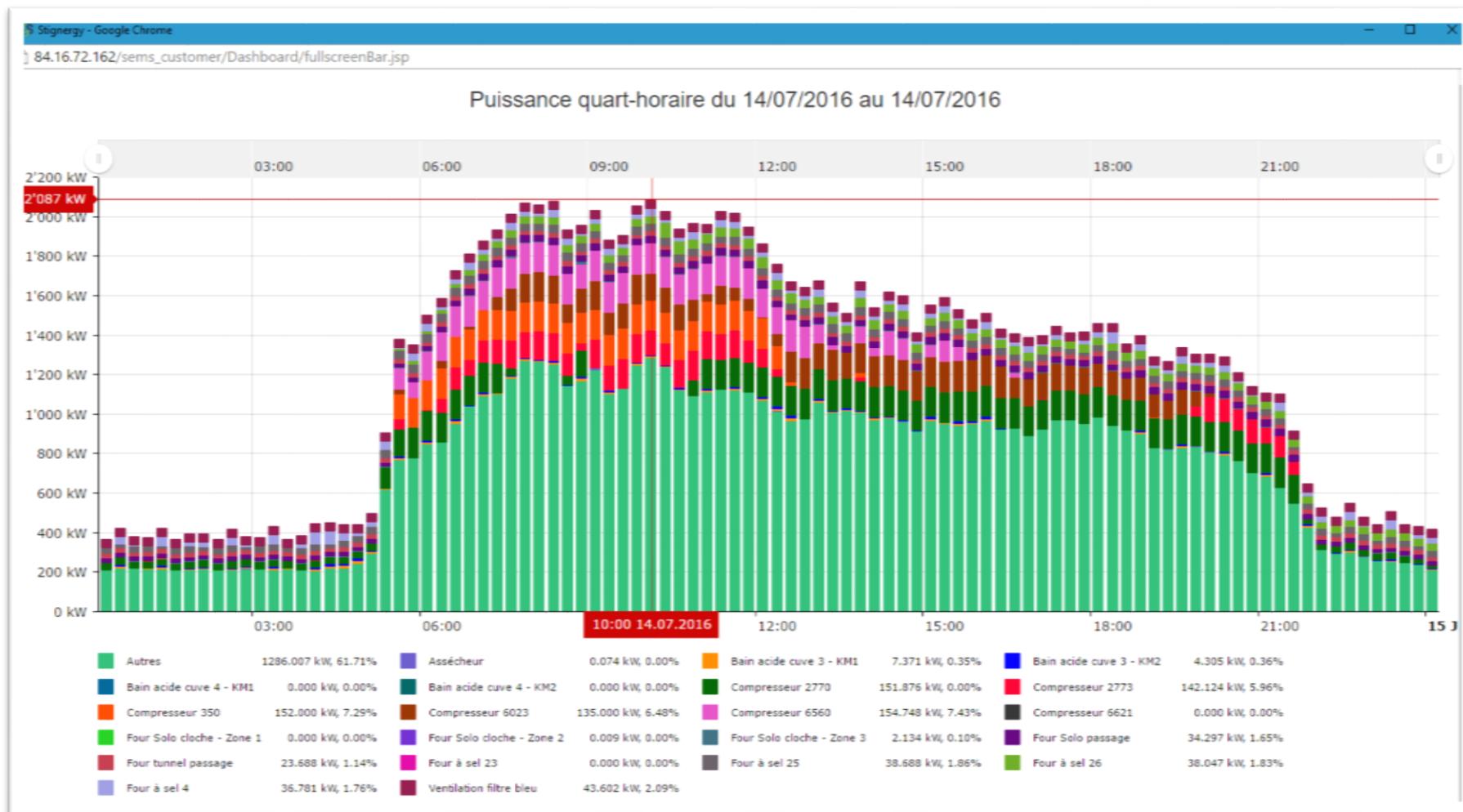


Figure 25 : Courbe de charge en barres mesurée le 14 juillet 2016.



Courbe de charge reconstituée du mois de juillet 2016

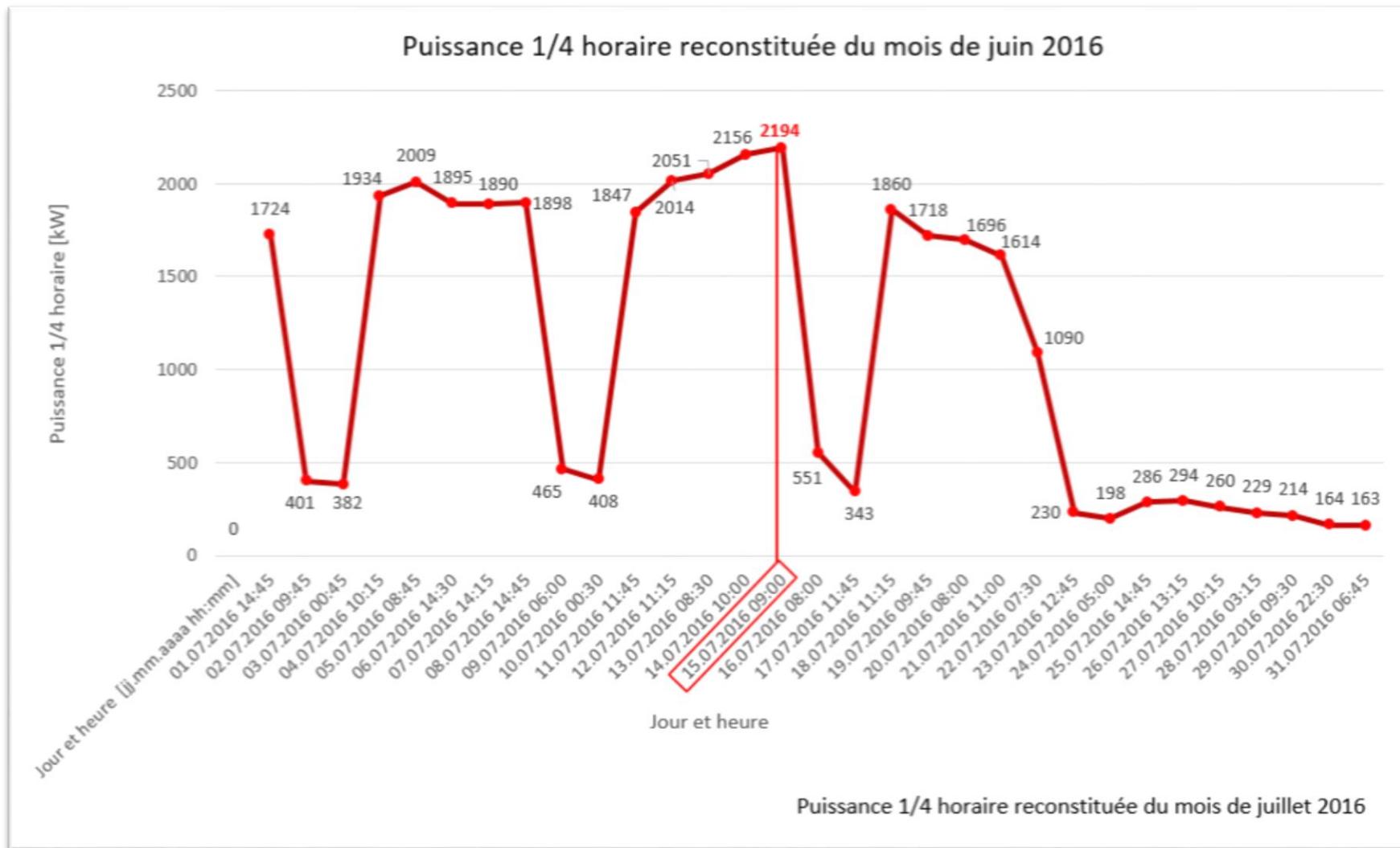


Figure 26 : Courbe de charge reconstituée du mois de juillet 2016.



Puissance quart horaire maximum mesurée et reconstituée de chaque jour du mois de juillet 2016

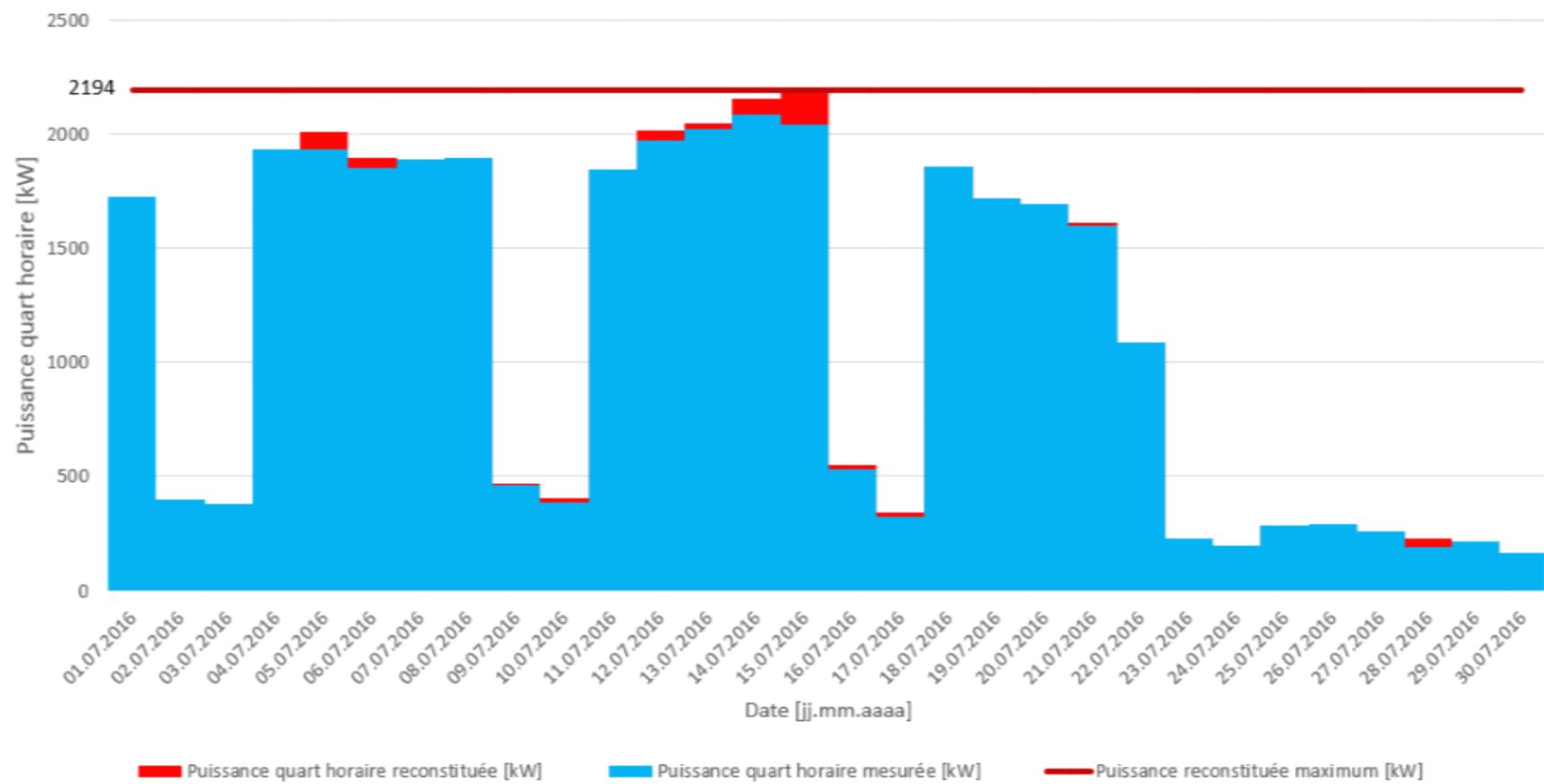


Figure 27: Graphique en barres de la courbe de charge reconstituée du mois de juillet 2016.



Impact des actions SEMS du 15 juillet 2016

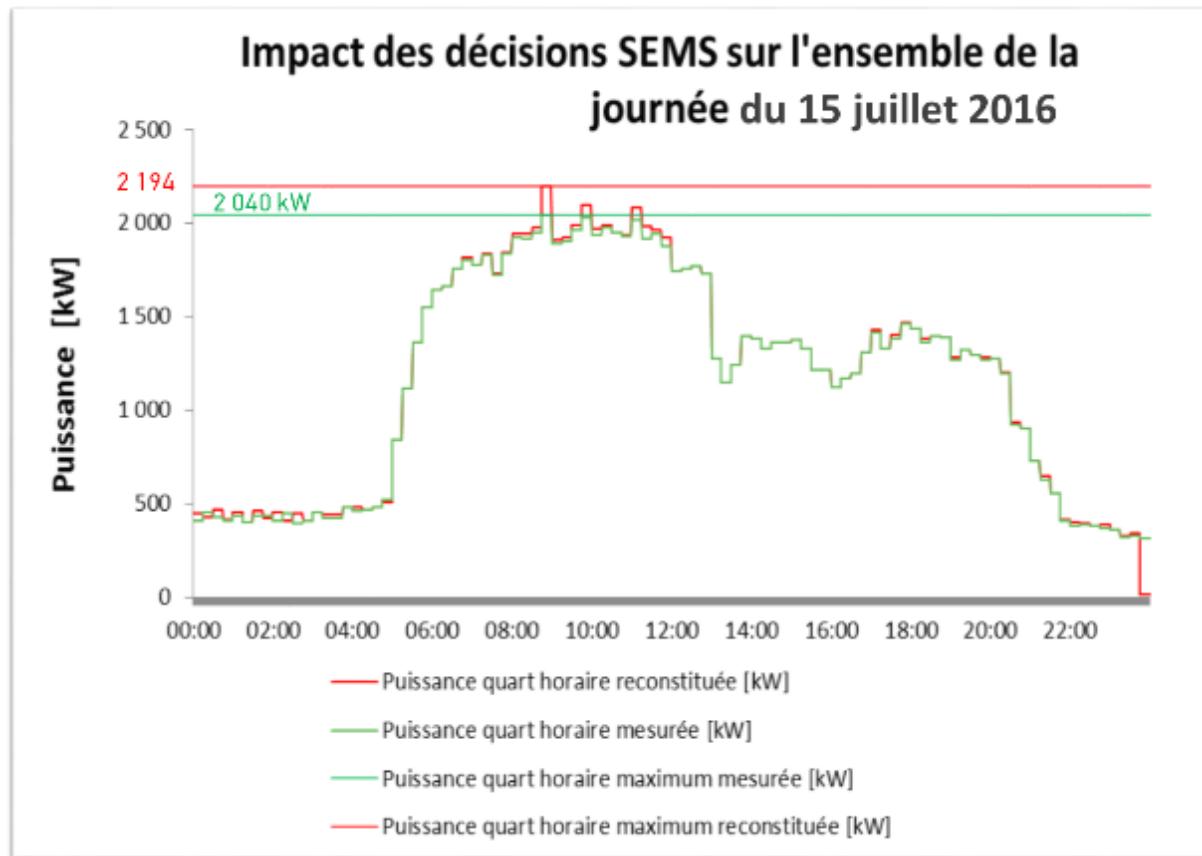


Figure 28 : Courbe de charge de la journée du 15 juillet.

L'analyse de l'impact des décisions et des actions de SEMS pendant la journée du 15 juillet 2016 pour chaque appareil sous contrôle est détaillée dans l'annexe 11.1.



Résumé des résultats de SEMS du ¼ d'heure de 9h00 du 15 juillet 2016

Liste des appareils	Puissance nominale [kW]	Puissance contrôlée par SEMS [kW]	Puissance effective contrôlée par SEMS [kW]	Puissance contrôlable au moment du pic [kW]	Mode de fonctionnement de l'appareil	Réduction de la puissance ¼ horaire [kW]
Four tunnel passage	100	74	54	54	Production	4.4
Four de trempe 23	0	0	0	0	Éteint	0.0
Four de trempe 26	75	75	75	75	Production	1.0
Four de trempe 25	90	90	90	90	Production	0.0
Four de trempe 4	65	65	65	65	Production	12.1
Four de trempe cloche	92	60	60	60	Maintien	0.2
Four de trempe solo passage	92	84	40	40	Production	0.7
Bain de traitement 1 – Corps de chauffe 1	12.5	12.5	12.5	0	Éteint	0.0
Bain de traitement 1 – Corps de chauffe 2	12.5	12.5	12.5	0	Éteint	0.0
Bain de traitement 2 – Corps de chauffe 1	12.5	12.5	12.5	12.5	Production	0.0
Bain de traitement 2 – Corps de chauffe 2	12.5	12.5	12.5	12.5	Production	0.0
Ventilation filtre bleu	55	45	0	0	Nécessite VdF	0.0
Groupe compresseur	800	765	765	765	Production	135.6
Compresseur de froid	25	15	15	0	Éteint	0.0
TOTAL [kW]	1'444	1'323	1'214	1'174	-	154
% par rapport à la puissance nominal total	100.00%	91.62%	84.07%	81.30%	-	10.66%
% par rapport à la puissance contrôlable	-	100.00%	91.75%	88.73%	-	11.64%
% par rapport à la puissance effective contrôlable	-	-	100.00%	96.70%	-	12.69%
% de réduction de la puissance par rapport à la pointe de 2'194 kW du mois de juillet 2016	65.82%	60.30%	55.33%	53.51%	-	7.02%

Tableau 24 : Résumé de la réduction de la puissance par SEMS pour le quart d'heure de 9h00 du 15 juillet 2016.



Analyse du pic du 14 juillet 2016 à 10h00

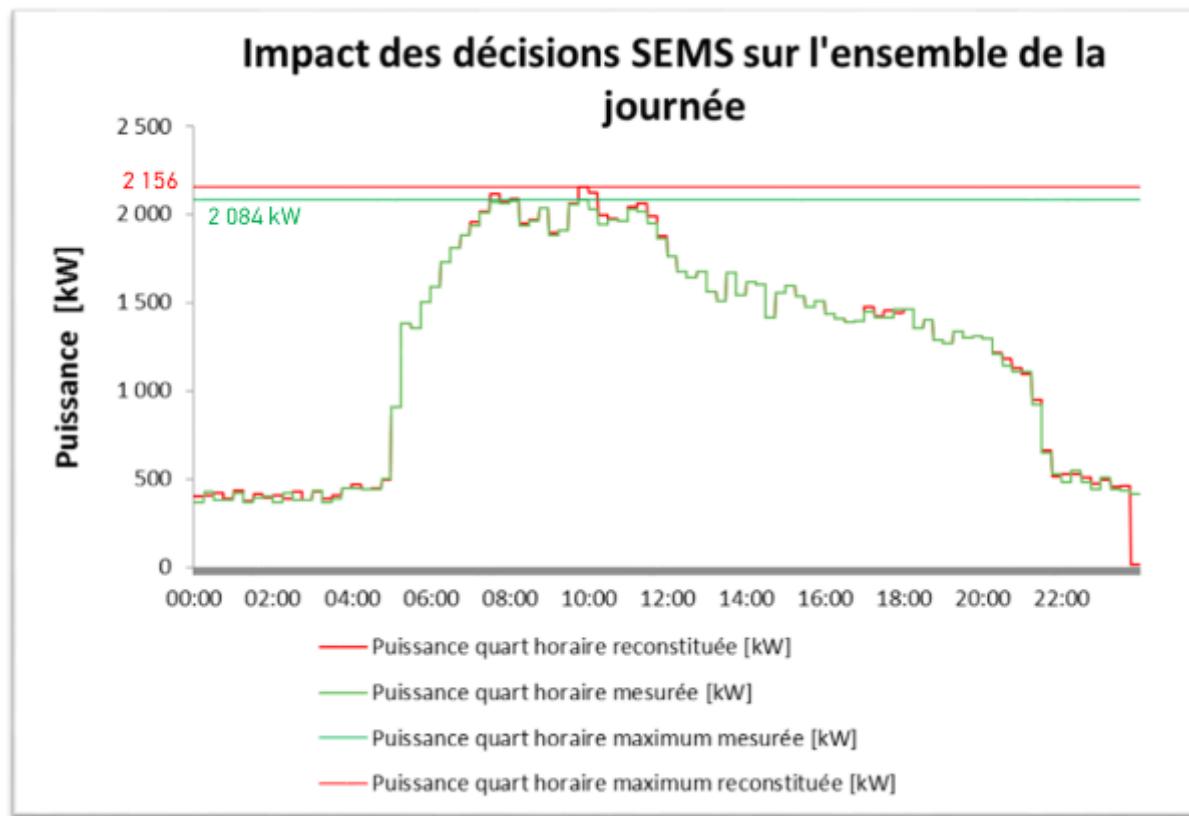


Figure 29 : Courbe de charge mesurée et reconstituée sans les actions de SEMS du 14 juillet 2016.

L'analyse de l'impact des décisions et des actions de SEMS pendant la journée du 14 juillet 2016 pour chaque appareil sous contrôle est détaillée dans l'annexe 11.2.

**Résumé des résultats de SEMS du ¼ d'heure de 10h00 du 14 juillet 2016**

Liste des appareils	Puissance nominale [kW]	Puissance contrôlée par SEMS [kW]	Puissance effective contrôlée par SEMS [kW]	Puissance contrôlable au moment du pic [kW]	Mode de fonctionnement de l'appareil	Réduction de la puissance ¼ horaire [kW]
Four tunnel passage	100	74	54	54	Production	4.6
Four de trempe 23	0	0	0	0	Éteint	0
Four de trempe 26	75	75	75	75	Production	0
Four de trempe 25	90	90	90	90	Production	0
Four de trempe 4	65	65	65	65	Production	0
Four de trempe cloche	92	60	60	60	Maintien	0.2
Four de trempe solo passage	92	84	40	40	Production	2.0
Bain de traitement 1 – Corps de chauffe 1	12.5	12.5	12.5	0	Éteint	0
Bain de traitement 1 – Corps de chauffe 2	12.5	12.5	12.5	0	Éteint	0
Bain de traitement 2 – Corps de chauffe 1	12.5	12.5	12.5	12.5	Production	0
Bain de traitement 2 – Corps de chauffe 2	12.5	12.5	12.5	12.5	Production	0
Ventilation filtre bleu	55	45	0	0	Nécessite VdF	0
Groupe compresseur	800	765	765	339	Production	65.6
Compresseur de froid	25	15	15	0	Éteint	0
TOTAL [kW]	1'444	1'323	1'214	748	-	72.4
% par rapport à la puissance nominal total	100.00%	91.62%	54.56%	51.79%		5.01%
% par rapport à la puissance contrôlable	-	100.00%	59.55%	56.53%		5.47%
% par rapport à la puissance effective contrôlable	-	-	100.00%	94.92		9.19%
% de réduction de la puissance par rapport à la pointe de 2'194 kW du mois de juillet 2016	65.82%	60.30%	35.91%	34.09%		3.30%

Tableau 25 : Résumé de la réduction de la puissance par SEMS pour le quart d'heure de 10h00 du 14 juillet 2016.



Le graphique ci-dessous présente comment a été déterminé les résultats de la réduction de la puissance quart horaire réalisé par SEMS pour le mois de juillet 2016.

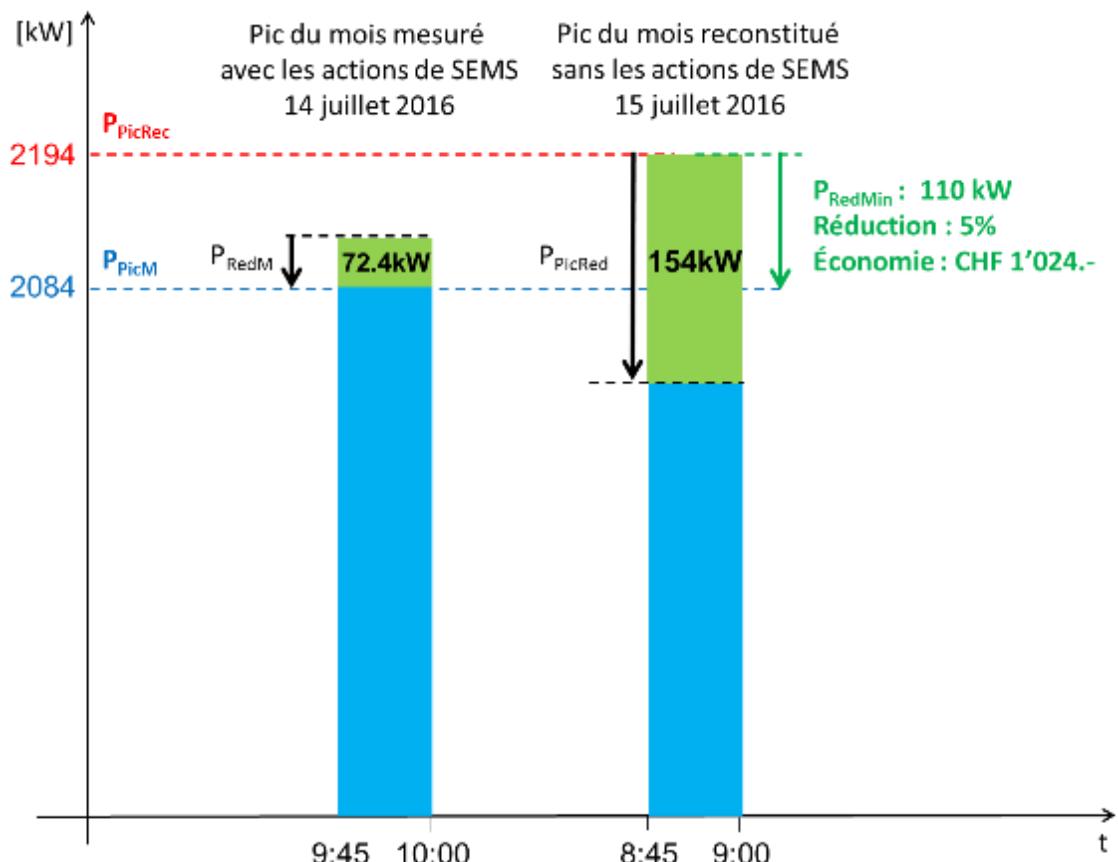


Figure 30 : Réduction de puissance du mois de juillet 2016 aux UMV.



6.1.6 Récapitulatif de la réduction de puissance réalisée par SEMS.

Mois - Année	Puissance max mesurée [kW]	Puissance max reconstituée [kW]	Réduction de puissance [kW]	% de réduction de la puissance par rapport aux pics [%]	Puissance délestable effective au moment du pic [kW]	% de réduction de la puissance par rapport aux délestables [%]	Gains financiers [CHF]
Mai 2016	2'016	2'074	58	2.88%	773	7.50%	548
Juin 2016	2'052	2'115	63	3.07%	748	8.42%	595
Juillet 2016	2'084	2'194	110	5.28%	748	14.71%	1'040
Août 2016	2'038	2'145	107	5.24%	617	17.34%	1'010
Septembre 2016	2'116	2'235	119	5.62%	629	18.92%	1'124
Octobre 2016	2'132	2'208	76	3.59%	489	15.64%	723
Novembre 2016	2'152	2'241	89	4.13%	464	19.17%	840
Décembre 2016	2'132	2'203	71	3.32%	464	15.24%	668
Janvier 2017	2'032	2'118	86	4.22%	424	20.20%	810
Février 2017	2'108	2'215	107	5.09%	424	25.30%	1'014
Mars 2017	2'120	2'218	98	4.63%	464	21.14%	927
Avril 2017	2'044	2'107	63	3.07%	464	13.52%	593
Total							9'892

Tableau 26 : Résumé des gains résultant de la réduction de puissance par SEMS entre mai 2016 et avril 2017.

Impact de la réduction de la puissance ¼ horaire par SEMS entre mai 2016 et avril 2017

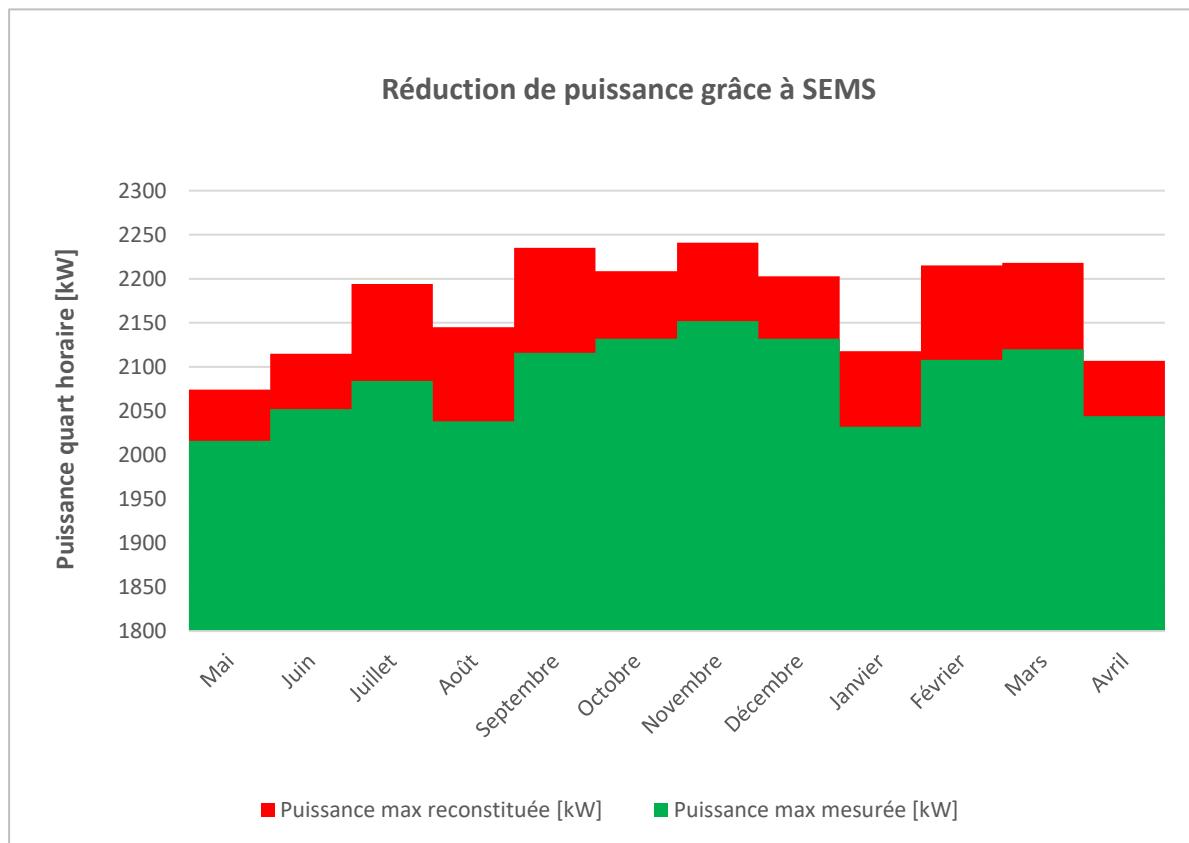


Figure 31 : L'impact de la réduction de la puissance ¼ horaire par SEMS entre mai 2016 et avril 2017.



6.2 Économie d'énergie

6.2.1 Le Mode ECO

Certains processus fonctionnent de manière permanente et consomment autant lorsqu'ils sont en régime de production qu'en régime de maintien pendant les périodes hors production de la journée, ou la nuit et le weekend. SEMS permet grâce à son mode économie nommé « Mode ECO » de réduire la consommation de l'énergie électrique des appareils en fonctionnement permanent. Le Terminal SEMS concerné adapte automatiquement le cycle de fonctionnement (duty cycle) adéquat pour chaque régime de fonctionnement.

Utilisation et configuration du « Mode ECO » :

Les premiers paramétrages tels que les cycles de fonctionnement adéquats du mode économie des appareils contrôlés par SEMS sont effectués par Stignergy. Cependant la gestion des heures de production n'est pas fixe et peut changer chaque semaine. Nous avons mis en place à travers le SEMS Live Dashboard une interface permettant à l'entreprise de définir elle-même les périodes d'application du « Mode ECO » en fonction de ses propres besoins et selon le planning de production. L'accès au « Mode ECO » est géré par l'administrateur du SEMS Live Dashboard de l'entreprise. Il peut créer et attribuer les profils d'accès de manière personnalisée pour chaque utilisateur.

Dans l'onglet « OUTILS DE GESTION SEMS » puis « Mode ECO », une interface de contrôle est proposée à l'utilisateur.

The screenshot shows the SEMS Live Dashboard interface. At the top, there is a header with the Stignergy logo, the text 'Site sélectionné : Usines Métallurgiques de Vallorbe SA', and language options (FR | DE | EN). On the right side, there is a 'LOGOUT' button and the Vallorbe logo. Below the header, there is a navigation bar with links: ACCUEIL, GRAPHIQUES, ANALYSES, METERING, RAPPORT, OUTILS DE GESTION SEMS, UTILISATEURS, and CONTACT. The 'OUTILS DE GESTION SEMS' link is highlighted. A dropdown menu is open under 'OUTILS DE GESTION SEMS', showing four options: Mode ECO (which is selected and highlighted in green), Mode Timer, Groupes de mesures, and Plan du site. The 'ACCUEIL' link in the main navigation bar is also highlighted in green with a right-pointing arrow.

Figure 32 : Sélection du « Mode ECO » sur le SEMS Live Dashboard

Pour chaque appareil disposant d'un « Mode ECO », l'entreprise peut définir les moments d'activation des modes économies pour l'ensemble de la semaine.



Site sélectionné : Usines Métallurgiques de Vallorbe SA

ACCUEIL GRAPHIQUES ANALYSES METERING RAPPORT OUTILS DE GESTION SEMS UTILISATEURS CONTACT

OUTILS DE GESTION SEMS Mode ECO Mode Timer Groupes de mesures Plan du site

 Mode ECO Mode production Mode Timer

Appareils	Mode ECO								
	Horaire	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche	Détails
Four tunnel passage	0h-6h								
	6h-12h								
	12h-18h								
	18h-24h								
Four à sel 23									
Four à sel 26									
Four à sel 25									
Four à sel 4									

Figure 33 : Exemple d'affichage du « Mode ECO » sur le SEMS Live Dashboard pour le four tunnel passage.

Dans cet exemple, le « Mode ECO » est enclenché comme suit :

Lundi à 18h00 jusqu'à mardi 06h00

Mardi à 18h00 jusqu'à mercredi 06h00

Mercredi à 18h00 jusqu'à Jeudi 06h00

Jeudi à 18h00 jusqu'à vendredi 06h00

Vendredi à 18h00 jusqu'à lundi 06h00

L'entreprise est donc libre de modifier et d'appliquer comme bon lui semble le « Mode ECO » en fonction de sa production et de ses besoins grâce à une interface très simple.



The screenshot shows a detailed configuration window for the 'Four tunnel passage - Mode ECO'. The window has a header with tabs: 'OUTILS DE GESTION SEMS' (selected), 'Mode ECO', 'Mode Timer', and 'Groupes de ma...'. Below this are three mode selection buttons: 'Mode ECO' (green), 'Mode production' (white), and 'Mode Timer' (red). The main area is a grid table with columns for 'Appareils' (Four tunnel passage), 'Horaires' (0h-01h, 01h-02h, 02h-03h, 03h-04h, 04h-05h, 05h-06h, 06h-07h, 07h-08h, 08h-09h, 09h-10h, 10h-11h, 11h-00h, 00h-13h, 13h-14h, 14h-15h, 15h-16h, 16h-17h, 17h-18h, 18h-19h, 19h-20h, 20h-21h, 21h-22h, 22h-23h, 23h-00h), and days of the week (Lundi, Mardi, Mercredi, Jeudi, Vendredi, Samedi, Dimanche). The grid cells contain checkmarks indicating active modes. At the bottom right are 'Valider' and 'Annuler' buttons.

Figure 34 : Exemple de configuration du « Mode ECO » pour le four tunnel passage.

6.2.2 Récapitulatif des économies d'énergie réalisées par SEMS

Les résultats ci-dessous sont obtenus en appliquant le « Mode ECO » de SEMS aux fours en dehors des heures de production. Ils ont été obtenus en respectant les contraintes spécifiques de chaque four, en particulier la température de maintien nécessaire à leur bon fonctionnement et pour préserver leur durée de vie.

Appareil	Réduction d'énergie mensuelle [kWh]		Économie mensuelle [CHF]	Économie annuelle [CHF]
	HP	HC		
Four tunnel passage	579	1'012	132	1'584
Four de trempe 23	1'133	1'013	189	2'271
Four de trempe 26	1'133	1'013	189	2'271
Four de trempe 25	1'334	1'194	223	2'675
Four de trempe 4	976	873	163	1'956
Total⁴	5'155	5'105	896	10'757

Tableau 27 : Économie d'énergie par des mesures réelles grâce au « Mode ECO ».

⁴ Le montant total d'économie annuelle inclus l'acheminement et les taxes en heures pleines et creuses



7. DISCUSSION / ÉVALUATION DES RÉSULTATS / ENSEIGNEMENTS

7.1 Discussion

La première constatation est durant la période de mesure et de monitoring de mai 2016 et avril 2017, nous n'avons encore jamais observé un démarrage simultané de tous les appareils contrôlés, mais cela ne veut pas dire que cette situation ne se présentera pas à l'avenir. D'ailleurs, la puissance quart horaire du mois de novembre 2014 a atteint 2'521.5kW (selon la facture d'électricité de la période du 31.10.2014 au 30.11.2014). Cette demande de puissance significative est le résultat d'une augmentation de la charge de production ce qui a nécessité le démarrage simultané d'un nombre important d'appareils et de machines de production.

SEMS est un système de réduction des pics de puissance, mais permet également un contrôle continu (heures, jours, mois, années) de la puissance tout en respectant les paramètres des contraintes et utilisant les paramètres de flexibilités définis pour chaque appareil sous le contrôle de SEMS. Ce contrôle continu avec la flexibilité d'adaptation dynamique de SEMS à la demande de consommation est important, car il suffit d'un seul quart d'heure trop élevé dans le mois pour qu'il devienne la référence de facturation du mois.

Grace au mode ECO sur les fours, SEMS a permis de réduire de 123.12 MWh sur la consommation d'énergie électrique pour la période de mesure de mai 2016 à avril 2017.

7.2 Évaluation des résultats

Durant les mois de mai et juin 2016, SEMS a réalisé respectivement 58 et 63kW de réduction de puissance, représentant 7.5% et 8.42% du total de la puissance délestable de 773kW et 748kW. Ce premier résultat que nous qualifions de passable s'explique principalement par :

1. La mise en place dans un premier temps de paramètres de flexibilités conservateurs et de paramètres de contraintes relativement sévères. Cette démarche a été choisie volontairement par Stignergy pour ne pas prendre des risques de bloquer la production ou altérer la qualité des pièces produites. De ce fait, avec le monitoring des actions SEMS nous avons augmenté progressivement les paramètres de flexibilités avec plus de souplesses et les paramètres des contraintes moins sévères.
2. La mise en place et les tests pendant la période d'interfaçage entre SEMS et le système de gestion des compresseurs d'air pour l'intégration d'une solution efficace et sûre afin de garantir la production d'air nécessaire pour le fonctionnement de la production.

Ce projet nous a permis de mesurer et démontrer une réduction réelle de la puissance, particulièrement importante depuis l'implémentation de la régulation des appareils thermiques et la gestion des zones de pressions pour les compresseurs d'air. Par exemple, durant le quart d'heure de 9h du 15 juillet 2016, la réduction de puissance a atteint 154kW représentant 7% de réduction par rapport au pic qui aurait pu se produire sans SEMS. Le pic de puissance est passé de 2194kW à 2084kW, soit 110kW de réduction pour le mois de juillet 2016, représentant des économies sur la facture d'électricité du mois de CHF 1'012.-.

Les résultats des mois de juillet, août et septembre 2016 ont été relativement stables et SEMS a enregistré des économies financières de plus de CHF 1'000.- pour chaque mois.

À partir du mois d'octobre 2016 et jusqu'au mois d'avril 2017, nous avons enregistré une baisse de la puissance totale contrôlable de l'installation par SEMS, passant en moyenne de 700kW à une moyenne de 456kW. La différence significative de 244kW de puissance contrôlable est due à la mise hors service de la Grappe 4 auquel sont branchés les Terminaux SEMS de 4 fours de trempe d'une puissance contrôlable de 230kW, sans compter le four de trempe 23 qui est à l'arrêt la plupart du temps et un compresseur de 160kW qui est hors de fonctionnement depuis le début du projet. De plus, le four tunnel passage, représentant 54kW de puissance délestable contrôlable, a été mis à l'arrêt par la production.



La mise hors service de la Grappe 4 est due au démantèlement du four de trempe 4 pour réparation et au changement du four de trempe 23 par un nouveau four SAFED d'une nouvelle génération semblable au four de trempe 4. Ainsi, pendant cette période et à cause des changements des conditions cadre, il était impossible pour SEMS d'atteindre les objectifs de réduction de la puissance des scénarios Min/Max de 168kW et de 336kW fixés au début du projet. En effet, avec ces conditions SEMS a seulement pu atteindre 70% de l'objectif du scénario Min. Pendant cette période, soit d'octobre 2016 à mars 2017, les actions SEMS ont atteint d'important pourcentage de réduction de la puissance délestageable, pour attendre au mois de février 2017, 25.3% de réduction des 424kW de puissance délestageable. Ce résultat est satisfaisant et montre bien la flexibilité du système SEMS malgré la mise hors service d'une partie des installations contrôlées, il a continué à fonctionner efficacement. Ce projet démontre l'importance d'avoir un système décentralisé de décision et d'actions afin de répondre aux évolutions de production d'un site industriel.

Le résultat de réduction de la puissance est proportionnel à la puissance délestageable à disposition. Suite au monitoring de l'installation sous contrôle et à l'analyse approfondie des décisions de l'algorithme SEMS et de ses actions, nous pouvons confirmer que SEMS est capable d'atteindre aisément l'objectif du scénario Min dans le cas où les conditions de départ du projet sont présentes.

7.3 Enseignements

Les objectifs du scénario Max, fixé au début du projet, ne sont pas encore atteints. Cet objectif de 336 kW de réduction représente 15.14% de réduction de la charge globale du site, (par rapport à la référence du mois de novembre 2015, de 2'220kW de puissance ¼ horaire). Cependant, la probabilité que tous les appareils contrôlés se retrouvent un jour à fonctionner en même temps sur le même quart horaire n'est pas nulle (comme le cas du mois de novembre 2014 avec 2'521.5kW) et le potentiel de réduction de 336kW est réel, notamment avec la mise en place des améliorations décrites dans la section 8 du présent rapport.

Le remplacement en cours des deux anciens fours de trempe par des fours SAFED de nouvelle génération permettra au SEMS d'appliquer un délestage dynamique combiné avec de la régulation pour passer de 4.5kW de réduction de puissance à 25.3kW par four.

En appliquant le délestage dynamique combiné à de la régulation et les réductions de la consommation d'énergie avec « le Mode ECO », le système SEMS a le potentiel de réaliser, dans les conditions actuelles et avec la remise en service de la Grappe 4 (composé d'un compresseur, de 2 fours de trempe SAFED et de deux anciens fours de trempe 23 et 25), les économies suivantes selon la tarification de 2016.

Paramètre électrique	Moyenne de réduction mensuelle	Économie annuelle [CHF]
Puissance ⁵	160 kW	18'144
Énergie HP	5'155 kWh	10'757
Énergie HC	5'105 kWh	
Total ⁶		28'901

Tableau 28 : Économie grâce au système SEMS sur une année avec les conditions existantes.

L'objectif économique du projet pour les deux scénarios Min/Max était de réaliser des économies annuelles sur la facture d'électricité d'un montant compris entre CHF 19'040.- et CHF 38'079.-. SEMS réalise dans les conditions actuelles CHF 28'901.- d'économie par an. Dépassant ainsi, de 51.79%

⁵ Référence du mois de février 2017, réduction de puissance ¼ horaire du mois de 107kW, plus l'impact des appareils de la Grappe 4 pour une réduction minimum assurée par SEMS de 50.6kW (2 X 25.3kW des 2 fours de trempe SAFED et sans compter l'impact de la réduction de puissance du 5^{ème} compresseur de 160kW de puissance nominale).

⁶ Le montant total d'économie annuelle inclus l'acheminement et les taxes en heures pleines et creuses



l'objectif du scénario Min, cependant 24.10% de réduction sont encore nécessaires pour atteindre l'objectif du scénario Max.

Le montant encore nécessaire pour atteindre l'objectif du scénario Max est de CHF 9'178.- par année et représente une réduction de puissance $\frac{1}{4}$ horaire de l'ordre de 81kW par mois. Nous proposons aux UMV un plan d'amélioration détaillé dans la section 8 ci-après leur permettant d'atteindre cet objectif grâce à SEMS.

7.3.1 SEMS, un outil de monitoring et de maintenance

Grâce au système SEMS, nous pouvons monitorer et contrôler le bon fonctionnement des appareils de l'installation.

Le cas du bain de traitement 1

En mai 2016, nous avons observé un arrêt de la consommation et une chute de la tension sur la phase 3 du bain de traitement 1. Nous avons ainsi pu diagnostiquer une panne et avertir les UMV afin de changer le fusible grillé. Il était alors impossible de constater ce défaut sans mesures électriques car le bain continuait de maintenir la température de consigne grâce aux deux autres phases.

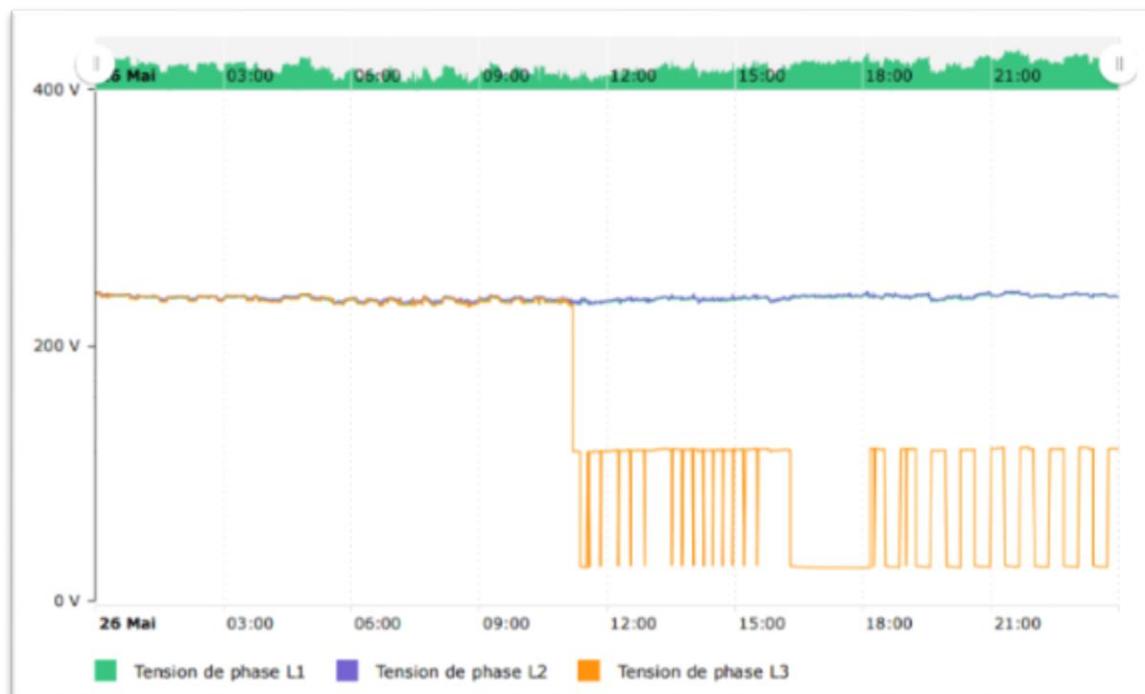


Figure 35 : Observation de la chute de tension de la phase 3 du bain de traitement 1 suite au fusible qui a sauté.

Le cas des fours à pot

Pendant le mois d'avril 2016, nous avons observé en fin de journée vers 17h00 une augmentation de la puissance quart horaire dépassant la pointe de la journée et qui n'était pas due à des appareils sous contrôle de SEMS. Après discussion avec le responsable technique des UMV, nous avons identifié la source de cette augmentation. Les horloges des quatre fours à pot étaient mal réglées et les faisaient démarrer les quatre en même temps. Afin de palier à ce problème, nous avons suggéré de reprogrammer l'enclenchement des fours avec un délai de 45 minutes entre chaque démarrage et depuis ce pic de puissance observé en fin de journée a disparu.



7.3.2 Avantages de SEMS par rapport aux systèmes existants

Pour la limitation des pics de puissances quart horaire, il y a en général deux catégories de solutions sur le marché : les automates programmables et le délestage statique.

Les automates programmables, il s'agit de solutions intégrées à des systèmes de gestion centralisés connus sous le nom de GTC (Gestion technique centralisée). Ils sont souvent composés d'une station centrale pour la surveillance et le contrôle et de sous-stations distantes pour mesurer et appliquer des commandes. Ces solutions monolithiques présentent plusieurs inconvénients. Premièrement, leur coût est trop élevé, ce qui induit un important investissement de départ. Il faut en effet compter une durée d'amortissement de 4 à 6 ans selon la taille de l'installation. Laborieux et complexes à installer (câblage, programmation des automates) et des interventions manuelles sont nécessaires pour les réglages, le contrôle et la maintenance. Ils présentent de plus les désavantages des systèmes centralisés : il suffit d'une simple panne informatique et tout le système est hors service. Finalement, ces types de systèmes souffrent d'une absence d'évolutivité et de modularité : le programme pour une telle gestion est développé de manière personnalisée pour une situation spécifique, tout changement de configuration, tel que l'ajout ou le remplacement d'un nouvel appareil, implique un nouveau développement du programme de l'automate.

Quant au système de délestage statique est qualifié ainsi car il consiste à délester certains appareils à certaines heures et/ou quand la puissance atteint une valeur prédéfinie. Dans le cadre de ce projet démonstrateur aux UMV, nous avons effectué une comparaison entre le système SEMS et un système de délestage statique pour la réduction du pic de puissance quart horaire. Ce système est basé sur un programme centralisé qui tient compte de priorités de fonctionnement associées à chaque appareil consommateur qu'il contrôle et son fabriquant annonce des réductions de la pointe de puissance jusqu'à 40% et un amortissement sur 3 ans.

À première vue, ce système de délestage statique ressemble au système SEMS. Un module de mesure de la charge des appareils gros consommateur d'une installation et un autre dédié au contrôle et qui peut retransmettre des informations. Nous avons effectué une comparaison démontrant l'efficacité et la fiabilité entre les deux solutions.

Décentralisation et robustesse

La première faiblesse du système de délestage statique est son intelligence centralisée. Cela n'a pas d'impact au niveau la performance du programme de délestage, mais présente un gros problème en cas de panne. En effet le pic de puissance apparaît une seule fois par mois et si l'élément de contrôle central tombe en panne au mauvais moment, l'optimisation du reste du mois ne sert plus à rien. Avec SEMS, l'optimisation continue même si un de ses éléments est en panne et comme aucun élément n'est central le système continue à fonctionner.

Dynamisme et confort d'utilisation

Avec le système de délestage statique, le client doit s'attendre que des machines et appareils qui ont été définies comme ayant une priorité basse dans la production soient purement et simplement déclenchées pour ne pas dépasser un seuil de puissance donné.

Il n'y a pas d'intelligence garantissant une température de consigne ou la bonne pression d'air comprimé dans une cuve ou encore la bonne continuité de production de l'appareil contrôlé comme le cas du système SEMS.

Ce « délesteur » statique déleste simplement la consommation des appareils désignée comme peu prioritaire sans tenir compte de leur état de fonctionnement pour assurer le non dépassement du pic de puissance et cela au détriment de la bonne marche de la production de l'entreprise. Dans le cas des UMV, en mode production tous les appareils sont prioritaires et seront tous délestés en même moment et doivent démarrer par la suite de manière simultané ce qui fait que de déplacer le pic de puissance dans le quart d'heure suivant.

Nous avons montré qu'un simple délestage pour le groupe thermique ne fonctionne pas correctement à cause de l'augmentation de la demande de puissance au démarrage ce qui fait qu'augmenter la puissance 1/4 horaire suivant. C'est pour cette raison que nous avons introduit dans le système SEMS de la régulation ou pour certain cas une combinaison d'un délestage dynamique avec une régulation afin de ne pas perturber les processus de productions tout en garantissant une réduction de la puissance quart horaire. SEMS étant beaucoup plus respectueux de la préservation du fonctionnement



des appareils, il devient possible d'installer un Terminal SEMS sur des appareils qui ne seraient simplement pas contrôlable par un système de délestage statique.

Gestion des processus complexe de production

Contrairement à un système de délestage statique, SEMS peut aussi intégrer dans son optimisation la gestion de processus tel que la production d'air comprimé par un groupe de compresseurs en s'interfaisant avec « AirLeader » comme le cas des UMV. On peut proposer des solutions innovantes tel que la régulation dynamique des processus de chauffe cyclique pour optimiser les quarts horaires les plus élevés et même intégrer un plan d'économie d'énergie grâce au Mode Eco de SEMS et ceci en adaptant les cycles de fonctionnements « duty cycle » réduisant les températures de consignes des appareils restant enclenché la nuit et le weekend en respectant leurs caractéristiques techniques comme pour les fours à moulle. SEMS permet ainsi l'intégration d'appareils de productions gros consommateurs qui étaient jusqu'à présent indisponibles pour participer à la réduction du pic de puissance. De plus dans le cas des UMV, l'intégration de la gestion des compresseurs n'aurait pas été possible et les contraintes élevées des différents appareils contrôlés n'auraient jamais pu être respectées par un système de délestage statique.

Les 40% d'économie annoncés par le système de délestage statique sur la puissance nous semblent irréalisables sans des interruptions totales des processus de production. Dans ces conditions les gains sur la factures d'électricité sont immédiatement effacés suite à la perturbation de la bonne marche de l'entreprise.

Par conséquence, ce type de solution de délestage statique n'est pas toujours applicable, peu efficace et souvent désactivé par les clients. Avec une approche novatrice pour la réduction du pic de puissance, SEMS se démarque des systèmes classiques existant sur le marché en proposant un système dynamique, évolutif, modulaire, robuste par sa décentralisation, fiable, efficace et ne perturbant pas les processus de production. La période de son amortissement est entre 30 et 36 mois.

Les principales caractéristiques du SEMS sont :

- **La simplicité de mise en œuvre** : SEMS apprend et analyse par lui-même la consommation des appareils auxquels il est connecté. Il permet l'auto-organisation de leur mise en marche grâce à un processus dans lequel l'organisation interne du système se structure automatiquement sans être dirigée par une source extérieure.
- **La modularité** : de nature bio-inspirée, le système est composé d'éléments simples coopérant pour atteindre l'objectif global. Le système est donc évolutif.
- **La décentralisation** : les modules SEMS prennent des décisions de manière décentralisée évitant ainsi une surcharge d'un système central tout en se préservant d'une éventuelle défaillance de ce dernier. Ceci garantit un système robuste, capable de continuer à fonctionner en cas de panne d'un de ses composants.
- **La réactivité** : les éléments du système coopèrent et communiquent entre eux via des interactions locales et sont capables de réagir instantanément aux demandes des appareils connectés. Le système peut ainsi faire face aux changements rapides de la demande de charge du réseau et d'une manière dynamique.
- **L'auto-adaptation** : dans le cas où de nouveaux consommateurs sont ajoutés à l'installation, le système s'y adapte facilement, pour autant que les nouveaux consommateurs soient équipés d'un Terminal SEMS. Le système peut aussi aisément évoluer pour prendre en compte les apports locaux d'énergie, tels que panneaux solaires installés sur le toit du bâtiment.

La solution SEMS présente de nombreux avantages pour les entreprises tels que :

- **Une économie immédiate** : SEMS permet de réaliser des économies immédiates. Il ne nécessite pas d'investissement initial lourd ni de financement à long terme ;
- **Un prix abordable** : l'investissement initial peut être amorti sur une période de 30 à 36 mois ;
- **La facilité d'utilisation** : entièrement plug and play, il ne nécessite aucun entretien ni maintenance de la part du client ;
- **Un large champ d'application** : il est applicable à plusieurs styles de bâtiments et différents types d'appareils et équipements électriques.
- **Une simplicité et rapidité d'installation** : le branchement d'un Terminal SEMS à l'appareil à contrôler est de moins qu'une heure et ne nécessitant pas de gros travaux ou le blocage de l'activité de l'entreprise.



8. PERSPECTIVES D'AMÉLIORATION

Nous formulons ci-après des propositions d'amélioration à mettre en place en collaboration avec les UMV pour améliorer le potentiel de réduction totale de la puissance par SEMS et d'économie d'énergie avec le « Mode ECO ».

8.1 Installation de nouveaux fours de trempe

Les fours de trempe 23, 25 et 26 vont à terme être changés par un nouveau modèle de même type que celui du four 4. Ces nouveaux fours plus flexibles permettront au SEMS de réduire plus efficacement le pic de puissance, comme pour le four 4, mais également de réaliser d'importante économie d'énergie sur une année. Nous avons comparé, ci-dessous, la consommation du four 26 avec celle du four 4 sur la même durée.

Four	Début			Fin				Durée [h]	Conso. sur la durée [kWh]	Conso. par heure [kWh/h]
	Date	Temp. [°C]	Relève d'énergie [kWh]	Date	Temp. [°C]	Relève d'énergie [kWh]				
26	14.04.16 17:00	793.1	554.2	15.04.16 06:00	791.1	973.5	13	419.2	32.25	
4	16.03.16 17:00	792.8	388.8	17.03.16 06:00	796.4	684.1	13	295.3	22.72	
								Gain	123.9	9.53

Tableau 29 : Comparaison de la consommation des fours de génération différente.

Nous observons bien une évolution de technologie qui permet d'économiser environ 9.53kWh par heure de fonctionnement. Sur une année cela représente 8'766 heures de fonctionnement (2'922 d'heures creuses et 5'844 d'heures pleines), ce qui représente une économie de 83'540 kWh d'énergie par four par année (27'847 kWh en heures creuses et 55'693 kWh en heures pleines) pour un total de CHF 7'730.-. Le potentiel d'économie totale en cas de changement des 3 fours est de **CHF 23'190.- par année**.

Le tableau ci-dessous présente le potentiel d'économie atteignable par le système SEMS et le « Mode ECO » avec le remplacement en cours des fours de trempes 23 et 26 par des fours SAFED de nouvelle génération identique au four de trempe 4.

Appareil	Réduction d'énergie mensuelle kWh]		Économie mensuelle [CHF]	Économie annuelle [CHF]
	HP	HC		
Four tunnel passage	579	1'012	132	1'584
Four de trempe 23 (SAFED)	976	873	163	1'956
Four de trempe 26 (SAFED)	976	873	163	1'956
Four de trempe 25	1'334	1'194	223	2'675
Four de trempe 4	976	873	163	1'956
Total⁷	4'841	4'825	844	10'127

Tableau 30 : Estimation par des mesures réelles des économies d'énergie grâce au « Mode ECO ».

⁷ Le montant total d'économie annuelle inclus l'acheminement et les taxes en heures pleines et creuses



8.2 Installation d'un variateur de fréquence pour la ventilation

La ventilation présente un fort potentiel d'économie à la fois pour la réduction du pic de puissance que pour le volume d'énergie consommée. En effet elle fonctionne en permanence à 44kW et consomme donc environ 44kWh par heure et ne peut pas être interrompue complètement sans perturber la production. L'installation d'un variateur de fréquence permettrait de diminuer le flux d'air tout en conservant l'aspiration pendant les moments critiques. En réduisant le cycle de fonctionnement de la ventilation de 50% pendant 15 minutes, la réduction de puissance serait de **22kW sur le pic de puissance**. De plus, en diminuant le régime moteur pendant la nuit et les weekends tout en appliquant un « Mode ECO » de 17h00 à 05h00 (12 heures) la semaine et toute la journée (24 heure) les weekends, cela représente 108 heures par semaine de fonctionnement en mode réduit (57 heures pleines et 51 heures creuses). Le tableau ci-dessous présente le potentiel d'économie que peut réaliser SEMS avec l'installation d'un variateur de fréquence sur la ventilation filtre bleu.

Période	Réduction de la vitesse [%]	Duty cycle [%]	Réduction d'énergie mensuelle [kWh]		Économie mensuelle [CHF]	Économie annuelle [CHF]
			HP	HC		
Lundi au vendredi	20%	51.20%	5'939.2	5'140.4	980	11'758
Samedi et dimanche	25%	42.19%				

Tableau 31 : Estimation des économies d'énergie annuelle de la ventilation filtre bleu.

Ainsi, le total d'économie annuelle sur la facture d'électricité s'élève à CHF 14'253.- avec l'installation d'un variateur de fréquence, et ceci en ajoutant CHF 2'495.- par an d'économie de la composante puissance de 22kW par mois à CHF 9.45 le kW aux économies sur la consommation d'énergie de CHF 11'758.- par an.

À noter que le scénario d'économie d'énergie de SEMS présenté ci-dessus ne prend pas en compte l'impact total des économies de la consommation électrique qui peut être sauvé par l'installation d'un variateur de fréquence estimé entre 30% à 50% selon les fabricants des variateurs de fréquences.

L'avantage du système SEMS pour le contrôle et le pilotage de la ventilation à travers d'un variateur de fréquence qu'il permet d'assurer des économies de la consommation électrique optimale en garantissant une qualité d'air dans le respect des normes en vigueur d'un environnement sain et propre des locaux offrant les meilleures conditions de travail aux opérateurs et ceci grâce à la mesure en temps réel de manière continue des toxines dans l'air par un capteur intégré pour cet effet au système SEMS TECO.

Parmi les variateurs de fréquence disponibles sur le marché, en voici deux qui répondent le mieux aux critères de choix, à savoir :

Marque	Modèle	Puissance contrôlable [kW]	Type de moteur contrôlé	Communication	Prix hors TVA [CHF]
OMRON	RX A4550	55	Asynchrone Synchrone	✓ Modbus ✓ Digital input ✓ Analog input	5'118.80
Schneider Electric	ATV650	55	Asynchrone Synchrone	✓ Modbus ✓ Digital input ✓ Analog input	5'752.69

Tableau 32 : Proposition de variateurs de fréquence compatibles avec la ventilation filtre bleu.

Nous avons demandé une offre pour l'installation du modèle de Schneider Electric choisi par les UMV. L'offre est de CHF 9'450.- hors TVA incluant le variateur de fréquence, la configuration, l'installation y compris la fourniture électrique et la mise en service. Selon le calcul des coûts, et avec les CHF 14'253.- par an d'économie de réduction de puissance et de consommation d'énergie, l'amortissement du variateur de fréquence grâce au système SEMS est moins d'un an.



8.3 Amélioration du contrôle des compresseurs

Pour le contrôle des compresseurs, SEMS est actuellement interfacé avec « Airleader » un système existant de gestion de la production d'air comprimé. Avec cet interfaçage, SEMS fonctionne sur les compresseurs selon les possibilités d'actions suivantes :

1. La mise à vide
2. La gestion des zones de pressions

Nous observons que ces deux actions ne nous permettent pas à chaque fois d'atteindre le potentiel de réduction maximum. L'envoi d'une commande d'arrêt complet du compresseur au lieu d'une simple mise à vide est nécessaire pour garantir les gains de puissance que nous avons annoncés. Une minute de mise à vide pour un compresseur représente 2.6kW d'impact de réduction sur la puissance quart horaire et ne représente aucun bénéfice pour la production d'air comprimé. L'arrêt complet du compresseur demande cependant une nouvelle configuration des commandes SEMS et nécessitera une activation d'une entrée logique au niveau des compresseurs. Ce mode de fonctionnement d'action SEMS réduirait de **40kW** la puissance ¼ horaire mensuelle pour l'ensemble des compresseurs et représenterait des économies supplémentaires de **CHF 4'536.-** par année sur la facture d'électricité.

8.4 Perspectives des résultats des améliorations au sein des UMV

En ajoutant le contrôle de la ventilation, le changement des fours de trempe 23 et 26 ainsi que la suppression des mises à vide des compresseurs, SEMS est capable de réaliser les résultats suivants dans les conditions actuelles de la charge de production du site des UMV, soit 2'200kW par mois en moyenne de pic de puissance ¼ horaire et d'une moyenne de 7.5 GWh par année de consommation d'énergie :

Paramètre électrique	Gain mensuel	Économie annuelle [CHF]
Puissance	245 kW	27'783
Energie HP	10'780 kWh	21'885
Énergie HC	9'965 kWh	
Total ⁸		49'668

Tableau 33 : Potentiel d'économie du SEMS en ajoutant le contrôle de la ventilation, le changement des fours 23 et 26 ainsi que la suppression des mises à vide des compresseurs.

Nous avons reconstitué et simulé la réduction de la puissance ¼ horaire que SEMS aurait pu réaliser avec les améliorations proposées pour la période de mai 2016 à avril 2017. Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous :

⁸ Le montant total d'économie annuelle inclus l'acheminement et les taxes en heures pleines et creuses



Mois/Année	Réduction de la puissance améliorée 1 : 2 fours SAFED, ventilation et suppression de la mise à vide des compresseurs				Réduction de la puissance améliorée 2 : 3 fours SAFED, ventilation et suppression de la mise à vide des compresseurs			
	Réduction de puissance [kW]	Puissance délestage effective au moment du pic [kW]	% de réduction de la puissance par rapport aux délestables [%]	Gains financiers [CHF]	Réduction de puissance [kW]	Puissance délestage effective au moment du pic [kW]	% de réduction de la puissance par rapport aux délestables [%]	Gains financiers [CHF]
Mai 2016	176	808	21.78%	1'663	201	783	25.67%	1'899
Juin 2016	180	783	22.99%	1'701	205	758	27.04%	1'937
Juillet 2016	219	783	27.97%	2'070	244	758	32.19%	2'306
Août 2016	199	652	30.52%	1'881	199	652	30.52%	1'881
Septembre 2016	218	664	32.83%	2'060	218	664	32.83%	2'060
Octobre 2016	189	754	25.07%	1'786	214	729	29.36%	2'022
Novembre 2016	202	729	27.71%	1'909	227	704	32.24%	2'145
Décembre 2016	183	729	25.10%	1'729	209	704	29.69%	1'975
Janvier 2017	198	689	28.74%	1'871	224	664	33.73%	2'117
Février 2017	220	689	31.93%	2'079	245	664	36.90%	2'315
Mars 2017	211	729	28.94%	1'994	236	704	33.52%	2'230
Avril 2017	175	729	24.01%	1'654	201	704	28.55%	1'899
			Total	22'397			Total	24'787

Tableau 34 : Potentiels d'économie de la réduction de la puissance $\frac{1}{4}$ horaire par SEMS avec les améliorations proposées.



Avec la mise en place des améliorations proposées, y compris les actions sur la ventilation, SEMS atteindrait pour le mois de juillet 2016 une réduction de la puissance de 244kW, représentant 11.12% de réduction sur la charge globale de 2'194kW. Le gain que SEMS pourrait réaliser sur le mois de juillet 2016 par rapport aux mois de mai et juin 2016 serait le résultat direct de l'implémentation d'amélioration liée à la gestion des compresseurs et d'actions optimisées sur les fours. Ces propositions d'améliorations sont discutées avec la direction technique des UMV qui a pris la décision de leurs mises en place progressives selon un planning budgétaire pour les investissements nécessaires. D'ailleurs, le four de trempe 23 a été changé par un nouveau four SAFED d'une nouvelle génération et qui a été mis en service courant le mois d'avril 2017. Le changement du four 26 et l'installation du variateur de fréquence pour la ventilation filtre bleu sont programmés pour fin 2017. Lors de la réalisation de ces travaux par notre partenaire d'installation, nous avons prévu de lui confier la programmation des entrées logiques et le branchement des nouvelles commandes des compresseurs, afin de supprimer leur mise à vide.

Impact amélioré de la réduction de la puissance ¼ horaire par SEMS entre mai 2016 et avril 2017

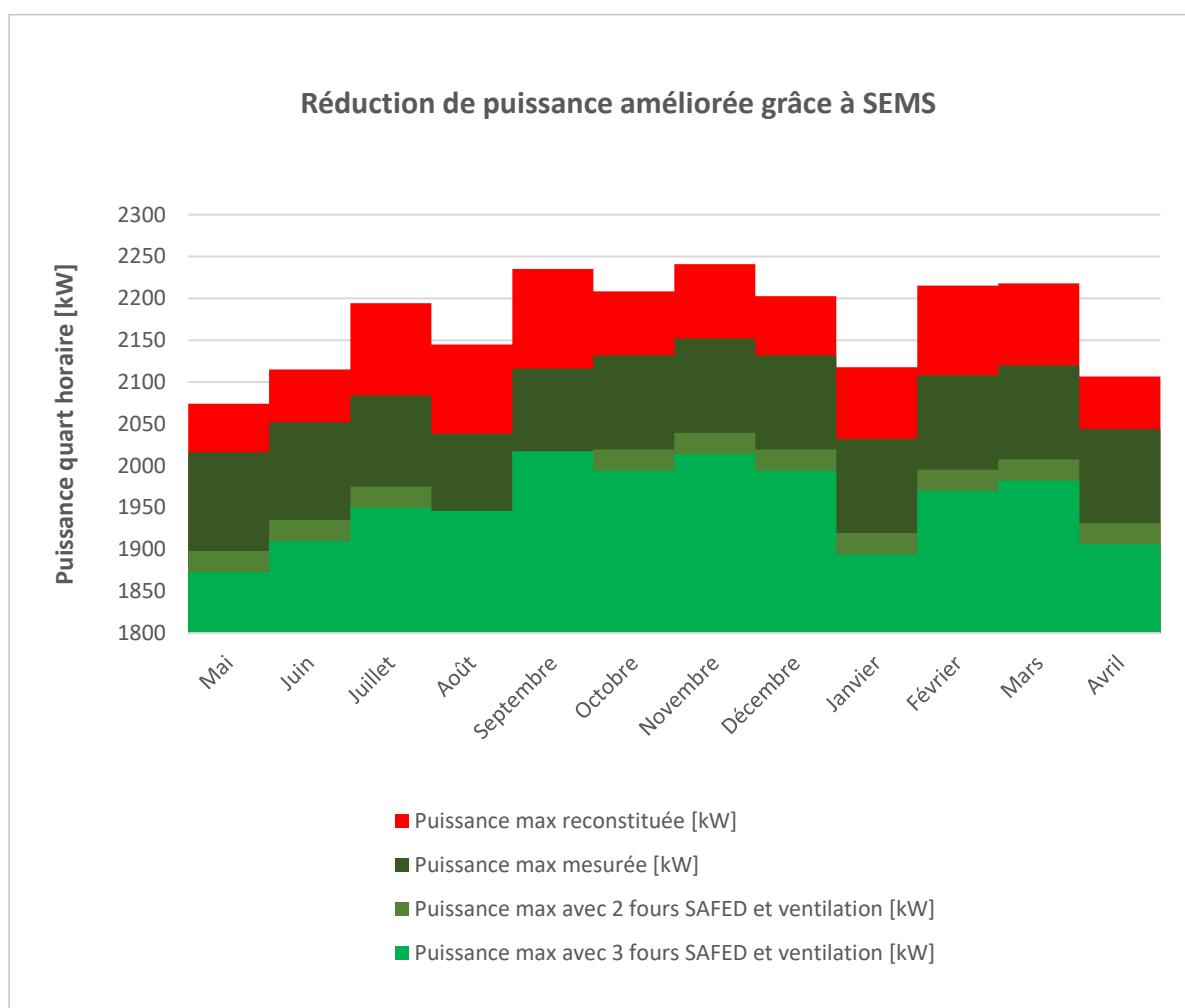


Figure 36 : Impact des améliorations de la réduction de la puissance ¼ horaire par SEMS pour la période entre mai 2016 et avril 2017.



9. EXPERTISES

9.1 Expertise de Romande Energie

Une des clés de la réussite de la transition énergétique repose sur le développement de technologies innovantes en matière de production, de stockage et de consommation d'énergie. Convaincue du potentiel du système SEMS développé par Stignergy, Romande Energie a participé au développement et la mise en œuvre du projet démonstrateur sur le site des UMV. En effet, cette solution correspond à la volonté de Romande Energie d'offrir à sa clientèle des outils, prestations et services leur permettant de maîtriser leurs consommations énergétiques et de réduire leur facture.

Le système SEMS se distingue des solutions de délestage traditionnel par sa capacité de réduire et optimiser de manière flexible et décentralisée la demande globale en énergie, en répartissant dynamiquement les besoins tout au long d'une journée, sans perturber la production des appareils concernés.

Pour le déploiement à large échelle de la solution, il était nécessaire de prouver que les promesses de SEMS étaient bien tenues. Le projet démonstrateur nous a permis de démontrer l'efficacité et la fiabilité de la solution technique sur un site industriel et de confirmer qu'un délestage décentralisé pouvait être mis en place sur des appareils de production sans perturber le processus de production, autant quantitativement que qualitativement.

Une solution de management de la demande évolutive, flexible, et décentralisée est essentielle pour fonctionner dans une entreprise qui doit pouvoir changer son fonctionnement, son cycle de production ou ses méthodes de travail rapidement afin de répondre aux attentes du marché et rester, voire gagner, en compétitivité.

En plus de confirmer l'efficacité technique du système et une réduction effective de la facture d'électricité par la réduction des pics de puissance, nous avons pu démontrer les avantages supplémentaires d'un système qui permet également le contrôle et le monitoring des consommations et de l'environnement, soit :

- Déetecter des optimisations de régulation de la consommation et la réduire par la programmation de « Mode Eco » ;
- Révéler des anomalies de consommation et des pannes d'installations ;
- Apporter une aide à la décision dans la rénovation des installations et justifier des investissements ;
- Optimiser l'entretien et la maintenance des installations.

Les gains financiers réalisés grâce à la réduction de puissance ne sont pas les seuls bénéfices, cette solution peut répondre à d'autres besoins des entreprises grandes consommatrices d'énergie. En effet, la plupart des Cantons ont introduit ou vont introduire une obligation pour les grands consommateurs d'énergie de réaliser des mesures d'efficiencies énergétique. Avec SEMS, et notamment son Dashboard, les entreprises disposent d'un outil de pilotage qui leur permet de détecter des mesures d'efficiency énergétique, d'appliquer des mesures de régulation et de suivre les résultats effectifs de leurs mises en œuvre.

Suite aux résultats positifs tant quantitatifs (économie réalisée) que qualitatifs (modularité et flexibilité du système et outil de pilotage) du projet, Romande Energie va mettre à disposition de ses clients une offre de management de l'énergie basée sur le système SEMS. À terme, le système pourrait également être combiné avec un système local de production d'énergie, ainsi qu'une solution de stockage d'énergie, voire s'interfacer aux centres de conduite des gestionnaires de réseaux, afin d'améliorer encore la gestion des pics de consommation et l'équilibrage entre la production et la demande d'énergie. Le développement de SEMS s'aligne parfaitement avec les objectifs de la stratégie énergétique 2050 en apportant une solution innovante pour répondre aux défis de la transition énergétique.



9.2 Expertise des UMV

La chasse aux gaspillages, les notions d'environnement et notre implication dans la stratégie énergétique 2050 font partie intégrante de notre stratégie. Et c'est dans ce but que nous souhaitons, par le biais de nos actions, réduire nos consommations énergétiques. Que ce soit pour la consommation de l'eau, du gaz et de l'électricité.

Toute entreprise doit innover, pas seulement dans la technique, mais également dans sa façon d'agir et de consommer.

Quand notre partenaire, Romande-énergie, nous a fait part du projet de « délestage » proposé par Stignergy, il était tout naturel d'adhérer à ce projet.

Certes les contraintes ou les inconnues pouvaient être nombreuses en début de projet, mais le résultat prouve que le choix était juste et qu'il nous offre beaucoup d'axes d'améliorations et de réflexions.

L'accompagnement dans le projet par notre personnel était impératif. La communication a une importance capitale dans sa réussite. Nos cadres ont su accompagner nos collaborateurs dans l'acceptation aux changements. Car il s'agit bien de changement de culture, d'habitude de consommation. Une analyse de risques a été nécessaire au début du projet afin de limiter et d'anticiper les dysfonctionnements. La mise en place a été plutôt simple et sans écueil, pas de perte de productivité ni de non-conformité majeure.

Pour limiter les dysfonctionnements il était impératif de suivre régulièrement toutes les actions mises en place. Les résultats étaient mis en évidence rapidement grâce au Dashboard (résultat en live). Ce tableau de bord est un réel outil qui nous a permis et permet l'amélioration continue.

Stignergy, par ses compétences et son engagement a su apporter un soutien technique considérable. Par la compréhension de nos contraintes, nos métiers si spécifiques, mais également par son regard d'expert pour ses propositions d'amélioration (comme décrit dans ce rapport). Leurs disponibilités et leurs implications ont permis au projet de répondre à nos attentes et nous ne pouvons que le conseiller à d'autres entreprises.

Aujourd'hui, nous disposons d'un outil, qui nous permet de faire des simulations afin de définir des axes d'améliorations, mais également un outil permettant de suivre, de gérer nos consommations de façon proactive et également d'innover dans notre façon d'agir et de consommer.

Il est également important de remercier l'OFEN pour son accompagnement dans la démarche, par son soutien dans notre entreprise mais également d'avoir cru à ce projet innovant.

Aujourd'hui, nous avons progressé dans nos démarches et grâce à ce projet une multitude d'axe de réflexions s'ouvre à nous pour les autres formes de consommations.

En d'autres termes : une expérience réussie.



10. CONCLUSIONS

Tout au long du projet démonstrateur aux UMV, nous avons effectué une analyse constante des mesures et des décisions SEMS ce qui nous a permis d'apporter un grand nombre d'améliorations durant le projet. Chaque amélioration a été dûment testée et validée avant de la mettre en fonction aux UMV. Un monitoring précis et méticuleux effectué par notre équipe a permis une bonne marche de SEMS sans perturber les processus de production des appareils contrôlés par celui-ci sur le site des UMV. Tout ce travail nous amène jusqu'à aujourd'hui où tous les processus d'optimisation applicables sont en place.

Le site des UMV a un fort et réel potentiel de réduction de la puissance $\frac{1}{4}$ horaire et d'économies d'énergie. Nous pouvons actuellement contrôler et diminuer le pic de puissance de plus de 160kW. En tenant compte des propositions d'amélioration de la section 8 qui consiste à l'installation d'un variateur de fréquence pour la ventilation, au remplacement de deux fours de trempe à sel et la suppression des mises à vide des compresseurs, SEMS peut encore atteindre facilement une réduction de la puissance $\frac{1}{4}$ horaire de plus de 245kW (Référence par rapport du mois de février 2017 avec les actions SEMS améliorées). L'objectif d'atteindre une réduction de puissance $\frac{1}{4}$ horaire de 336kW selon le scénario Max est donc potentiellement atteignable. En particulier, si le site des UMV augmente l'activité de production qui engendrerait automatiquement une augmentation de l'appel de puissance et des pics $\frac{1}{4}$ horaire, ainsi le potentiel de réduction de 91kW supplémentaire par SEMS est tout à fait réalisable dans ces conditions.

Les propositions d'améliorations sont discutées avec la direction technique des UMV pour leurs mises en place progressives jusqu'à fin 2017, afin d'atteindre une réduction optimale de la puissance de la charge globale et d'importantes économies sur la consommation d'énergie que peut réaliser SEMS.

Le projet démonstrateur de SEMS sur le site des UMV nous a permis de démontrer :

- La fiabilité et l'efficacité du système SEMS ;
- La souplesse de déploiement de nouveaux mécanismes et d'outils d'optimisation de la puissance ainsi que d'économie d'énergie : délestage dynamique standard, par régulation et le « Mode ECO » ;
- L'évolutivité et la modularité du système SEMS : adaptation facile et automatique aux changements ;
- L'atteinte des objectifs fixés sans perturber les processus de production primordiale dans l'industrie ;
- La qualité des mesures et l'efficacité du SEMS Live Dashboard pour détecter et simuler des plans d'amélioration d'efficacité énergétique : Renouvellement des fours et installation d'un variateur de fréquence ;

Ce projet démonstrateur a permis Stignergy d'évaluer avec précision l'effort initial pour chaque étape de l'intégration du système SEMS dans un nouveau site. Ainsi, nous avons affiner notre modèle d'affaire par l'attribution des coûts de chaque étape opérationnelle de la mise en service du système SEMS. Le tableau de l'annexe 11.3 présente ces différentes étapes et leurs coûts associés.

Le soutien de l'OFEN dans le cadre du programme projets démonstrateurs et l'excellente collaboration entre les différents partenaires, Stignergy, les UMV, Romande Energie et l'installateur Amaudruz SA, ont également fortement contribué à la réussite du projet.

À la clôture de ce projet démonstrateur de SEMS aux UMV, Stignergy dispose d'un système qui a atteint une maturité industrielle importante tout en étant une solution simple, efficace et compétitive. De ce fait, le système SEMS est prêt d'intégrer de nouveaux modules et de nouvelles fonctionnalités telles que la gestion de stockage d'énergie produite localement par des panneaux photovoltaïques ou par des mini-turbines pour maximiser l'autoconsommation des installations contrôlées par SEMS, facilitant ainsi, le déploiement des énergies renouvelables. À terme, SEMS est capable de participer auprès du GRD à l'ajustement de l'équilibre entre la demande et la production de l'énergie électrique dans un concept de Smart Grid.



L'impact du système SEMS de Stignergy touche plusieurs aspects, particulièrement :

Aspect environnemental : Un service web, le SEMS Live Dashboard permet de détecter les consommations inutiles et d'agir à distance ou de manière programmable sur chaque appareil électrique contrôlé par le système SEMS. En effet, certains processus fonctionnent de manière permanente et consomment autant lorsqu'ils sont en régime de production ou en régime de maintien pendant les périodes hors production. SEMS permet grâce à son « Mode ECO » de réduire la consommation d'énergie des appareils en fonctionnement permanent. Le Terminal SEMS concerné adapte automatiquement le rapport cyclique adéquat pour chaque régime de fonctionnement, réduisant ainsi la consommation d'énergie liée et les émissions de CO₂ associées.

Aspect économique : SEMS contribue à maîtriser les coûts énergétiques des entreprises et permet également d'augmenter leur productivité.

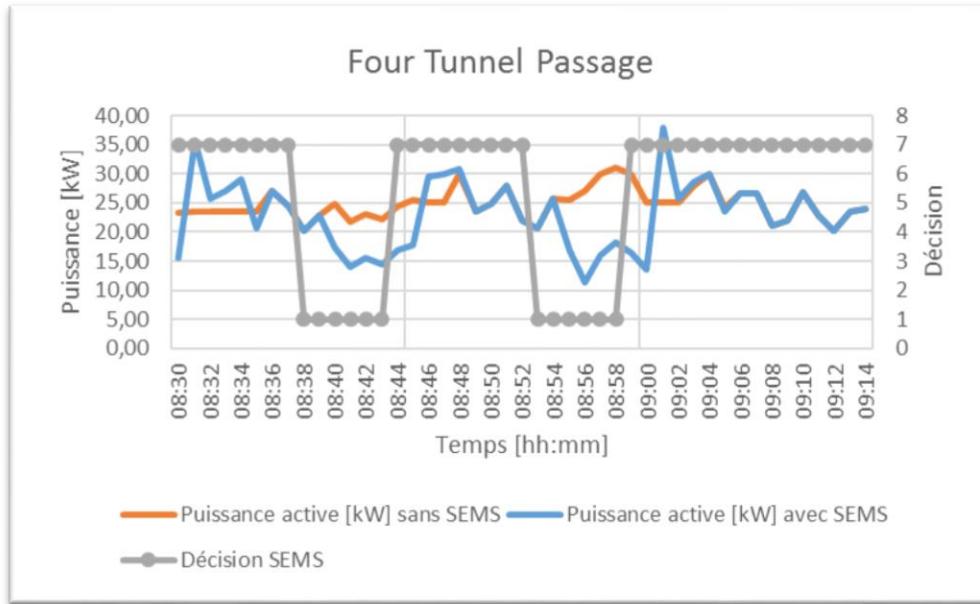
Aspect politique : SEMS est parfaitement en phase avec les orientations de la politique énergétique fixé par la Confédération. Le Conseil fédéral souhaite continuer de garantir une sécurité élevée de l'approvisionnement énergétique en Suisse, mais sans le nucléaire à moyen terme. Afin de garantir la sécurité d'approvisionnement, le Conseil fédéral souhaite, dans le contexte de la nouvelle stratégie énergétique 2050, accroître l'efficacité énergétique de la Suisse tout en développant la production via les nouvelles énergies renouvelables. Parallèlement au développement des énergies renouvelables et à l'intégration dans le réseau électrique européen, il est nécessaire de moderniser et d'élargir le réseau électrique et de recourir à des techniques intelligentes («smart technologies» ou « smart grid ») pour gérer les flux croissant de la production décentralisée des énergies renouvelables ou encore l'augmentations des recharges des batteries des voitures électriques, afin d'éviter les congestions des réseaux. Dans cette perspective, SEMS contribue à l'objectif ambitieux du Conseil fédéral, car il permet de gérer efficacement la demande d'énergie des entreprises tout en leurs donnant les moyens de l'optimiser via des outils de monitoring. Il s'intègre parfaitement au concept du réseau « smart grid » et à son développement nécessaire pour les besoins de la transition énergétique. L'intelligence embarquée des modules SEMS est un outil clé dans l'analyse des installations et des réseaux en vue de leur optimisation.



11. ANNEXES

11.1 Analyse de l'impact des actions SEMS du 15 juillet 2016

Impact des actions de SEMS sur le four tunnel passage

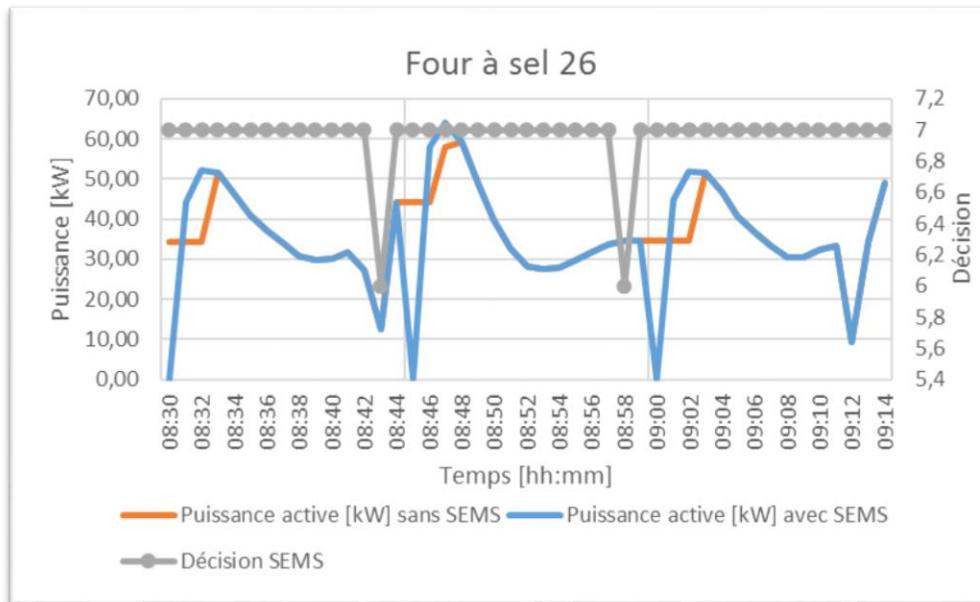


La décision du délestage de 6 minutes a correctement été effectuée en fin du quart d'heure pour permettre un gain de 4.4kW.

Afin d'améliorer encore le gain sur la puissance, et de ne pas avoir à enregistrer une légère augmentation de la consommation suite à l'action de délestage du quart d'heure précédent, nous avons mis en place un principe de régulation des appareils thermiques non cyclique. L'objectif est de réguler la puissance de la zone du milieu du four tunnel afin de contrôler et garantir la puissance lors de quarts d'heure à forte consommation.

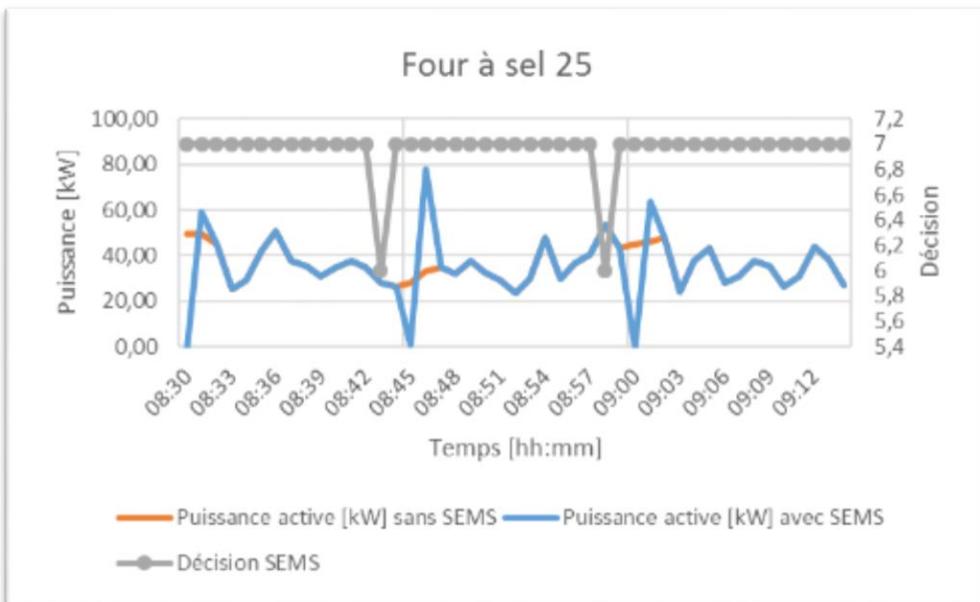
Quart d'heure [hh:mm]	Gain sur la puissance quart horaire [kW]
09:00	4.4

Tableau 35 : Gain de puissance du four tunnel passage.

Impact des actions de SEMS sur le four à sel 26**Figure 38 : Reconstitution de la consommation du four à sel 26.**

Les actions de délestage sur le four à sel 26 ont été activées et ont permis un gain de 0.975kW sur le quart d'heure critique. Comme dans le cas du four tunnel passage, nous pourrions améliorer les gains de puissance en appliquant une régulation sur le four lorsque plusieurs quarts d'heure à forte consommation se suivent en diminuant légèrement la puissance tout en garantissant la température de consigne du four.

Quart d'heure [hh:mm]	Gain sur la puissance quart horaire [kW]
09:00	0.975

Tableau 36 : Gain de puissance du four à sel 26.Impact des actions de SEMS sur le four à sel 25**Figure 39 : Reconstitution de la consommation du four à sel 25.**



Intelligence collective pour un délestage dynamique de la charge

Les actions de délestage sur le four à sel 25 ont été activées. Cependant le gain réalisé est très faible. L'action de délestage est suivie directement d'une forte augmentation de la consommation électrique. Et l'action de délestage du quart d'heure précédent annule presque complètement l'action de délestage du quart d'heure de 09h00. Comme dans les deux cas précédents, nous pourrions améliorer les gains de puissance en appliquant une régulation sur le four lorsque plusieurs quarts d'heure à forte consommation se suivent en diminuant légèrement la puissance tout en garantissant la température de consigne du four.

Quart d'heure [hh:mm]	Gain sur la puissance quart horaire [kW]
09:00	0.012

Tableau 37 : Gain de puissance du four à sel 25.

Impact des actions de SEMS sur four à sel 4

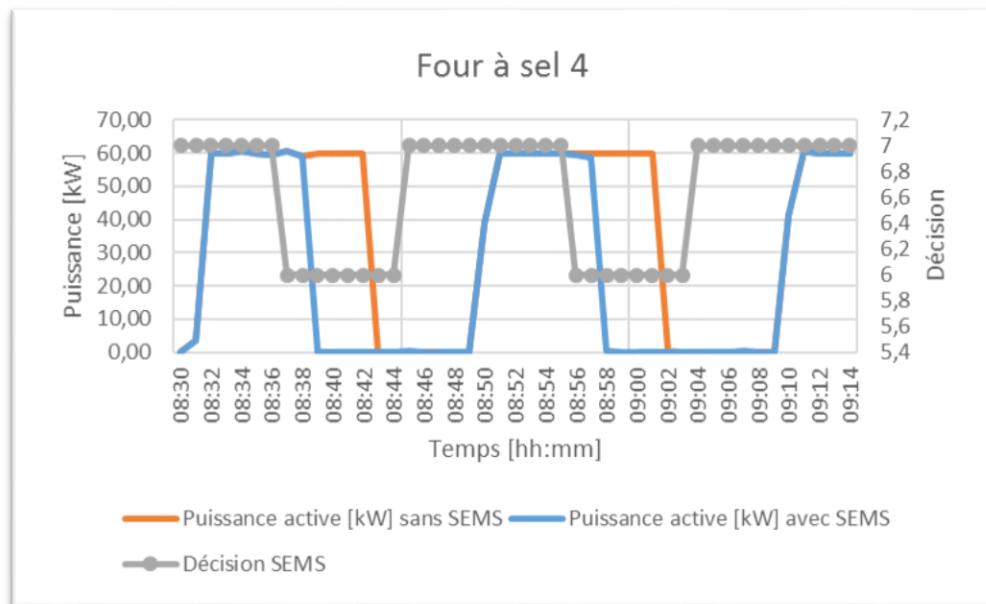
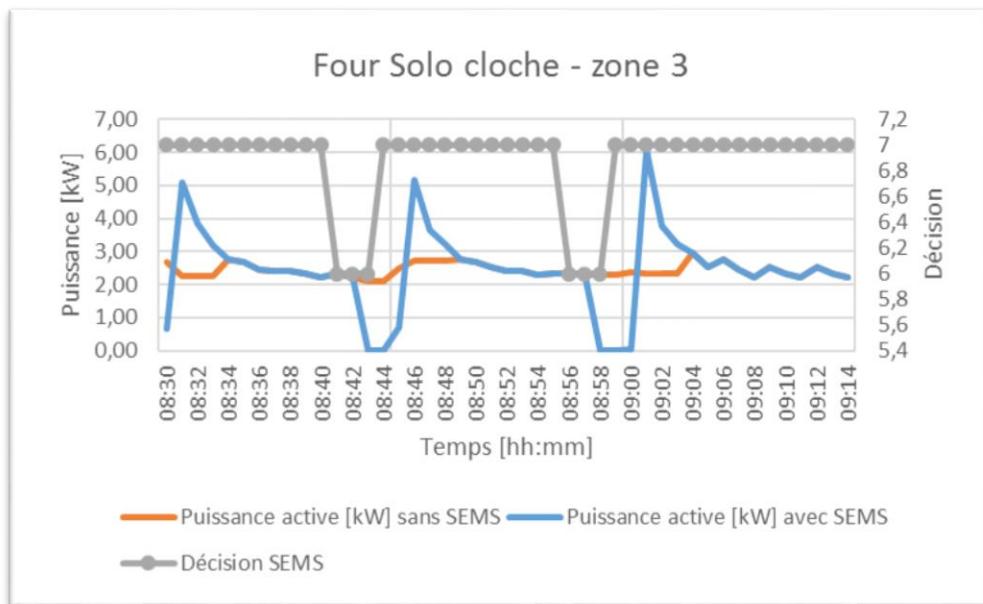


Figure 40 : Reconstitution de la consommation du four à sel 4.

Dans cette situation le four à sel 4 est en mode régulation, les cycles de fonctionnement sont régulés et répartis entre les quarts d'heure.

Quart d'heure [hh:mm]	Gain sur la puissance quart horaire [kW]
09:00	12.5

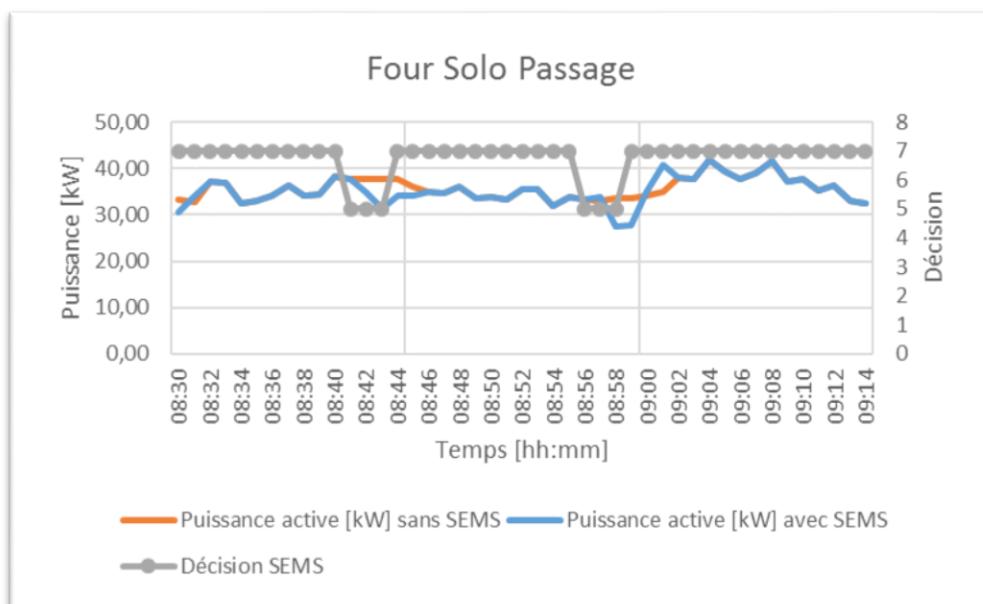
Tableau 38 : Gain de puissance du four à sel 4.

Impact des actions de SEMS sur le four Solo Cloche**Figure 41 : Reconstitution de la consommation du four Solo cloche.**

Le four Solo cloche est en mode de maintien. Le délestage a été effectué correctement en respectant les flexibilités et les contraintes.

Afin d'améliorer encore le gain de puissance, le principe de régulation des appareils thermiques non cyclique permettrait de contrôler et de garantir la puissance soutirée par le four.

Quart d'heure [hh:mm]	Gain sur la puissance quart horaire [kW]
09:00	0.2

Tableau 39 : Gain de puissance du four Solo cloche.Impact des actions de SEMS sur le four Solo passage**Figure 42 : Reconstitution de la consommation du four Solo passage.**



Le four Solo passage a respecté ses flexibilités et ses contraintes. Une décision de 3 minutes a correctement été prise en fin de quart horaire pour permettre un gain de 0.7kW.
Une augmentation du gain sur ce four serait encore possible grâce à une régulation contrôlée de la zone du milieu du four lorsque plusieurs quarts d'heure à forte consommation se suivent.

Quart d'heure [hh:mm]	Gain sur la puissance quart horaire [kW]
09:00	0.707

Tableau 40 : Gain de puissance du four Solo passage.

Impact des actions de SEMS sur le bain de traitement cuve 3 KM1 et KM2

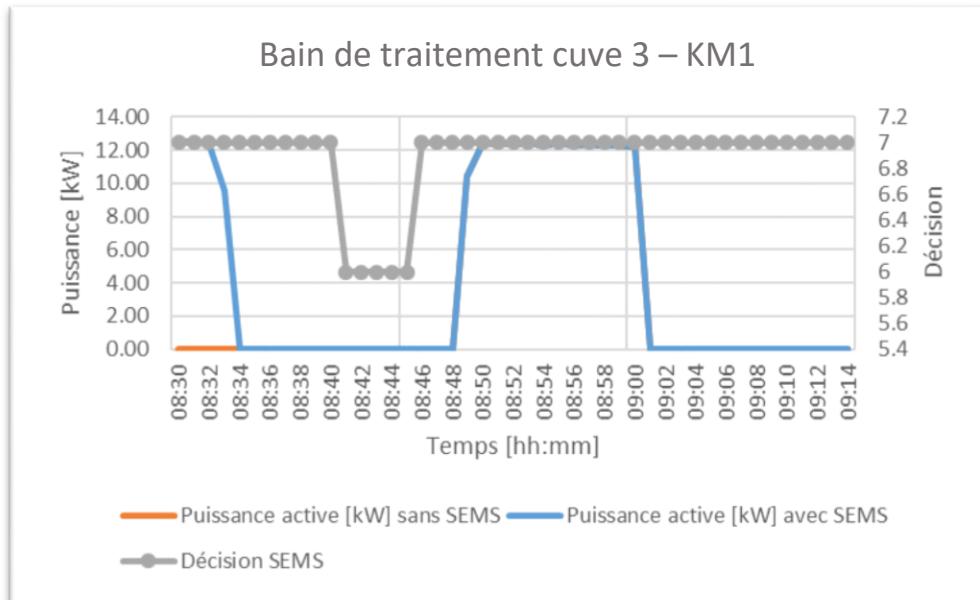


Figure 43 : Consommation et décision du Bain de traitement cuve 3 KM1.

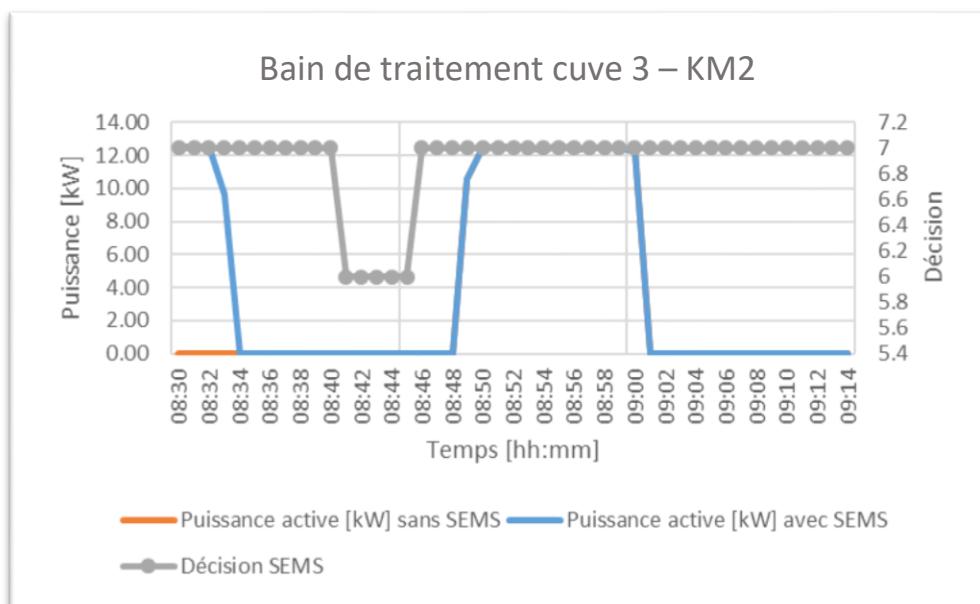


Figure 44 : Consommation et décision du Bain de traitement cuve 3 KM2.



Pendant le quart d'heure de 09h00, l'algorithme n'a pas pris de décision en raison du délestage du quart d'heure précédent. En effet, afin de respecter les flexibilités et les contraintes, l'algorithme doit attendre avant de pouvoir délester la consommation à nouveau. C'est pourquoi tous les appareils thermiques cycliques sont maintenant en mode de régulation lors des pics. Sur ce type d'appareil, une action de délestage seule n'est pas suffisante pour garantir un contrôle de la puissance.

Impact des actions de SEMS sur le groupe compresseur

Le choix des zones de pression par l'algorithme se fait via le Terminal SEMS contrôlant le compresseur 6023. Voici l'équivalent de ses décisions :

Valeur de décision	Zone de pression (DP)	Action directe sur le compresseur 6023
2	DP2 – Action de réserve	Mise à vide
3		Aucune
4	DP4 – Action de délestage	Mise à vide
5		Aucune
6	DP1 – Régime standard	Mise à vide
7		Aucune

Tableau 41 : Équivalent des décisions du Terminal 20 contrôlant le compresseur 6023.

Pour les terminaux 350 et 2773, le Terminal actionne seulement la mise à vide.

Valeur de décision	Action sur le compresseur
6	Mise à vide
7	Aucune

Tableau 42 : Équivalent des décisions des terminaux contrôlant les compresseurs 350 et 2773.

Pour les autres compresseurs, aucune décision n'est prise.

Action de réserve

Aucune action de réserve n'a eu lieu car la puissance du quart d'heure précédent était déjà élevée à 1950kW.

Actions de délestage

Chaque fois que la consommation diminue en dessous de 150kW, cela indique un changement de mode de fonctionnement du compresseur. Les compresseurs ayant une forte inertie, lors d'une mise à vide, ils ne diminuent pas leur consommation instantanément, il faut quelques secondes avant d'atteindre les 40 kW de consommation en mise à vide. C'est pourquoi, nous comptons des actions de mise à vide alors que la mesure de puissance est plus élevée que 40kW.

Pour chaque compresseur, nous avons mis en évidence, sur les graphiques ci-dessous, les mesures qui sont le résultat d'une action SEMS.

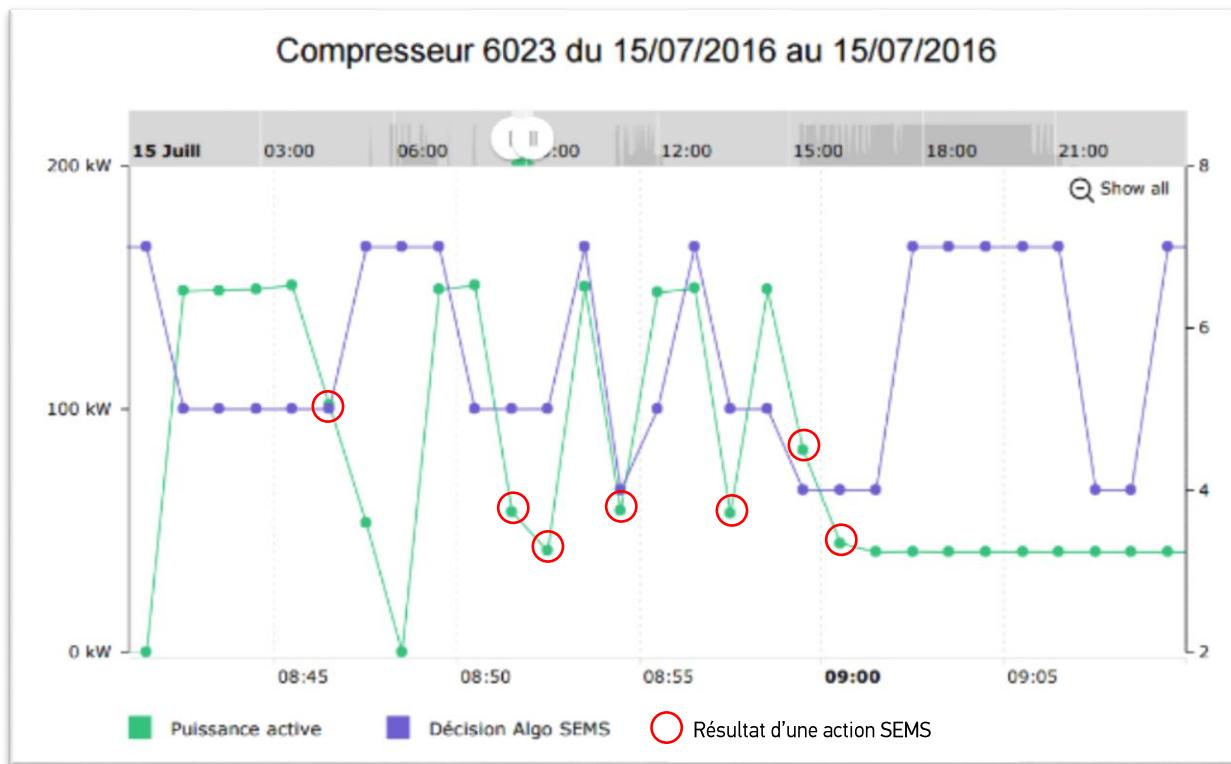


Figure 45 : Prise de décision et consommation du compresseur 6023.

Contrôle de la pression d'air dans la cuve du 15.07.2016

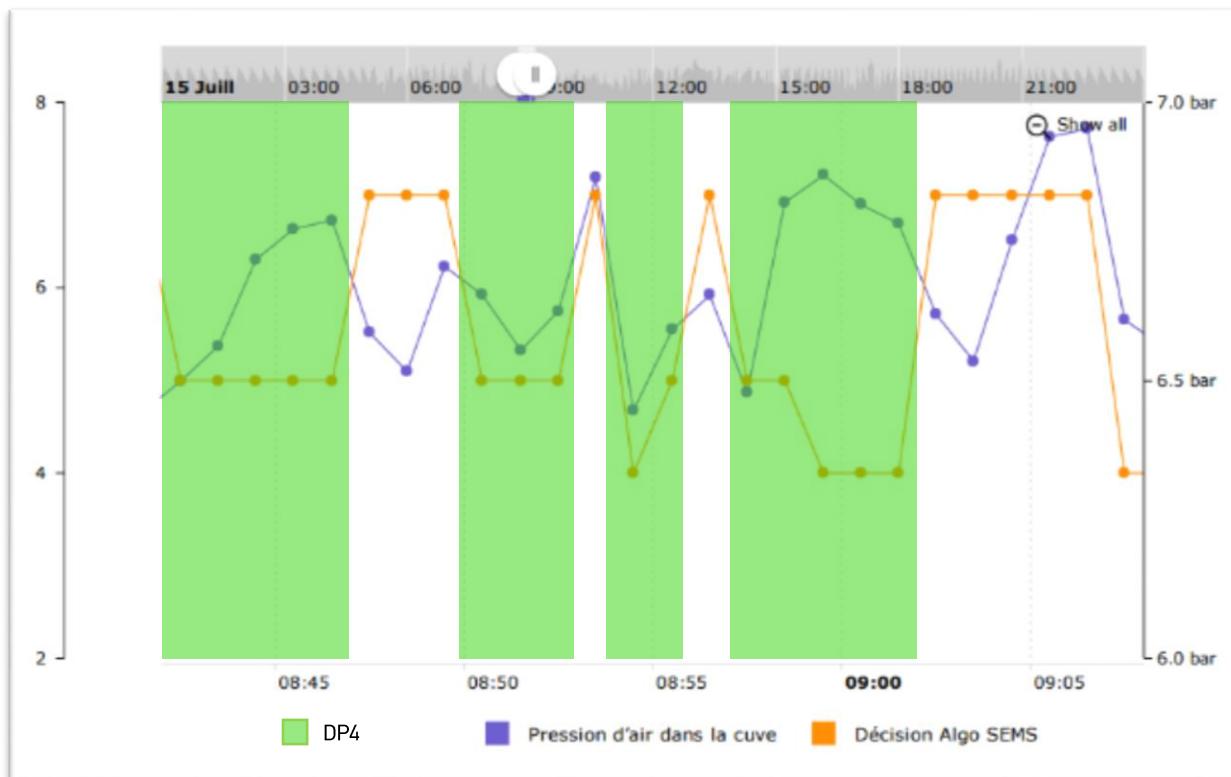


Figure 46 : Évolution de la pression d'air dans la cuve en fonction des zones de pression choisies.



Entre 08h45 et 09h00, l'algorithme SEMS a appliqué les décisions de zone de pression suivantes :

Heure de début	Heure de fin	Zone de pression
08h45	08h47	DP4
08h47	08h50	DP1
08h50	08h53	DP4
08h53	08h54	DP1
08h54	08h56	DP4
08h56	08h57	DP1
08h57	09h00	DP4

Tableau 43 : Zones de pression appliquées entre 08h45 et 09h00.

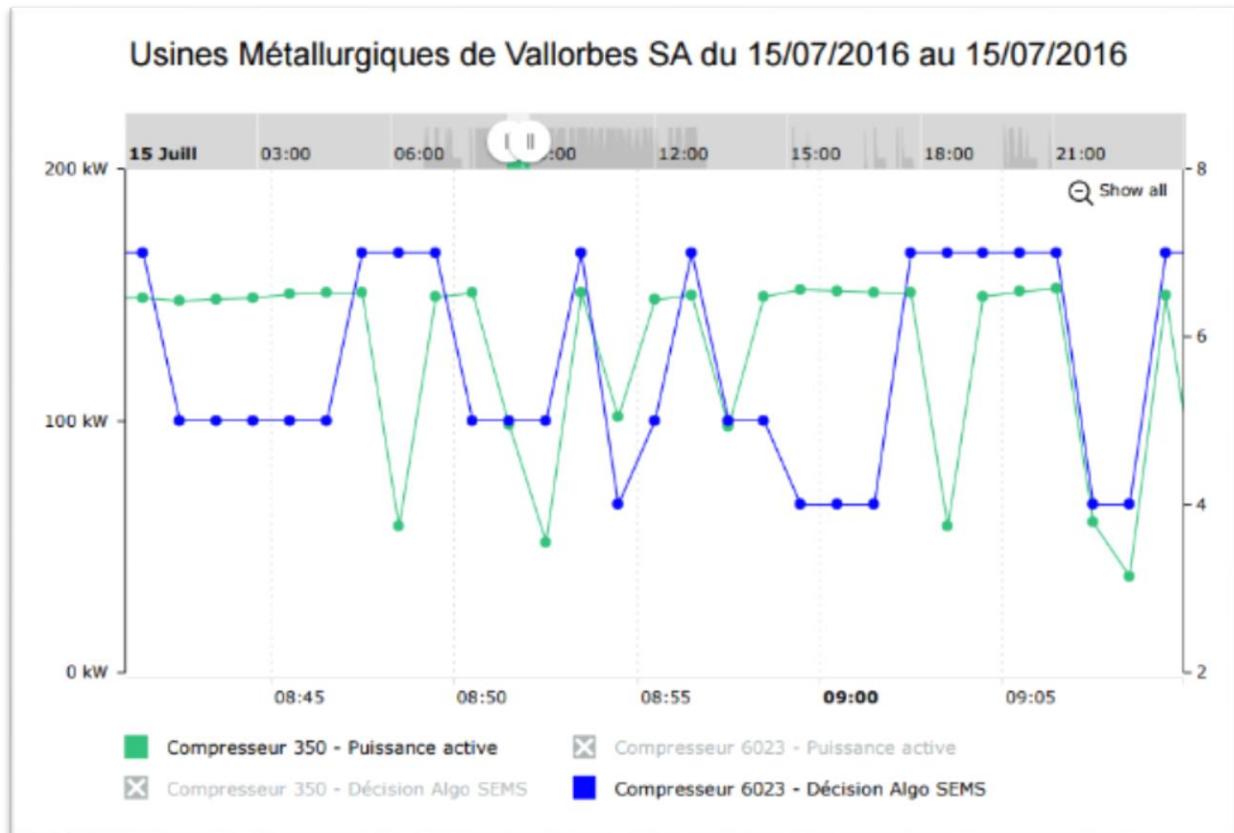


Figure 47 : Prise de décision et consommation du compresseur 350.

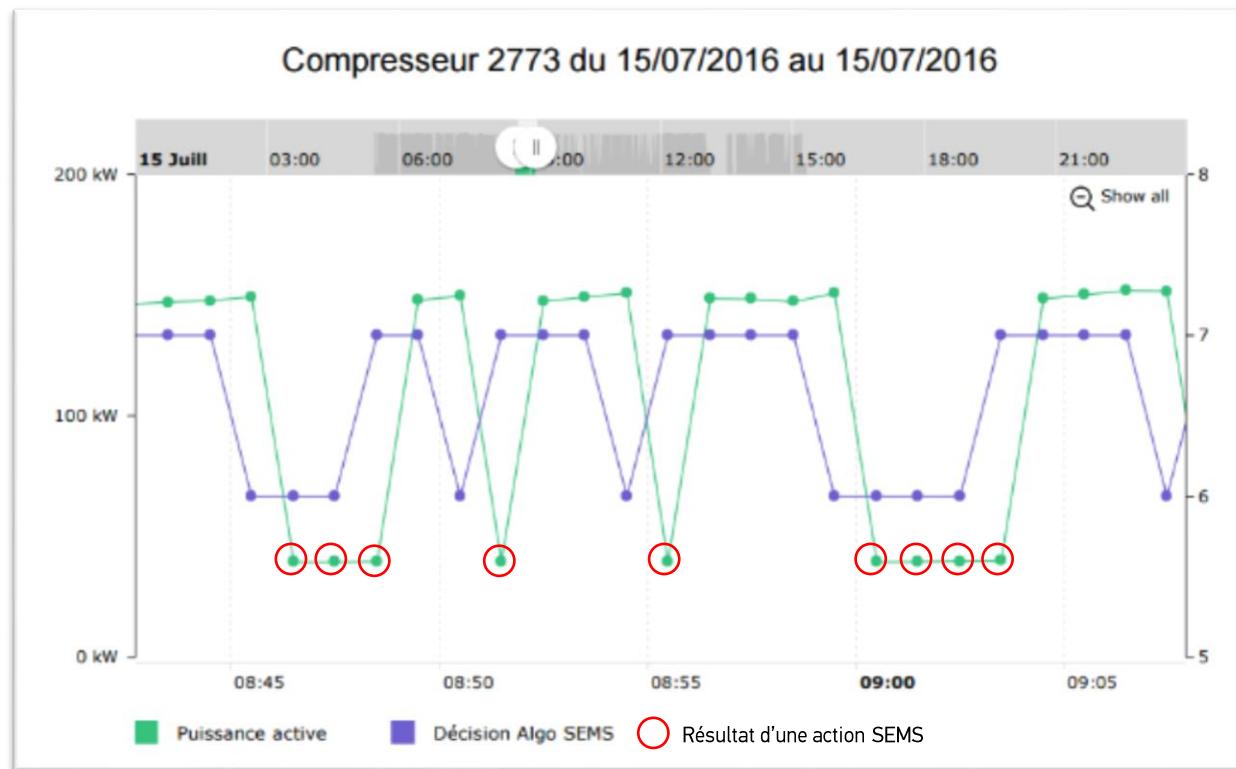


Figure 48 : Prise de décision et consommation du compresseur 2773.

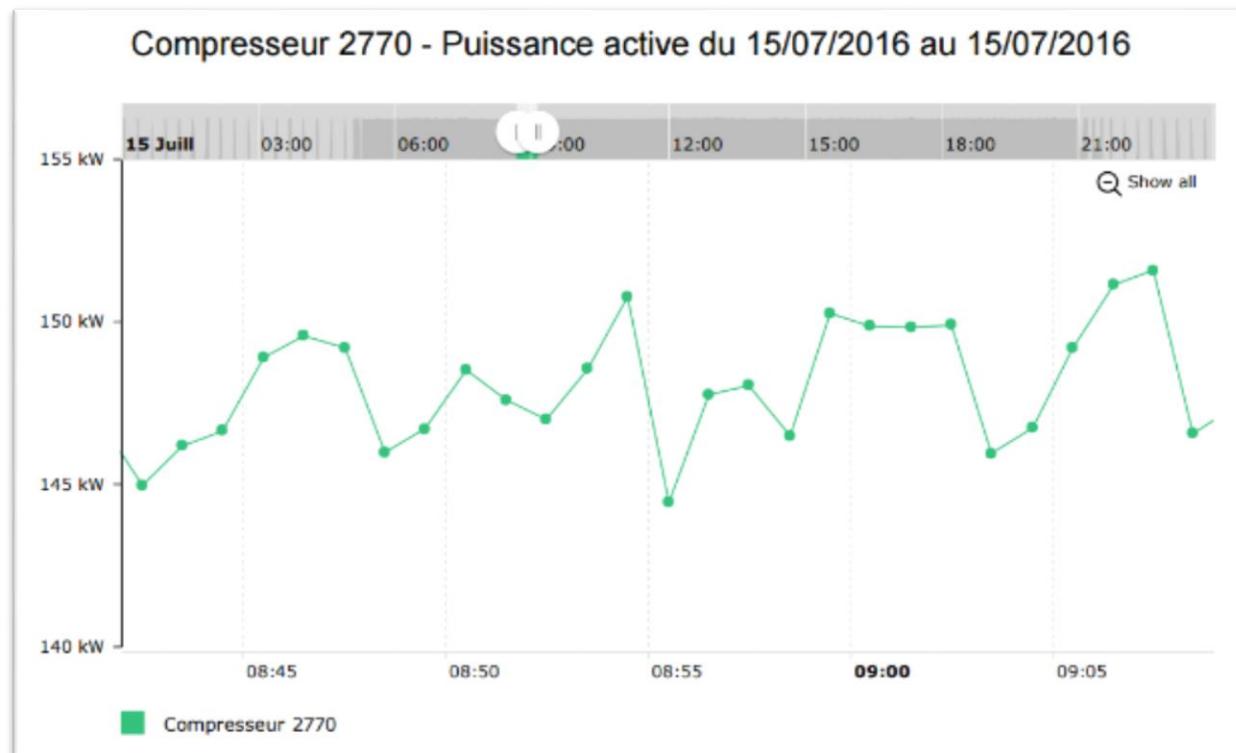


Figure 49 : Consommation du compresseur 2770.

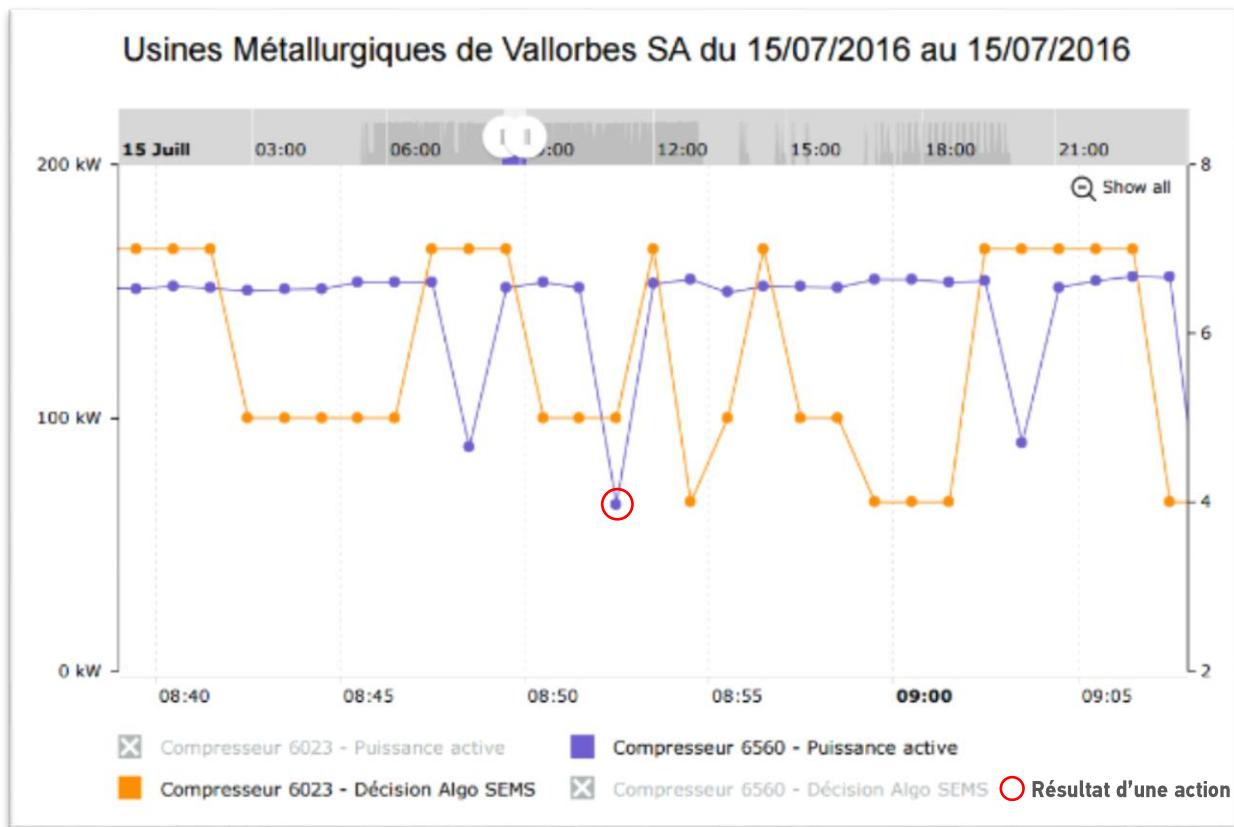


Figure 50 : Consommation du compresseur 6560.

Pendant le quart d'heure de 09h00, nous mesurons les gains suivants :

Compresseur	Temps de mise à vide [min]	Gains sur le quart horaire [kW]
350	4	30.13
2773	6	45.20
6023	7	52.73
2770	0	0.00
6560	1	7.53
Total		135.60

Tableau 44 : Gains de puissance mesuré lors du quart d'heure de 09h00 suite aux actions de délestages de SEMS.

En cas de contrôle complet sur les compresseurs, en appliquant des arrêts au lieu de mise à vide, nous pourrions encore augmenter les gains de puissance de 48kW.

Gain total du groupe compresseur sur le quart d'heure critique :

Actions SEMS	Gains sur le quart horaire [kW]
Reserve	0
Délestage	135.60
Total	135.60

Tableau 45 : Gains de puissance totaux pour le quart d'heure de 09h00.

Les appareils ci-dessous sont éteints lors du quart d'heure de 09h00 :

- Four à sel 23
- Bain de traitement cuve 4 KM1 et KM2
- Assécheur



11.2 Analyse de l'impact des actions SEMS du 14 juillet 2016

Impact des actions de SEMS sur le four tunnel passage

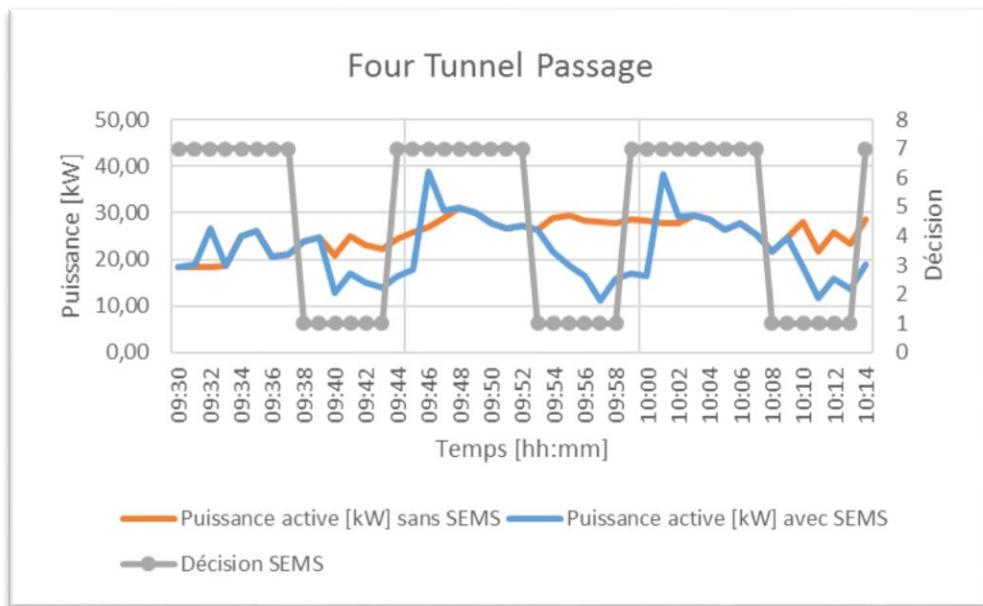


Figure 51 : Reconstitution de la consommation du four tunnel passage.

Quart d'heure [hh:mm]	Gain sur la puissance quart horaire [kW]
10:00	4.6

Tableau 46 : Gain de puissance pour le four tunnel passage.



Impact des actions de SEMS sur le four Solo Cloche

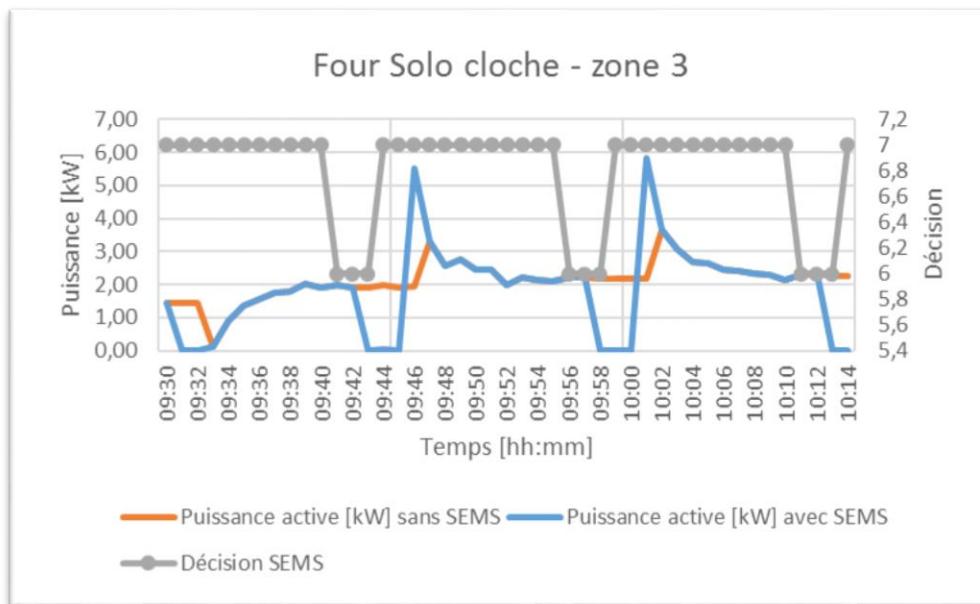


Figure 52 : Reconstitution de la consommation du four Solo cloche.

Quart d'heure [hh:mm]	Gain sur la puissance quart horaire [kW]
10:00	0.2

Tableau 47 : Gain de puissance pour le four Solo cloche.

Impact des actions de SEMS sur le four Solo passage

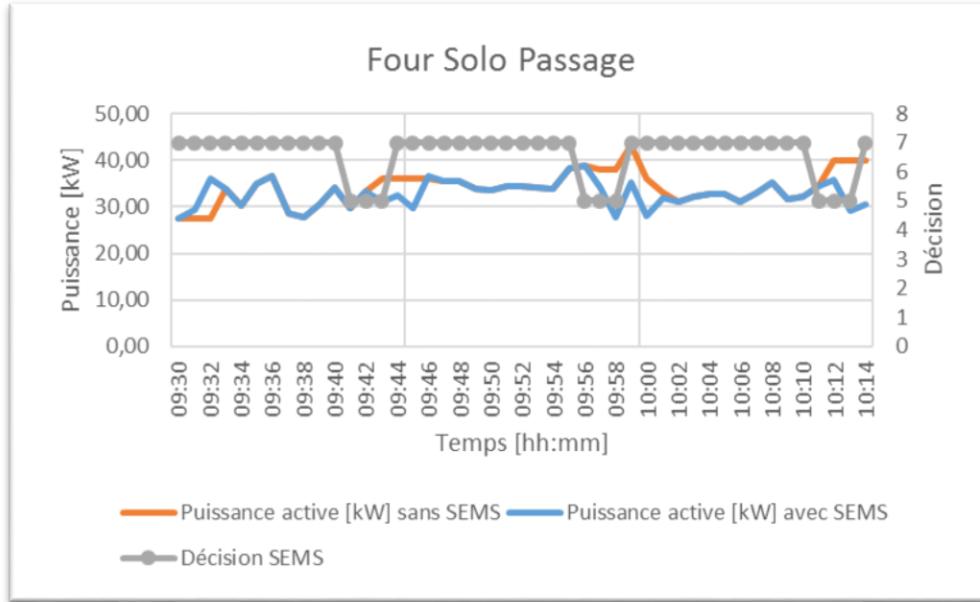


Figure 53 : Reconstitution de la consommation du four Solo passage.

Quart d'heure [hh:mm]	Gain sur la puissance quart horaire [kW]
10:00	1.99

Tableau 48 : Gain de puissance pour le four Solo passage.



Impact des actions de SEMS sur le groupe compresseur

Le choix des zones de pression par l'algorithme se fait via le Terminal SEMS contrôlant le compresseur 6023. Voici l'équivalent de ses décisions :

Valeur de décision	Zone de pression (DP)	Action directe sur le compresseur 6023
2	DP2 – Action de réserve	Mise à vide
3		Aucune
4	DP4 – Action de délestage	Mise à vide
5		Aucune
6	DP1 – Régime standard	Mise à vide
7		Aucune

Tableau 49 : Équivalent des décisions du Terminal 20 contrôlant le compresseur 6023.

Pour les compresseurs 350 et 2773, le Terminal correspondant actionne seulement la mise à vide.

Valeur de décision	Action sur le compresseur
6	Mise à vide
7	Aucune

Tableau 50 : Équivalent des décisions des terminaux contrôlant les compresseurs 350 et 2773.

Pour les autres compresseurs, aucune décision n'est prise.

Action de réserve

Aucune action de réserve n'a été prise, car le quart horaire précédent était trop élevé (2'054kW).

Actions de délestage

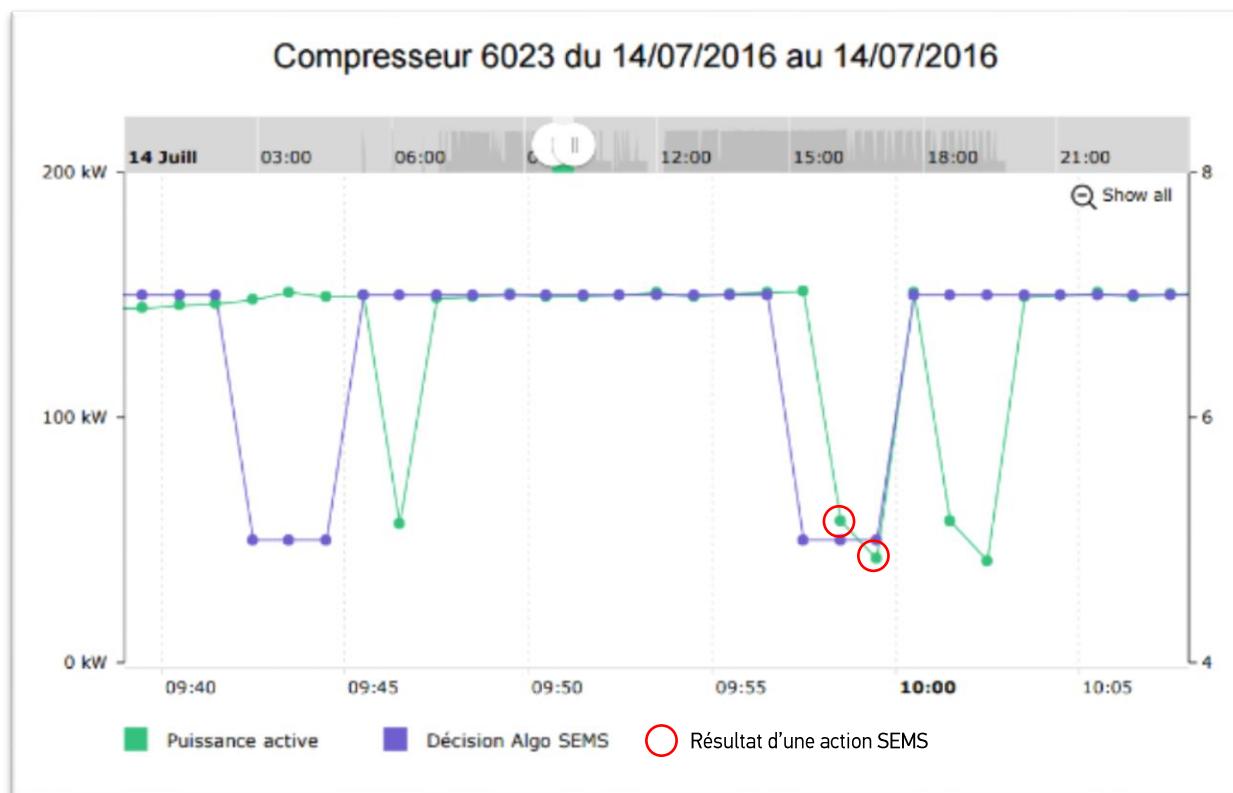


Figure 54 : Prise de décision et consommation du compresseur 6023.

Pression d'air dans la cuve du 14/07/2016 :

Figure 55 : Évolution de la pression d'air dans la cuve en fonction des zones de pression choisies.

Entre 09h45 et 10h00 l'algorithme a appliqué les décisions des zones de pression suivantes :

Heure de début	Heure de fin	Zone de pression
09h45	09h57	DP1
09h57	10h00	DP4

Tableau 51 : Zones de pression appliquées entre 09h45 et 10h00.

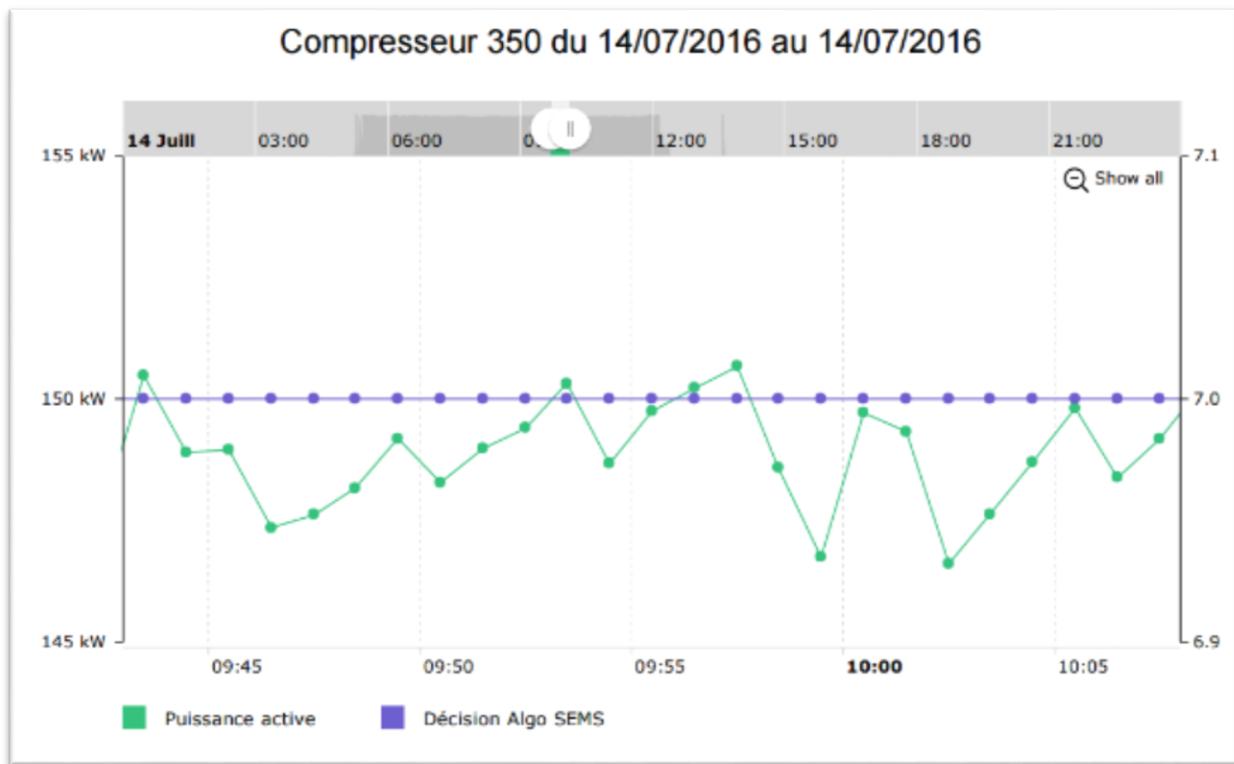


Figure 56 : Prise de décision et consommation du compresseur 350.

Pour le compresseur 350, la valeur 7 exprime la décision de l'algorithme du Terminal SEMS de ne prendre aucune action et de le laisser sous le contrôle de « l'AirLeader ».

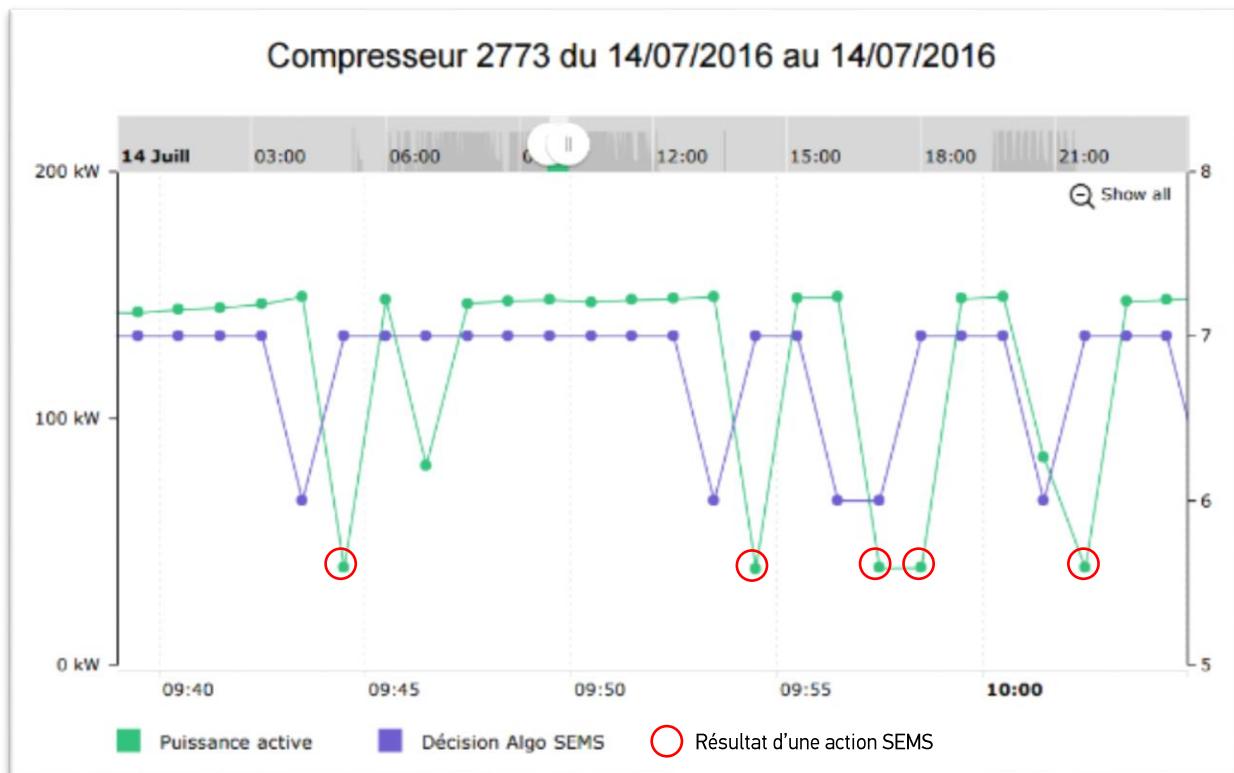


Figure 57 : Prise de décision et consommation du compresseur 2773.

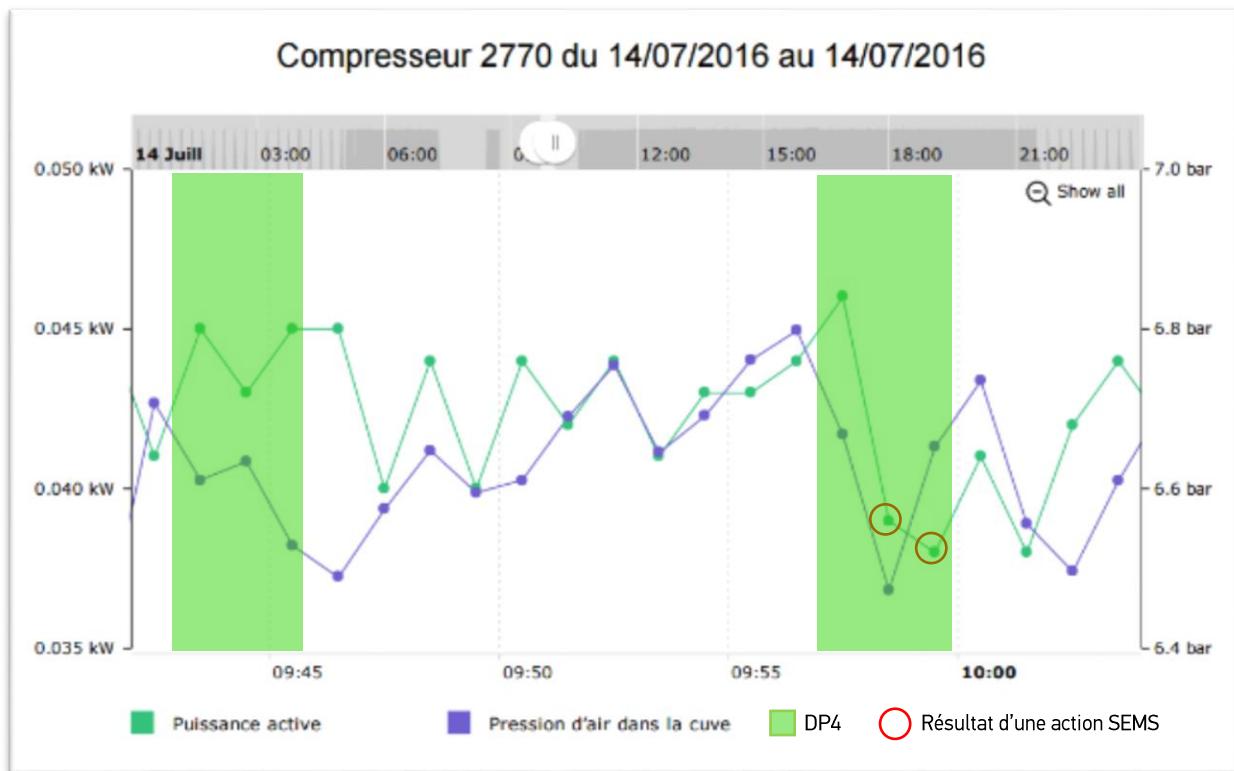


Figure 58 : Consommation du compresseur 2770.

Grâce au passage en DP4, SEMS a prévenu le démarrage du 5^{ème} compresseur en demandant un régime bas alors même que la pression était en dessous de 6.5 bar.

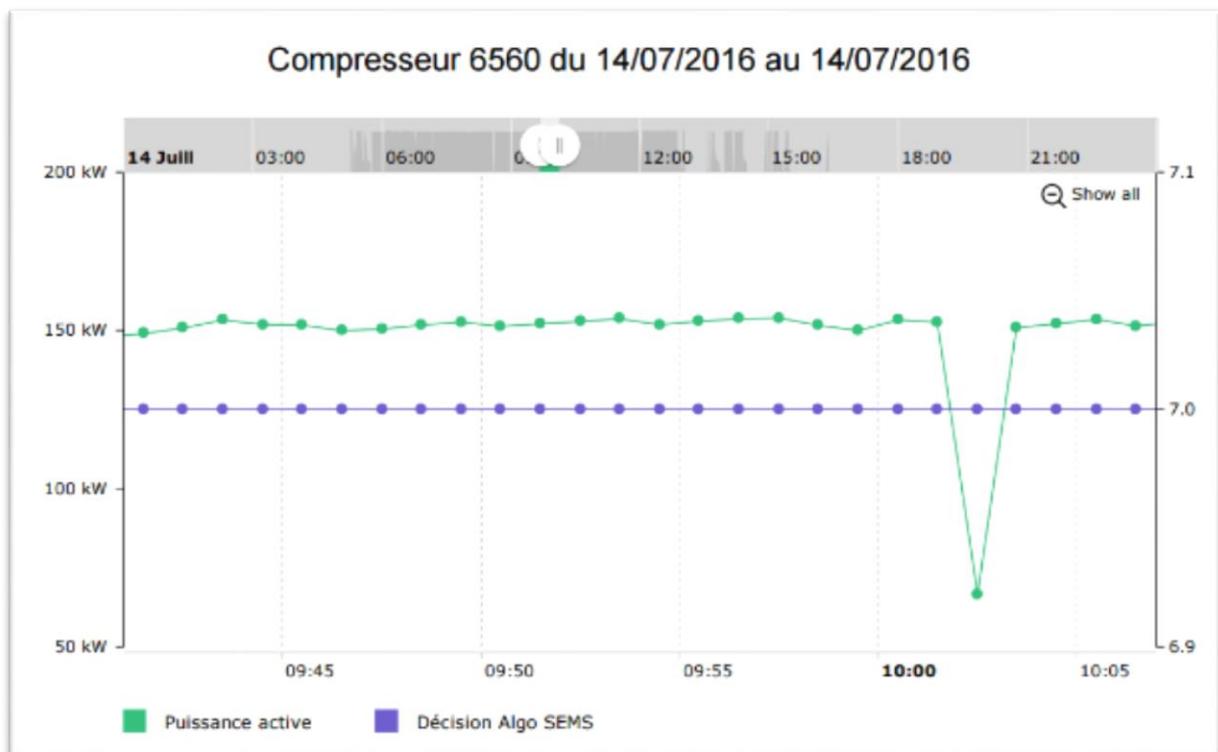


Figure 59 : Consommation du compresseur 6560.



Pendant le quart d'heure de 09h00, nous mesurons les gains suivants :

Compresseur	Temps de mise à vide [min]	Prévention de démarrage du compresseur [min]	Gains sur le ¼ horaire [kW]
350	0	0	0
2773	4	0	30.1
6023	2	0	15.1
2770	0	2	20.4
6560	0	0	0
Total			65.6

Tableau 52 : Gains de puissance mesurés lors du quart d'heure de 10h00 suite aux actions de délestages.

L'arrêt complet des compresseurs mis à vide nous permettrait encore d'améliorer ces performances en évitant les 40 kW de consommation. Nous pourrions encore gagner 6 minutes de mise à vide ce qui représente environ 29.33kW sur le quart d'heure.

Gain total sur le quart d'heure :

Actions SEMS	Gains sur le quart horaire [kW]
Reserve	0
Délestage	65.6
Total	65.6

Tableau 53 : Gains de puissance totaux pour le quart d'heure de 10h00.

11.3 Analyse de l'impact des actions SEMS du 14 juillet 2016

#	Désignation	Description	Quantité	Mode de paiement	Prix catalogue [CHF] HTVA
1	Planification et gestion de projet	Étude de projet, dossier de planification et gestion du projet	Par Terminal SEMS	Une fois	300.00
			Par point de mesure TECO	Une fois	200.00
2	Ingénierie Commande	Analyse des schémas, définition des commandes et leurs branchements entre les modules SEMS et les appareils à piloter par SEMS	Par Terminal SEMS	Une fois	200.00
3	Ingénierie : Analyse, configuration et paramétrage	Analyse des profils de charges, configuration et paramétrage	Par Terminal SEMS	Une fois	300.00
4	Option e-licence	Licence pour l'accès et l'utilisation du SEMS Live Dashboard depuis le serveur de Stignergy	Par Terminal SEMS	Annuelle	120.00
			Par point de mesure TECO	Annuelle	30.00
5	Option Server-licence	Installation de la plateforme SEMS Live Dashboard sur un serveur chez le client	Par Terminal SEMS	Une fois	500.00
			Par point de mesure TECO	Une fois	200.00

Tableau 54 : Structure des prix pour chaque étape de la mise en service du système SEMS.