



TPF, Etude Energie Phase 1  
SETP 2050

# Rapport étude énergie avec pistes d'analyse pour phase 2 Relevés MT Groupe E / Gruyère Energie

ECH-294.06\_01-101  
Version 1.0

Mandant:

TPF Transports Publics Fribourgeois  
Rue Louis-d'Affry 2  
Case postale 1536  
1701 Fribourg

Mandataire:

ENOTRAC AG  
Seefeldstrasse 8  
CH-3600 Thun  
Tel. +41 (0)33 346 66 11  
Fax +41 (0)33 346 66 12  
e-mail: [info@enotrak.com](mailto:info@enotrak.com)  
[www.enotrak.com](http://www.enotrak.com)

Validé

23/04/2015

ECH-294.06\_01-101.V1.0.Rapport\_Phase1\_Energie\_900V.docx

© ENOTRAC AG

### Version actuelle

Version	Date	Statut	Etabli	Vérfié	Validé
1.0	23/04/2015	Validé	N. Uchimoto	J. Comte	H. Voegeli

### Version précédente

Version	Date	Statut	Etabli	Vérfié	Validé



### Modifications par rapport à la version précédente

--

### Mentions légales

Ce document a été établi dans le cadre de l'exécution d'un mandat et est propriété d'ENOTRAC AG. Le commanditaire jouit du droit d'usage du document et de son contenu. Toute reproduction, communication à des tiers ou exploitation du contenu sont interdites sans autorisation écrite.  
© ENOTRAC AG

### Bookmarks

Titre du projet	ProjTitle1	TPF, Etude Energie Phase 1
	ProjTitle2	SETP 2050
Titre du document	DocTitle1	Rapport étude énergie
	DocTitle2	avec pistes d'analyse pour phase 2
	DocTitle3	Relevés MT Groupe E / Gruyère Energie
Référence du document	DocNumber	ECH-294.06_01-101
Mandant	ClientName	TPF Transports Publics Fribourgeois
	ClientAddr	Rue Louis-d'Affry 2 Case postale 1536 1701 Fribourg
Logos	EnoLogoHeader	
	ClientLogo1Header	
	ClientLogo2Header	
Contact	Contact	Numa Uchimoto, Tel. +41 (0)33 346 66 23
	Contact_Mail	numa.uchimoto@enotrak.com

## Table des matières:

<b>1</b>	<b>Cadre, Introduction, résumé</b>	<b>4</b>
1.1	Stratégie énergétique 2050 des transports publics – SETP 2050	4
1.2	Introduction	4
1.3	Résumé	5
<b>2</b>	<b>Principe d'évaluation</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>Consommation 2014</b>	<b>7</b>
3.1	Moyenne tension	7
3.2	Basse tension	7
3.2.1	Auxiliaires 400 V <sub>AC</sub>	7
3.2.2	Pertes à vide	9
3.2.3	Pertes en charge	10
3.2.4	Traction 900 V <sub>DC</sub>	10
3.2.5	Chauffage 900 V <sub>DC</sub>	11
3.3	Synthèse de la consommation	12
<b>4</b>	<b>Profil de puissance 2014</b>	<b>16</b>
4.1	Puissance maximale sur 15 minutes	16
4.2	Profil annuel de puissance	18
4.3	Profil mensuel de puissance	20
4.4	Profil hebdomadaire de puissance	21
4.5	Profil quotidien de puissance	22
<b>5</b>	<b>Relevés de base et calculs complémentaires</b>	<b>23</b>
5.1	Températures	23
5.2	Tonnes-kilomètres	24
5.3	Consommation spécifique	25
5.4	Corrélation consommation température	26
<b>6</b>	<b>Pistes d'analyse pour Phase 2</b>	<b>28</b>
<b>7</b>	<b>Annexes et références</b>	<b>29</b>
7.1	Annexes	29
7.2	Références	29

# 1 CADRE, INTRODUCTION, RÉSUMÉ

## 1.1 Stratégie énergétique 2050 des transports publics – SETP 2050

Avec la Stratégie énergétique 2050 [9], le Conseil fédéral présente comment le système énergétique doit être transformé par étapes à l'horizon 2050. Le Conseil fédéral a confié à l'Office fédéral des transports (OFT) la mission de réaliser un programme concernant le système des transports publics. A cet effet, l'OFT dispose à partir de 2014 d'un programme intitulé « Stratégie énergétique des transports publics (SETP 2050) ».

Les Transports publics fribourgeois (TPF) ont fait part de leur intérêt de réaliser - dans le cadre du programme SETP 2050 - une évaluation de la consommation électrique de leur réseau de traction à courant continu 900 V à voie métrique.

A la demande de l'OFT, l'évaluation est réalisée en 2 phases :

- Phase 1 :
  - exploitation des relevés d'énergie moyenne tension 2014
  - évaluation de l'exploitation réelle
  - définition des pistes pour la phase 2
- Phase 2 :
  - simulation de l'exploitation et des mesures envisagées
  - évaluation des mesures et du rapport coût-efficacité
  - recommandations

## 1.2 Introduction

Le réseau de traction à courant continu 900 V à voie métrique des TPF est alimenté par 9 sous-stations de traction [2]. A partir du réseau de distribution moyenne tension (MT) du Groupe E et de Gruyère Energie (sous-stations « Bulle » et « La Tour»), l'énergie est transformée en basse tension pour la traction ( $900 V_{DC}$ , courant continu) et les auxiliaires ( $400 V_{AC}$ , courant alternatif). Chaque sous-station traction est équipée d'un groupe redresseur (à diodes) et d'un groupe auxiliaire, à l'exception des sous-stations « La Tour » et « Broc-Village » qui disposent chacune d'une introduction séparée pour l'alimentation auxiliaire  $400 V_{AC}$ . La sous-station « Bulle » comprend deux groupes redresseurs séparés. Le couplage de la ligne de contact de Montbovon avec le réseau MOB est normalement déclenché, de ce fait aucun échange d'énergie n'a lieu entre les réseaux TPF et MOB.

La consommation d'énergie active au niveau moyenne tension est disponible par tranche de 15 minutes, pour chaque sous-station traction et chaque période de l'année 2014 et 2015. Durant l'année 2014 les TPF ont mis en place progressivement des compteurs sur tous les groupes auxiliaires (au niveau basse tension).

## 1.3 Résumé

L'évaluation de la consommation électrique du réseau de traction à courant continu 900 V à voie métrique des TPF repose sur les relevés par tranche de 15 minutes réalisés par les distributeurs d'énergie électrique moyenne tension Groupe E [3] et Gruyère Energie [4]. Les valeurs sont consolidées et évaluées par période mensuelle et annuelle (2014). Elles sont corrigées de la consommation des auxiliaires 400 V<sub>AC</sub> relevés séparément annuellement (2014) selon le principe d'évaluation (chapitre 2).

De fortes variations saisonnières existent au niveau de la consommation mensuelle d'énergie active au niveau moyenne tension (rapport 1.7 entre les mois de décembre et juillet). Ces variations saisonnières s'expliquent par le chauffage électrique : chauffages des aiguilles 400 V<sub>AC</sub> et chauffage des véhicules 900 V<sub>DC</sub> (chapitre 3). Le profil de puissance (chapitre 4) fournit un complément d'information sur le profil de consommation. Les relevés de base et calculs complémentaires sont résumés (chapitre 5). Les pistes d'analyse de réduction de consommation globale (chapitre 6) sont listées dans le Tableau 6-1.

La traction 900 V<sub>DC</sub> représente **65 %** du total de l'énergie active moyenne tension. La pertinence des mesures concernant la traction 900 V<sub>DC</sub> ne peut être évaluée qu'au moyen de simulations dynamiques (Phase 2).

En ce qui concerne les autres consommations, la situation (bilan annuel) est la suivante :

- Auxiliaires 400 V<sub>AC</sub> : les auxiliaires 400 V<sub>AC</sub> représentent **12 %** du total (32 % pour la sous-station « Bulle »). Les chauffages d'aiguille représentent environ 3 % du total (dont la moitié uniquement pour ceux en gare de Bulle). Une réduction drastique de la consommation des chauffages d'aiguille semble difficile à envisager en raison de l'altitude moyenne du réseau (supérieure à 700 m), une action ciblée sur le réglage permet d'envisager de réduire d'au plus 1 % la consommation globale. Une analyse complémentaire et plus détaillée des auxiliaires 400 V<sub>AC</sub> sous l'angle « technologie du bâtiment » permettrait d'identifier les potentiels d'économie pour la sous-station « Bulle », en particulier la saisonnalité de la charge.
- Pertes à vide : les pertes à vides sont de **4 %** du total. La réduction par un facteur 2 permet de réduire de 2 % la consommation globale. Cet objectif est facilement accessible par la spécification de transformateurs à faibles pertes pour les nouvelles sous-stations.
- Pertes en charge : les pertes en charge sont relativement faibles, **1 %** du total et représentent un faible potentiel de gain (nettement moins de 1 %). Aucune réduction significative n'est à attendre.
- Chauffage 900 V<sub>DC</sub> : le chauffage 900 V<sub>DC</sub> représente **18 %** du total (32 % pour la sous-station « Bulle »). Pour les mois d'hiver ces valeurs atteignent 34 % du total (environ 50 % pour la sous-station « Bulle »). L'importance du chauffage (et préchauffage) des trains pour la sous-station « Bulle » est confirmée par la tranche horaire à laquelle est atteinte la puissance maximum sur 15 minutes, soit principalement entre 04h30 et 06h00 pendant les mois d'hiver, c'est-à-dire avant l'heure de pointe de circulation des trains. Des actions coordonnées avec la traction 900 V<sub>DC</sub> présentent le plus gros potentiel de réduction de consommation, y compris pour les trains en attente.

Sur la base des résultats cités précédemment, la pertinence et la priorité des actions peut être définie en regard de la liste du Tableau 6-1.

## 2 PRINCIPE D'ÉVALUATION

L'évaluation de la répartition des consommations repose sur une évaluation mensuelle. Les relevés d'**énergie active MT** (au niveau moyenne tension) mis à disposition par le Groupe E et Gruyère Energie sont corrigés de la consommation des **auxiliaires 400 V<sub>AC</sub>** et permettent de définir l'**énergie de traction brute**. Pour la sous-station « Bulle », où la part de consommation des auxiliaires 400 V<sub>AC</sub> est significative, un relevé mensuel a été réalisé entre janvier et mars 2015 afin d'estimer plus précisément la répartition annuelle (différente de 1/12 par mois).

L'**énergie de traction nette** est obtenue par soustraction des **pertes (à vide et en charge)** de l'énergie traction brute.

La consommation de **traction 900 V<sub>DC</sub>** est considérée comme proportionnelle au total des tonnes-kilomètre<sup>1</sup> (t x km) réalisées, la consommation de chauffage 900 V<sub>DC</sub> est considérée comme nulle au mois de juin<sup>2</sup>.

La consommation du **chauffage 900 V<sub>DC</sub>** est obtenue par soustraction de la traction 900 V<sub>DC</sub> de l'énergie traction nette.

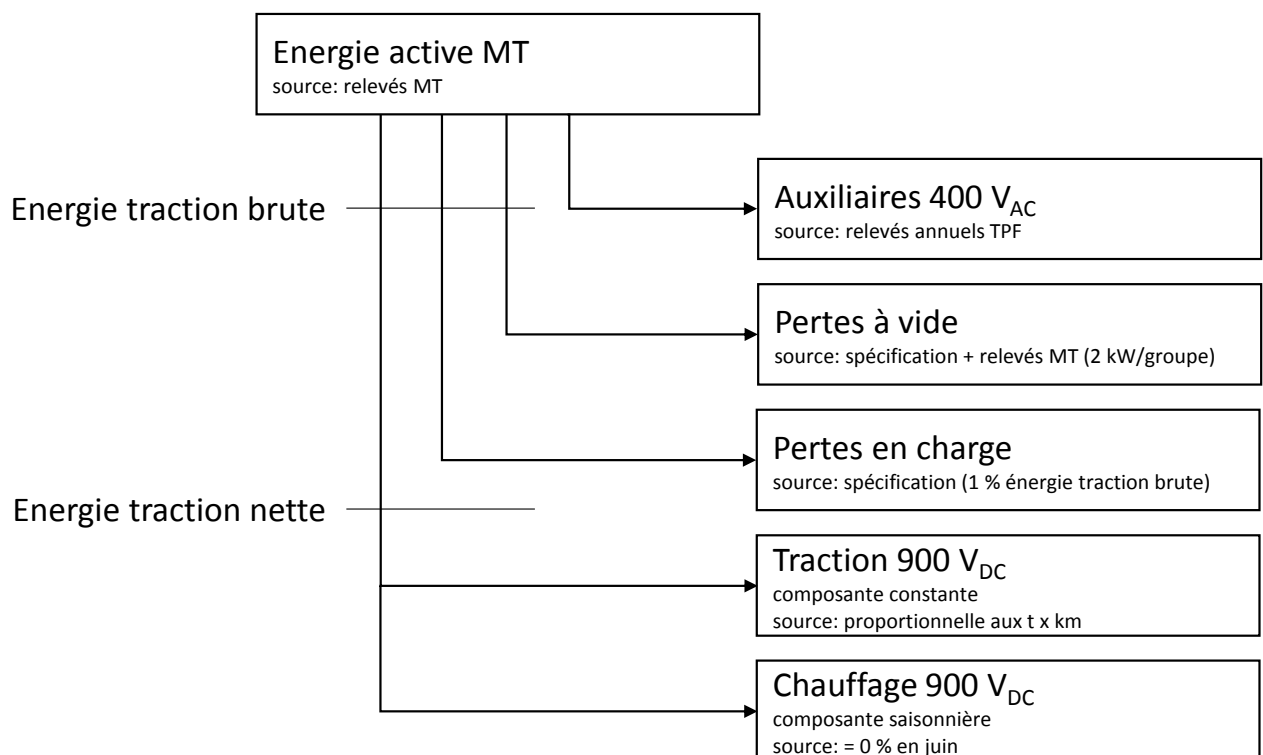


Figure 2-1 : Contributions à la consommation d'énergie

<sup>1</sup> Ce principe introduit un léger biais en raison d'une consommation spécifique différente entre les différents types de trafic (voyageur et fret) sur les différentes lignes, ainsi que de la réceptivité variable de la ligne en fonction de la saison (chauffage en hiver). Toutefois il s'agit d'une bonne estimation initiale.

<sup>2</sup> Juin est le mois avec la plus faible consommation d'énergie de traction nette par tonne-kilomètre et avec la température moyenne la plus élevée. Les véhicules à voie métrique TPF actuels ne disposent pas de climatisation. Certaines voitures MOB (trains spéciaux, circulant occasionnellement sur le réseau TPF) disposent toutefois d'une climatisation. Leur contribution n'est toutefois pas prépondérante dans le bilan annuel.

### 3 CONSOMMATION 2014

#### 3.1 Moyenne tension

Le Tableau 3-1 présente les consommations d'énergie active au niveau moyenne tension pour chaque sous-station et chaque mois de l'année 2014. Les valeurs totales sont aussi consolidées par mois et par sous-station. En particulier la consommation maximale sur un site est de 179'683 kWh pour le mois de décembre et de 1'322'649 kWh pour l'année complète pour la sous-station « Bulle ». La consommation totale maximale du réseau atteint 464'585 kWh pour le mois de décembre et 4'201'396 kWh pour l'année complète.

Sous-station	Janvier [kWh]	Février [kWh]	Mars [kWh]	Avril [kWh]	Mai [kWh]	Juin [kWh]	Juillet [kWh]	Août [kWh]	Septembre [kWh]	Octobre [kWh]	Novembre [kWh]	Décembre [kWh]	Total annuel [kWh]
Bossonnens	49'774	43'412	44'941	39'803	42'202	38'072	30'389	34'554	41'846	47'081	45'322	49'502	506'897
Châtel	47'322	42'781	40'256	34'089	36'536	31'473	25'666	29'046	34'811	34'545	41'060	48'342	445'925
Semsaes	35'222	31'331	33'136	29'785	29'748	27'200	27'519	26'037	29'674	29'901	31'447	37'602	368'601
Vaulruz	34'677	32'925	32'721	28'862	29'199	27'199	28'037	24'760	29'218	29'588	30'429	33'903	361'517
Bulle	156'836	171'462	131'295	88'271	87'239	64'746	71'417	70'820	81'782	92'685	126'415	179'683	1'322'649
La Tour	41'166	38'054	34'516	28'556	35'025	31'347	32'954	32'478	38'059	33'950	37'363	43'483	426'950
Estavannens	30'294	26'492	28'398	24'105	22'923	23'082	23'019	23'646	17'647	27'080	29'195	29'994	305'874
Albeuve	29'789	26'757	27'087	26'677	31'703	27'401	29'539	29'551	29'521	25'728	28'581	31'533	343'867
Broc-Village	11'206	9'932	9'515	8'633	9'765	9'149	9'298	8'882	10'952	10'678	10'564	10'543	119'117
<b>TOTAL</b>	<b>436'284</b>	<b>423'146</b>	<b>381'865</b>	<b>308'780</b>	<b>324'339</b>	<b>279'668</b>	<b>277'836</b>	<b>279'773</b>	<b>313'510</b>	<b>331'235</b>	<b>380'375</b>	<b>464'585</b>	<b>4'201'396</b>

Tableau 3-1 : consommation mensuelle (2014) énergie moyenne tension

#### 3.2 Basse tension

L'énergie consommée se répartit en plusieurs catégories :

- 3.2.1 Auxiliaires 400 V<sub>AC</sub>
- 3.2.2 Pertes à vide
- 3.2.3 Pertes en charge
- 3.2.4 Traction 900 V<sub>DC</sub>
- 3.2.5 Chauffage 900 V<sub>DC</sub>

##### 3.2.1 Auxiliaires 400 V<sub>AC</sub>

Les auxiliaires 400 V<sub>AC</sub> incluent tous les consommateurs raccordés au transformateur auxiliaire des sous-stations tractions du réseau à voie métrique 900 V<sub>DC</sub> des TPF. Il s'agit de :

- équipements auxiliaires (contrôle-commande) pour chaque sous-station traction
- chauffages d'aiguilles (« Bossonnens », « Châtel », « Semsales », « Vaulruz », « Bulle »)
- autres charges (« Bulle »), voir document [1]

Les sous-stations « La Tour » et « Broc-Village » disposent chacune d'une introduction séparée pour l'alimentation auxiliaire 400 V<sub>AC</sub>. D'autres chauffages d'aiguilles sont alimentés directement par une introduction séparée dans les stations et croisements sans sous-station traction à proximité.

### 3.2.1.1 Relevés 2014

Le Tableau 3-2 présente la consommation d'énergie active au niveau basse tension pour chaque sous-station et chaque mois de l'année 2014. Il est établi sur la base des relevés annuels 2014 (colonne de droite). La répartition entre mois est effectuée proportionnellement au nombre de jours de chaque mois. Pour la sous-station « Bulle » - qui présente la consommation la plus importante - des relevés mensuels ont été réalisés début 2015 (point 3.2.1.2) et ont été extrapolés pour le reste de l'année.

Sous-station	Janvier [kWh]	Février [kWh]	Mars [kWh]	Avril [kWh]	Mai [kWh]	Juin [kWh]	Juillet [kWh]	Août [kWh]	Septembre [kWh]	Octobre [kWh]	Novembre [kWh]	Décembre [kWh]	Total annuel [kWh]
Bossonnens	1'891	1'708	1'891	1'830	1'891	1'830	1'891	1'891	1'830	1'891	1'830	1'891	22'267
Châtel	1'707	1'542	1'707	1'652	1'707	1'652	1'707	1'707	1'652	1'707	1'652	1'707	20'104
Semsales	1'006	909	1'006	974	1'006	974	1'006	1'006	974	1'006	974	1'006	11'845
Vaulruz	1'366	1'234	1'366	1'322	1'366	1'322	1'366	1'366	1'322	1'366	1'322	1'366	16'087
Bulle	39'278	51'444	26'325	25'000	25'000	25'000	25'000	25'000	27'322	45'000	50'000	55'000	419'369
La Tour	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Estavannens	272	246	272	264	272	264	272	272	264	272	264	272	3'208
Albeuve	384	347	384	371	384	371	384	384	371	384	371	384	4'517
Broc-Village	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	45'905	57'430	32'952	31'413	31'627	31'413	31'627	31'627	33'735	51'627	56'413	61'627	497'397

Tableau 3-2 : consommation mensuelle (2014) énergie auxiliaire 400 V<sub>AC</sub>

### 3.2.1.2 Relevés 2015

Afin d'identifier les variations saisonnières des consommateurs de sous-station « Bulle », des relevés mensuels ont été réalisés par TPF début 2015. Les plus gros consommateurs 400 V sont le « TBT Groupe 2 » et le « Tableau voie Ouest » qui présentent aussi une forte variation entre les différents mois (chauffages de locaux et d'aiguilles selon [1]).

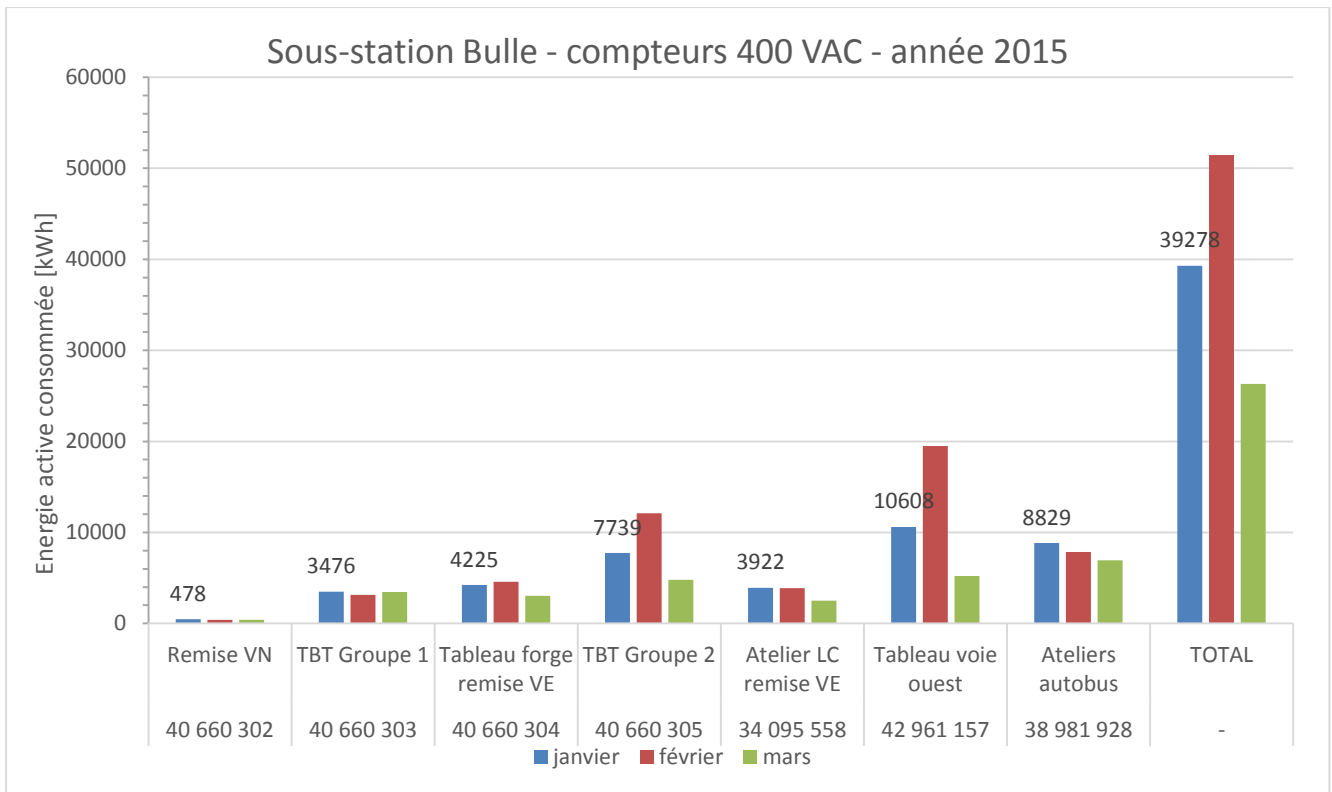


Figure 3-1 : Consommation d'énergie active des auxiliaires 400 V de la sous-station « Bulle » (2015) pour les différents sous-compteurs (avec valeurs de janvier)

### 3.2.2 Pertes à vide

Les pertes à vide incluent toutes les pertes à vide des sous-stations, principalement celles des transformateurs de traction. Sur la base des spécifications des sous-stations TPF [8] et des relevés des consommations de puissance active [3] et [4], les pertes à vide sont estimées à 2 kW par groupe redresseur. Le Tableau 3-3 résume la situation. La sous-station « Bulle » dispose de 2 groupes redresseurs.

Sous-station	Janvier [kWh]	Février [kWh]	Mars [kWh]	Avril [kWh]	Mai [kWh]	Juin [kWh]	Juillet [kWh]	Août [kWh]	Septembre [kWh]	Octobre [kWh]	Novembre [kWh]	Décembre [kWh]	Total annuel [kWh]
Bossonnens	1'488	1'344	1'488	1'440	1'488	1'440	1'488	1'488	1'440	1'488	1'440	1'488	17'520
Châtel	1'488	1'344	1'488	1'440	1'488	1'440	1'488	1'488	1'440	1'488	1'440	1'488	17'520
Semsales	1'488	1'344	1'488	1'440	1'488	1'440	1'488	1'488	1'440	1'488	1'440	1'488	17'520
Vaulruz	1'488	1'344	1'488	1'440	1'488	1'440	1'488	1'488	1'440	1'488	1'440	1'488	17'520
Bulle	2'976	2'688	2'976	2'880	2'976	2'880	2'976	2'976	2'880	2'976	2'880	2'976	35'040
La Tour	1'488	1'344	1'488	1'440	1'488	1'440	1'488	1'488	1'440	1'488	1'440	1'488	17'520
Estavannens	1'488	1'344	1'488	1'440	1'488	1'440	1'488	1'488	1'440	1'488	1'440	1'488	17'520
Albeuve	1'488	1'344	1'488	1'440	1'488	1'440	1'488	1'488	1'440	1'488	1'440	1'488	17'520
Broc-Village	1'488	1'344	1'488	1'440	1'488	1'440	1'488	1'488	1'440	1'488	1'440	1'488	17'520
TOTAL	14'880	13'440	14'880	14'400	14'880	14'400	14'880	14'880	14'400	14'880	14'400	14'880	175'200

Tableau 3-3 : pertes à vide mensuelles (2014)

### 3.2.3 Pertes en charge

Les pertes en charge incluent les pertes en charge des sous-stations, principalement celles des transformateurs de traction et des redresseurs. Sur la base des spécifications des sous-stations TPF [8], les pertes en charge des groupes redresseurs sont estimées à 1 % de l'énergie de traction brute. Le Tableau 3-4 résume la situation.

Sous-station	Janvier [kWh]	Février [kWh]	Mars [kWh]	Avril [kWh]	Mai [kWh]	Juin [kWh]	Juillet [kWh]	Août [kWh]	Septembre [kWh]	Octobre [kWh]	Novembre [kWh]	Décembre [kWh]	Total annuel [kWh]
Bossonnens	479	417	430	380	403	362	285	327	400	452	435	476	4'846
Châtel	456	412	385	324	348	298	240	273	332	328	394	466	4'258
Semsales	342	304	321	288	287	262	265	250	287	289	305	366	3'568
Vaulruz	333	317	314	275	278	259	267	234	279	282	291	325	3'454
Bulle	1'176	1'200	956	583	572	347	414	408	518	577	874	1'407	9'033
La Tour	412	381	345	286	350	313	330	325	381	340	374	435	4'270
Estavannens	300	262	281	238	227	228	227	234	174	268	289	297	3'027
Albeuve	294	264	267	263	313	270	292	292	291	253	282	311	3'393
Broc-Village	112	99	95	86	98	91	93	89	110	107	106	105	1'191
TOTAL	3'904	3'657	3'396	2'724	2'877	2'433	2'412	2'431	2'771	2'896	3'350	4'190	37'040

Tableau 3-4 : pertes en charge mensuelles (2014)

### 3.2.4 Traction 900 V<sub>DC</sub>

La traction 900 V<sub>DC</sub> inclut tous les consommateurs raccordés au redresseur des sous-stations tractions du réseau à voie métrique 900 V<sub>DC</sub> des TPF, à l'exception des chauffages des véhicules (3.2.5). Il s'agit de :

- Pertes de transport (ligne de contact, câbles et rails)
- Pertes de conversion des véhicules
- Energie utile à l'avancement des véhicules
- Energie dissipée par les rhéostats de freinage
- Energie dissipée par le freinage mécanique
- Energie des auxiliaires de traction

Les contributions individuelles ne sont pas identifiables séparément. La somme de la traction 900 V<sub>DC</sub> et du chauffage 900 V<sub>DC</sub> est égale à l'énergie de traction nette. La répartition mensuelle (point 3.3, Tableau 3-8) entre ces deux consommations est estimée sur la base des tonnes-kilomètres et de l'absence de chauffage au mois de juin.

#### 3.2.4.1 Tonnes-kilomètres (t x km) réseau entier

Les lignes suivantes sont exploitées sur le réseau à voie métrique :

- B-B : Bulle - Broc
- B-M : Bulle - Montbovon
- B-P : Bulle - Palézieux
- TOT : total réseau à voie métrique

Trafic ligne	Janvier [t x km]	Février [t x km]	Mars [t x km]	Avril [t x km]	Mai [t x km]	Juin [t x km]	Juillet [t x km]	Août [t x km]	Septembre [t x km]	Octobre [t x km]	Novembre [t x km]	Décembre [t x km]	Total annuel [t x km]
B-B	332'845	300'827	330'181	314'268	363'661	353'437	371'807	345'582	383'449	363'164	343'607	342'742	4'145'570
B-M	1'155'650	1'060'392	1'150'730	1'094'932	1'255'282	1'235'355	1'252'744	1'265'182	1'231'411	1'162'240	1'208'390	1'206'024	14'278'332
B-P	2'788'800	2'482'949	2'770'018	2'577'887	2'767'321	2'680'695	2'360'211	2'398'923	2'768'208	2'823'946	2'696'424	2'661'827	31'777'210
TOT	4'277'296	3'844'168	4'250'930	3'987'087	4'386'265	4'269'487	3'984'762	4'009'687	4'383'068	4'349'349	4'248'420	4'210'594	50'201'113

Tableau 3-5 : tonnes-kilomètres mensuelles (2014) du réseau entier à voie métrique TPF

### 3.2.4.2 Tonnes-kilomètres (t x km) sous-station « Bulle »

Dans le but d'estimer la part de trafic dont l'alimentation provient principalement de la sous-station « Bulle », la longueur totale de chaque ligne et la distance médiane à la sous-station sont rappelées :

Ligne	Longueur totale de la ligne considérée [km]	Longueur alimentée principalement par la sous-station de Bulle [km]
B-B	5.5	0.4
B-M	17.2	0.4
B-P	26.1	2.6

Tableau 3-6 : longueur totale et médiane à la sous-station « Bulle »

Sur la base des deux tableaux précédents, le trafic alimenté principalement par la sous-station « Bulle » est présenté dans le Tableau 3-7:

Trafic ligne	Janvier [t x km]	Février [t x km]	Mars [t x km]	Avril [t x km]	Mai [t x km]	Juin [t x km]	Juillet [t x km]	Août [t x km]	Septembre [t x km]	Octobre [t x km]	Novembre [t x km]	Décembre [t x km]	Total annuel [t x km]
B-B	24'207	21'878	24'013	22'856	26'448	25'705	27'040	25'133	27'887	26'412	24'990	24'927	301'496
B-M	26'876	24'660	26'761	25'464	29'193	28'729	29'134	29'423	28'637	27'029	28'102	28'047	332'054
B-P	277'812	247'344	275'941	256'801	275'672	267'042	235'117	238'973	275'760	281'313	268'609	265'163	3'165'546
TOT	328'894	293'882	326'715	305'120	331'313	321'476	291'291	293'529	332'285	334'753	321'701	318'137	3'799'096

Tableau 3-7 : tonnes-kilomètres mensuelles (2014) du réseau à voie métrique TPF alimenté par la sous-station « Bulle »

### 3.2.5 Chauffage 900 V<sub>DC</sub>

Le chauffage 900 V<sub>DC</sub> inclut tous les consommateurs raccordés aux véhicules et dont la consommation varie selon les mois. Il s'agit de :

- Chauffages des véhicules
- Climatisation des voitures MOB

Les contributions individuelles ne sont pas identifiables séparément. La somme de la traction 900 V<sub>DC</sub> et du chauffage 900 V<sub>DC</sub> est égale à l'énergie de traction nette. La répartition mensuelle (Tableau 3-8) entre ces deux consommations est estimée sur la base des tonnes-kilomètres (Tableau 3-5) et l'absence de chauffage au mois de juin (Figure 5-1).

### 3.3 Synthèse de la consommation

La consommation d'énergie électrique s'établit comme suit pour le réseau 900 V<sub>DC</sub> entier :

Contribution	Janvier [kWh]	Février [kWh]	Mars [kWh]	Avril [kWh]	Mai [kWh]	Juin [kWh]	Juillet [kWh]	Août [kWh]	Septembre [kWh]	Octobre [kWh]	Novembre [kWh]	Décembre [kWh]	Total annuel [kWh]
Auxiliaires 400 VAC	45'905	57'430	32'952	31'413	31'627	31'413	31'627	31'627	33'735	51'627	56'413	61'627	497'397
Pertes à vide	14'880	13'440	14'880	14'400	14'880	14'400	14'880	14'880	14'400	14'880	14'400	14'880	175'200
Pertes en charge	3'904	3'657	3'489	2'774	2'927	2'483	2'462	2'481	2'798	2'796	3'240	4'030	37'040
Traction 900 VDC	231'795	208'323	230'366	216'068	237'700	231'372	215'942	217'293	237'527	235'700	230'230	228'180	2'720'496
Chauffage 900 VDC	139'801	140'296	100'177	44'125	37'205	0	12'925	13'492	25'050	26'232	76'092	155'868	771'263
Traction nette	371'595	348'619	330'543	260'193	274'905	231'372	228'867	230'785	262'577	261'931	306'322	384'049	3'491'759
Traction brute	390'379	365'716	348'913	277'367	292'712	248'254	246'209	248'146	279'775	279'608	323'962	402'958	3'703'999
Energie active MT	436'284	423'146	381'865	308'780	324'339	279'668	277'836	279'773	313'510	331'235	380'375	464'585	4'201'396

Tableau 3-8 : synthèse de la consommation énergie électrique réseau 900 V entier

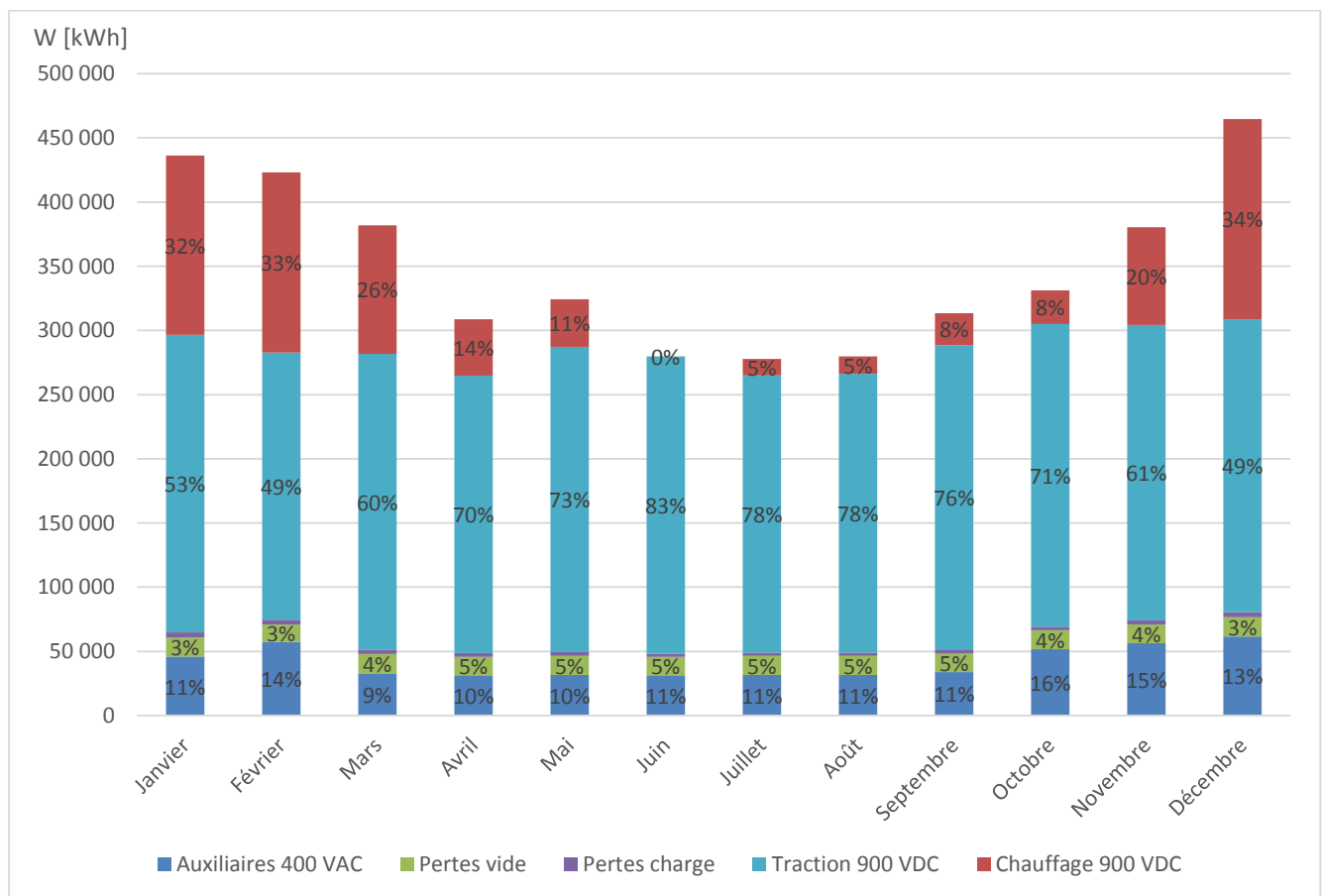


Figure 3-2 : Consommation énergie électrique réseau 900 V entier [kWh] avec répartition [%]

Les auxiliaires 400 V<sub>AC</sub> contribuent mensuellement entre 9 % et 16 % à la consommation d'énergie active MT. La contribution de la sous-station « Bulle » est déterminante dans la consommation totale des auxiliaires (84 %). Les pertes à vide s'élèvent entre 3 % et 5 %. Les pertes en charge sont d'environ 1 %. La traction 900 V<sub>DC</sub> évolue entre 49 % (décembre et février) et 83 % (juin). En valeur absolue la traction 900 V<sub>DC</sub> reste relativement constante et toujours proportionnelle aux tonnes-kilomètres réalisés (selon le modèle retenu). Le chauffage évolue entre 0 % (juin) et 34 % (décembre). En décembre, la proportion entre le chauffage 900 V<sub>DC</sub> et l'énergie traction nette atteint 41 % (59 % pour la traction 900 V<sub>DC</sub>).

La Figure 3-3 présente la consommation mensuelle d'énergie de traction brute (énergie active moyenne tension avec déduction des auxiliaires 400 V<sub>AC</sub>). Sans la composante saisonnière (chauffage), le profil de consommation des sous-stations devrait rejoindre la ligne de contrôle en traitillé (nombre de jours).

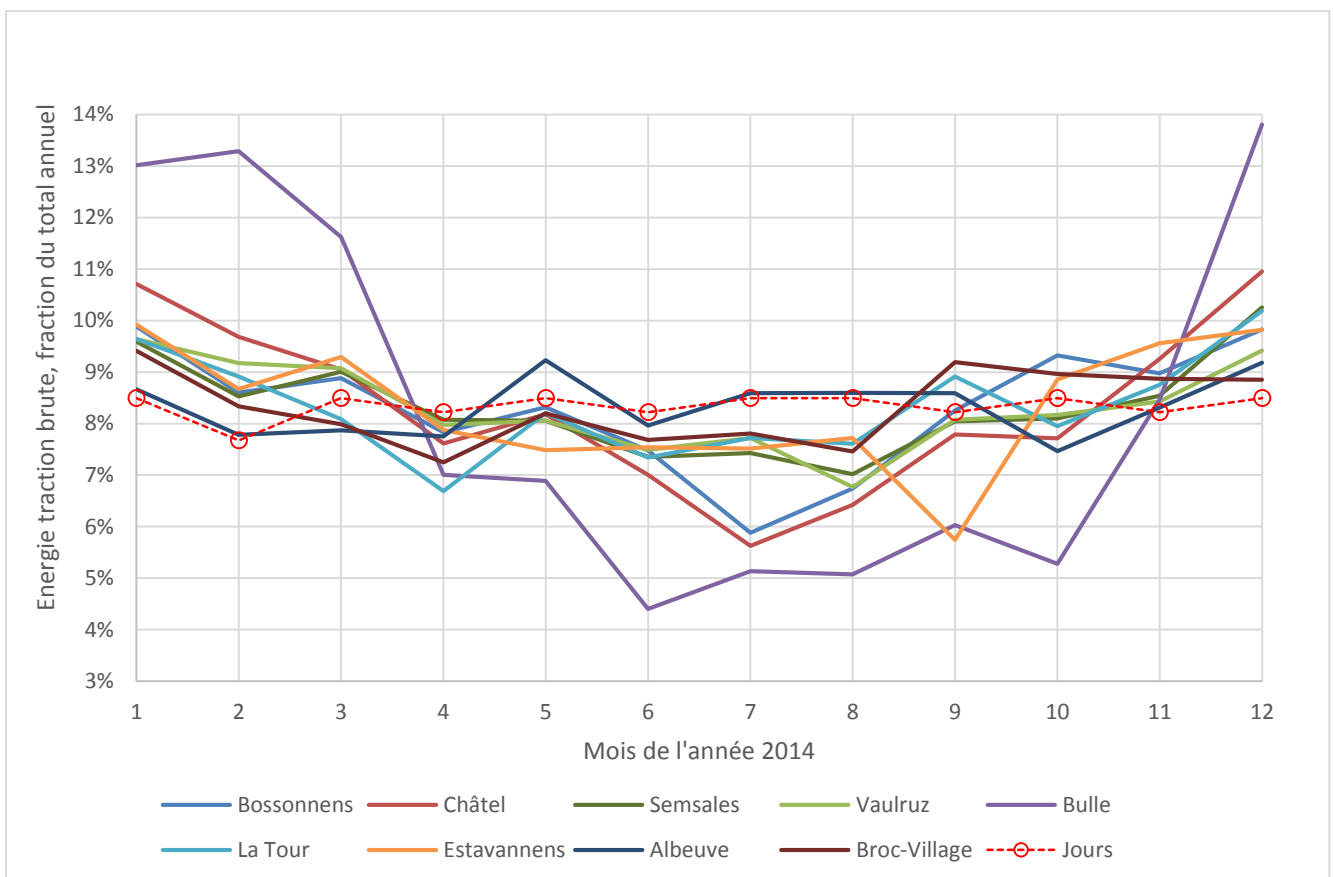


Figure 3-3 : Energie traction brute sur réseau 900 V entier avec répartition par mois [%] pour toutes les sous-stations

La consommation d'énergie électrique s'établit comme suit pour le réseau 900 V<sub>DC</sub> sous-station « Bulle » :

Contribution	Janvier [kWh]	Février [kWh]	Mars [kWh]	Avril [kWh]	Mai [kWh]	Juin [kWh]	Juillet [kWh]	Août [kWh]	Septembre [kWh]	Octobre [kWh]	Novembre [kWh]	Décembre [kWh]	Total annuel [kWh]
Auxiliaires 400 VAC	39'278	51'444	26'325	25'000	25'000	25'000	25'000	25'000	27'322	45'000	50'000	55'000	419'369
Pertes à vide	2'976	2'688	2'976	2'880	2'976	2'880	2'976	2'976	2'880	2'976	2'880	2'976	35'040
Pertes en charge	1'176	1'200	1'050	633	622	397	464	458	545	477	764	1'247	9'033
Traction 900 VDC	37'310	33'338	37'062	34'613	37'584	36'468	33'044	33'298	37'694	37'974	36'494	36'089	430'968
Chauffage 900 VDC	76'097	82'792	63'882	25'145	21'057	0	9'933	9'087	13'341	6'257	36'277	84'371	428'239
Traction nette	113'406	116'129	100'945	59'758	58'641	36'468	42'977	42'385	51'035	44'232	72'771	120'460	859'208
Traction brute	117'558	120'018	104'970	63'271	62'239	39'746	46'417	45'820	54'460	47'685	76'415	124'683	903'280
Energie active MT	156'836	171'462	131'295	88'271	87'239	64'746	71'417	70'820	81'782	92'685	126'415	179'683	1'322'649

Tableau 3-9 : Synthèse de la consommation énergie électrique réseau 900 V sous-station « Bulle »

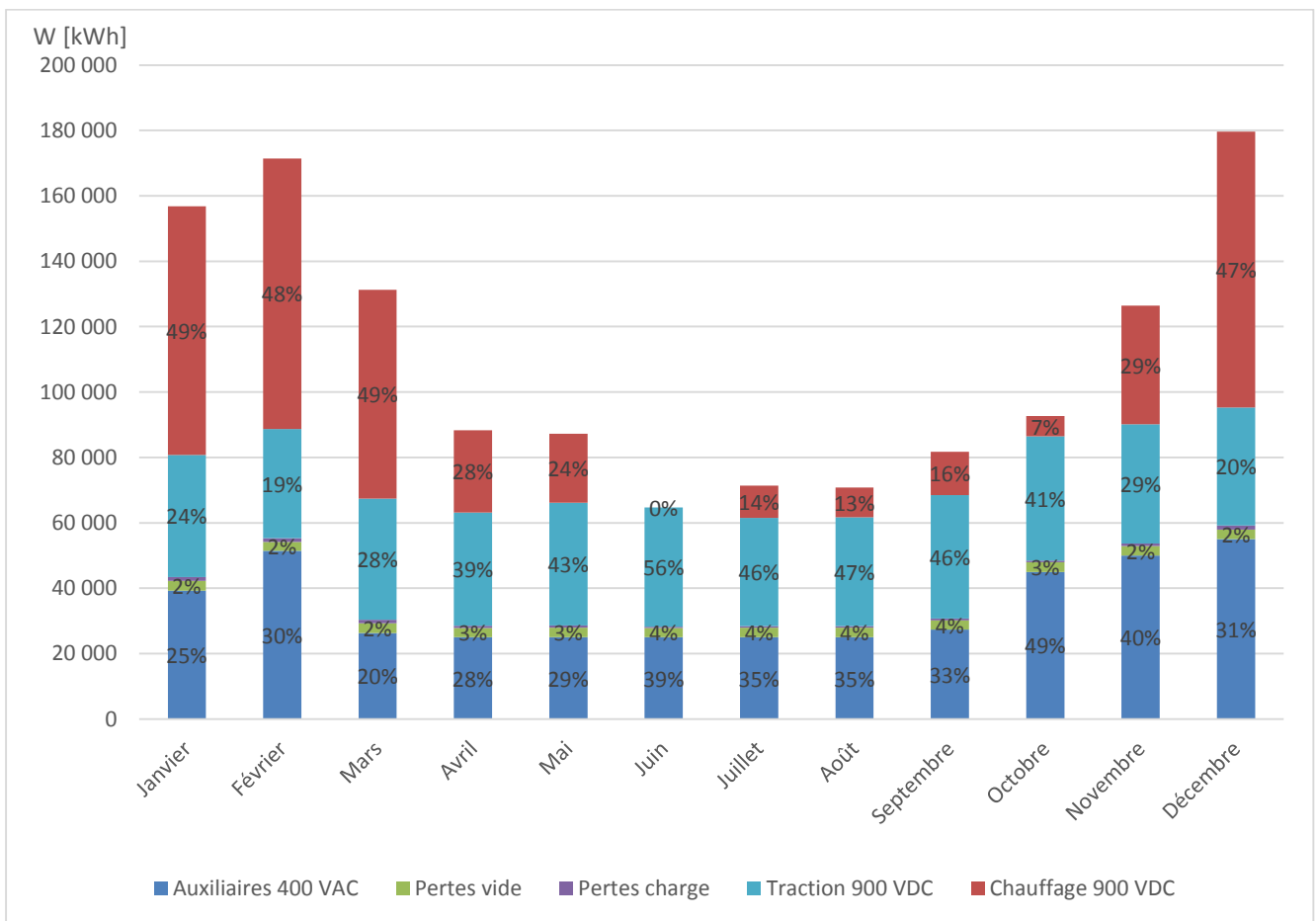


Figure 3-4. Consommation énergie électrique réseau 900 V sous-station « Bulle » [kWh] avec répartition [%]

La Figure 3-5 présente la répartition de la consommation d'énergie active moyenne tension pour le réseau 900 V<sub>DC</sub> en entier et pour la sous-station « Bulle ».

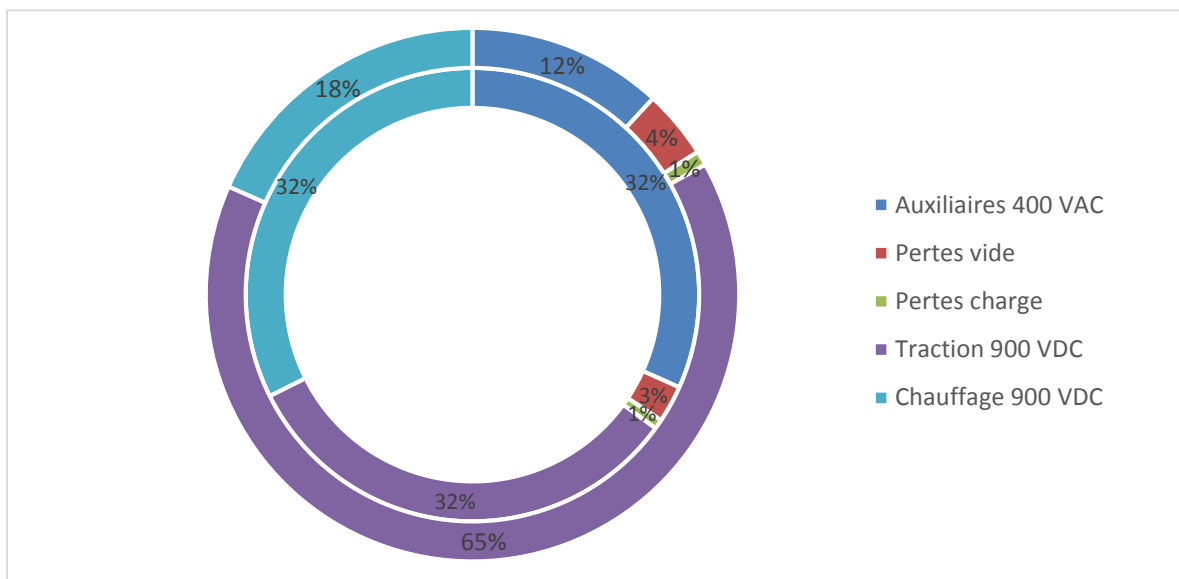


Figure 3-5. Répartition [%] consommation annuelle énergie électrique réseau 900 V entier (arc extérieur) et sous-station « Bulle » (arc intérieur)

## 4 PROFIL DE PUISSANCE 2014

### 4.1 Puissance maximale sur 15 minutes

Le Tableau 4-1 présente les valeurs maximales de puissance sur 15 minutes au niveau moyenne tension. Ces valeurs se basent sur les relevés automatiques du Groupe E [3] [4] et de Gruyère Energie.

Sous-station	Janvier [kW]	Février [kW]	Mars [kW]	Avril [kW]	Mai [kW]	Juin [kW]	Juillet [kW]	Août [kW]	Septembre [kW]	Octobre [kW]	Novembre [kW]	Décembre [kW]
Albeuve	175	259	154	161	294	249	241	285	296	198	251	239
Bossonnens	299	323	283	255	239	225	204	210	247	387	259	264
Broc	189	238	183	193	158	145	143	204	180	196	224	163
Châtel-St-Denis	239	207	196	203	174	157	140	158	224	181	229	283
Estavannens	245	226	181	169	208	169	178	162	198	222	220	197
Semsaes	229	214	248	176	247	177	166	157	178	172	193	265
Vaulruz	224	231	216	199	190	161	177	161	239	185	208	226
Bulle	558	534	534	422	441	266	303	300	398	420	468	585
La Tour	280	273	239	259	300	245	239	238	289	264	253	250

Tableau 4-1 : Puissance maximale mensuelle sur 15 minutes des différentes sous-stations 2014

La Figure 4-1 présente l'heure à laquelle la puissance maximale sur 15 minutes a été requise pour chaque sous-station et chaque mois de l'année 2014. La taille de la pastille indique la puissance correspondante.

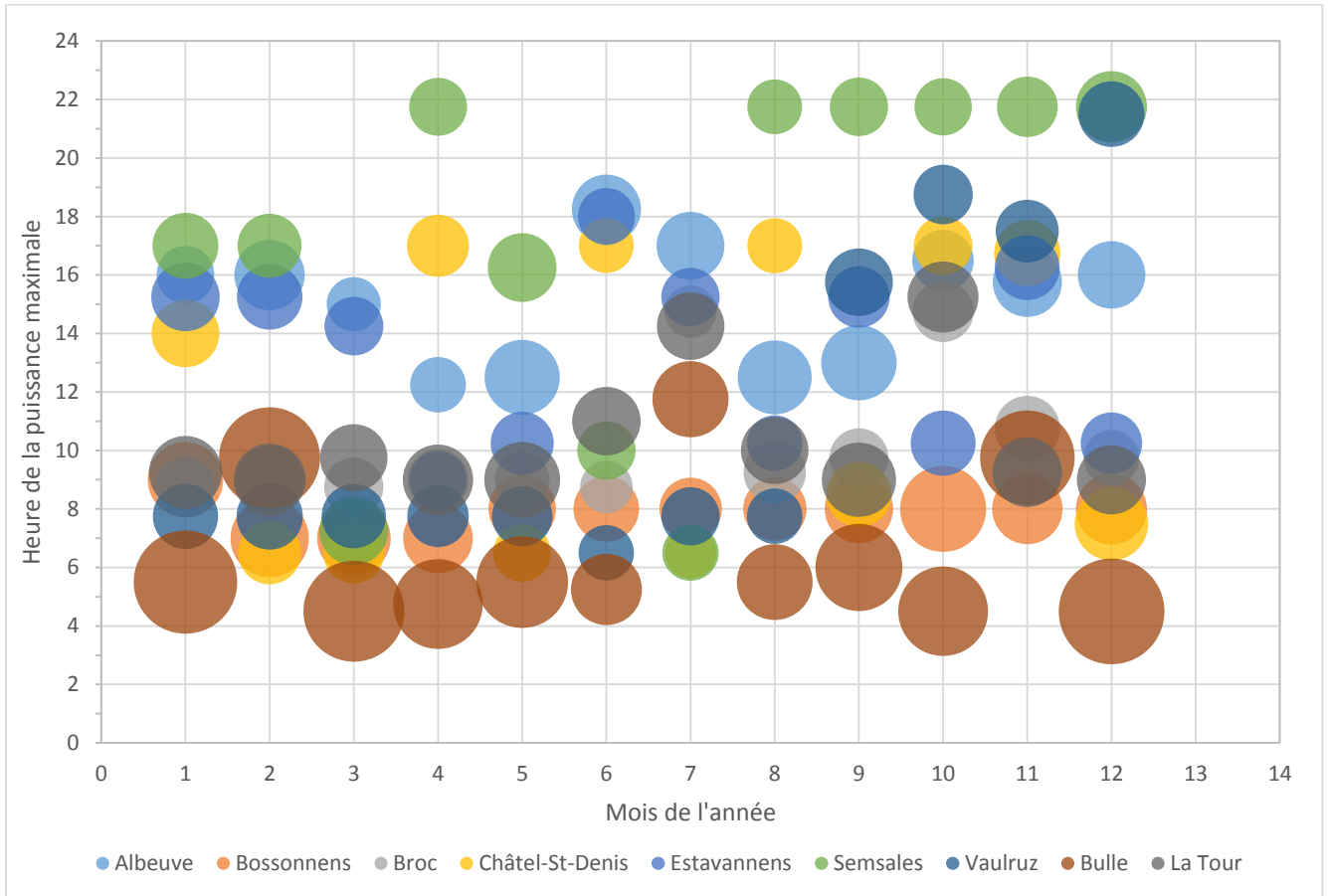


Figure 4-1 : Heure et intensité relative de la puissance maximale sur 15 minutes des différentes sous-stations en fonction du mois de l'année 2014

Les points marquants sont :

- Sous-station « Bulle » (brun) : maximum entre 04h30 et 06h00 → mise en condition des véhicules
- Sous-station « Semsales » (vert) : maximum à 21h45 → croisement de trains
- Autres sous-stations : maximum pendant les heures de trafic maximum → 06h00 à 18h00

## 4.2 Profil annuel de puissance

Les cycles hebdomadaires et saisonniers sont perceptibles sur la charge des sous-stations.

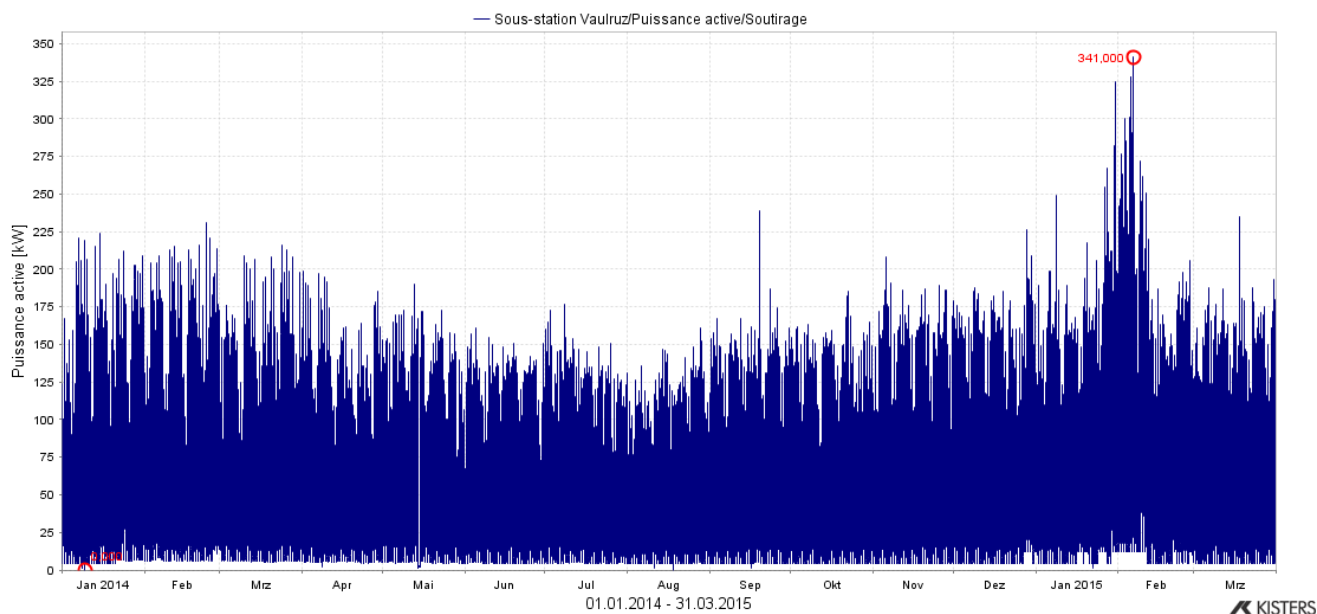


Figure 4-2 : Relevé de puissance active moyenne tension, profil de puissance annuel par tranche de 15 minutes de la sous-station « Vaulruz » [3], 1<sup>er</sup> janvier 2014 au 31 mars 2015

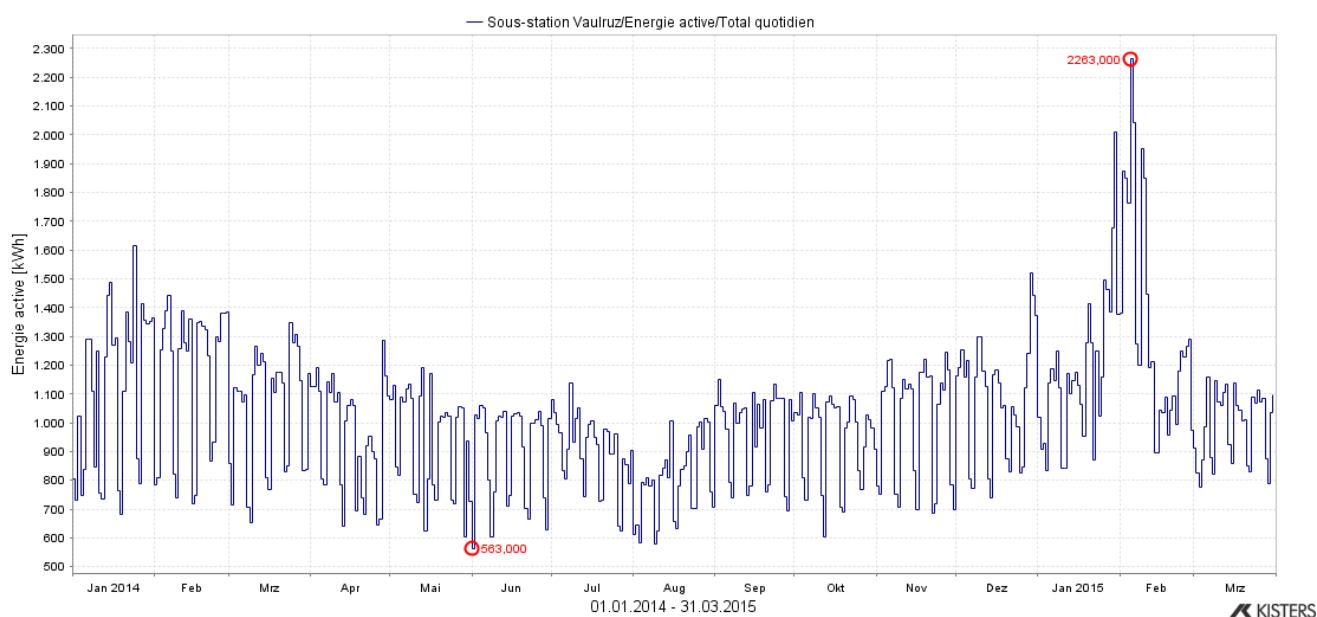


Figure 4-3 : Relevé d'énergie active moyenne tension, profil de consommation annuel par tranche de 24 heures de la sous-station « Vaulruz » [3], 1<sup>er</sup> janvier 2014 au 31 mars 2015

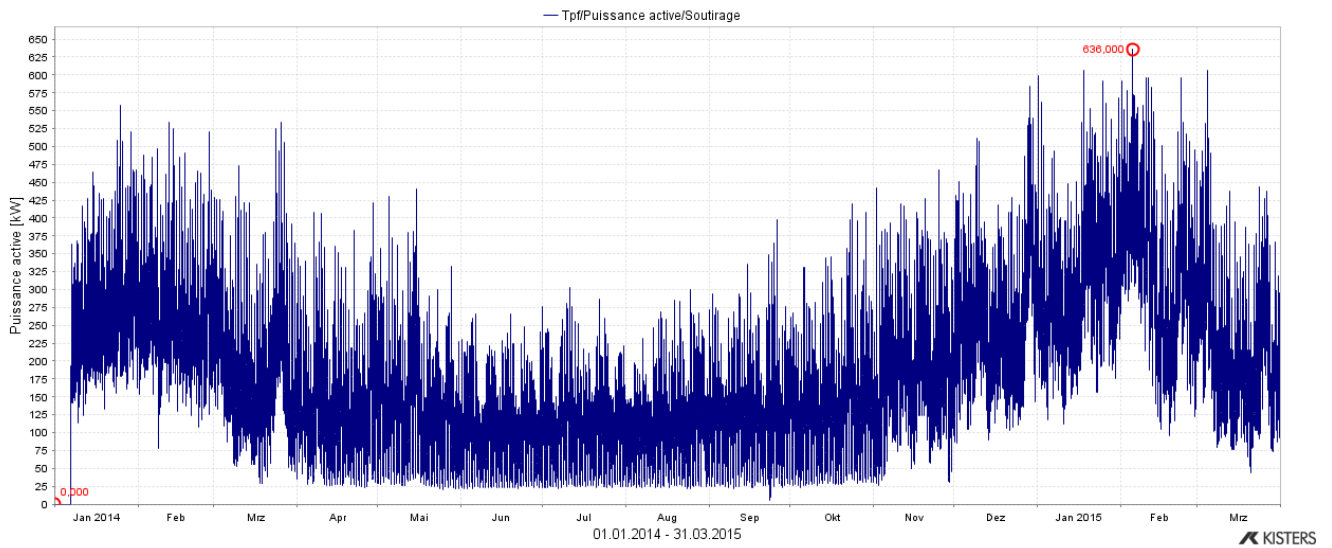


Figure 4-4 : Relevé de puissance active moyenne tension, profil de puissance annuel par tranche de 15 minutes de la sous-station « Bulle » [4], 1<sup>er</sup> janvier 2014 au 31 mars 2015

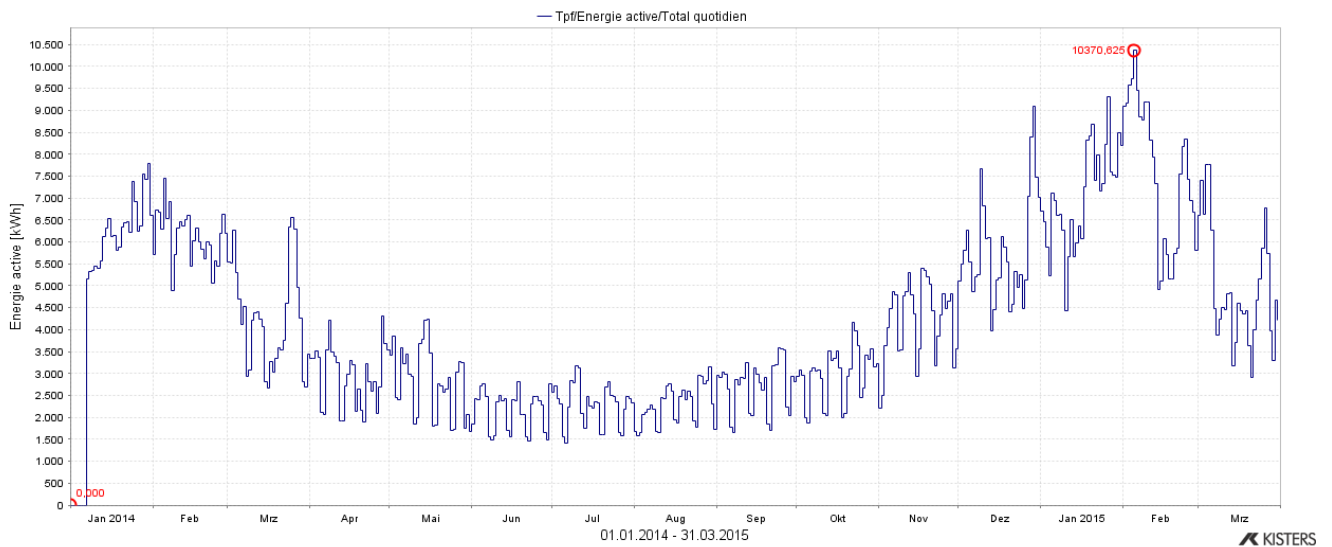


Figure 4-5 : Relevé d'énergie active moyenne tension, profil de consommation annuel par tranche de 24 heures de la sous-station « Bulle » [4], 1<sup>er</sup> janvier 2014 au 31 mars 2015

### 4.3 Profil mensuel de puissance

Le cycle quotidien avec la variation des besoins de chauffage (10 et 28-30 décembre) est perceptible sur la charge des sous-stations. La charge de nuit de la sous-station « Vaulruz » est d'environ 4 kW en temps normal et d'environ 12 kW les nuits de gel (chauffages d'aiguille). La charge de nuit de la sous-station « Bulle » varie entre 100 kW et 300 kW en décembre (25 kW d'avril à octobre).

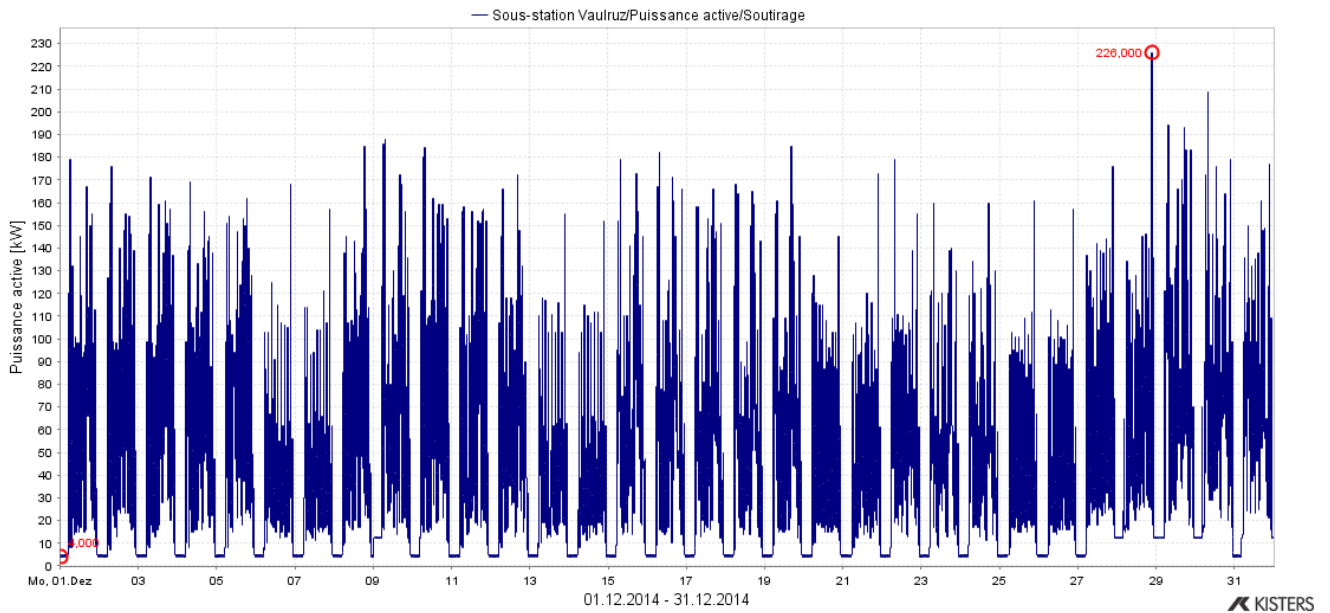


Figure 4-6 : Relevé de puissance active moyenne tension, profil de puissance annuel par tranche de 15 minutes de la sous-station « Vaulruz » [3], 1<sup>er</sup> au 31 décembre 2014

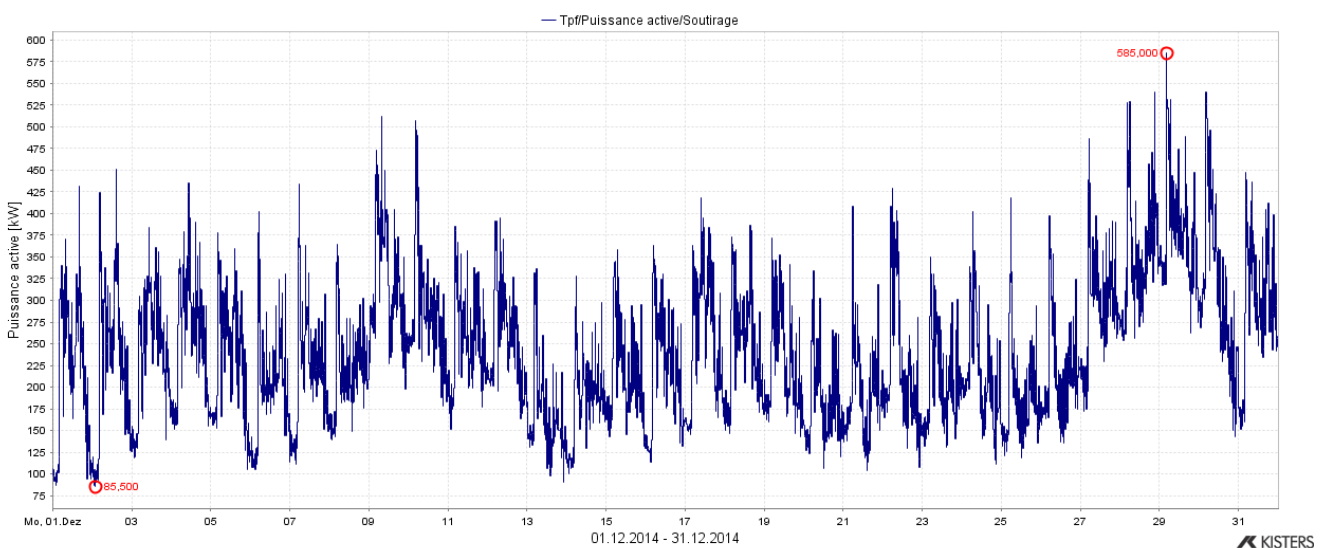


Figure 4-7 : Relevé de puissance active moyenne tension, profil de puissance annuel par tranche de 15 minutes de la sous-station « Bulle » [4], 1<sup>er</sup> au 31 décembre 2014

## 4.4 Profil hebdomadaire de puissance

Le cycle hebdomadaire lundi-vendredi et samedi-dimanche est perceptible sur la charge des sous-stations, en particulier celle de « Vaulruz ».

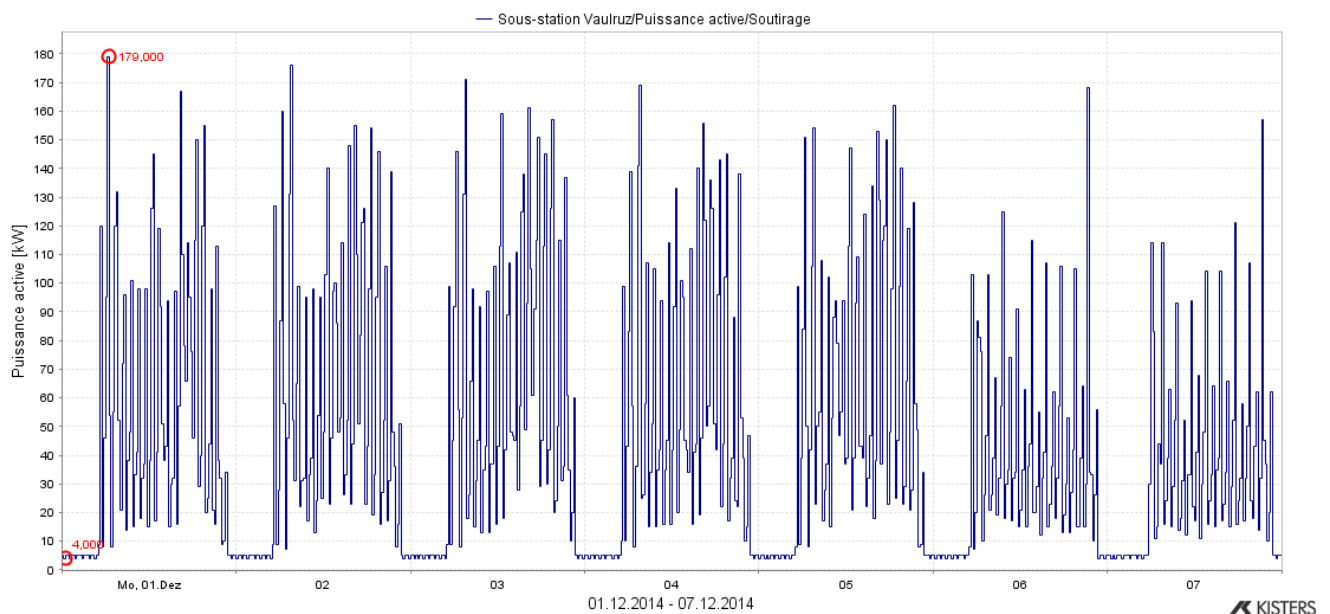


Figure 4-8 : Relevé de puissance active moyenne tension, profil de puissance annuel par tranche de 15 minutes de la sous-station « Vaulruz » [3], 1<sup>er</sup> au 7 décembre 2014 (lundi au dimanche)

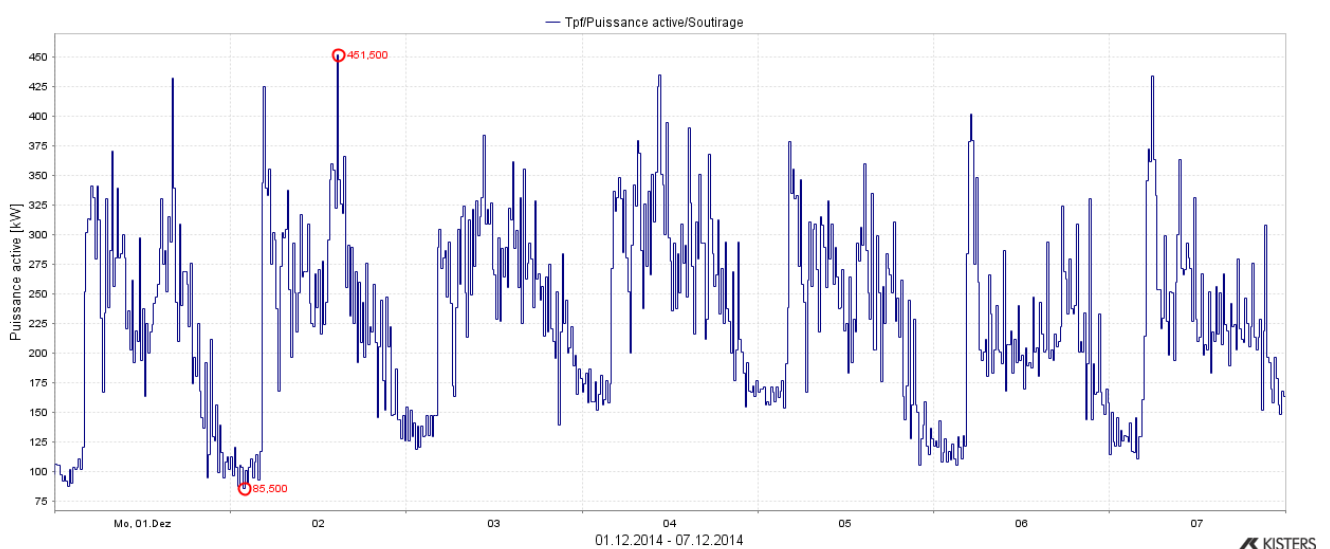


Figure 4-9 : Relevé de puissance active moyenne tension, profil de puissance annuel par tranche de 15 minutes de la sous-station « Bulle » [4], 1<sup>er</sup> au 7 décembre 2014 (lundi au dimanche)

## 4.5 Profil quotidien de puissance

Le cycle quotidien nuit et jour ainsi que la circulation horaire est perceptible sur la charge des sous-stations. Pour la sous-station « Bulle » la période de jour commence dès 4 heures, soit avant la circulation des trains à l'horaire.

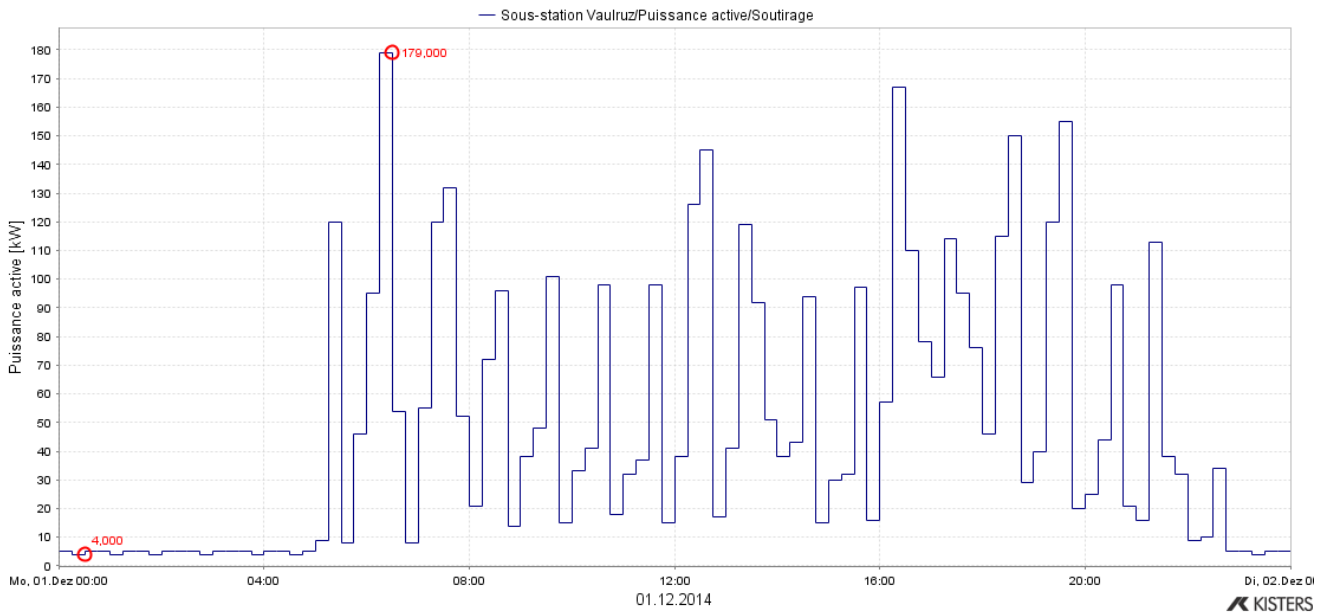


Figure 4-10 : Relevé de puissance active moyenne tension, profil de puissance annuel par tranche de 15 minutes de la sous-station « Vaulruz » [3], 1<sup>er</sup> décembre 2014

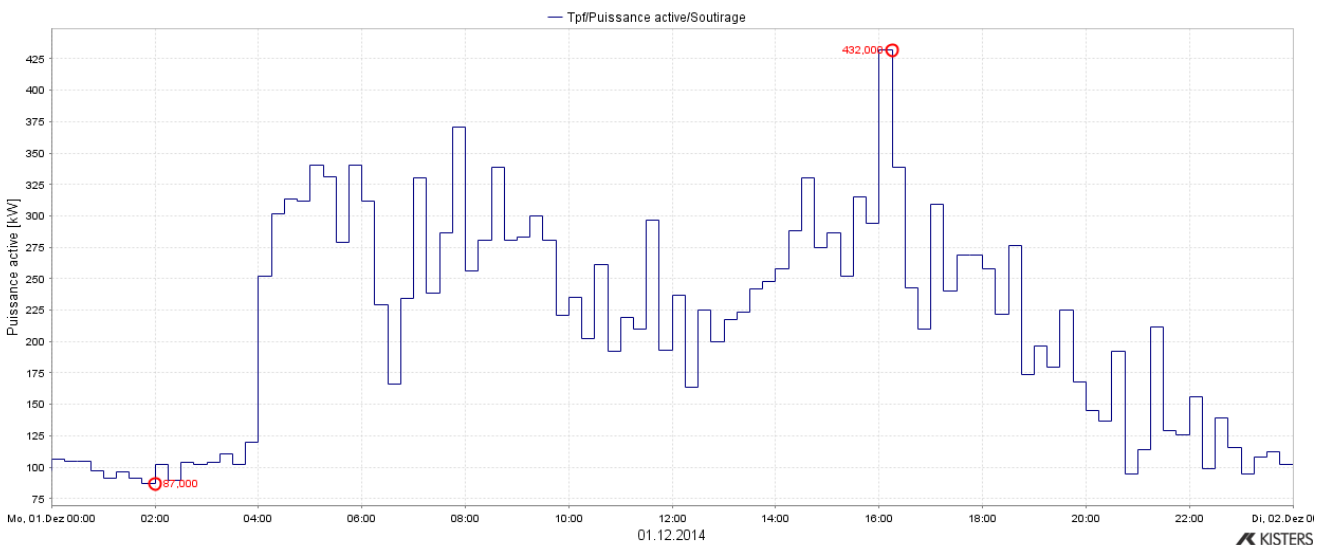


Figure 4-11 : Relevé de puissance active moyenne tension, profil de puissance annuel par tranche de 15 minutes de la sous-station « Bulle » [4], 1<sup>er</sup> décembre 2014

## 5 RELEVÉS DE BASE ET CALCULS COMPLÉMENTAIRES

Les relevés et calculs intermédiaires sont présentés succinctement dans ce chapitre :

- Température ambiante de l'air
- Trafic (tonnes-kilomètres)
- Consommation spécifique (Wh/t x km)
- Corrélation consommation-température

### 5.1 Températures

Mois	Température [°C]			Ensoleillement [h]
	Min.	Max.	Moy.	
Janv.	-6.8	12.9	2.3	74h 12min
Févr.	-4.5	13.3	3.0	77h 48min
Mars	-3.5	19.5	6.3	208h 36min
Avr.	-2.2	20.1	10.1	176h 54min
Mai	0.5	24.2	11.6	166h 36min
Juin	5.3	31.2	17.2	286h 06min
Juill.	6.4	29.2	17.1	163h 48min
Août	6.8	26.6	16.1	139h 48min
Sept	4.1	25.5	14.8	209h 48min
Oct.	-0.7	22.3	11.8	136h 36min
Nov	-0.5	16.7	5.9	72h 42min
Déc.	-10.5	13.1	3.0	55h 54min
min.-10.5    max.31.2    moy.9.9				total1768h 48min

Figure 5-1 : Relevés mensuels de température 2014 à Posieux / Fribourg [7]

Mois	Température [°C]			Ensoleillement [h]
	Min.	Max.	Moy.	
Janv.	-8.1	15.7	1.4	70h 12min
Févr.	-9.7	9.4	-0.6	85h 06min
Mars	-3.8	16	5.7	165h 42min
min.-9.7    max.16.0    moy.2.8				total321h 00min

Figure 5-2 : Relevés mensuels de température 2015 à Posieux / Fribourg [7]

## 5.2 Tonnes-kilomètres

Trafic ligne	Janvier [t x km]	Février [t x km]	Mars [t x km]	Avril [t x km]	Mai [t x km]	Juin [t x km]	Juillet [t x km]	Août [t x km]	Septembre [t x km]	Octobre [t x km]	Novembre [t x km]	Décembre [t x km]	Total annuel [t x km]
B-B	332'845	300'827	330'181	314'268	363'661	353'437	371'807	345'582	383'449	363'164	343'607	342'742	4'145'570
B-M	1'155'650	1'060'392	1'150'730	1'094'932	1'255'282	1'235'355	1'252'744	1'265'182	1'231'411	1'162'240	1'208'390	1'206'024	14'278'332
B-P	2'788'800	2'482'949	2'770'018	2'577'887	2'767'321	2'680'695	2'360'211	2'398'923	2'768'208	2'823'946	2'696'424	2'661'827	31'777'210
TOT	4'277'296	3'844'168	4'250'930	3'987'087	4'386'265	4'269'487	3'984'762	4'009'687	4'383'068	4'349'349	4'248'420	4'210'594	50'201'113

Tableau 5-1 : tonnes-kilomètres mensuelles (2014) du réseau entier à voie métrique TPF [5]

Trafic ligne	Janvier [t x km]	Février [t x km]	Mars [t x km]	Avril [t x km]	Mai [t x km]	Juin [t x km]	Juillet [t x km]	Août [t x km]	Septembre [t x km]	Octobre [t x km]	Novembre [t x km]	Décembre [t x km]	Total annuel [t x km]
B-B	349'229	323'243	352'712	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B-M	1'236'595	1'131'024	1'279'173	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B-P	2'699'180	2'418'612	2'730'099	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TOT	4'285'004	3'872'879	4'361'984	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tableau 5-2 : tonnes-kilomètres mensuelles (2015) du réseau entier à voie métrique TPF [6]

### 5.3 Consommation spécifique

La consommation spécifique est le rapport entre l'énergie [Wh] et l'intensité du trafic [t x km]. Sur la base des hypothèses des points 3.2.4 et 3.2.5, la consommation spécifique de la traction 900 V<sub>DC</sub> est une constante à 54 [Wh/(t x km)] pour 2014. Pour 2015, la même valeur a été reconduite.

Consommation spécifique 2014	Janvier [Wh/(t x km)]	Février [Wh/(t x km)]	Mars [Wh/(t x km)]	Avril [Wh/(t x km)]	Mai [Wh/(t x km)]	Juin [Wh/(t x km)]	Juillet [Wh/(t x km)]	Août [Wh/(t x km)]	Septembre [Wh/(t x km)]	Octobre [Wh/(t x km)]	Novembre [Wh/(t x km)]	Décembre [Wh/(t x km)]
Traction 900 VDC	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54
Chauffage 900 VDC	33	36	24	11	8	0	3	3	6	6	18	37
Traction nette	87	91	78	65	63	54	57	58	60	60	72	91
Traction brute	91	95	82	70	67	58	62	62	64	64	76	96
Energie active MT	102	110	90	77	74	66	70	70	72	76	90	110

Tableau 5-3 : consommation spécifique mensuelle (2014) du réseau entier à voie métrique TPF

Consommation spécifique 2015	Janvier [Wh/(t x km)]	Février [Wh/(t x km)]	Mars [Wh/(t x km)]	Avril [Wh/(t x km)]	Mai [Wh/(t x km)]	Juin [Wh/(t x km)]	Juillet [Wh/(t x km)]	Août [Wh/(t x km)]	Septembre [Wh/(t x km)]	Octobre [Wh/(t x km)]	Novembre [Wh/(t x km)]	Décembre [Wh/(t x km)]
Traction 900 VDC	54	54	54	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Chauffage 900 VDC	52	56	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Traction nette	106	110	84	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Traction brute	111	115	89	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Energie active MT	122	130	96	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tableau 5-4 : consommation spécifique mensuelle (2015) du réseau entier à voie métrique TPF

### 5.4 Corrélation consommation température

La consommation totale d'énergie active MT du réseau de traction à courant continu 900 V à voie métrique des TPF dépend de la température extérieure, Figure 5-3. L'énergie active MT corrigée prend en compte l'évolution du trafic (tonnes-kilomètres) mois par mois.

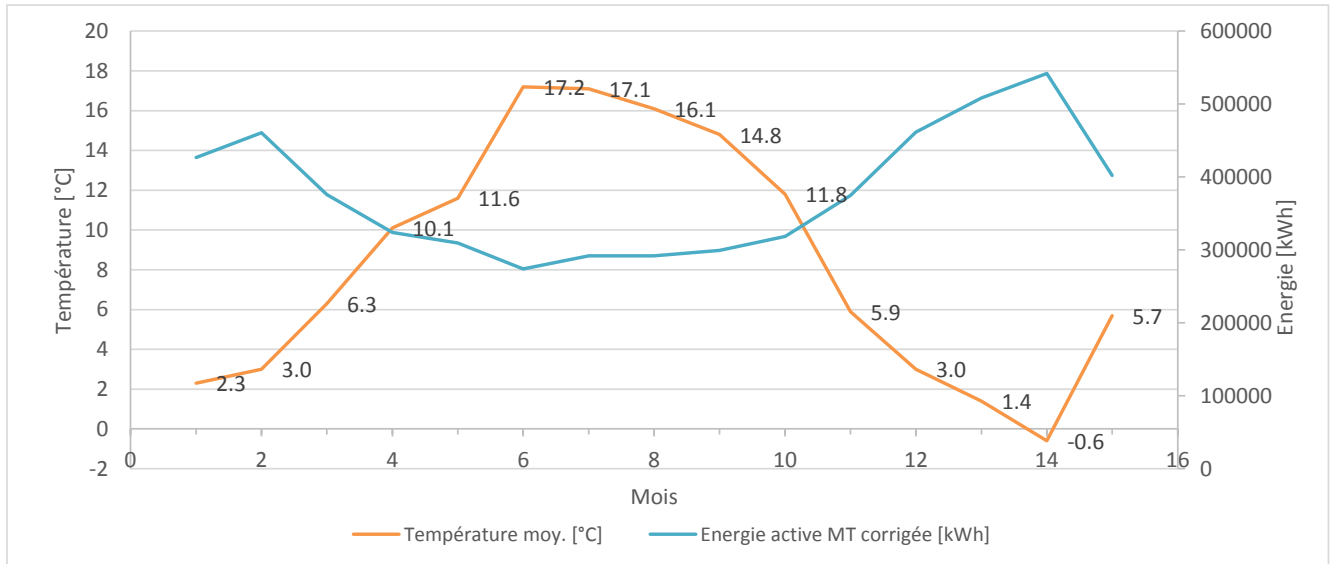


Figure 5-3 : Température moyenne mensuelle et énergie active MT mensuelle

Le croisement des données des Tableau 3-1, Tableau 5-1, Tableau 5-2, Figure 5-1 et Figure 5-2 permet d'établir la Figure 5-4. Lorsque la température ambiante moyenne descend en dessous de 10°C, la consommation d'énergie augmente significativement.

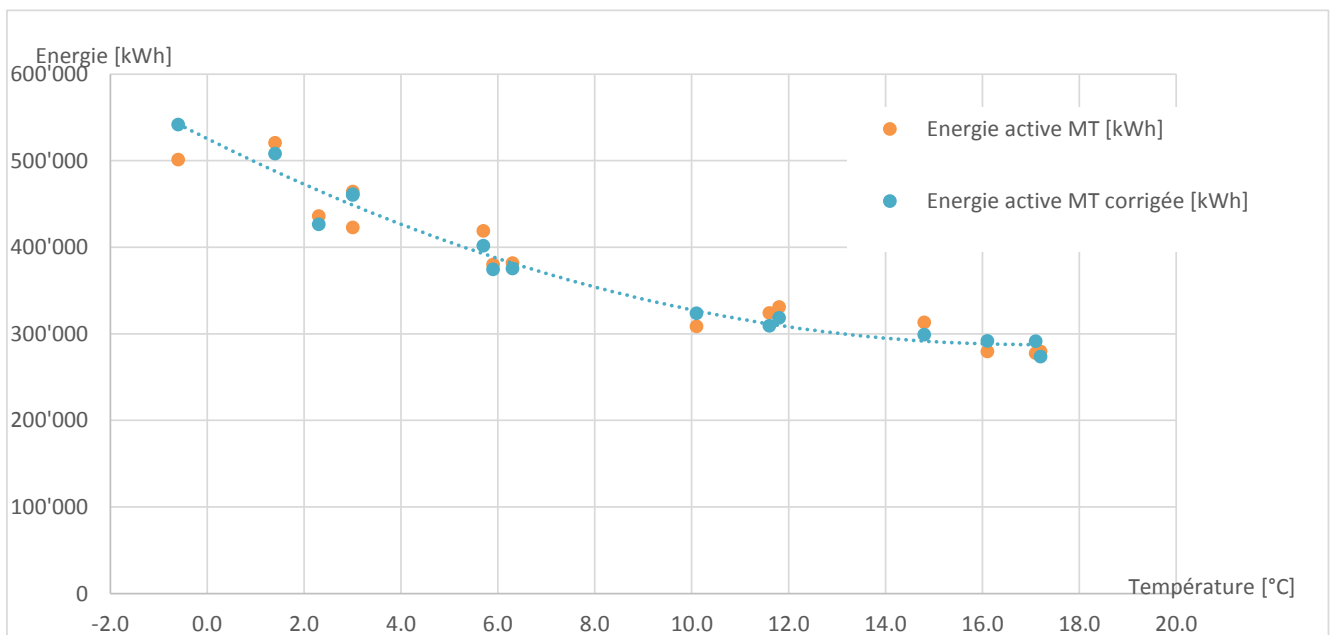


Figure 5-4 : Corrélation température moyenne mensuelle - énergie active MT mensuelle

Lors des périodes de gel important (température maximale inférieure à 0°C), la consommation de la sous-station « Bulle » ne descend pas en dessous de 300 kW.

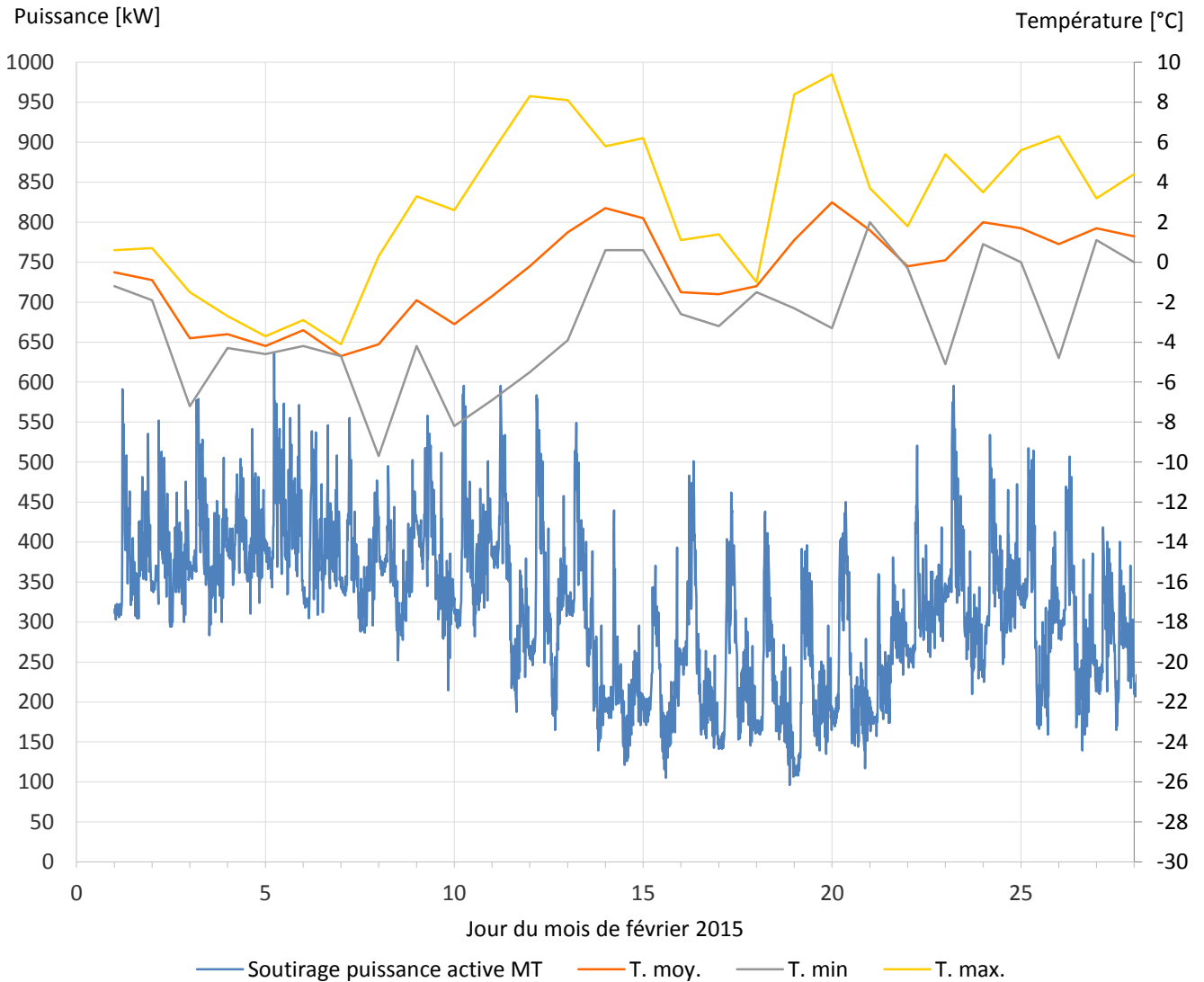


Figure 5-5 : Relevé de puissance active moyenne tension, profil de puissance mensuel par tranche de 15 minutes de la sous-station « Bulle » [4] avec température moyenne quotidienne 1<sup>er</sup> au 28 février 2015

## 6 PISTES D'ANALYSE POUR PHASE 2

Les pistes envisagées appartiennent à un ou plusieurs des trois axes suivants :

- Réduction des pertes
- Valorisation de l'énergie
- Réduction de la consommation

La réduction des pertes correspond à la réduction de la consommation associée à une fonction non recherchée. La valorisation de l'énergie comprend l'utilisation plus efficiente de l'énergie disponible par freinage régénératif (énergie potentielle et cinétique des trains). La réduction de la consommation comprend toutes les mesures qui permettent d'assurer la même fonction recherchée avec une consommation plus basse. Les caractéristiques principales du nouveau matériel roulant étant déjà définies (masse à vide, rendements), elles ne sont pas considérées comme piste d'analyse pour la phase 2.

ID	Mesure	Effet principal sur	Réduction des pertes	Valorisation de l'énergie	Réduction de la consommation
1	Sensibilisation des conducteurs de trains à une conduite économe en énergie	Traction 900 V <sub>DC</sub>			x
2	Remplacement éventuel des arrêts fixes par des arrêts à la demande aux endroits où il y a peu de clients et en dehors des horaires de transport scolaire	Traction 900 V <sub>DC</sub>			x
3	Chauffage des véhicules de la série 120 : Modification éventuelle du système de commande du chauffage de façon à pouvoir réduire le chauffage la nuit	Chauffage 900 V <sub>DC</sub>			x
4	Optimisation des compositions des trains de façon à adapter le nombre de places offertes à la demande (déjà en place)	Traction 900 V <sub>DC</sub>			x
5	Choix optimal de l'emplacement des sous-stations dont le déplacement est prévu en raison du déplacement des gares (Châtel-St-Denis, éven. Bossonnens) et impact du déplacement de la sous-station d'Albeuve à Neirivue	Traction 900 V <sub>DC</sub>	x		
6	Couplage électrique avec le réseau MOB (sous-station MOB à Montbovon, équipée dans le futur d'un onduleur réseau de récupération)	Traction 900 V <sub>DC</sub>	x	x	
7	Augmentation de la tension admissible sur l'ensemble du réseau voie étroite lors du freinage	Traction 900 V <sub>DC</sub>		x	
8	Régulation du chauffage des aiguillages (en test actuellement sur un aiguillage : chauffage coupé si température du rail supérieure à 16°C)	Auxiliaires 400 V <sub>AC</sub>			x
9	Dimensionnement des sections de cuivre des différents conducteurs (augmentation)	Traction 900 V <sub>DC</sub>	x	x	
10	Pertes à vide des groupes (réduction)	Pertes à vide	x		
11	Modulation active du chauffage embarqué (en fonction de la tension ligne)	Traction 900 V <sub>DC</sub>		x	
12	Implantation d'onduleur réseau de récupération dans les sous-stations TPF	Traction 900 V <sub>DC</sub>		x	

Tableau 6-1 : Pistes d'analyse proposées pour la phase 2

## 7 ANNEXES ET RÉFÉRENCES

### 7.1 Annexes

- [1] ECH-294.06\_01-305.V1.0, **Liste des sous-compteurs** de la sous-station Bulle pour relevés des compteurs auxiliaires 400 V (basse tension), TPF, 2015.01.23
- [2] ECH-294.06\_01-308.V1.0, **Schéma du réseau** 900 V à voie métrique V1-8, TPF, 2013.07.04

### 7.2 Références

- [3] **Relevés Groupe E**, période consultée 2014.01.01 au 2015.03.31, Groupe E, 2015.04.01
- [4] **Relevés Gruyère Energie**, période consultée 2014.01.01 au 2015.03.31, Gruyère Energie, 2015.04.01
- [5] **Relevés t x km voie métrique TPF 2014**, période consolidée 2014.01.01 au 2014.12.31, TPF, 2015.01.09
- [6] **Relevés t x km voie métrique TPF 2015**, période consolidée 2015.01.01 au 2015.03.31, TPF, 2015.04.10
- [7] **Relevés de température** Fribourg/Posieux, <http://www.prevision-meteo.ch>, période consultée 2014.01.01 au 2015.03.31, 2015.04.01
- [8] **Spécification des sous-stations** Estavannens, Bulle, Vaulruz, Semsales, SAAS, 1969.05.16
- [9] **Stratégie énergétique 2050** des transports publics - SETP 2050, <http://www.bav.admin.ch/energie2050/index.html?lang=fr>, 2015.03.13