



Projet SWACool « Potentiel de réduction de la demande de climatisation en climat tropical et optimisation du raccordement des bâtiments à un réseau de froid vertueux »

Tâche 1 : Etudes de cas à La Réunion :

Fac de lettres Université de La Réunion – St Denis

Résultats de simulation thermique

Livrable 1.3b

septembre 2020

rédigé par 



Le projet SWACool est lauréat de l'Appel à Projets de Recherche ADEME « Vers des bâtiments responsables à l'horizon 2020 » - 3^{ème} édition.

Fac de lettres St Denis



Table des matières

1. Introduction	5
2. Présentation du bâtiment.....	5
3. Modélisation du bâtiment par simulation thermique dynamique	7
3.1. Données mises à disposition.....	7
3.2. Outils de simulations utilisés	8
3.3. Hypothèses de modélisation	9
3.4. Météo	14
3.5. Période de simulation.....	15
3.6. Les mesures sur site	15
4. Analyse des différences de résultat	16
4.1. Analyse de l'influence des données climatologique.....	16
4.2. Analyse de la comparative mesure / simulation des puissances froid.....	18
4.2.1. Les puissances de froid.....	18
1.1.1. Analyse de la concordance des données.....	21

4.3. Analyse du comportement des puissances en froid suivant les charges internes 23

4.4. Comparaison mesures / simulation des températures 27

 Comportement des températures des amphithéâtres 4 et 5 28

 Comportement des températures des salles 44 et 45 34

Conclusion..... 38

1.Introduction

Cette section du projet SWACOOOL portée par GREENTECH vise à déterminer les limites des résultats prévisionnels d'une simulation thermique et dynamique face à celles véritablement obtenues sur site.

Les bâtiments étudiés ont donc été modélisés par simulation thermique dynamique de manière fiable, à l'aide de l'outil Sketchup et du moteur de calcul EnergyPlus.

Ces simulations sont davantage influencées par la quantité et qualité des données informatives disponibles.

Le bâtiment ici étudié est celui de la partie L1 de la Faculté de Lettres de l'Université du Moufia.

La première partie de ce rapport présente le bâtiment étudié et ses particularités, la deuxième partie détaille les hypothèses utilisées pour créer un modèle numérique le plus fiable possible, et la dernière partie présente l'analyse comparative des résultats simulés avec ceux mesurés sur site.

Dimensionner un appareillage de climatisation c'est déterminer la puissance en froid qui permettra de maintenir la température dans le bâtiment à une valeur souhaitée tout en tenant en compte de la déshumidification nécessaire.

2.Présentation du bâtiment

Nous avons étudié la zone L1 de la Faculté de Lettres de l'Université du Moufia, dont voici les caractéristiques :

Le bâtiment	
Nom	L1 de la Fac de Lettres
Localisation	Université du Moufia
Altitude	100m
Maître d'ouvrage	Université de La Réunion
Nombre de niveaux	6, du R-1 au R+5

L'enveloppe	
Murs extérieurs	Béton + revêtement peinture
Toiture	Béton + tôle
Menuiseries	Vitrage simple en aluminium, type fenêtres à l'italienne + partie fixe
Protections solaires	Du R+2 au R+5 : Brise soleils fixes en béton, avec lames aluminium inclinées R-1 et R+1 : Casquette béton pour les amphithéâtres du R+1 + Brises soleil extérieures avec lames aluminium réglables
Masques	Les autres ailes de la faculté des lettres créent un masque sur l'aile 1 et sont représentés sur le modèle numérique

Figure 1 Tableaux de présentation générale du bâtiment étudié

Le site se situe dans le Nord de l'île, à une altitude de 100m, soit en zone PERENE n°2.

Il s'agit d'un bâtiment tertiaire type Université, comportant des salles de cours réparties sur 4 niveaux, 2 amphithéâtres au R-1 et R+1, des salles informatiques et quelques locaux techniques dans lesquels se trouve la production de froid.



Figure 2 Bâtiment L1 de la Faculté de Lettres ; Vue extérieure sur façade Sud en haut à gauche, façade Nord en haut à droite, vue intérieure de l'amphithéâtre 5 en bas à gauche et vue d'une salle de classe en bas à droite.

Le bâtiment est entièrement climatisé grâce à 2 groupes froids à eau glacée, à l'exception des couloirs, sanitaires et locaux techniques.

Les systèmes	
Surface climatisée	1756 m ² (entièrement climatisé sauf couloirs, sanitaires et locaux techniques)
Production	2 groupes froids à eau glacée
Diffusion	2 CTA qui alimentent les amphithéâtres Des ventilo-convecteurs type cassettes qui alimentent les salles de cours, salles informatiques et audiovisuelles

Notre interlocuteur sur place a été Monsieur Eric Monceyron de la Direction du Patrimoine de l'Université.

3. Modélisation du bâtiment par simulation thermique dynamique

La simulation thermique dynamique permet de simuler le bâtiment dans son environnement, en tenant compte de la météo, des masques solaires, des apports solaires, mais aussi des apports internes et latents liés aux occupants et aux équipements (ventilation et apports d'humidité liés à l'évacuation des condensats de climatisation). Disposer d'un modèle dynamique fiable permet de comptabiliser les consommations de froid, puis d'étudier des solutions d'optimisation en raisonnant sur des diagrammes de confort température/humidité.

En comparant les résultats de sortie de la simulation aux mesures de puissance en froid et des températures sur site, on pourra porter un jugement sur le potentiel et les limites de la simulation dynamique.

Cette partie est issue d'un travail Collaboratif avec ENERTECH. Le montage des modèles numériques et les relevés sur site ont été réalisés par LEU et GREENTECH. ENERTECH dans le cadre du projet PACTE TROPICLIM a apporté son assistance dans la conception de la partie système du modèle.

3.1. Données mises à disposition

Par le biais de Monsieur Monceyron, des plans en 2D nous ont été fournis, pour chaque niveau, indiquant le nom des salles. Cependant, ces plans n'étant pas à l'échelle, et n'indiquant pas toutes les données dont nous avons besoin, nous nous sommes rendus plusieurs fois sur site afin de compléter les données manquantes telles que les dimensions des menuiseries, l'épaisseur des murs, la position de la cage d'ascenseur qui crée un masque supplémentaire sur le bâtiment, etc.

De plus, nous disposons également des mesures réalisées par GREENTECH sur ce bâtiment, à savoir : les consommations mensuelles de l'ensemble de la faculté de Lettres, toutes ailes confondues ainsi que les consommations électriques liées au fonctionnement de la climatisation.

3.2. Outils de simulations utilisés

Le bâtiment a été modélisé grâce à l'interface Sketchup, couplée à l'extension Euclid 2017, qui permet de modifier facilement les données d'entrée utilisées par le moteur de calcul EnergyPlus.

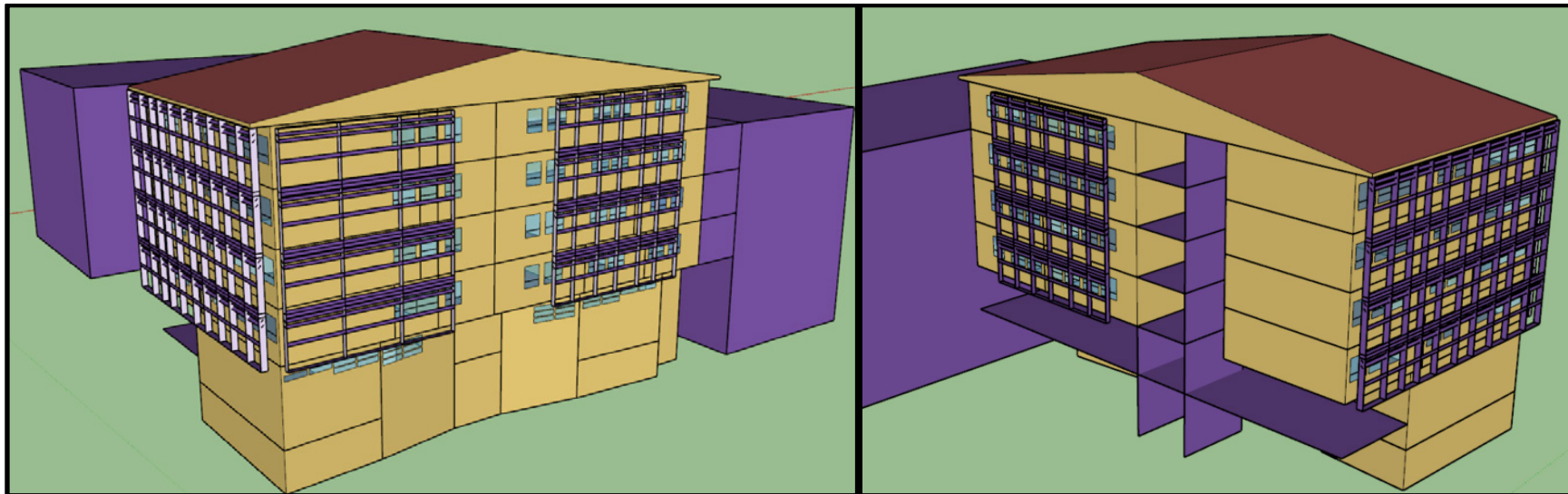


Figure 3 Représentation numérique du bâtiment étudié sous Sketchup (façade Sud à gauche, façade Nord à droite)

3.3. Hypothèses de modélisation

3.3.1. Zonage thermique

La première étape consiste à découper le bâtiment en zones supposées thermiquement homogènes. Un découpage détaillé permet de prendre en compte les spécificités de chaque pièce liées aux orientations ou aux sollicitations qui peuvent varier d'une zone à l'autre. Nous avons découpé le modèle en 31 zones thermiques : 1 zone représente 1 salle.

Niveau	-1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	
Zone	localtech	amphi4b + amphi4a	localclim	amphi5a + amphi5b	salle24	salle25	salle26	salle27	salle28	salle29A	
Niveau	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	
Zone	salle29B	toilettes2eme couloir2eme	salle36	salle37	informatique	audiovisuel	informatique1	informatique2	informatique3	informatique4	
Niveau	3	4	4	4	4	5	5	5	5	5	6
Zone	toilettes3eme couloir3eme	salle45	salle44	salle46	toilettes4eme couloir4eme	S51 salle de cours	s53 salle de cours	salle52	salle54 salle de cours	toilettes5eme couloir5eme	toit

Figure 4 Récapitulatif des zones thermiques créées

Les zones toilettes/couloir ne sont pas analysées.

3.3.2. Composition des parois

Nom de la paroi	Menuiserie	Plancher extérieur	Mur extérieur	Mur intérieur	Toit extérieur	Plancher intérieur
Composition	Vitrage simple clair	Sol souple 0.005m	Béton 0.2m	BA13 0.013m	Tôle acier 0.0008m	Sol souple 0.005m
		Béton 0.2m		Isolation BA13 0.05m	Circulation d'air	Béton 0.2m
				BA13 0.013m	Béton 0.2m	Circulation d'air
					Circulation d'air	Dalles 600*600 0.02
					Dalles 600*600 0.02m	

Figure 5 Description de la composition des parois sous EnergyPlus

Matériau	Epaisseur [m]	Densité [kg/m ³]	Chaleur spécifique [J/kg.K]	Conductivité [W/m.K]	Résistance Thermique [m ² .K/W]
Tôle acier	0.0008	7850	480	53	0
Béton	0.2	2300	657	1.046	0.19
Sol souple	0.005	1200	1400	0.19	0.03
BA13	0.013	2800	896	0.25	0.05
Dalles 600*600	0.02	200	710	0.034	0.58
Isolation BA13	0.05	25	920	0.045	0.55

Figure 6 Descriptif technique des matériaux sous Energy Plus

3.3.3. Ponts thermiques

Les ponts thermiques ne sont pas pris en compte. La majorité des besoins proviennent des apports solaires et internes et non via les échanges conducto-convectifs.

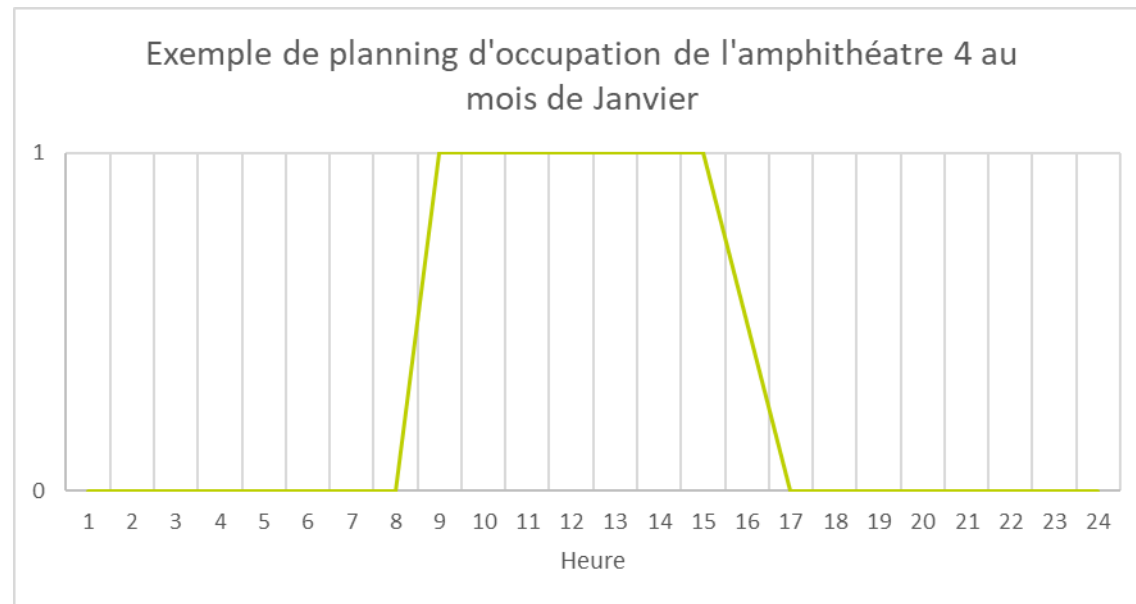
3.3.4. Occupation

Le planning d'occupation des salles de l'Université est renseigné sur une plateforme en ligne. A l'exception de 3 salles, nous avons ainsi pu récupérer le planning d'occupation de la totalité des zones. Ce planning permet de savoir à quel moment la salle est occupée ou non, mais ne donne pas d'information sur le nombre d'occupants. Pour les salles dont l'occupation est inconnue, à défaut d'occupation, on suppose celles-ci toujours inoccupées.

La capacité des deux amphithéâtres et de deux salles de cours est connue grâce aux plans. Un ratio moyen de places par mètre carré peut être estimé à partir de celles-ci (0,7 place/m²). Ce ratio permet ensuite de déterminer la capacité des autres salles de cours (arrondi à la dizaine). En occupation, on suppose les pièces occupées à 100% de leur capacité.

La capacité des salles informatiques et audiovisuelles est estimée (arrondie à la dizaine) à partir du débit d'extraction par personne calculé sur les salles de cours (18 m³/h/place).

Les vacances et jours fériés ont été supposés exclus des données d'occupation.



3.3.5. Apports internes sensibles

Ces apports sont de sources humaines (métabolisme des occupants qui dégagent de la chaleur) et électriques.

Les seuls équipements électriques pris en compte spécifiquement sont les ordinateurs. On les estime à une unité par salle audiovisuelle et amphithéâtre, et à 10 unités pour les salles informatiques (égale à la capacité des salles).

Les apports internes sont modulés selon le scénario d'occupation de la pièce.

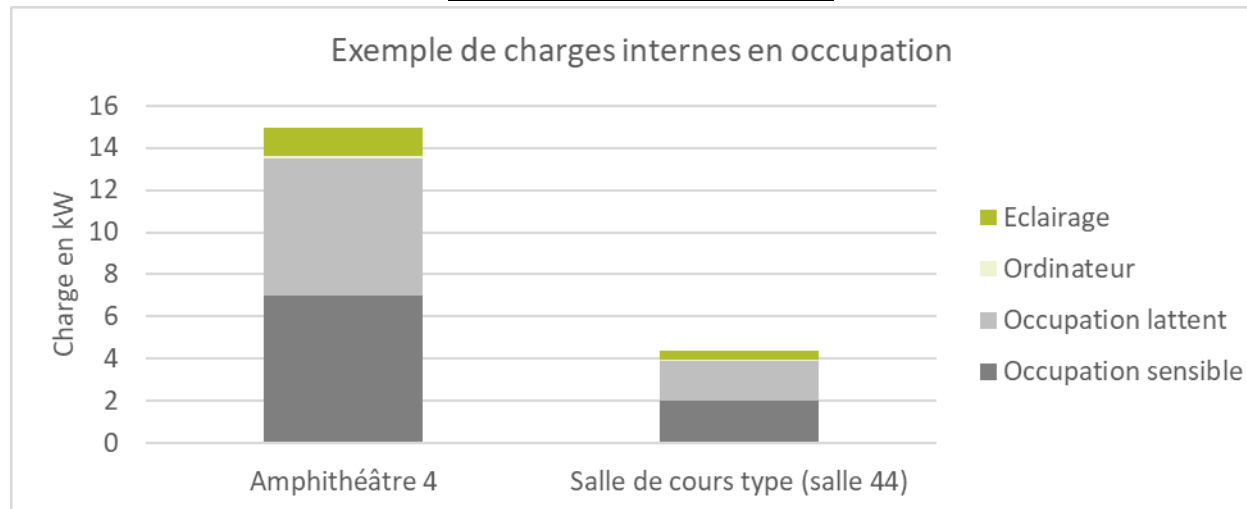
Métabolisme	67	Wsensibles/pers.
Ordinateur	70	W/appareil
Autre élec. Y compris éclairage	11	W/m ²

Figure 7 Hypothèses prises pour les apports sensibles

1.1.1. Coefficient de foisonnement

L'ensemble des appareils ne fonctionne pas de manière systématique dès lors qu'il y a occupation. Pour prendre en considération cet aspect, des coefficients de foisonnement sont appliqués.

Coefficient de foisonnement	
Occupation	1
Ordinateur	0,7
Eclairage	1



3.3.6. Apports internes latents

Les sources d'apports latents sont la ventilation et le métabolisme des occupants.

Métabolisme	63	Wlatents/pers.
-------------	----	----------------

Figure 8 Hypothèses prises pour les apports latents

Le renouvellement d'air dans les amphithéâtres, géré par les CTA pendant les périodes d'occupation uniquement, a été estimé à 30 m³/h/personne.

D'après les plans, l'air entre dans le bâtiment par les menuiseries et est extrait par des bouches de VMC dans les pièces. Les débits sont indiqués sur les plans pour la plupart des salles, et pour les salles manquantes, les débits ont été déduits en se basant sur les mêmes ratios au m². Les extracteurs fonctionnent lors de l'ouverture du bâtiment : entre 7h30 et 20h10 du lundi au vendredi et entre 7h30 et 13h le samedi, hors jours fériés et fermeture en vacances scolaires. Nous n'avons pas retrouvé ces bouches d'extraction sur site, cependant nous supposons une aspiration possible dans les faux plafonds due à la présence de gaines de ventilation non raccordées.

3.3.7. Systèmes

2 groupes froids alimentent l'ensemble du bâtiment. Le premier alimente des centrales de traitement d'air, situées dans le local technique au R+1, qui viennent refroidir les amphithéâtres. L'autre alimente les ventilo-convecteurs type cassettes des salles de cours et salles informatiques.

La climatisation fonctionne de 5h à 19h du lundi au vendredi et de 5h à 12h le samedi. La climatisation est aussi arrêtée sur la période de vacance hivernale, en fin d'année scolaire, pendant les jours fériés et certains jours de congés. Un scénario de marche-arrêt est reconstitué à partir des mesures selon l'état de fonctionnement de la climatisation.

3.3.8. Températures intérieures

La consigne de température est de 26°C (+/-2°C) dans les salles de cours et de 25°C (+/-2°C) dans les amphis.

Par ailleurs, 6 salles (amphi 5 (haut et bas), salle 29B, salle 27, informatique 2, salle de cours 37, salle 46) ont été instrumentées du 15/03/2019 au 30/04/2019.

3.4. Météo

Le choix des données météorologiques de référence est un choix important. L'ensemble des résultats est directement lié à ces données qui comprennent essentiellement :

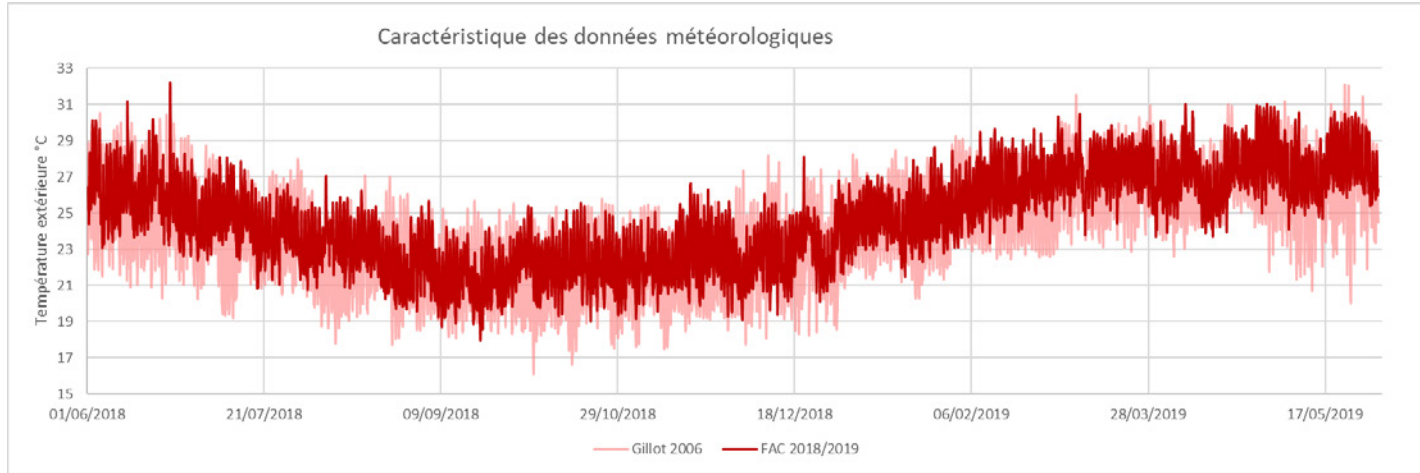
- La température extérieure
- L'humidité
- Le rayonnement direct, diffus et globale
- La vitesse et l'orientation des vents.

Sur site, des données météorologiques ont été prélevées permettant d'avoir un accès aux grandeurs suivantes (au pas de temps 10min) : la température extérieure, l'hygrométrie extérieure, et le flux solaire global horizontal.

N'ayant pas l'ensemble des paramètres au complet pour pouvoir faire tourner une simulation, le fichier météorologique « FAC 20018/2019 » a été recomposé sous la base du fichier météorologique de « Gillot 2006 » selon une méthode de conversion spécifique.

Une autre simulation a été réalisée avec le fichier météorologique d'origine de « Gillot 2006 » qui se situe à 5km de distance et un delta de gonètre d'altitude. De ce fait, nous avons fait le choix d'analyser les résultats de simulation suivant ces deux fichiers sources. L'objectif est de voir l'importance du choix du fichier météorologique.





Caractéristique des données météorologiques			
	Température minimale	Température moyenne	Température maximale
FAC 2018/2019	18,0	24,6	32,2
Gillot 2006	16,1	23,9	32,1

Le fichier météorologique de Gillot 2006 présente des valeurs de température inférieures à celui de la FAC 2018/2019. Nous verrons l'impact de ces caractéristiques dans le résultat des simulations et quel fichier sera le mieux adapté.

3.5. Période de simulation

A partir des données de mesures disponibles, la période de simulation retenue s'étend sur une année (reconstituée en utilisant les données de Janvier à Mars pour 2019, et d'avril à décembre pour 2018).

3.6. Les mesures sur site

Les mesures in-situ réalisées par GREENTECH concernent la mesure :

- Des frigidités du groupe froid qui alimentent les ventilo-convecteurs ;
- Des températures et humidité ambiantes réparties au RDC et R+1 ;
- Des consommations d'énergie globales du bâtiment

Les mesures ont été réalisées d'avril à décembre 2018 et de janvier à mars 2019.

4. Analyse des différences de résultat

On pourrait chercher à améliorer davantage la concordance entre mesures et modèles mais les données liées à l'enveloppe semblent suffisamment fiables, étant donné les incertitudes concernant la dynamique des systèmes et des apports internes, cela semble illusoire. Les écarts pouvant être observés seront donc principalement liés aux hypothèses d'occupation, charges internes et des caractéristiques des systèmes.

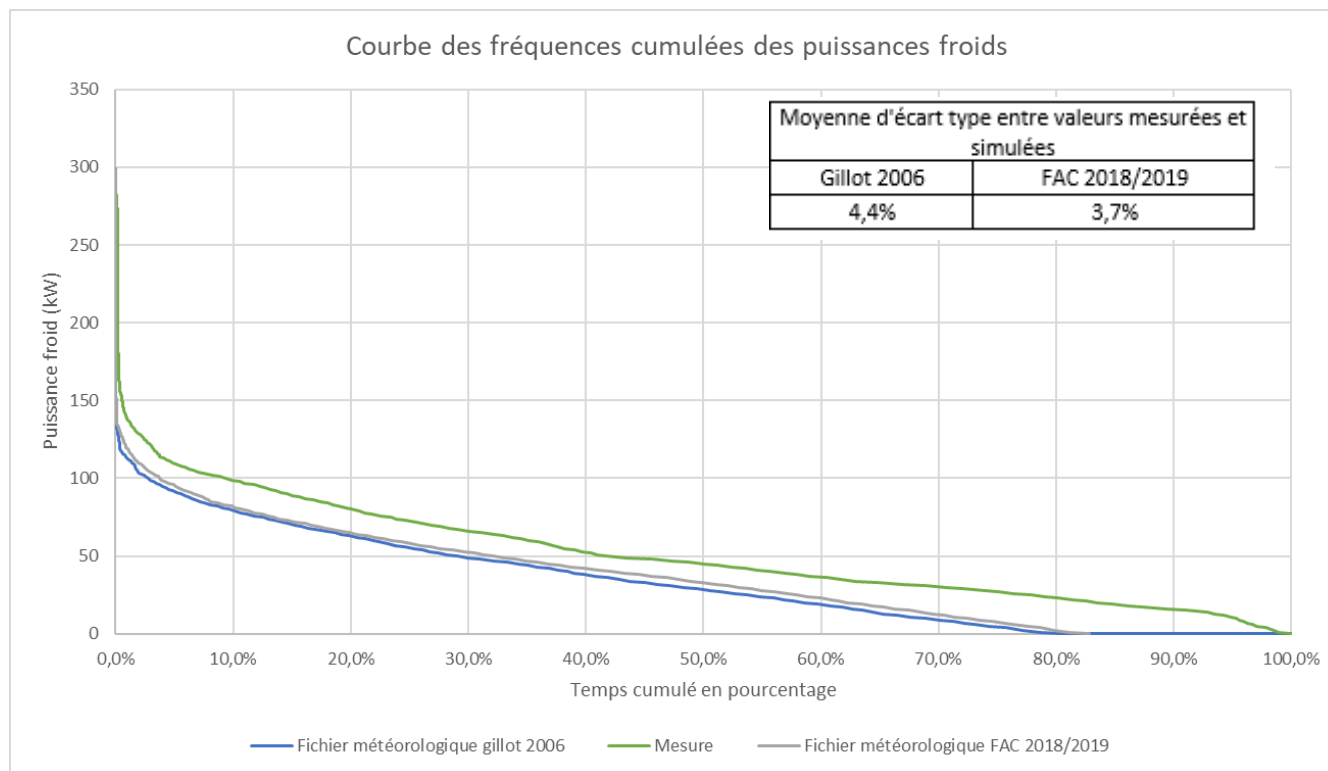
4.1. Analyse de l'influence des données climatologique

Nous avons dans cette partie, fait le choix d'analyser les résultats de simulation suivant deux fichiers météorologiques sources ayant des caractéristiques différentes. CF partie 1.2. Météo. Ces fichiers sont issus des :

- Données complètes de Gillot pour l'année 2006 (situé à 5km de distance et à 8m d'altitude)
- Données température, humidité et rayonnement globale de la FAC pour les années 2018 et 2019, correspondant à nos périodes de mesure (in-situ)

Ainsi, nous pourrions voir l'importance du choix du fichier météorologique.

Pour caractériser cela, nous nous baserons sur l'indicateur des courbes des fréquences cumulées des puissances en froid. Note : Pour une représentation plus visuelle, le temps total cumulé se limite aux valeurs mesurées supérieures à zéro.



La station météorologique de Gillot a une altitude inférieure à celle de la FAC, on pourrait donc s'attendre à des températures extérieures plus élevées, ce qui entrainerait des demandes frigorifiques plus élevées.

Nous voyons pourtant ici **l'avantage du fichier météo « FAC 2018/2019 »** qui se rapproche plus du comportement des valeurs des puissances froides mesurées. Cela se traduit par une demande en frigories moindre pour les données météorologiques de Gillot.

On en déduit que **l'ancienneté des données et la localisation** sont des paramètres impactant directement la fiabilité des résultats. Lorsque cela est possible, la modification d'un fichier météorologique avec des données plus récentes et fiables est de rigueur.

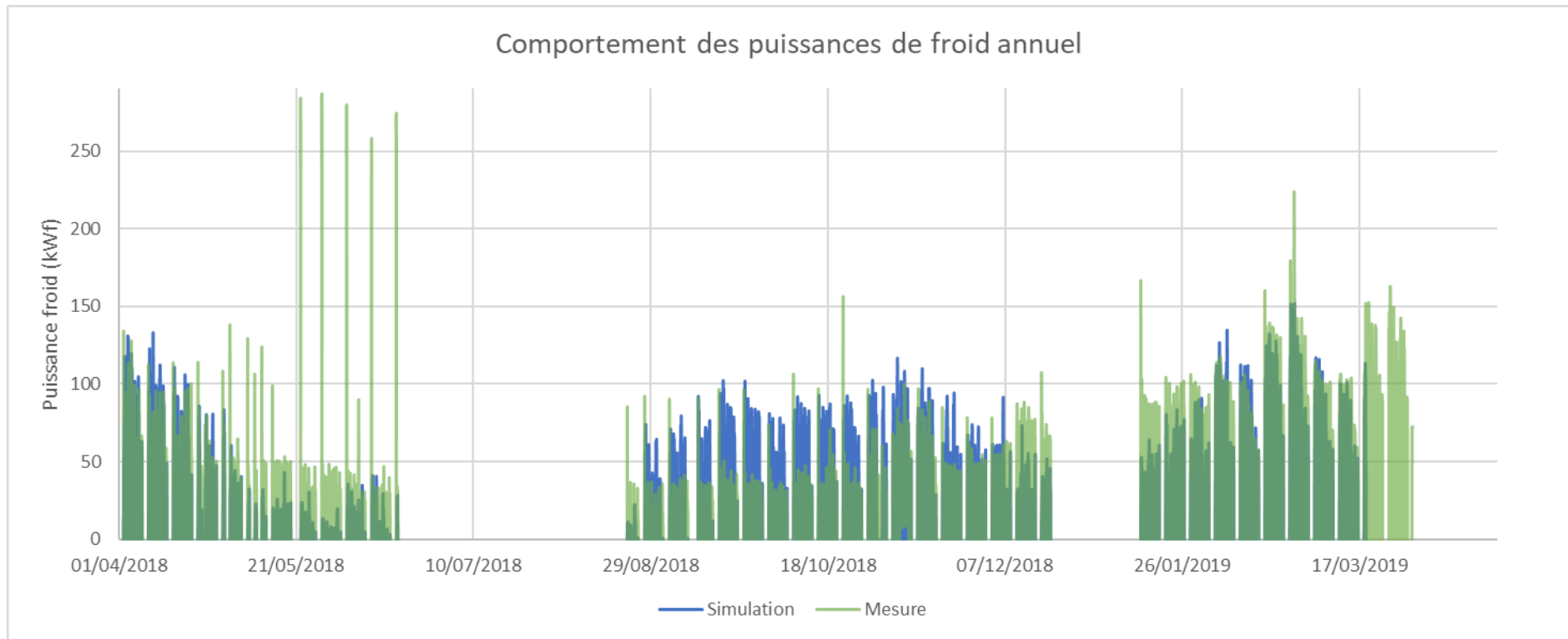
Pour la suite, les résultats de la simulation seront issus du fichier météorologique de « FAC2018/2019 ».

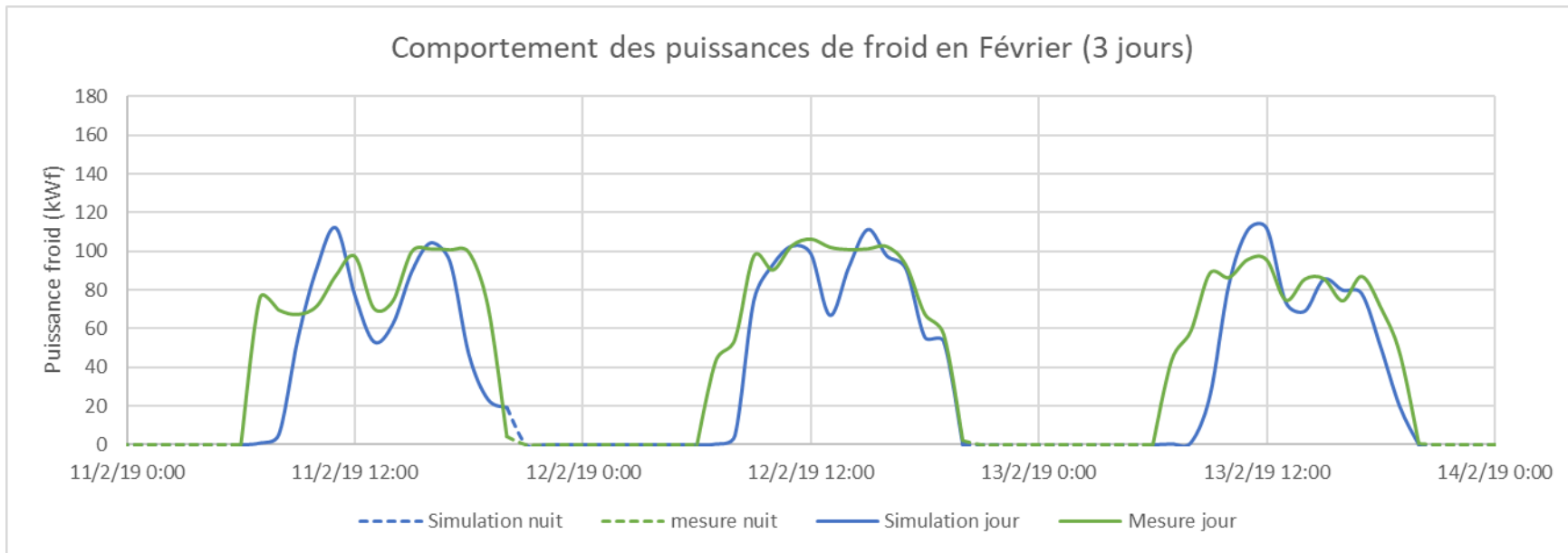
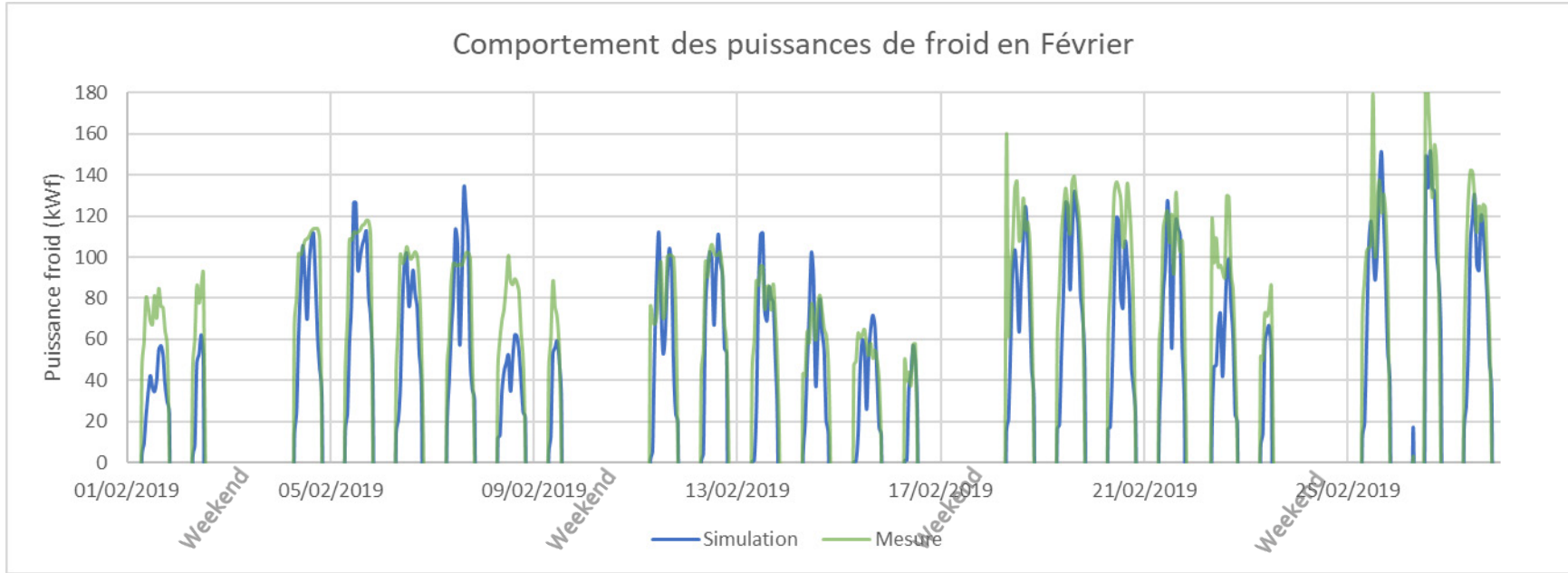
4.2. Analyse de la comparative mesure / simulation des puissances froid

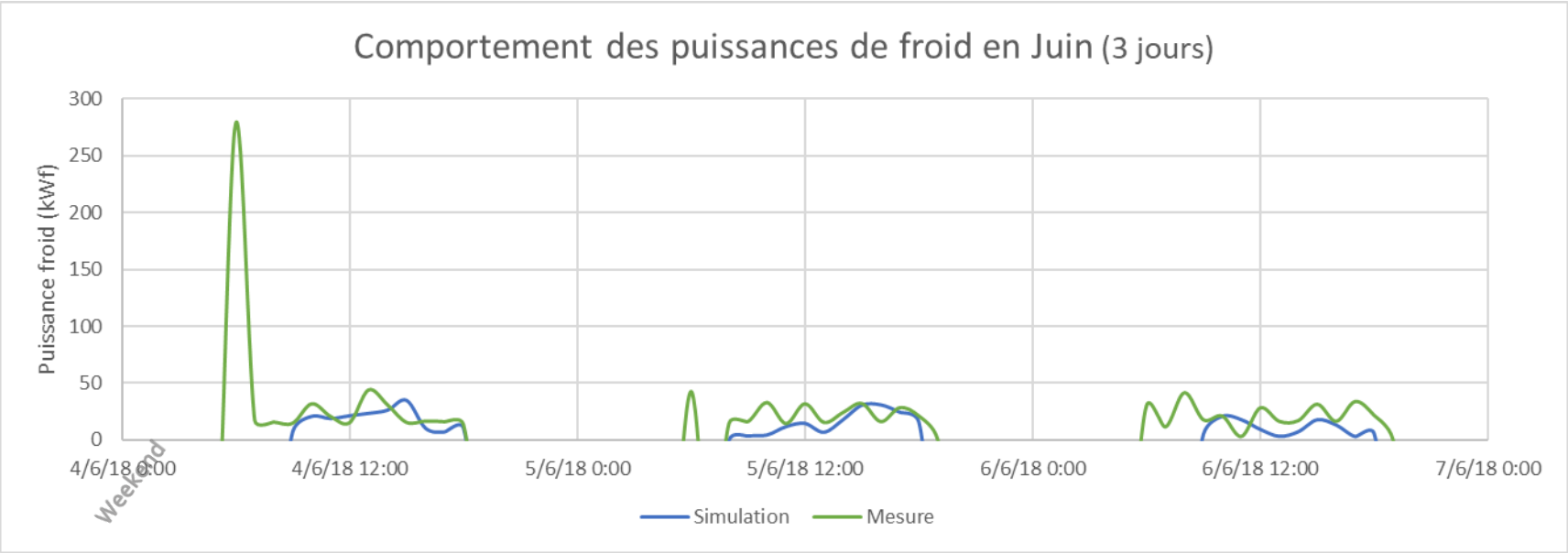
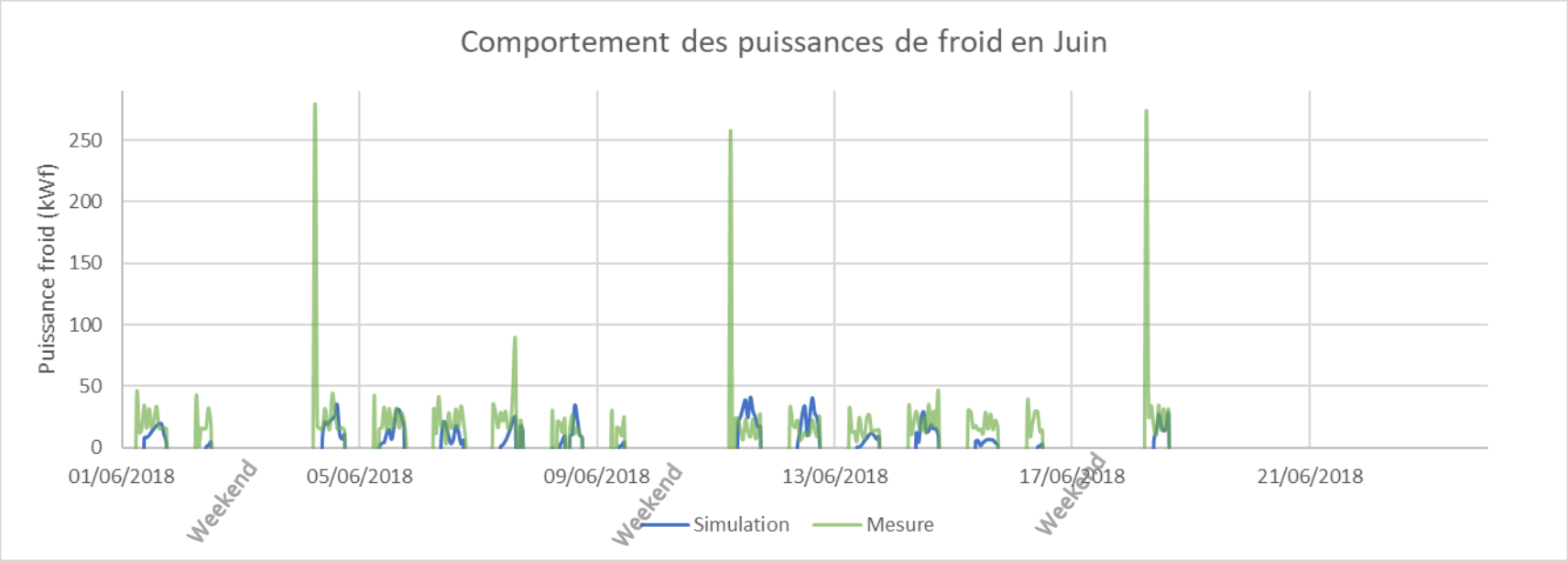
Cette partie regroupe l'ensemble des analyses comparatives entre le comportement d'un modèle simulé et le bâti réel. Les résultats sont issus des mesures obtenues par GREENTEH et de la simulation intégrant le fichier météorologique « FAC 2018/2019 ».

4.2.1. Les puissances de froid

Nous nous intéresserons ici au comportement des puissances de froids de l'ensemble des données simulées et mesurées à différentes périodes.







Pour une première approche d'analyse, on peut observer **qu'en été, les valeurs simulées sont inférieures à celles mesurées. En hiver, le phénomène inverse est observé** avec une courbe simulée souvent supérieure à celle mesurée.

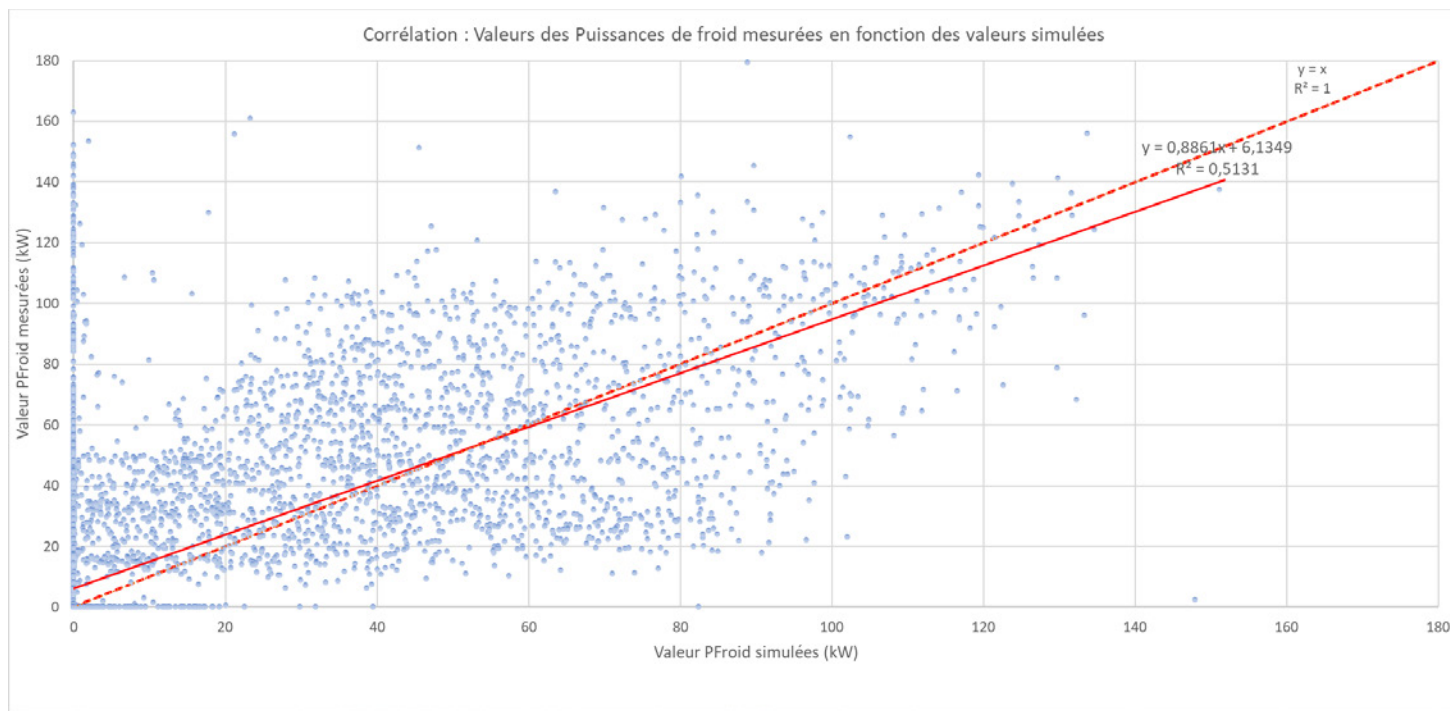
En été (voir courbes au mois de février), la différence entre les deux sources de données est très variée au fil des heures et des journées. Ceci s'explique par la **variation importante de l'occupation des lieux ainsi que leurs charges internes associées.**

En hiver, la remarque est la même. De plus, on relève des pics de puissance très importants répétitivement chaque lundi matin. **Ce phénomène est dû aux relances des systèmes (refroidissement du réseau d'eau). Cela n'est pas lié aux besoins réels du bâtiment. La STD ici ne représente pas cet aspect du comportement du système de climatisation.**

De plus, ce comportement permet d'affirmer que le système de climatisation installé est surdimensionné.

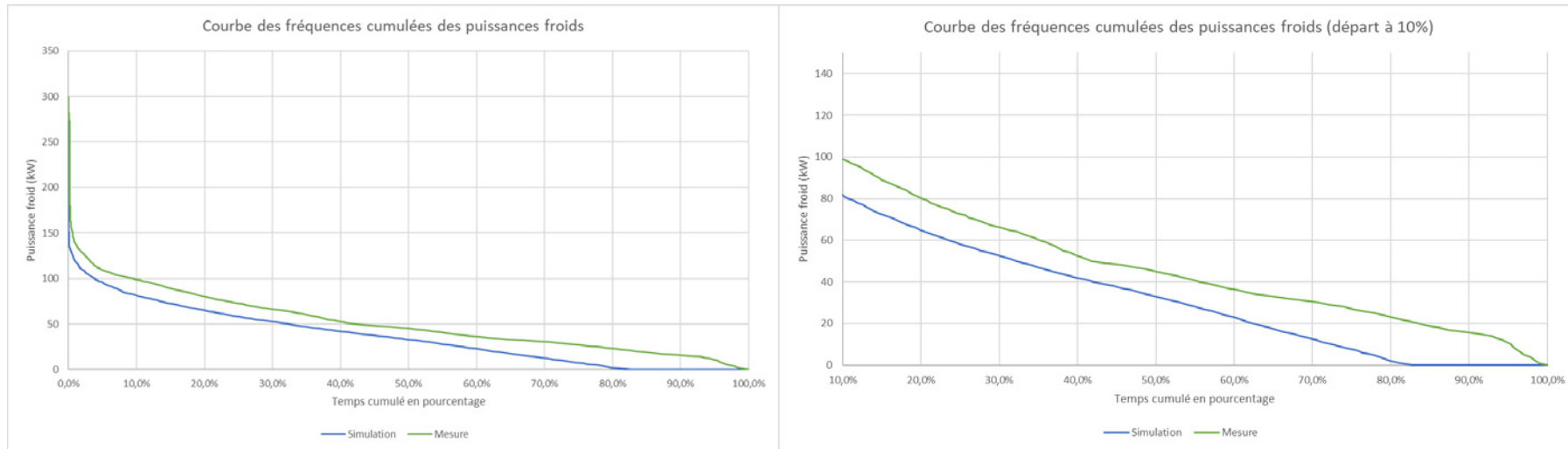
1.1.1. Analyse de la concordance des données

Analysons à présent la concordance des deux sources de valeur. Pour cela il est intéressant de tracer la régression linéaire.



On observe un coefficient de détermination R^2 de 0.5 faible qui caractérise à une régression linéaire.

Tracer les fréquences cumulées des puissances (ci-dessous) est une analyse intéressante ; avec en abscisse le temps en pourcentage et en ordonnée les puissances de froid. Note : Pour une représentation plus visuelle, le temps total cumulé se limite aux valeurs mesurées supérieures à zéro (pour un total cumulé de 4795 heure).



	Appel de la puissance en froid		Consommation totale annuel en froid	
	Simulé	Mesuré	Simulé	Mesuré
Puissance maximale	152 kW	285 kW	103361 kWh	145291 kWh
	Différence :	-47%	Différence :	-29%
Puissance à une fréquence cumulée de 10%	82 kW	99 kW	74894 kWh	111158 kWh
	Différence :	-17%	Différence :	-33%

Pour l'analyse, il est plus pertinent de prendre comme référence les résultats dont le pourcentage de temps cumulée est supérieur à 10%. En effet, nous considérons que les valeurs les plus importantes (et les moins récurrentes) sont induites par les pics de relance dus aux systèmes (refroidissement du réseau d'eau) et non aux liés aux besoins du bâtiment. Par visuel, ces deux courbes sont cohérentes dans leur comportement. Néanmoins, la simulation propose des besoins en froid moins importants que ceux mesurés.

Cela se traduit par des appels de **puissance maximale** ainsi que des **consommations annuelles plus élevés pour les mesures** : une différence d'un appel de puissance de -17% et une différence d'une consommation de -33% entre simulation et mesure.

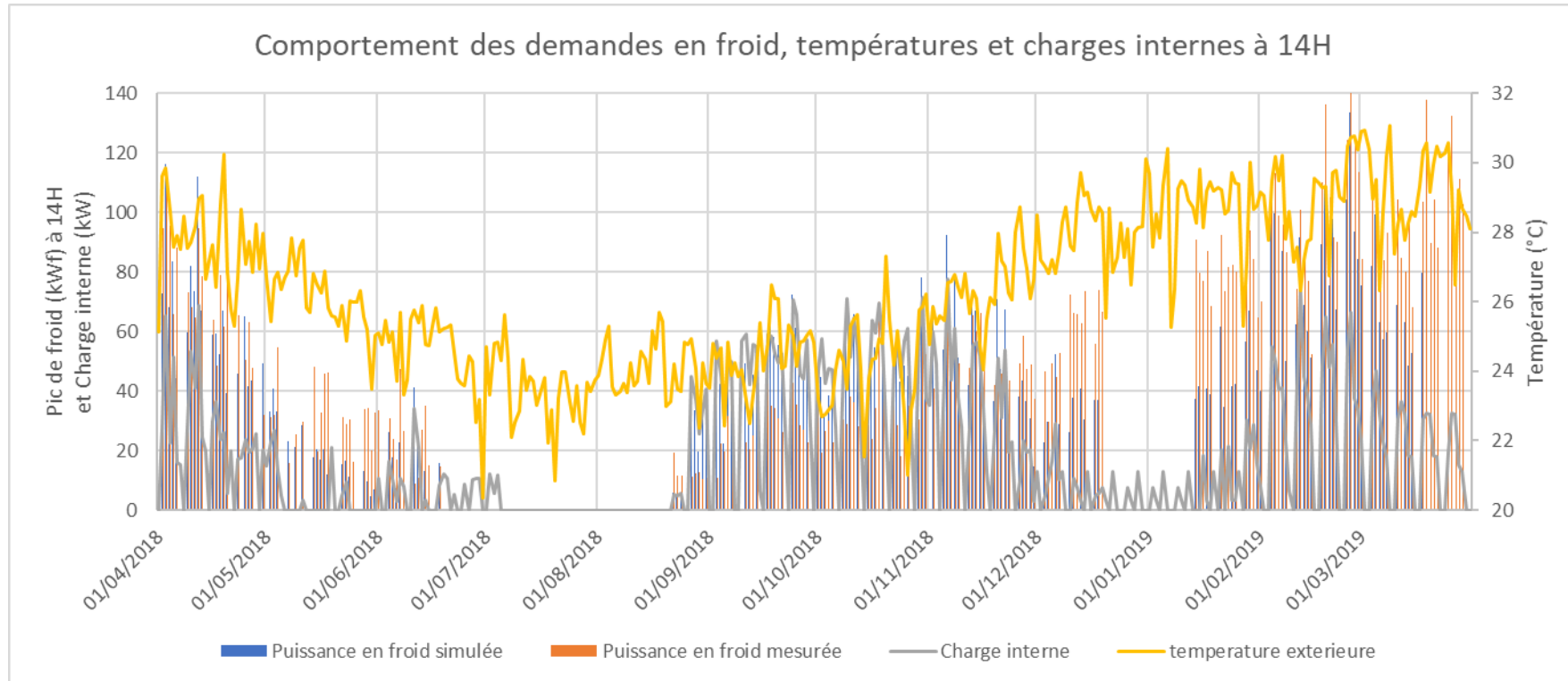
Nous pouvons en déduire une sous-estimation des besoins en froid que propose la STD.

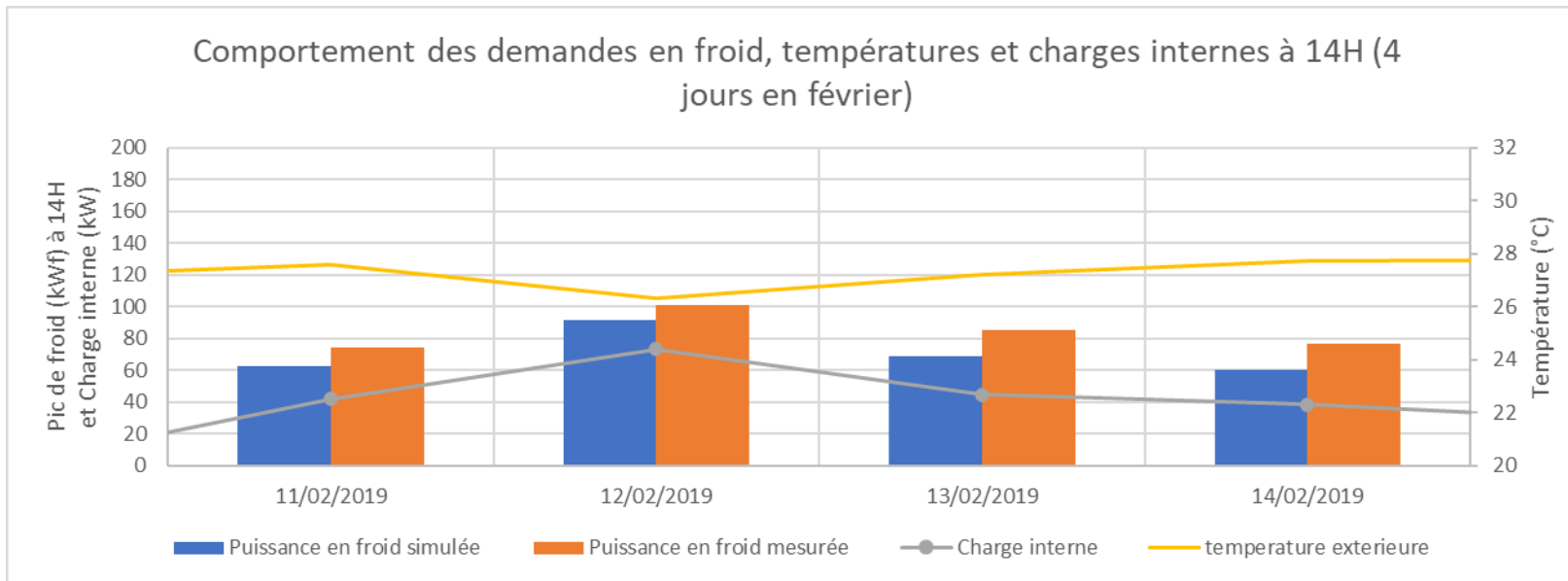
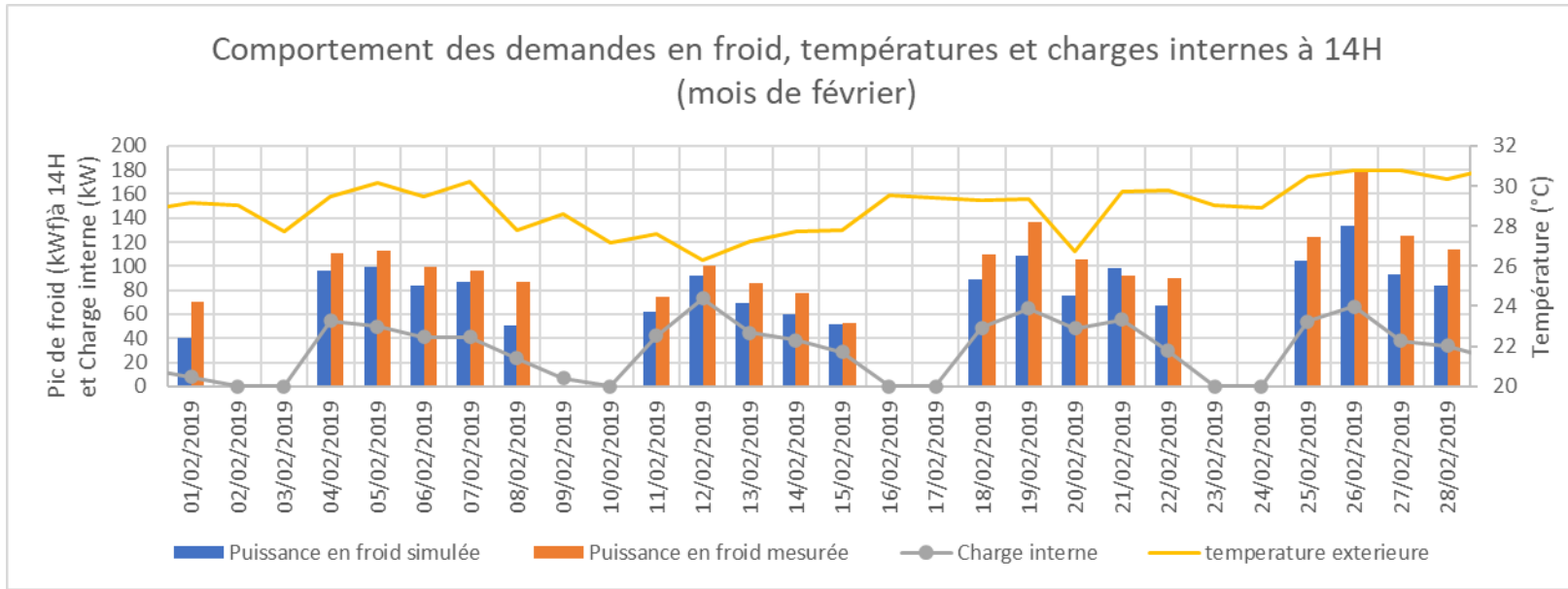
4.3. Analyse du comportement des puissances en froid suivant les charges internes

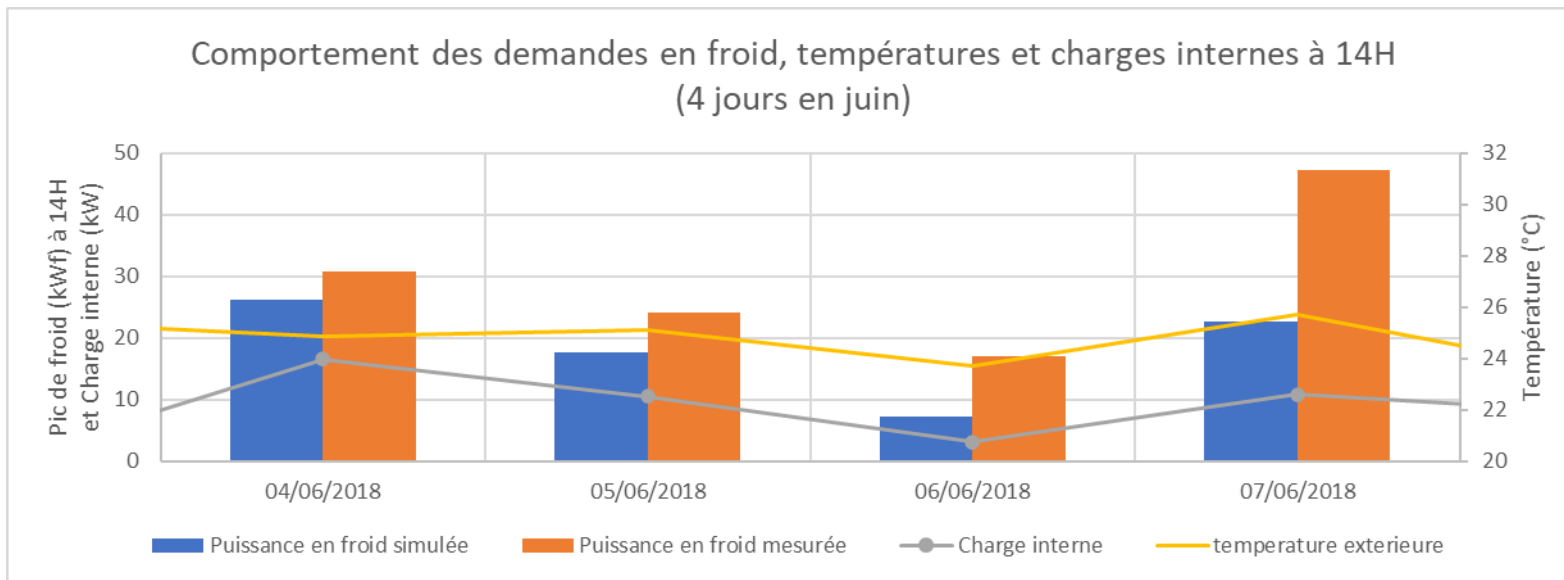
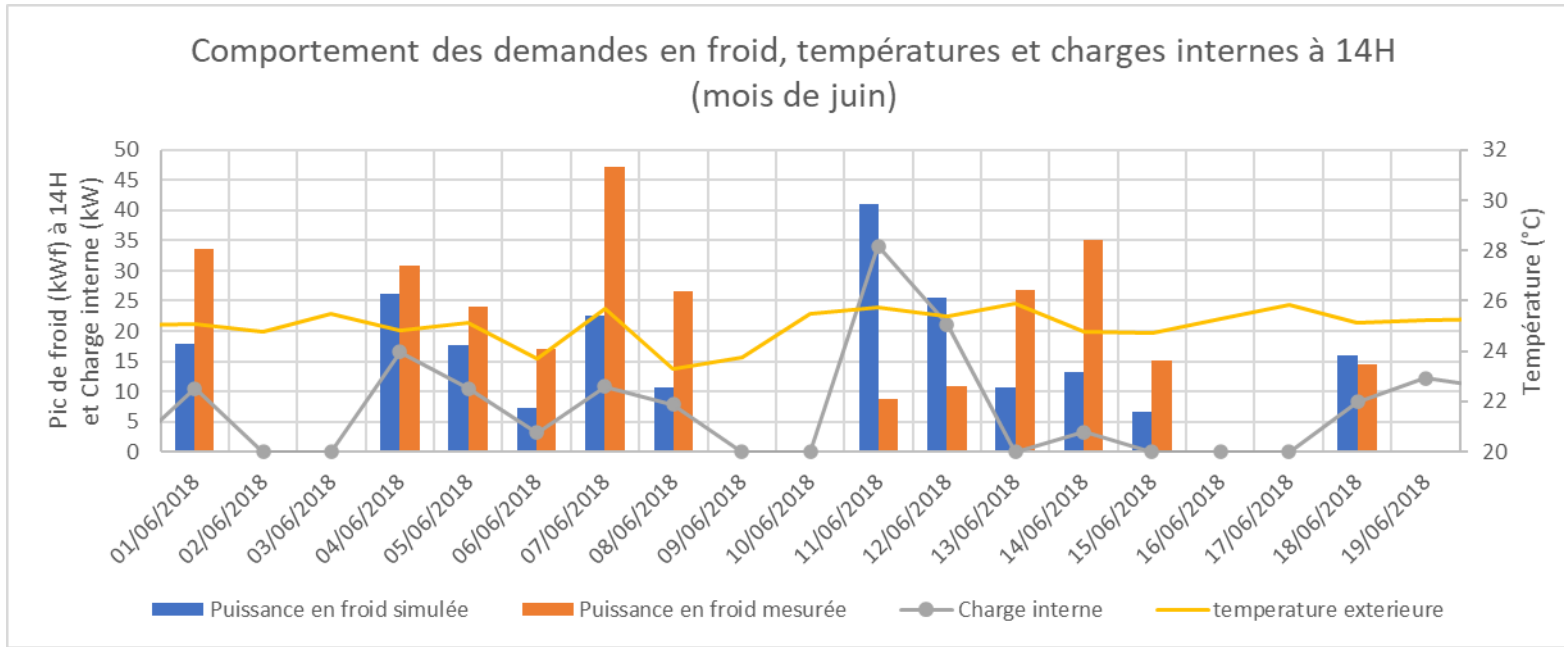
L'application ici vise à observer le comportement des puissances en froid suivant l'évolution des charges internes. Pour cela, nous avons représenté les valeurs journalières à 14H : des puissances en froid de la simulation et des mesures, des températures extérieures et des apports internes.

Les températures extérieures sont extraites du fichier météorologique utilisé pour la simulation (FAC 2018/2019).

Les charges internes regroupent l'ensemble des apports dues à l'occupation et à l'exploitation de la faculté des lettres, issues des hypothèses émises.







En se concentrant uniquement sur les besoins en froid simulés (représentés en bleu), annuellement, nous pouvons constater que **les puissances suivent le profil général des températures** ; plus les températures extérieures sont élevées plus les demandes en froid sont élevées et inversement. Cela rejoint l'analyse faite précédemment entre le comportement en hiver et en été des puissances.

De plus, nous pouvons voir que **ces besoins sont très influencés par l'évolution des apports internes**. Dès lors qu'on a affaire à des charges internes élevées les besoins augmentent et inversement.

Par exemple pour une même température de 25°C le 11/02/19 et 12/02/19, la puissance en froid simulée est plus importante le 11/02 (40kWf) avec une charge interne de 70kW comparé à la puissance du 12/02 (25kWf) avec une charge interne de 21kW.

Ces éléments nous démontrent la liaison directe entre la demande en froid, les conditions extérieures ainsi que les apports internes. D'où, l'importance du choix des hypothèses dès la programmation du modèle.

Si l'on observe le comportement des demandes en froid simulées face à celles mesurées, en été, le delta différence est plus ou moins constant avec des valeurs mesurées toujours supérieures ; en hiver **la différence des valeurs est plus instable**. On peut observer des valeurs simulées par rapport à celles mesurées qui sont : peu inférieure (delta de -6kWf le 04/06/18), très inférieure (delta de -26kWf le 07/06/18), très supérieure (delta de +34kWf).

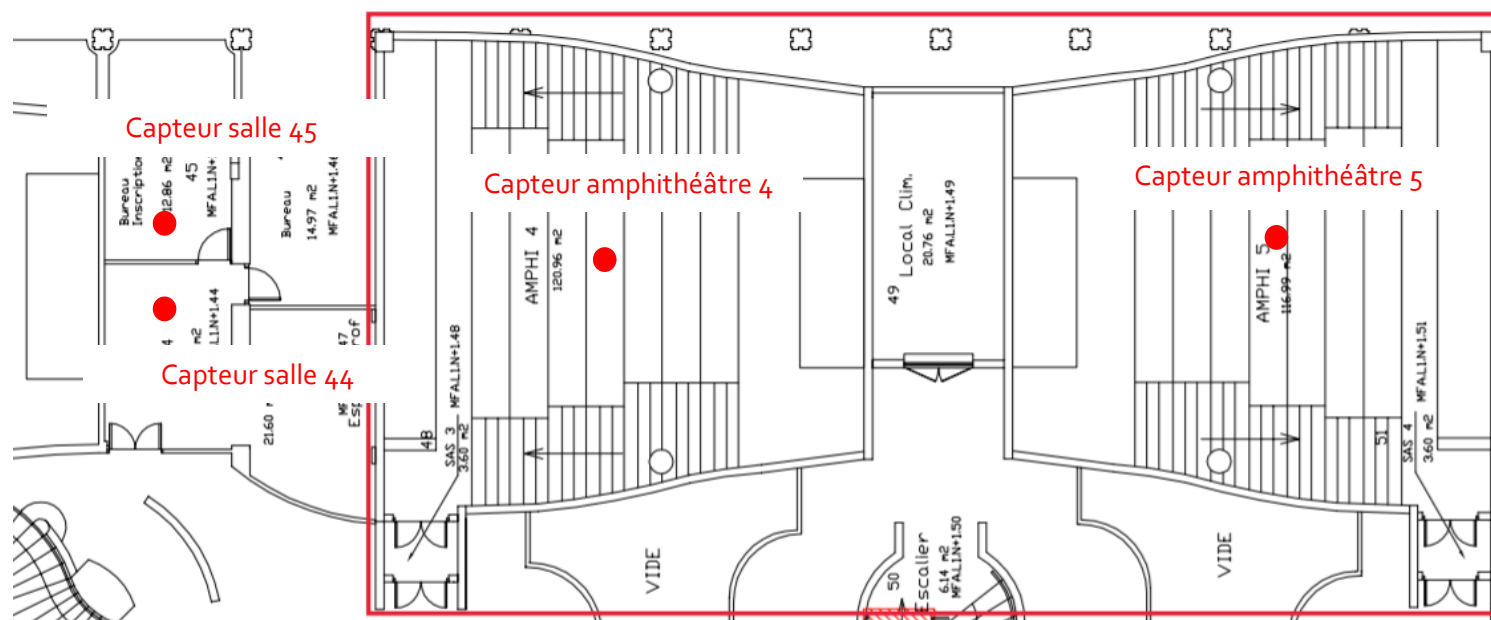
On peut alors conclure que la STD ne représente pas correctement les besoins en froid réels.

4.4. Comparaison mesures / simulation des températures

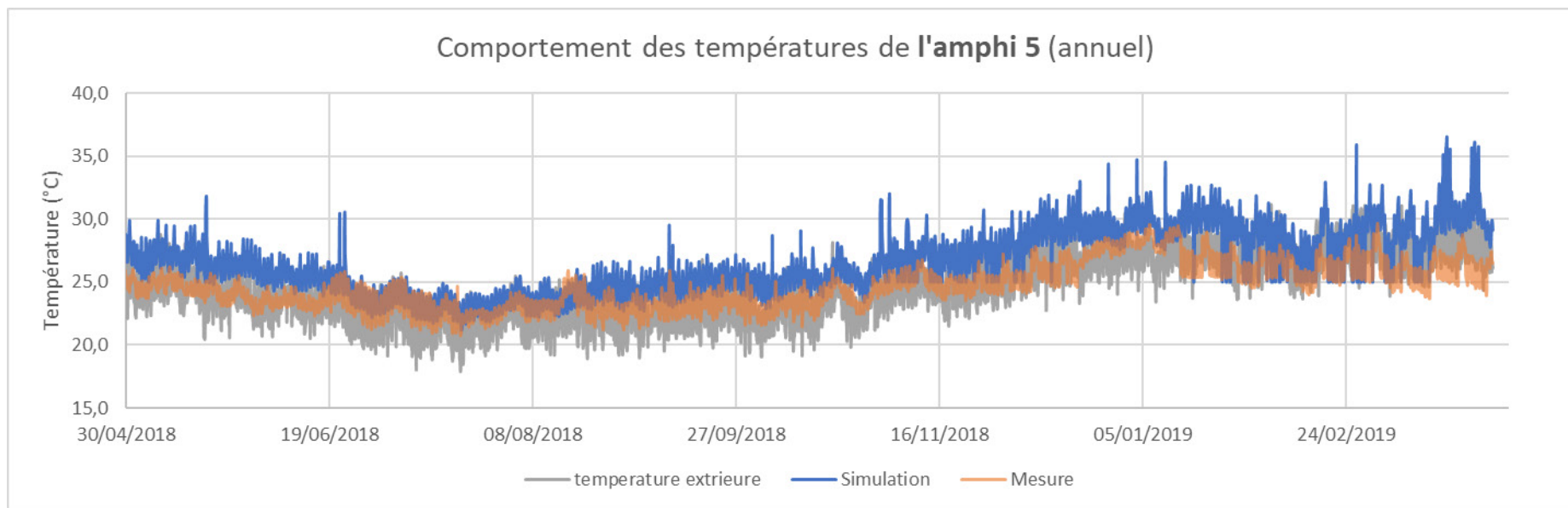
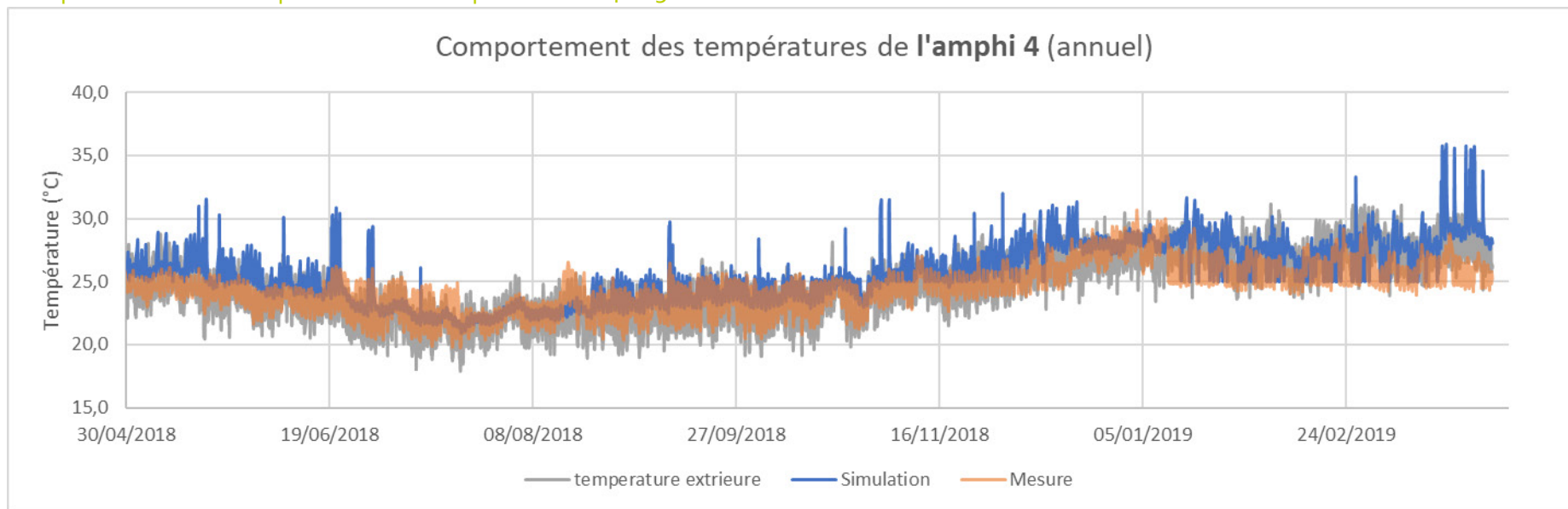
Seules les salles 44 et 45 ainsi que les amphithéâtres 4 et 5 ont été instrumentés. Les mesures de la donnée température seront comparées à celles obtenues par simulation.

Les mesures dans les amphithéâtres s'étendent du 30/04/2018 au 31/03/2019. Celles des salles du 12/12/2018 au 31/03/2019.

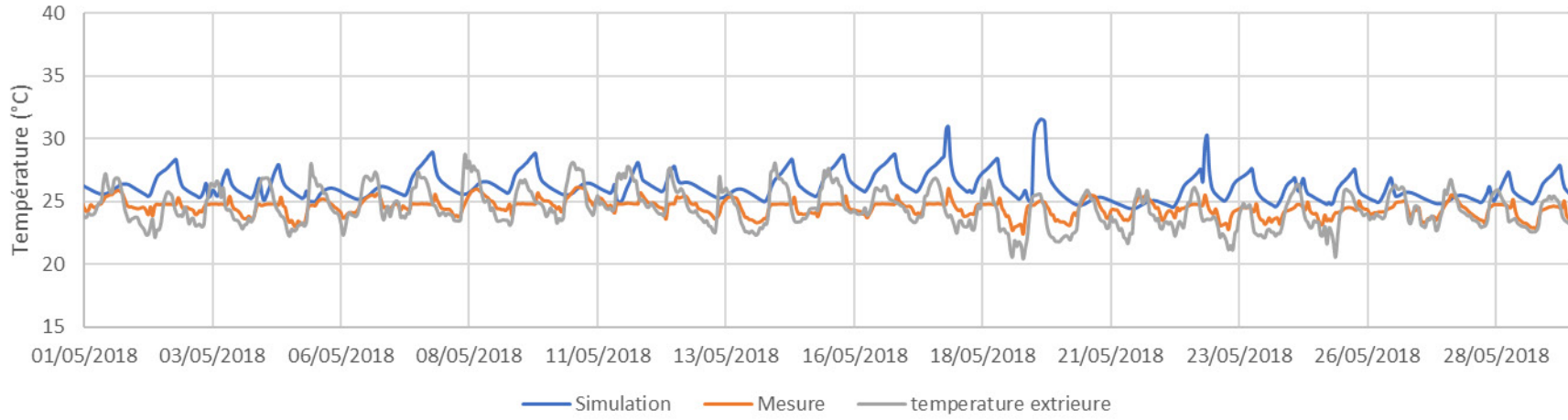
Pour rappel les amphithéâtres sont climatisés par des centrales de traitement d'air, les salles par des ventilo-convecteurs.



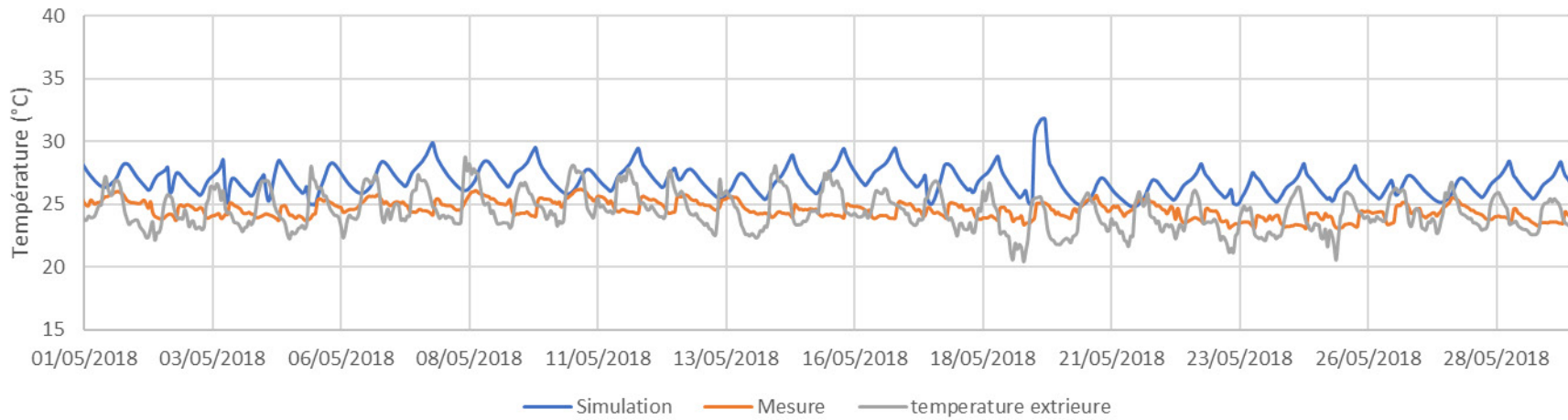
Comportement des températures des amphithéâtres 4 et 5

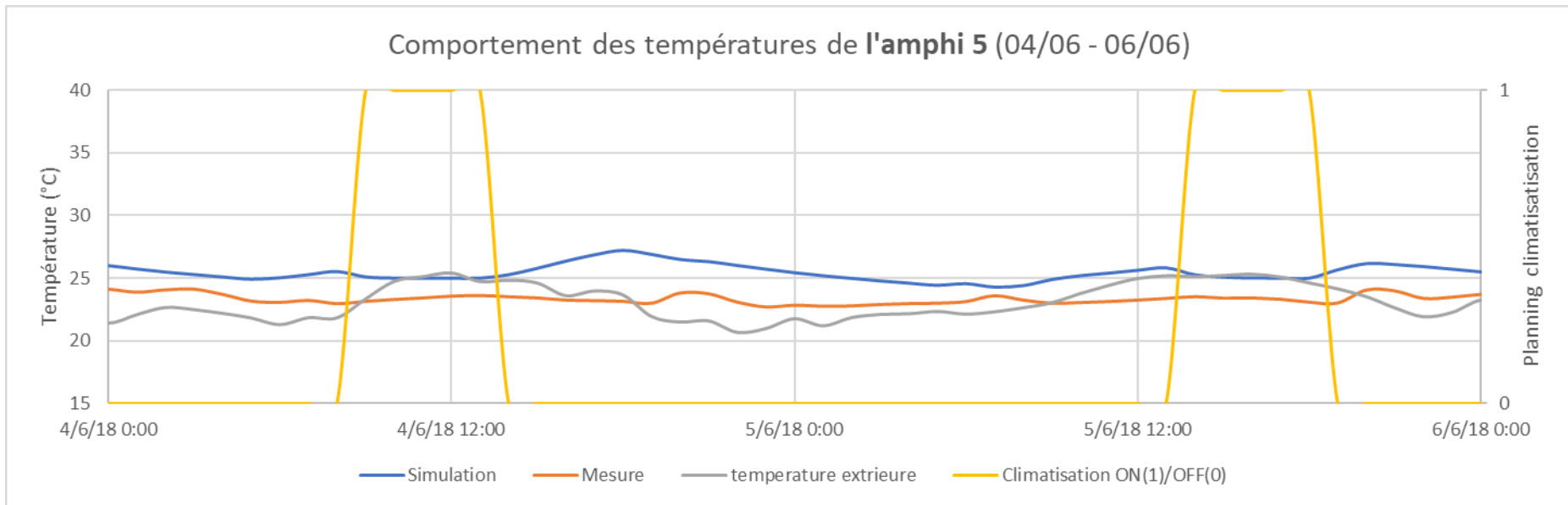
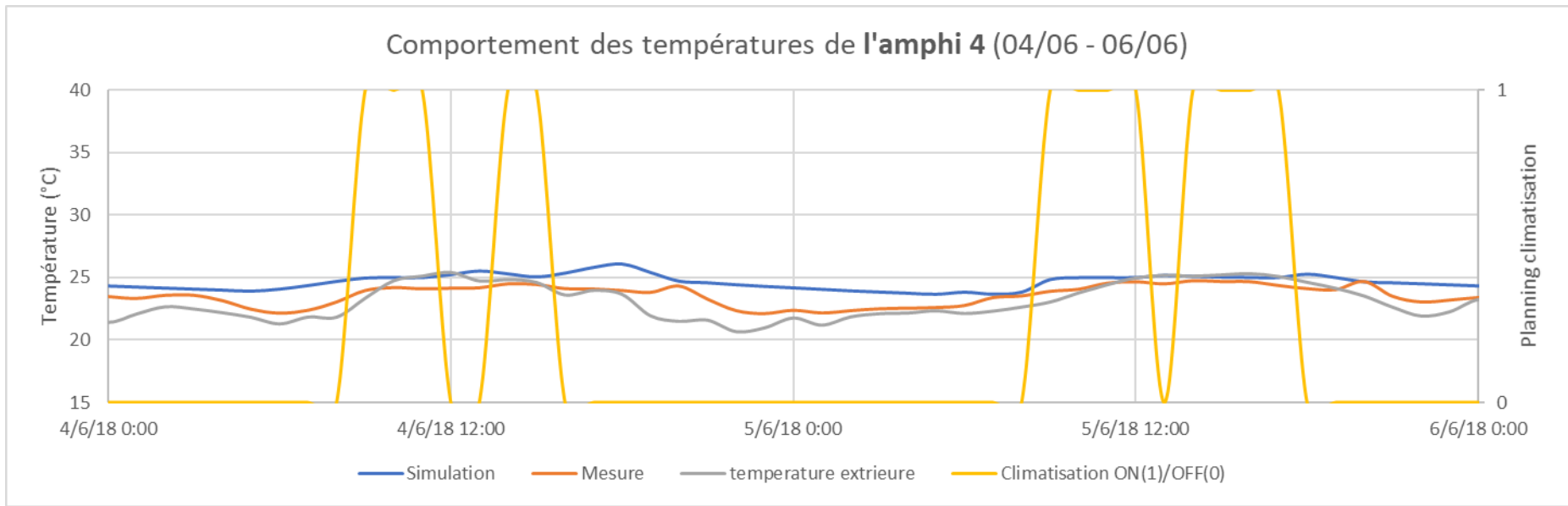


Comportement des températures de l'amphi 4 (mois de mai)

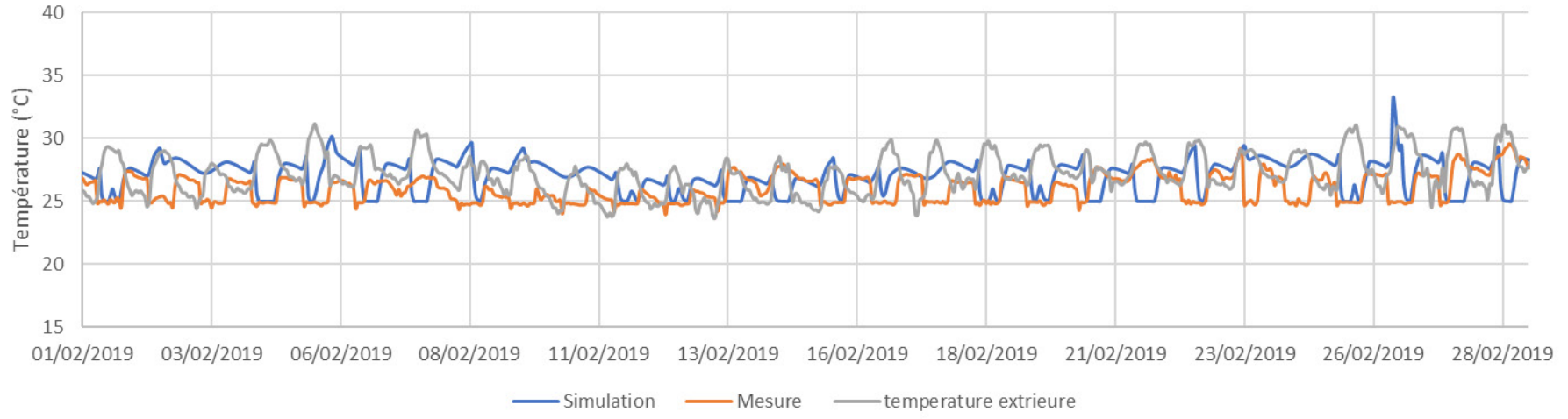


Comportement des températures de l'amphi 5 (mois de mai)

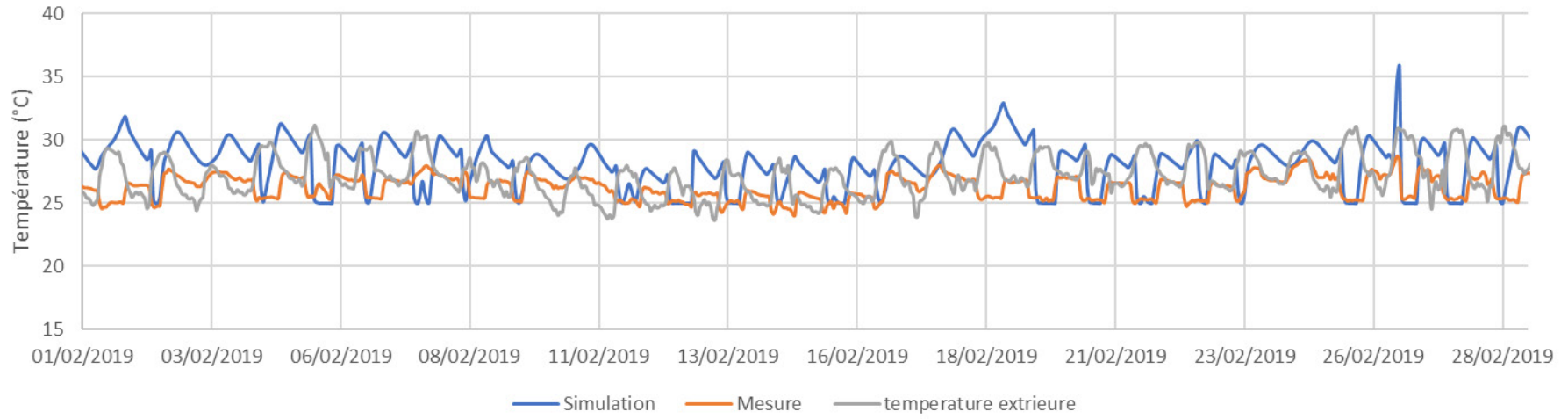


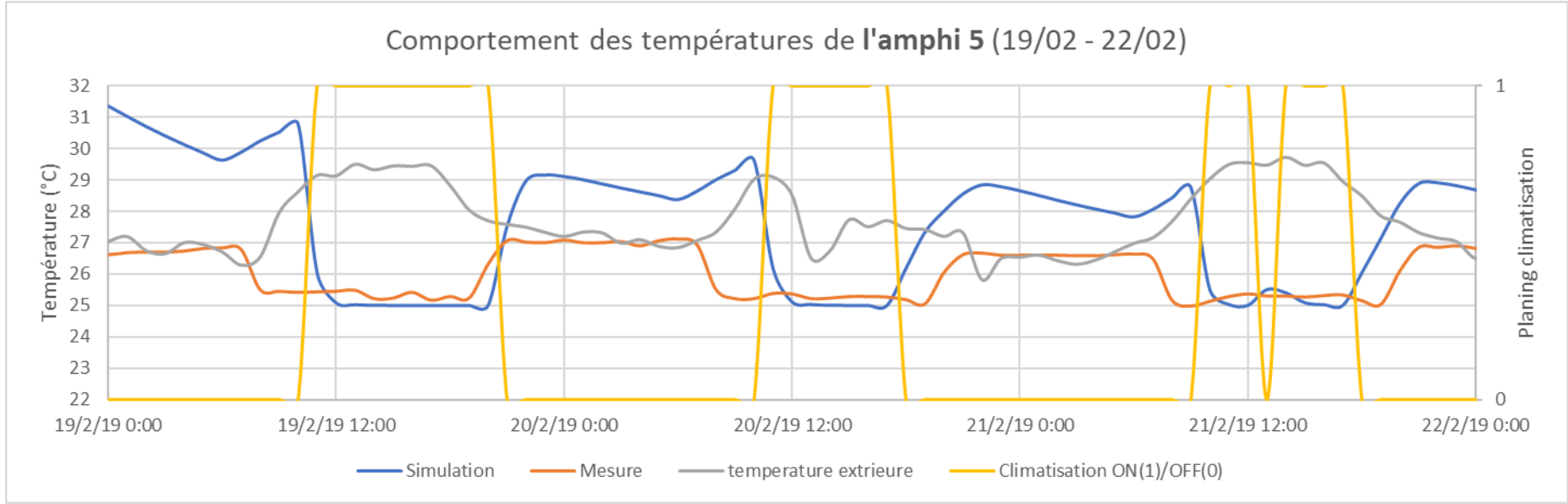
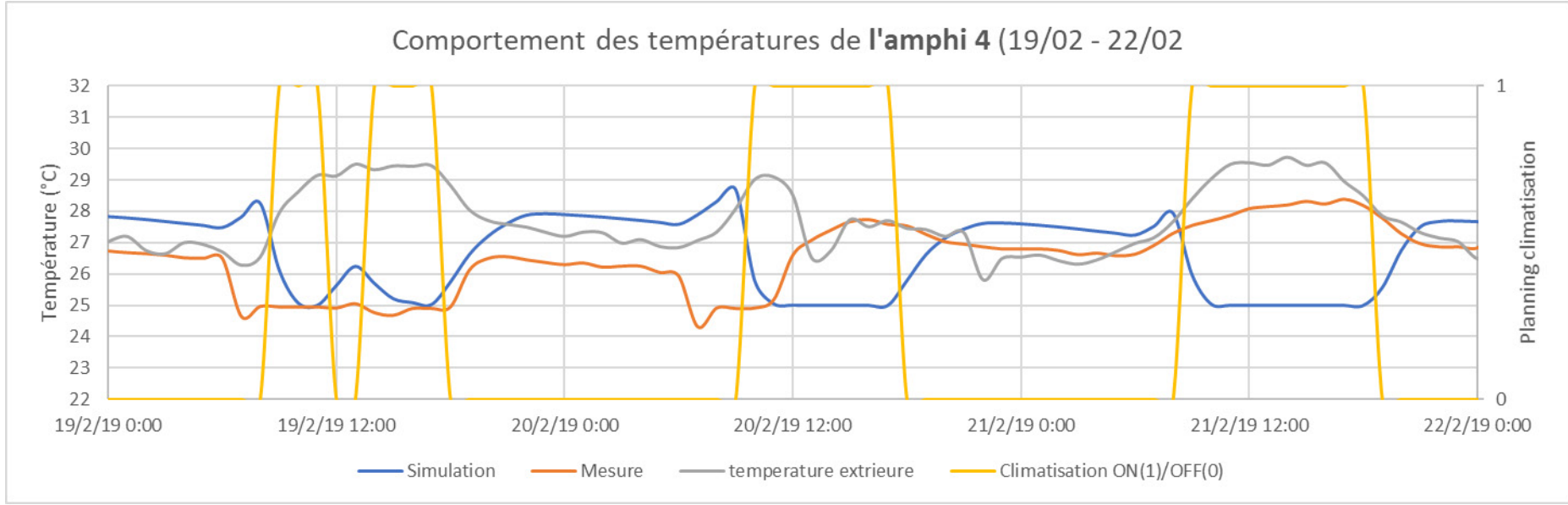


Comportement des températures de l'amphi 4 (février)



Comportement des températures de l'amphi 5 (février)





L'ensemble de ces données nous montre une différence très visible du comportement de l'ensemble des deux sources de données avec des températures simulées généralement supérieures à celles mesurées.

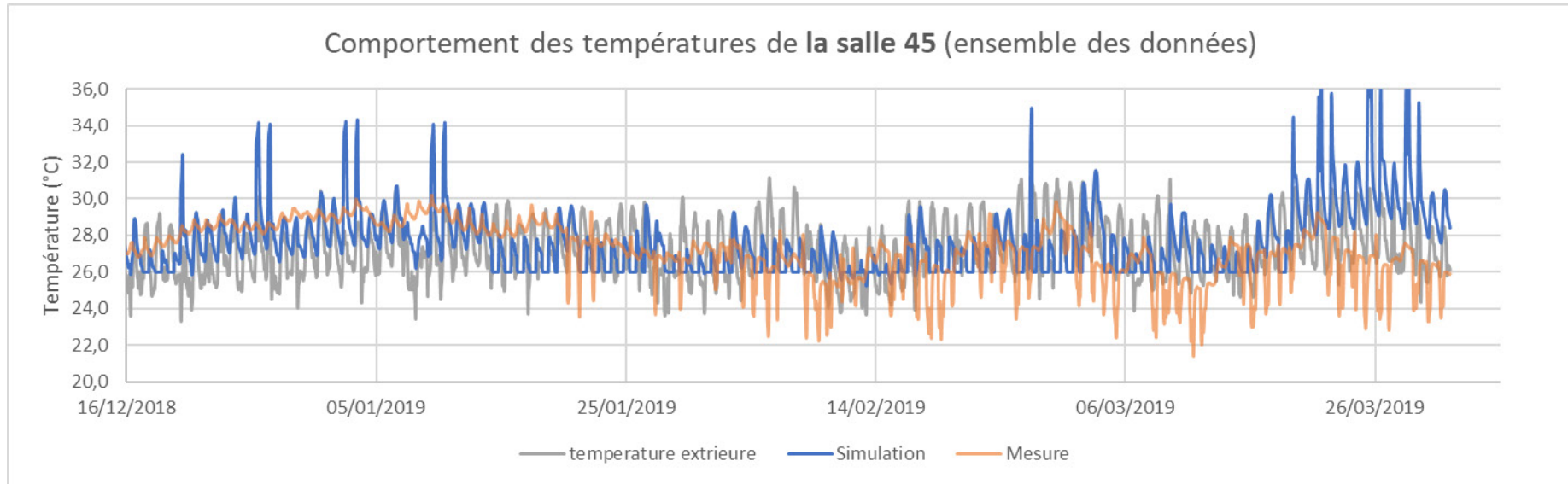
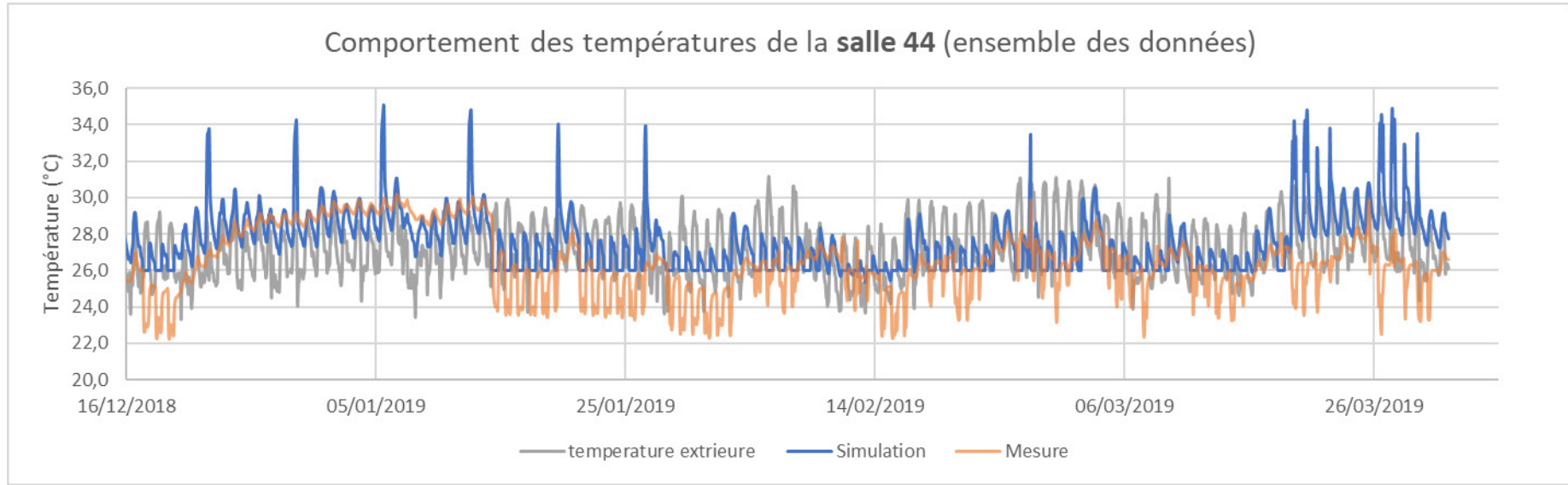
Si l'on se focalise sur les graphiques de 3 jours, nous pouvons voir, en fonction de la mise en route de la climatisation (ON=1, OFF=0) le comportement des températures intérieures. Rappelons que le planning de climatisation a été établi en fonction de l'occupation prévue des salles, disponible en ligne sur le site de l'université.

Les courbes simulées suivent bien le planning de climatisation avec des températures qui se stabilisent à 25°C, représentant la température de consigne. En revanche nous pouvons constater que les courbes mesurées ne suivent pas le même planning de climatisation. Cela s'explique par le changement récurrent du planning en ligne et souligne **la difficulté d'avoir des hypothèses d'occupation cohérentes dans les bâtiments d'enseignement.**

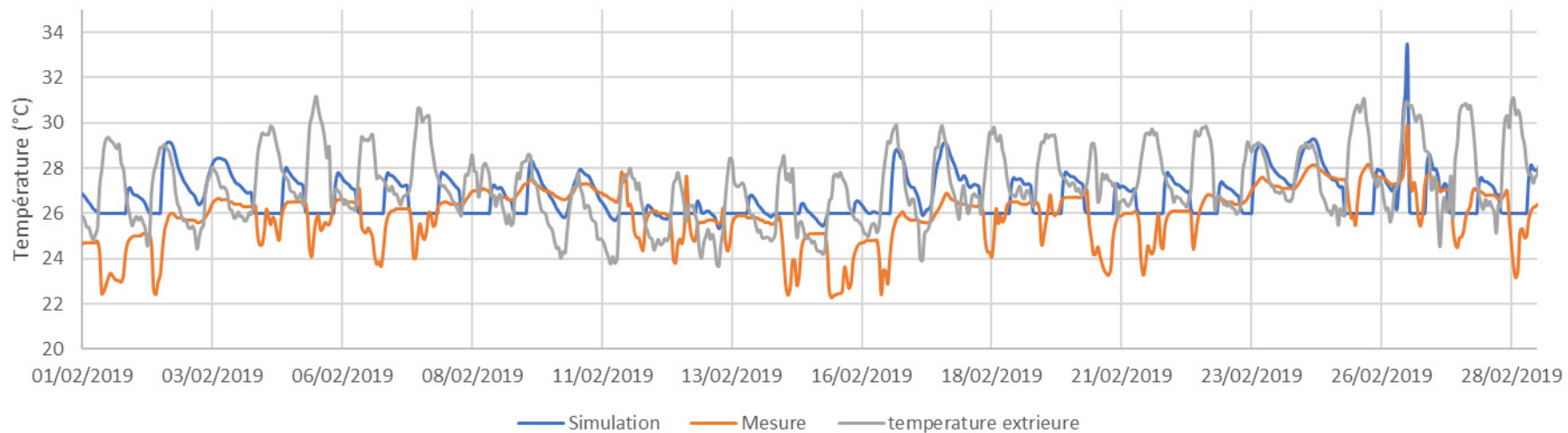
De plus, lors de l'inactivation de la climatisation, nous observons, en été (février) une différence moyenne de 0 à 2°C entre les températures mesurées (qui ne dépasse pas 28°C) et simulées (qui dépasse 28°C). Cette différence est moins visible en période d'hiver due à des températures extérieures plus basses. Mais de manière générale les données mesurées sont toujours inférieures à celles simulées. Après investigation, il a été révélé que le renouvellement d'air de l'ensemble des locaux était actif H24 durant la période de mesure. La configuration de la simulation elle, s'appuyait sur un renouvellement d'air actif uniquement en période d'occupation.

L'évacuation des charges par le renouvellement d'air explique alors les températures inférieures mesurées face à celles simulées en période d'inoccupation.

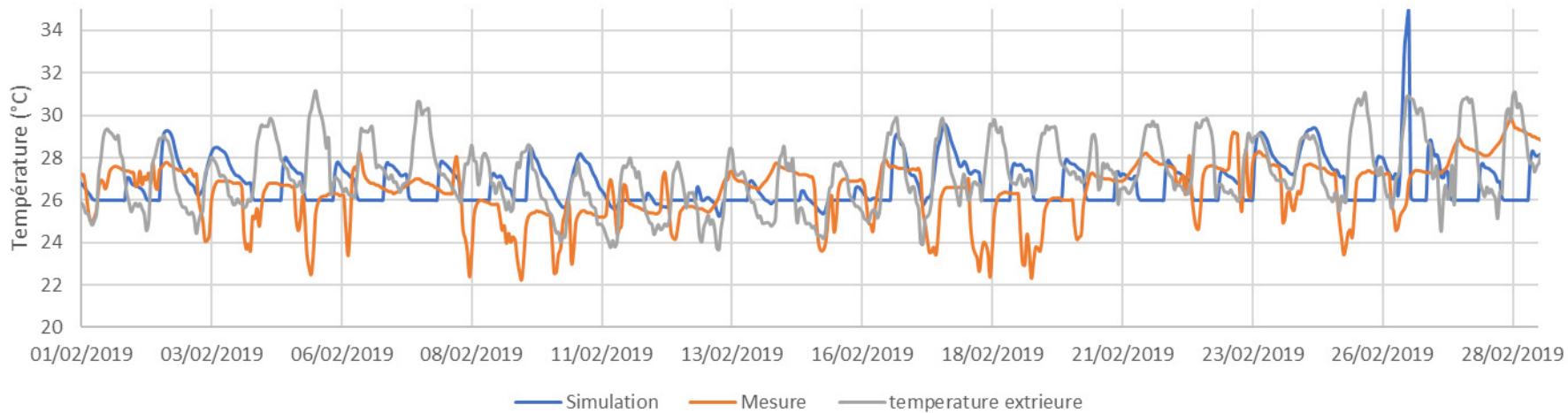
Comportement des températures des salles 44 et 45



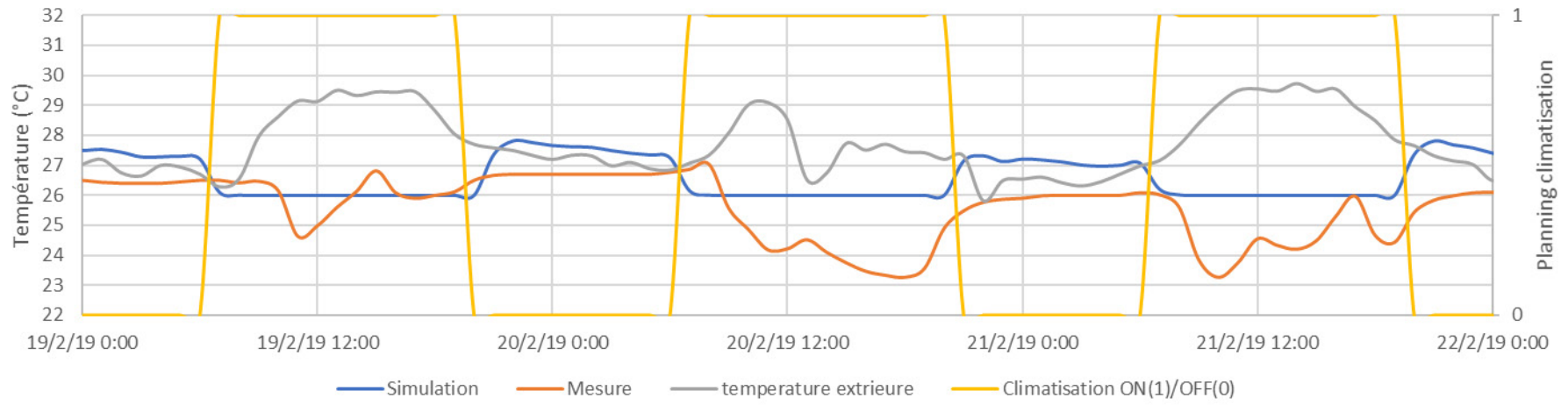
Comportement des températures de la **salle 44** (mois de février)



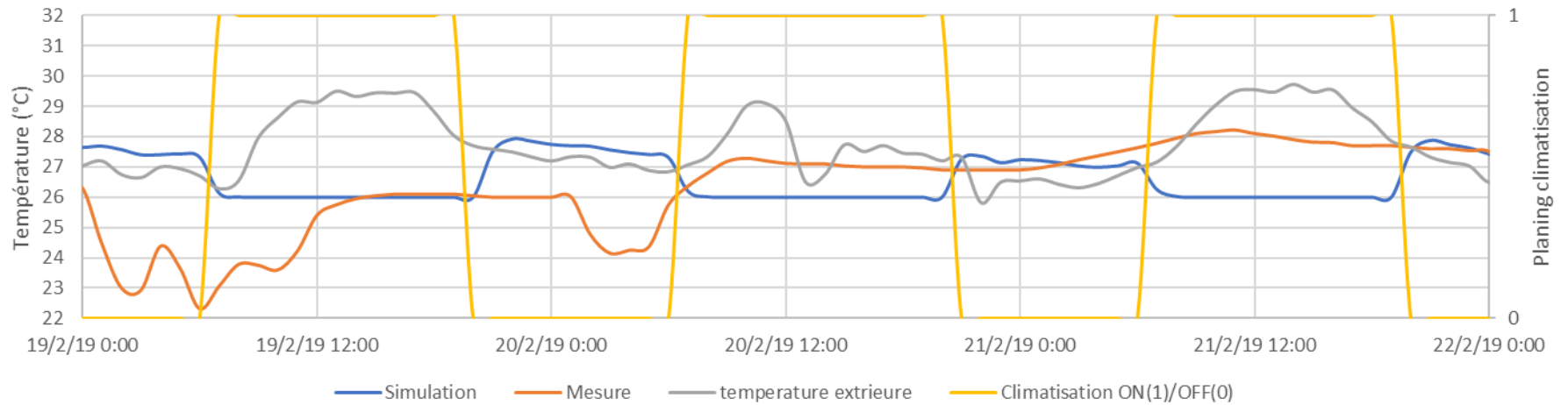
Comportement des températures de la **salle 45** (mois de février)



Comportement des températures de la **salle 44** (19/02 - 22/02)



Comportement des températures de la **salle 45** (19/02 - 22/02)



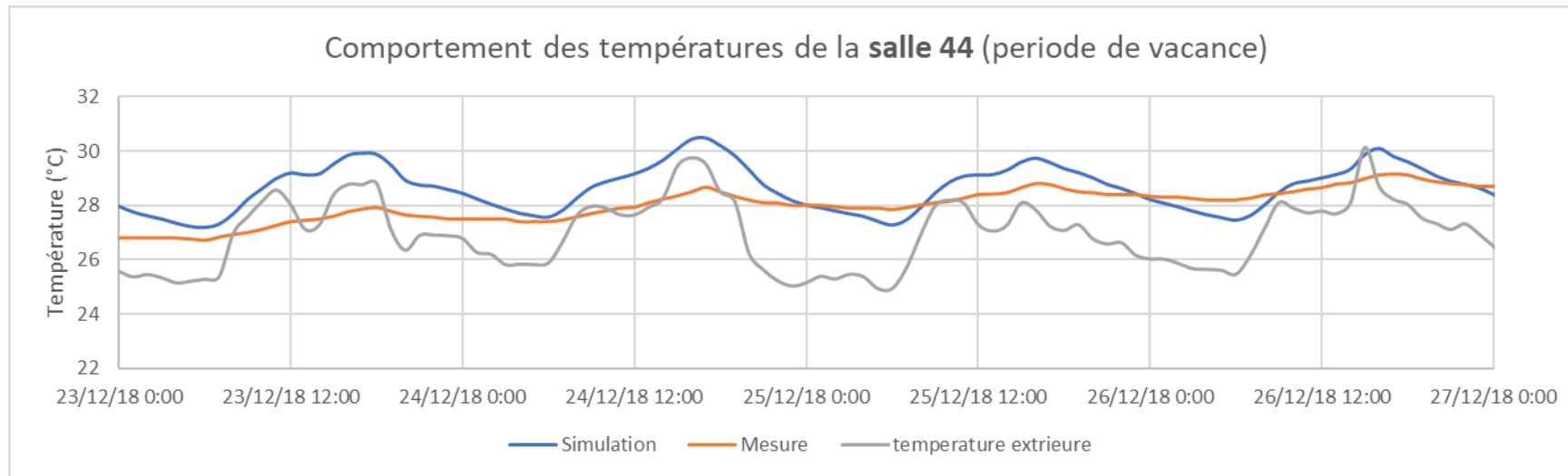
Pour les salles 44 et 45, on constate comme précédemment, de nettes différences entre les deux sources de données.

Lors de l'activation de la climatisation, les températures simulées se fixent à la température de consigne de 26°C tandis que les températures mesurées chutent au-dessous de 25°C.

On peut dire que **les occupants en période d'hiver ont une demande de confort en température inférieure à la température de consigne simulée** (entre 0 et 3°C de différence).

Autrement, les mêmes remarques sont similaires à celles évoquées précédemment :

- En période d'inoccupation, la décharge thermique due au renouvellement d'air n'est pas prise en compte dans la STD et entraîne des températures simulées plus élevées que celles mesurées.
- On observe une différence entre le planning de climatisation simulé et l'exploitation réelle de la climatisation.



Si l'on regarde le comportement des températures lors de la période de vacances (ci-dessous), nous constatons que le modèle STD propose des températures qui varient de manière beaucoup plus accentuée que les valeurs mesurées. Ces valeurs suivent le comportement des températures extérieures tandis que les valeurs mesurées sont lissées et varient peu. Ce lissage est dû au comportement inertiel des matériaux.

Cela signifie que **le caractère inertiel des matériaux du modèle est sous-estimé par rapport au comportement réel du bâti.**

Conclusion

Dans notre cas, le modèle de simulation construit est issu d'un travail d'échanges, de visites et d'hypothèses pour essayer de se rapprocher du fonctionnement réel.

Notre étude ici visait à comparer les résultats obtenus en simulation face aux mesures sur le site en fonctionnement.

Nous avons comparé les résultats et analysé la justesse des résultats de la STD et ses limites.

Analyse de l'influence des données climatologiques

L'ensemble des résultats sont directement liés au choix des données météorologiques de référence.

Nous avons donc comparé les résultats de deux simulations avec deux fichiers météorologiques différents. L'un est celui de Gillot pour l'année 2006. A partir de ce fichier, les données enregistrées sur le site de la Fac (2018 et 2019) ont été incluses pour obtenir un second fichier météorologique avec des données correspondant à nos périodes de l'étude.

En se basant sur l'indicateur des courbes des fréquences cumulées, nous avons pu voir **l'importance de la variation des résultats suivant la source des données météorologiques**. On en déduit que **l'ancienneté des données et la localisation** sont des paramètres impactant directement la fiabilité des résultats. Lorsque cela est possible, la création d'un fichier météorologique avec des données plus récentes et fiables est de rigueur.

Analyse de la comparative mesure / simulation des puissances en froid

D'un point de vue général, avec un coefficient R² faible de 0.5 les résultats obtenus témoignent d'une sous-estimation des besoins en froid que propose la STD.

L'appel de puissance maximale ainsi que les consommations annuelles sont plus élevés pour les mesures : une différence d'un appel de puissance de -21% et une différence d'une consommation de -48% entre simulation et mesure (valeur correspondante à une fréquence cumulée des puissances supérieur à 10%).

On peut rajouter que les pics de puissances importantes observées en début de semaine **est dues aux relances des systèmes (refroidissement du réseau d'eau)**. **Cela n'est pas lié aux besoins réels du bâtiment. La STD ici ne représente pas cet aspect du comportement du système de climatisation.**

Analyse du comportement des puissances en froid suivant les charges internes

Nous avons pu voir qu'il y a une liaison directe importante entre la demande en froid, les conditions extérieures ainsi que les apports internes. D'où, l'importance du choix des hypothèses dès la programmation du modèle.

Analyse de la comparative mesure / simulation des températures

Ici, une différence très visible du comportement de l'ensemble des deux sources de données est relevée avec des températures simulées généralement supérieures à celles mesurées.

Cela s'explique par la contradiction du planning d'occupation initialement prévu avec l'occupation du site au moment des mesures et souligne **la difficulté d'avoir des hypothèses d'occupation cohérentes dans les bâtiments d'enseignement.**

De plus pour les salles de cours, les valeurs mesurées ne respectent pas la température de consigne prévue à la simulation.

Conclusion générale

Globalement, les résultats de la STD restent critiquables sur de nombreux paramètres. L'appel de puissance dimensionnante est sous-estimé de -21%.

Cela vient principalement des hypothèses établies, paramètres très sensibles, qui se traduit par :

- Une sous-estimation des charges internes
- Un planning d'occupation éloigné de la réalité (problème récurrent dans les études d'établissements scolaires)
- En période d'inoccupation, la décharge thermique due au renouvellement d'air n'était pas programmée dans la STD et entraîne des différences dans les résultats.

De plus, le comportement inertiel du bâti n'est pas correctement considéré dans la simulation, ce qui induit un manque de besoin en froid important et un comportement des températures différent de la réalité.