



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

MESURES DES DONNÉES ÉNERGÉTIQUES D'UNE POMPE À CHALEUR AIR/EAU AU CO₂ (R744) POUR PRÉPARATION D'EAU CHAUDE SANITAIRE DANS UN HÔPITAL



Rapport final

Ausgearbeitet durch

Patrice Anstett, Pac-co2.ch / Recherche & Développement

Case postale 54 CH-2009 Neuchâtel, patrice.anstett@pac-co2.ch, <http://www.pac-co2.ch>

Impressum

Datum: 30. November 2006

Im Auftrag des Bundesamt für Energie, Forschungsprogramm UAW Umgebungswärme, Wärme-Kraft-Kopplung, Kälte

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen

Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. +41 31 322 56 11, Fax +41 31 323 25 00

www.bfe.admin.ch

BFE-Projektleiter F&E: Thomas Kopp tkopp@hsr.ch

BFE-Bereichsleiter: Fabrice Rognon fabrice.rognon@bfe.admin.ch

Projektnummer: 100772

Bezugsort der Publikation: www.energieforschung.ch

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

Table des matières

Resumé	2
Abstract	2
1. Situation de départ	3
2. But du travail.....	3
Spécifications techniques de la PAC air/eau.....	5
Résultats théoriques attendus	5
4. Résultats.....	8
Scéma de principe de l'installation	8
Introduction	8
Valeurs relevées	8
Première génération	10
Mesures relevées	10
Interprétation des résultats	10
Graphiques	11
Eau chaude 60 °C, eau froide 10 °C.....	11
Eau chaude 60 °C, eau froide 15 °C.....	12
Eau chaude 60 °C, eau froide 20 °C.....	13
Eau chaude 60 °C, eau froide 25 °C.....	14
Eau chaude 60 °C, eau froide 45 °C.....	15
Eau chaude 60 °C, eau froide 50 °C.....	16
Eau chaude 65 °C, eau froide 10 °C.....	17
Eau chaude 65 °C, eau froide 15 °C.....	18
Eau chaude 65 °C, eau froide 20 °C.....	19
Eau chaude 65 °C, eau froide 25 °C.....	20
Eau chaude 65 °C, eau froide 45 °C.....	21
Eau chaude 65 °C, eau froide 50 °C.....	22
Eau chaude 70 °C, eau froide 10 °C.....	23
Eau chaude 70 °C, eau froide 15 °C.....	24
Eau chaude 70 °C, eau froide 20 °C.....	25
Eau chaude 70 °C, eau froide 25 °C.....	26
Eau chaude 70 °C, eau froide 45 °C.....	27
Eau chaude 70 °C, eau froide 50 °C.....	28
Eau chaude 75 °C, eau froide 10 °C.....	29
Eau chaude 75 °C, eau froide 15 °C.....	30
Eau chaude 75 °C, eau froide 20 °C.....	31
Eau chaude 75 °C, eau froide 25 °C.....	32
Eau chaude 75 °C, eau froide 45 °C.....	33
Eau chaude 75 °C, eau froide 50 °C.....	34
6. Conclusion.....	36
Comparaison valeurs théoriques-mesurées.....	36

Références	41
Annexes.....	41

Resumé

Ce projet a pour objectif d'explorer les capacités d'une pompe à chaleur air/eau d'une puissance de 60 kW utilisant comme gaz réfrigérant du CO₂ ou R744 pour la préparation d'eau chaude sanitaire sur le site de l'Hôpital du Locle (NE). Le but est d'obtenir une production d'eau chaude sanitaire allant de 60 °C à 80 °C à partir d'eau froide à 10 °C.

La campagne de mesures permettra de vérifier en temps réel le coefficient de performance (COP) de la pompe à chaleur à différentes conditions d'utilisation (la température de l'eau froide notamment), mais aussi de le vérifier sur une longue période afin de pouvoir analyser son fonctionnement selon les conditions saisonnières.

Nous avons profité de la rénovation et l'expansion de l'Hôpital du Locle (canton de Neuchâtel, Suisse) pour installer une pompe à chaleur air/eau de 60kW pour remplacer la chaudière à gaz existante utilisée pour la production d'eau chaude sanitaire.

Cette pompe est un prototype utilisant, comme gaz réfrigérant, du CO₂ (connu aussi sous la dénomination de R744), qui permet d'atteindre des températures d'eau de 80 °C, condition indispensable pour un hôpital (en raison des risques de salmonelle).

L'installation est entièrement conçue pour une exploitation optimale de l'Hôpital du Locle, mais aussi pour assurer une campagne de mesures intéressante. Effectivement :

- la durée de la campagne permettra d'obtenir des relevés à différentes saisons de l'année (donc des températures d'air extérieur de -20 à +30/40 °C)
- la température d'eau froide pourra être facilement modifiée (grâce à la conception particulière du circuit hydraulique) afin de constater le fonctionnement de la pompe à chaleur à des conditions extrêmes.

Le serveur Web, directement relié à la machine, servira de passerelle entre le local chaufferie et l'Internet ; ainsi :

- les mesures prises en différents points de l'installation seront visualisées en direct
- 2 bases de données seront "nourries", stockant de manière redondante l'intégralité des valeurs mesurées lors de la campagne.

La pratique nous a montré que la PAC devrait être utilisée comme système de préchauffage d'eau chaude à 60 °C et pour une entrée d'eau froide garantie de 10 à maximum 15 °C, sans accumulateur !

Abstract

The main objective of this project is to explore the capacities of a 60 kW air/water heat pump using CO₂ (or R744) as refrigerant for the production of hot water at the Le Locle hospital (canton of Neuchâtel, Switzerland). The goal is to produce hot water with a temperature of 60 ° to 80 °C from cold water at a temperature of 10 °C.

The project will permit real-time measurement of the coefficient of performance of the heat pump under differing conditions of use (e.g. changes in the temperature of the cold water), as well as its verification over an extended period of time in order to evaluate its performance under changing seasonal conditions.

We used the renovation and expansion of the Le Locle hospital (canton of Neuchâtel, Switzerland), as an opportunity to install a 60 kW air/water heat pump to replace the existing gas-fired system for the production of hot water.

The heat pump concerned is a prototype that uses CO₂ (also known as R744) as the refrigerant and permits the production of water with a temperature of 80 °C, which is an essential requirement for a hospital in order to prevent the occurrence of salmonella.

The system was specially designed for optimum use at the Le Locle hospital, as well as to permit real-time measurement of a wide range of data:

- The lengthy measurement period will enable us to obtain seasonal data (i.e. with external air temperatures ranging from -20 to $+30/40^{\circ}\text{C}$)
- Thanks to the special design of the hydronic circuit, it will also be possible for us to adjust the temperature of the cold water in order to measure the performance of the heat pump under extreme conditions.

A web server connected directly to the heat pump functions as a link between the boiler room and the Internet. In this way:

- Readings obtained from different sections of the system can be viewed in real time
- Information is fed into two data bases, so that all measurement data are stored redundantly throughout the duration of the project.

The reality has shown us that the PAC should be used only to produce hot water from cold water between 10 and 15°C as a maximum, without accumulator!

1. Situation de départ

Profitant des rénovations et de l'agrandissement de l'Hôpital de Locle (NE), nous avons installé une pompe à chaleur air/eau d'une puissance de 60 kW , en remplacement de l'actuelle chaudière à gaz, pour la production d'eau chaude sanitaire.

2. But du travail

Cette pompe est un prototype utilisant, comme gaz réfrigérant, du CO_2 (connu aussi sous la dénomination de R744), qui permet d'atteindre des températures d'eau de 80°C , condition indispensable pour un hôpital (en raison des risques de salmonelle).

L'installation est entièrement conçue pour une exploitation optimale de l'Hôpital du Locle, mais aussi pour assurer une campagne de mesures intéressante. Effectivement :

- la durée de la campagne permettra d'obtenir des relevés à différentes saisons de l'année (donc des températures d'air extérieur de -20 à $+30/40^{\circ}\text{C}$)
- la température d'eau froide pourra être facilement modifiée (grâce à la conception particulière du circuit hydraulique) afin de constater le fonctionnement de la pompe à chaleur à des conditions extrêmes.

Le serveur Web, directement relié à la machine, servira de passerelle entre le local chaufferie et l'Internet ; ainsi :

- les mesures prises en différents points de l'installation seront visualisées en direct
- 2 bases de données seront "nourries", stockant de manière redondante l'intégralité des valeurs mesurées lors de la campagne.

Les personnes concernées pourront consulter les résultats stockés et actuels, via le site Internet de pac-co2 (<http://www.pac-co2.com>).

Seront accessibles les données suivantes :

- les puissances thermiques $[\text{kW}]$ dégagées par la pompe à chaleur
- les coefficients de performance de la pompe à chaleur.

Les données spécifiques de la pompe à chaleur, fournies par l'entreprise Axair Kobra, et les autres données, fournies par Siemens Building Technologies, sont centralisées par Axair Kobra sur le serveur Web, ce qui permet d'assurer la relation entre les différentes valeurs, car elles sont toutes disponibles en temps réel sur le même média.

Valeurs du local chaufferie :

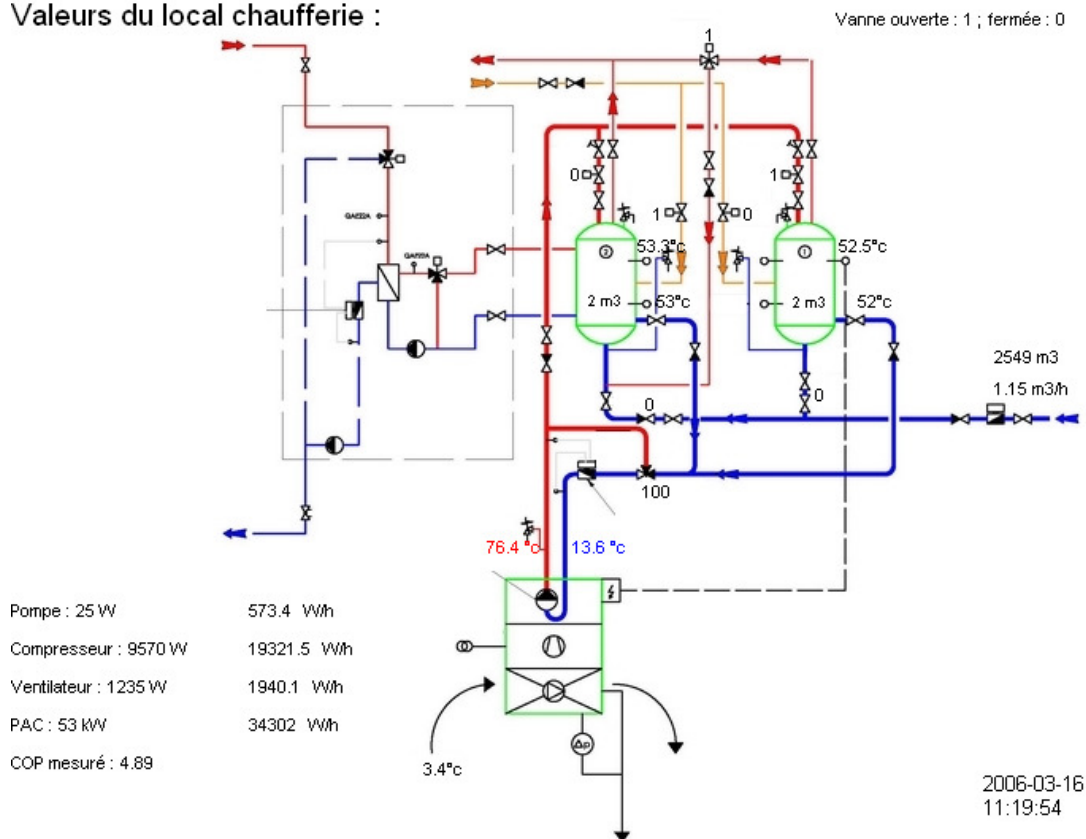


Figure 1 : schéma de principe de l'installation

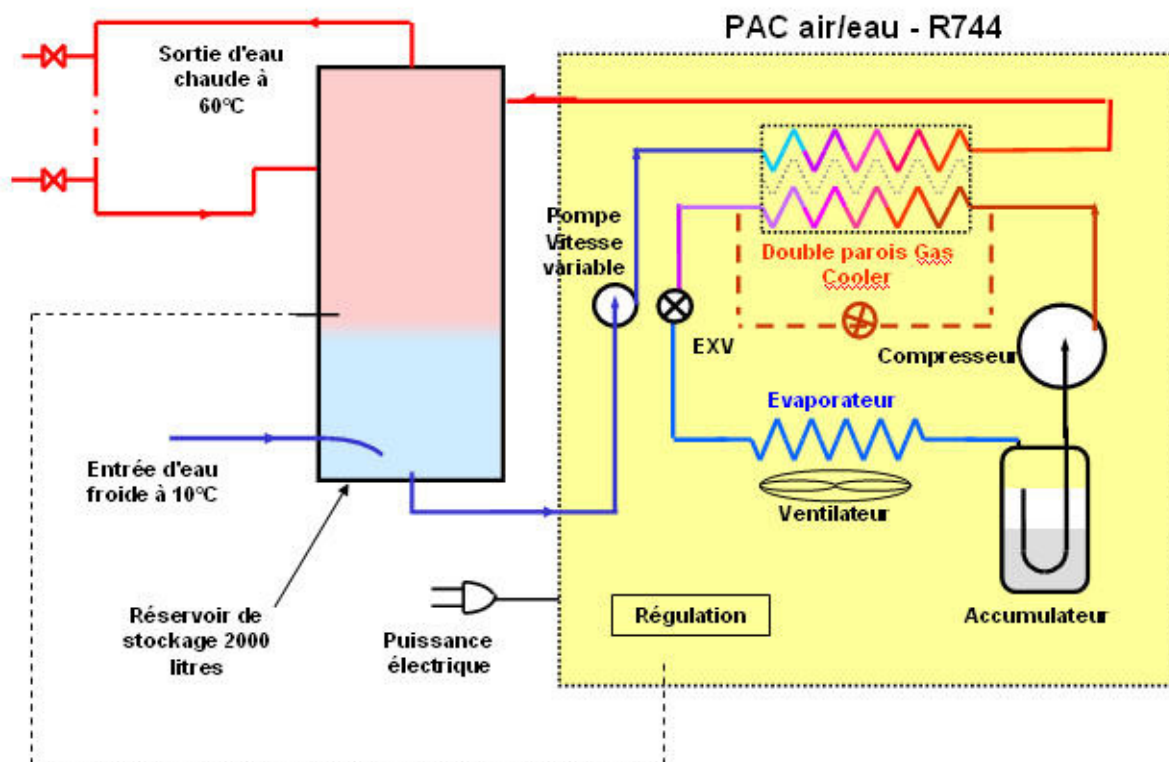


Figure 2 : Schéma de principe de la PAC

SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES DE LA PAC AIR/EAU

- Puissance calorifique nette :	60 kW
- Masse de fluide frigorigène CO ₂ :	6 kg
- Compresseur à pistons.	
- Puissance absorbée (compresseur, ventilateur et pompe) :	21 kW
- Débit d'air total (grande vitesse) :	3700 l/s

Plage de fonctionnement :

Echangeur à eau (condenseur)	Minimum °C	Maximum °C
Temp entrée d'eau (au démarrage)	3	70
Temp sortie d'eau (en fonctionnement)	50	80
Temp entrée d'eau (à l'arrêt)	3	70
Echangeur à air (évaporateur)		
Température d'entrée d'air(a)	-15	46

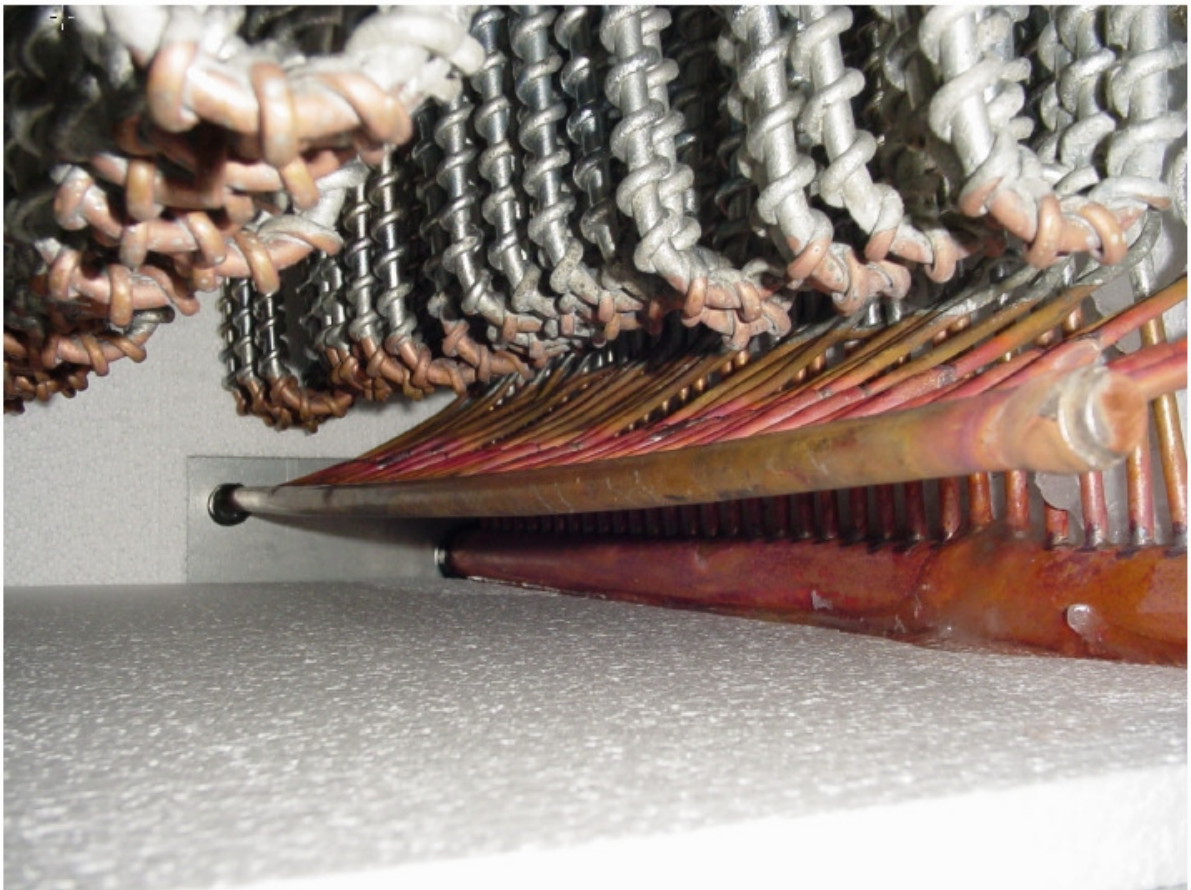


Figure 3 : Échangeur de la PAC

RÉSULTATS THÉORIQUES ATTENDUS

Les résultats suivant ont été fournis par le constructeur de la pompe à chaleur. Ces résultats sont purement théoriques. Ce sont des hypothèses de calculs posées lors de la conception de l'appareil et ne proviennent pas d'un banc d'essai.

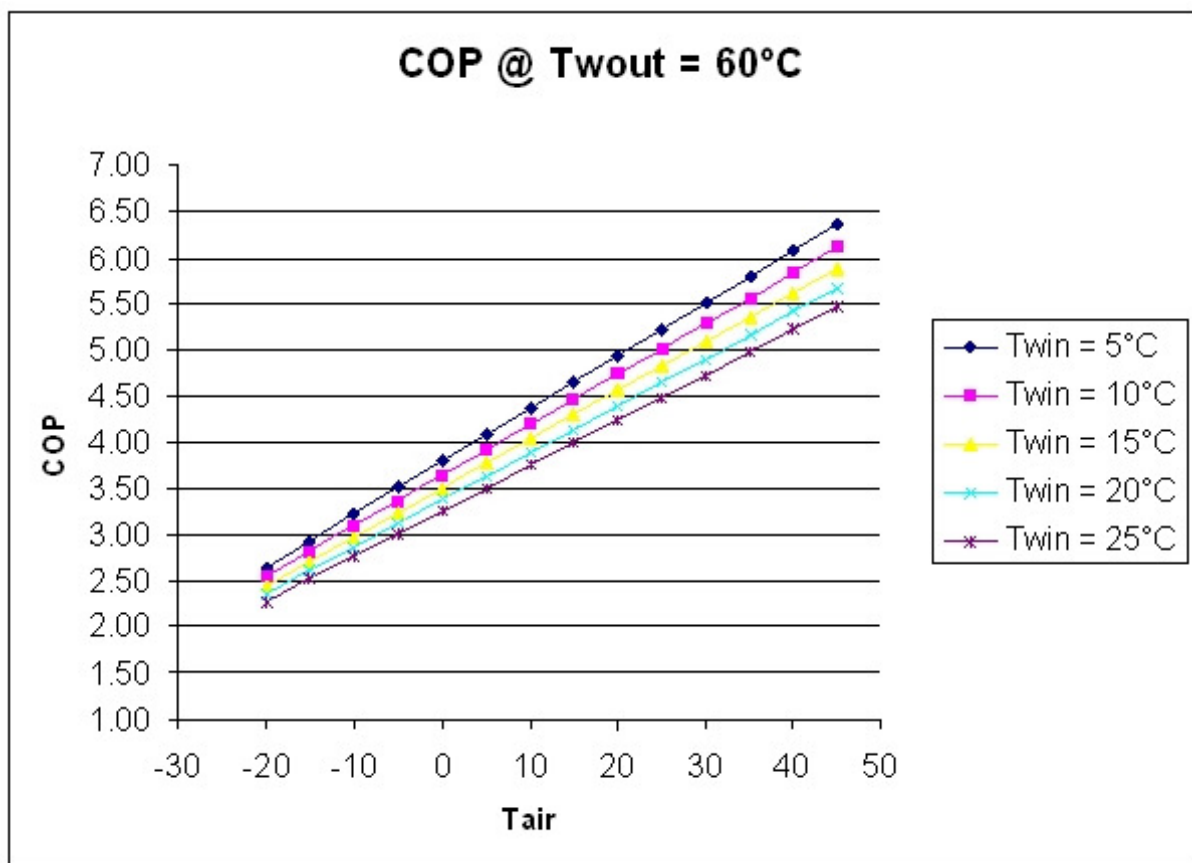


Figure 4 : COP pour une eau chaude à 60°C

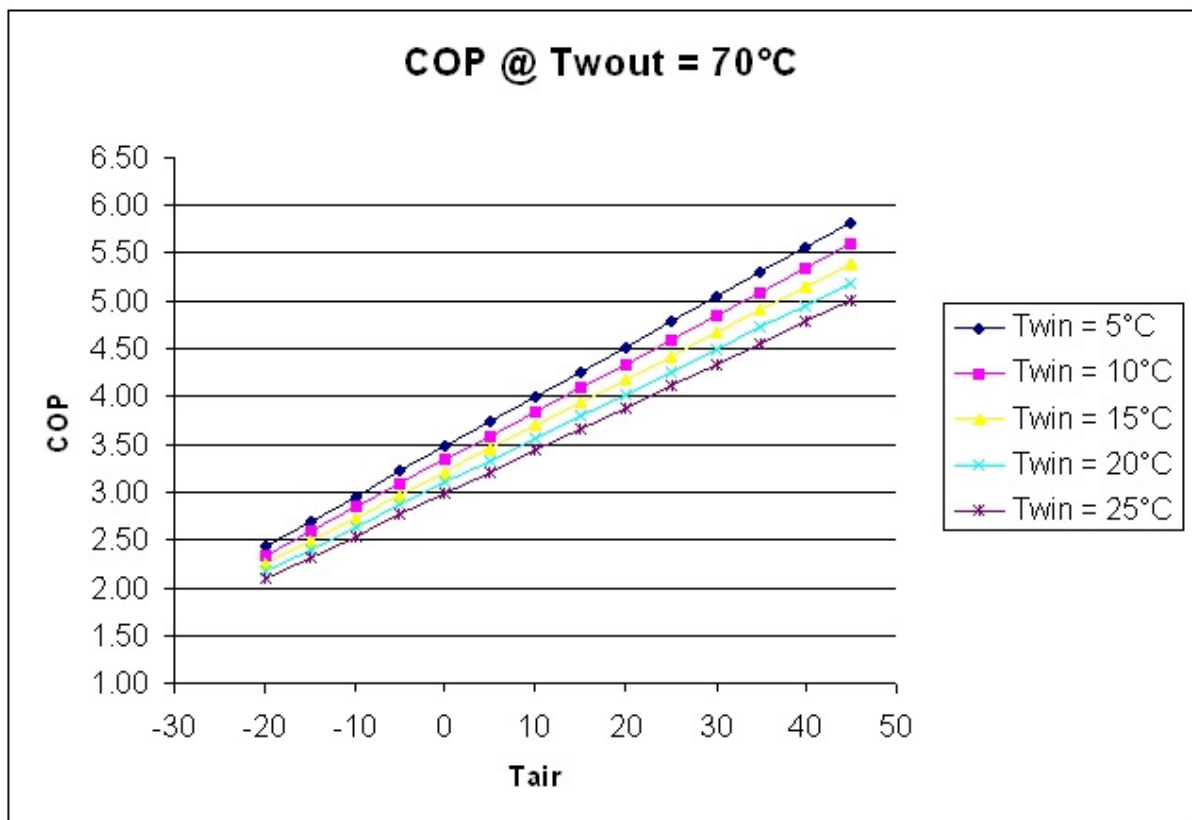


Figure 5 : COP pour une eau chaude à 70°C

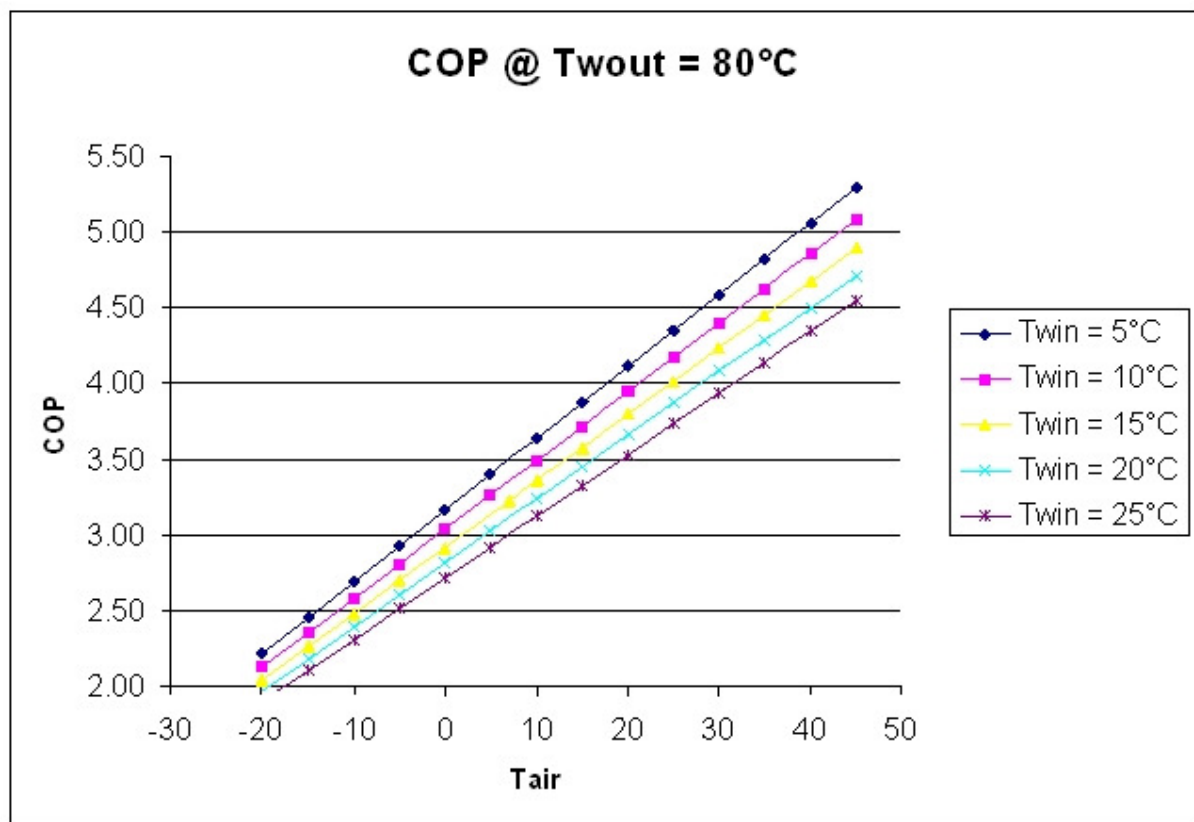
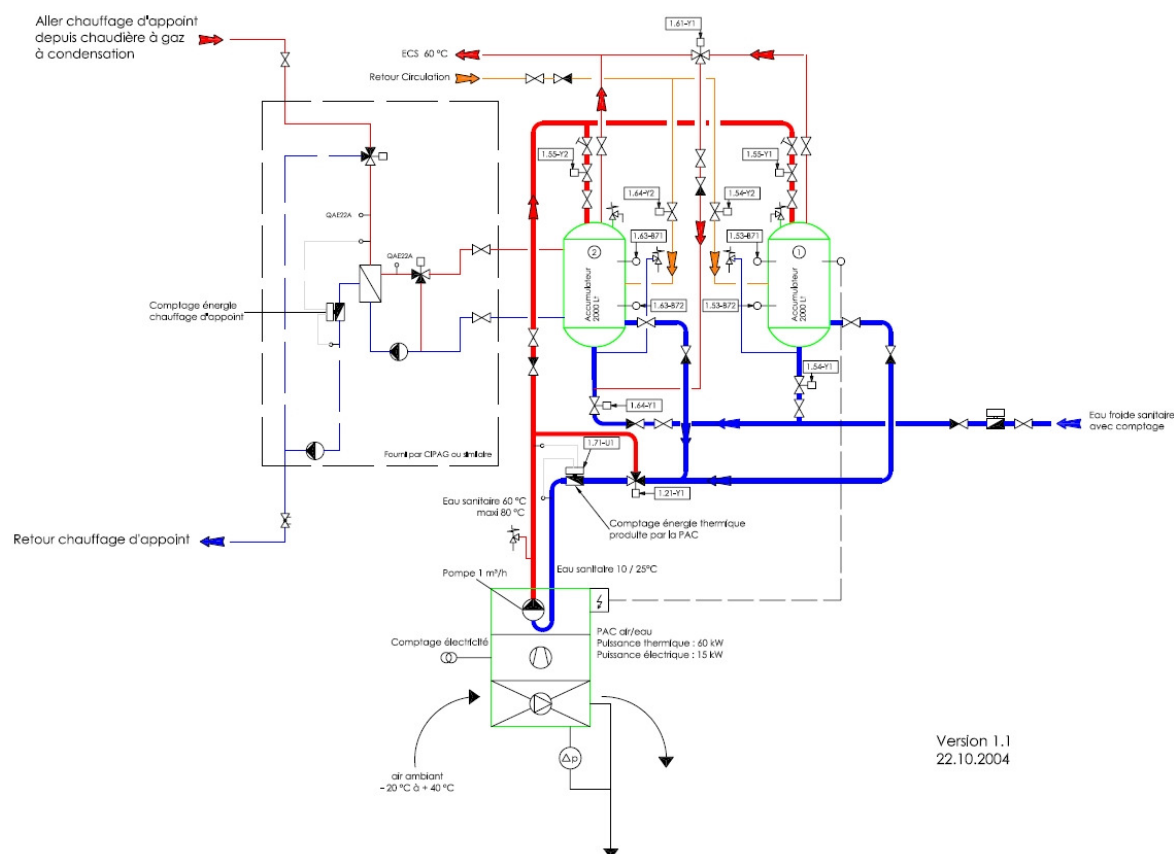


Figure 6 : COP pour une eau chaude à 80°C

4. Résultats

SCÉMA DE PRINCIPE DE L'INSTALLATION



Version 1.1
22.10.2004

Figure 7 : Schéma de principe de l'installation

INTRODUCTION

Les valeurs relevées proviennent de deux sources différentes :

- Pour la PAC les données sont fournies par les sondes intégrées d'usine dans l'appareil par Axair-Kobra.
- Pour le reste de l'installation, les données proviennent de sonde Siemens.

L'ensemble de ces valeurs ont été rapatrié dans un serveur web CLIP de la société Wit, installé par Axair Kobra, qui a fourni la PAC.

VALEURS RELEVÉES

Désignation	Description	Unité	Position	Source
tout	Température de l'eau à la sortie de la PAC	°C	1_10	PAC
compEnergie	Énergie du compresseur de la PAC	W/h	1_6	Siemens
compPuissance	Puissance du compresseur de la PAC	W	1_6	Siemens
consigne	Température de consigne de la PAC	°C	--	PAC
debEauFroide	Débit de l'eau en entrée de la PAC	m³/h	2_3	Siemens
energiePac	Energie totale de la PAC	kW/h	2_1	Siemens
pAspiration	Pression d'aspiration	Pa	1_4	PAC
pompeEnergie	Energie de la pompe de la PAC	W/h	1_7	Siemens

pompePuissance	Puissance de la pompe de la PAC	W	1_7	Siemens
pRefoulement	Pression de refoulement	Pa	1_3	Siemens
puissancePac	Puissance totale de la PAC	W	2_1	Siemens
tBas2_6	Température au point bas du ballon d'eau chaude	°C	2_6	Siemens
tBas2_8	Température au point bas du ballon d'eau chaude	°C	2_8	Siemens
TEntreeCond	Température à l'entrée du condenseur de la PAC	°C	--	PAC
text	Température extérieure	°C	1_8	PAC
tHaut2_7	Température au point haut du ballon d'eau chaude	°C	2_7	Siemens
tHaut2_9	Température au point haut du ballon d'eau chaude	°C	2_9	Siemens
tin	Température de l'eau à l'entrée de la PAC	°C	1_11	PAC
TSortieCond	Température à la sortie du condenseur	°C	--	PAC
vanne2_10	Ouverture/fermeture de la vanne	--	2_10	Siemens
vanne2_11	Ouverture/fermeture de la vanne	--	2_11	Siemens
vanne2_12	Ouverture/fermeture de la vanne	--	2_12	Siemens
vanne2_13	Ouverture/fermeture de la vanne	--	2_13	Siemens
vanne2_2	Ouverture/fermeture de la vanne	--	2_2	Siemens
vanne2_4	Ouverture/fermeture de la vanne	--	2_4	Siemens
vanne2_5	Ouverture/fermeture de la vanne	--	2_5	Siemens
ventilEnergie	Energie du ventilateur de la PAC	W/h	1_5	Siemens
ventilPuissance	Puissance du ventilateur de la PAC	W	1_5	Siemens
volEauFroide	Volume d'eau froide entré dans la PAC	m ³	2_3	Siemens
vanne2_15	Ouverture/fermeture de la vanne	--	2_15	Siemens

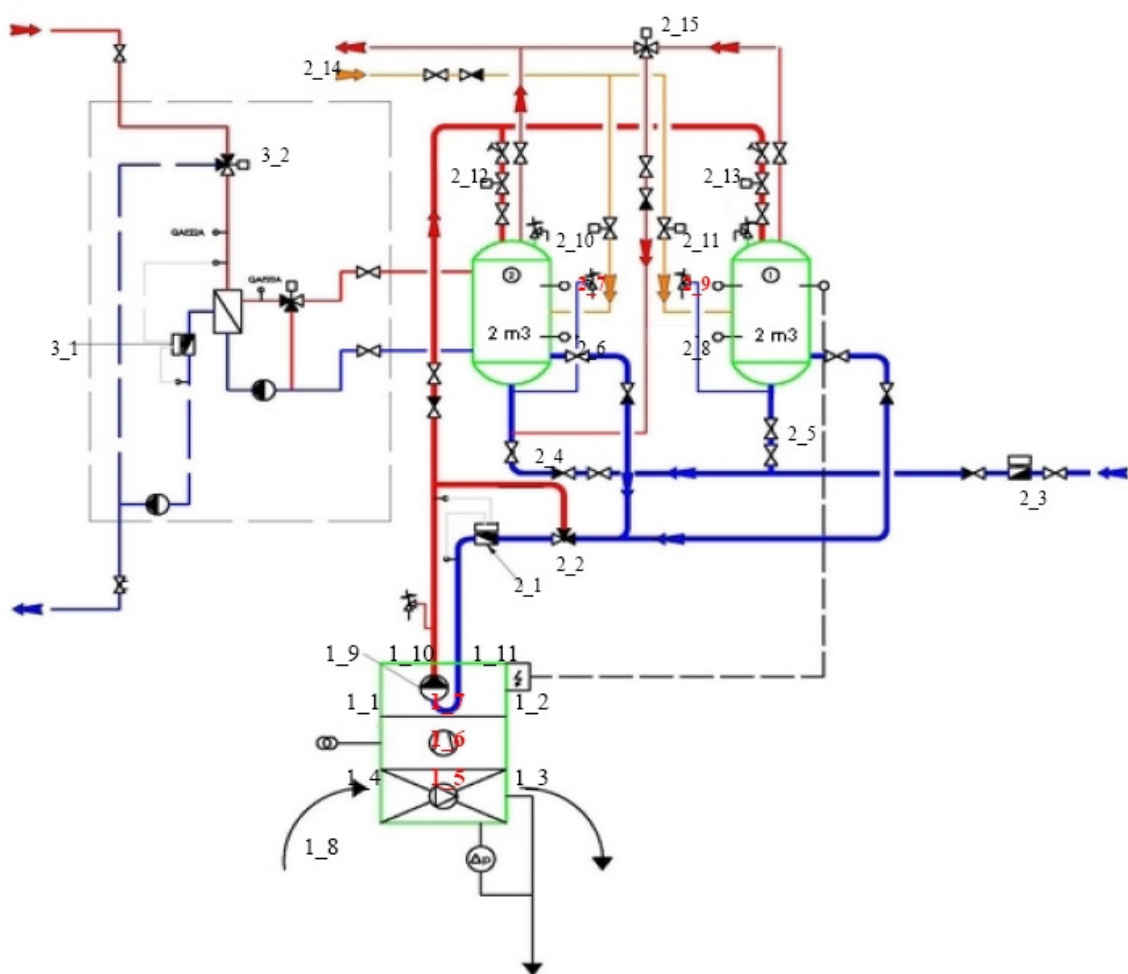


Figure 8 : Position des sondes

PREMIÈRE GÉNÉRATION

Il faut comprendre que cette PAC est de première génération, ce qui peut impliquer des défauts dus au manque d'expérience du constructeur dans ce produit. Ainsi nous avons rencontré différentes pannes durant le processus de mesures.

MESURES RELEVÉES

L'ensemble des mesures relevées au cours de la campagne sont disponibles dans un fichier annexe au format excel.

INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

Les résultats obtenus ne confirment pas les valeurs théoriques du constructeur. Effectivement, les graphiques ci-dessous montrent bien les variations des performances réalisées par la PAC à des conditions d'un prime abord similaires.

Tout d'abord, la situation géographique de l'installation a une influence sur ces résultats. Effectivement, l'Hôpital du Locle se situant à une altitude d'environ 1000 mètres, nous avons dans une même journée d'importantes variations de température. Ces variations ayant bien entendu des influences sur les résultats obtenus.

De plus, la consommation d'eau chaude d'un hôpital a elle aussi un important impact. Effectivement, on observe de grands pics de consommation entre 05h00 et 07h00 ainsi qu'entre 11h00 et 13h00.

Il faut aussi tenir compte de la montée en charge de la PAC. Effectivement, afin de ne pas influencer négativement les résultats obtenus nous n'avons pas tenu compte dans ces graphiques des valeurs de COP plus petites ou égales à 1. Ces valeurs correspondant à la mise en route de la PAC.

Il faut savoir que les données étaient enregistrées dès que la température de sortie de l'eau était plus grande que la température d'entrée et que la puissance de la PAC était supérieure à 0.

Néanmoins cela ne nous assurait pas d'obtenir des valeurs correspondantes à un fonctionnement réel de la PAC. Ainsi l'enregistrement des données se faisaient dès la phase d'allumage de la machine, alors qu'elle ne produisait pas encore d'eau chaude.

GRAPHIQUES

Eau chaude 60°C, eau froide 10°C

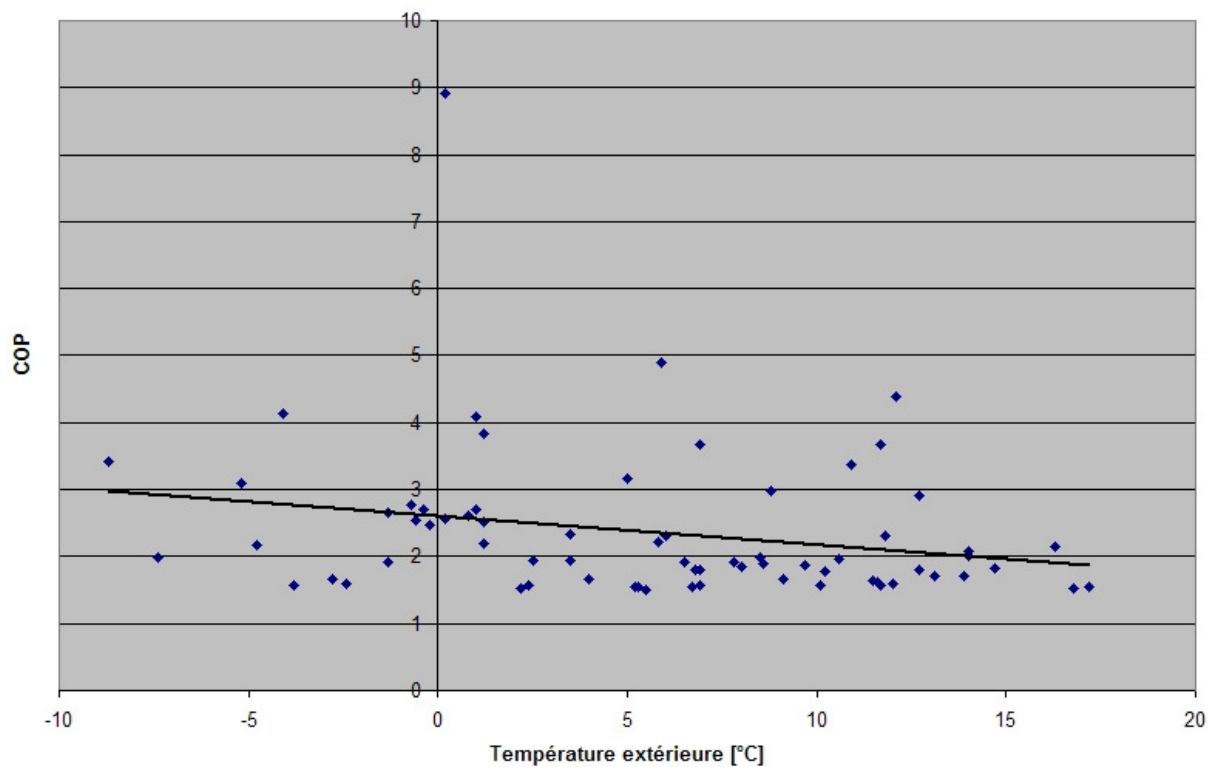


Figure 9 : COP en fonction de la température extérieure.

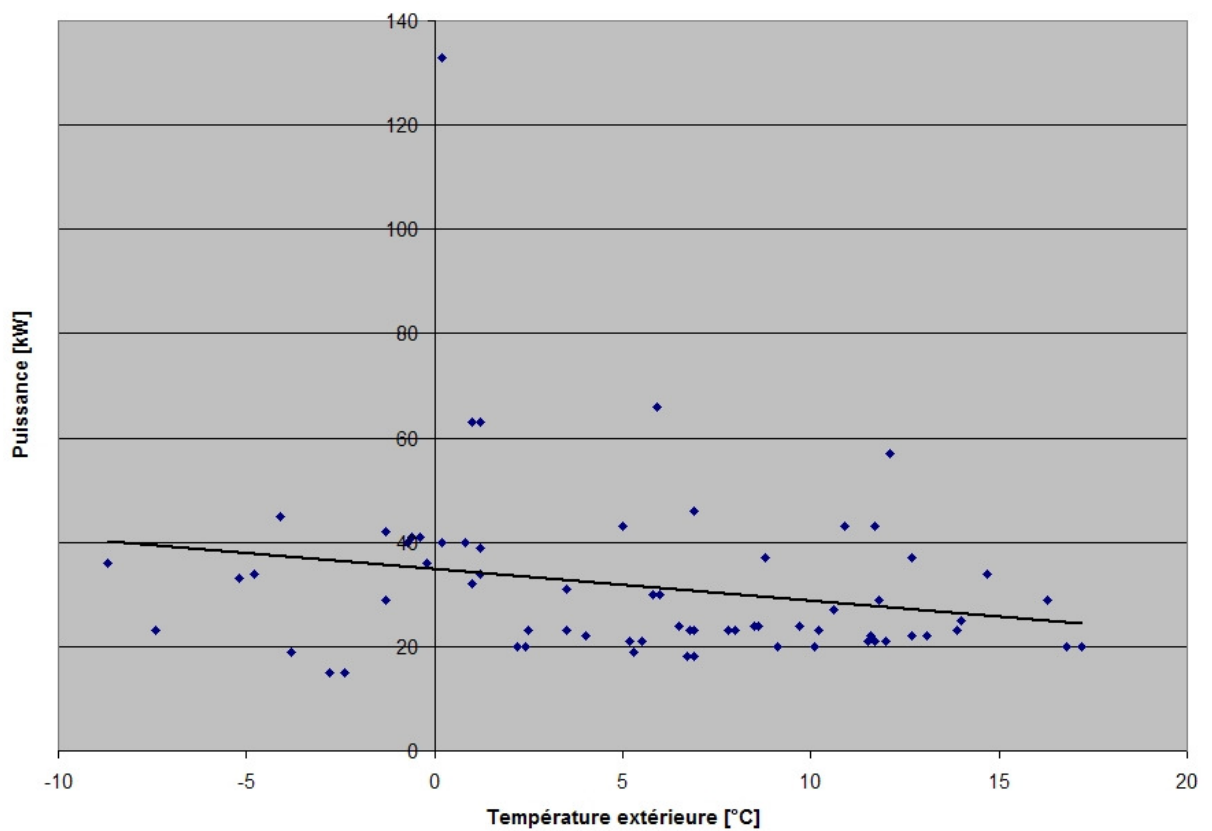


Figure 10 : puissance en fonction de la température extérieure.

Eau chaude 60°C, eau froide 15°C

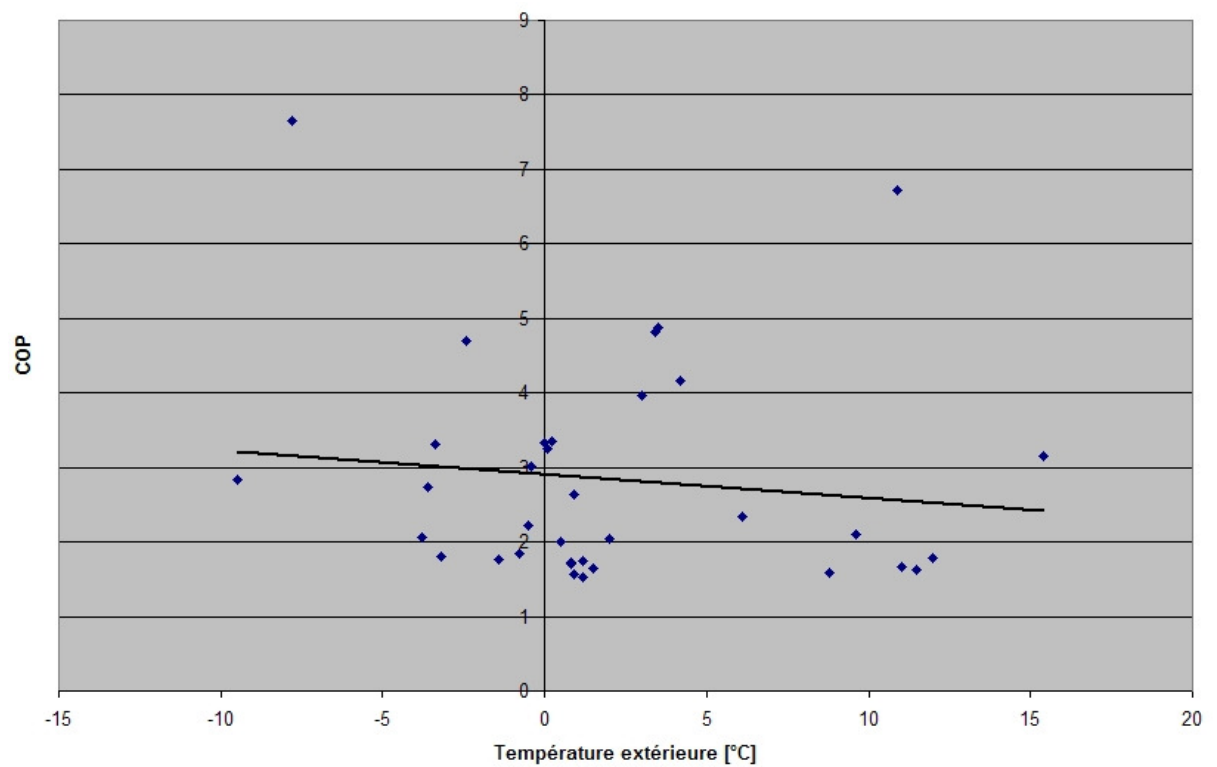


Figure 11 : COP en fonction de la température extérieure.

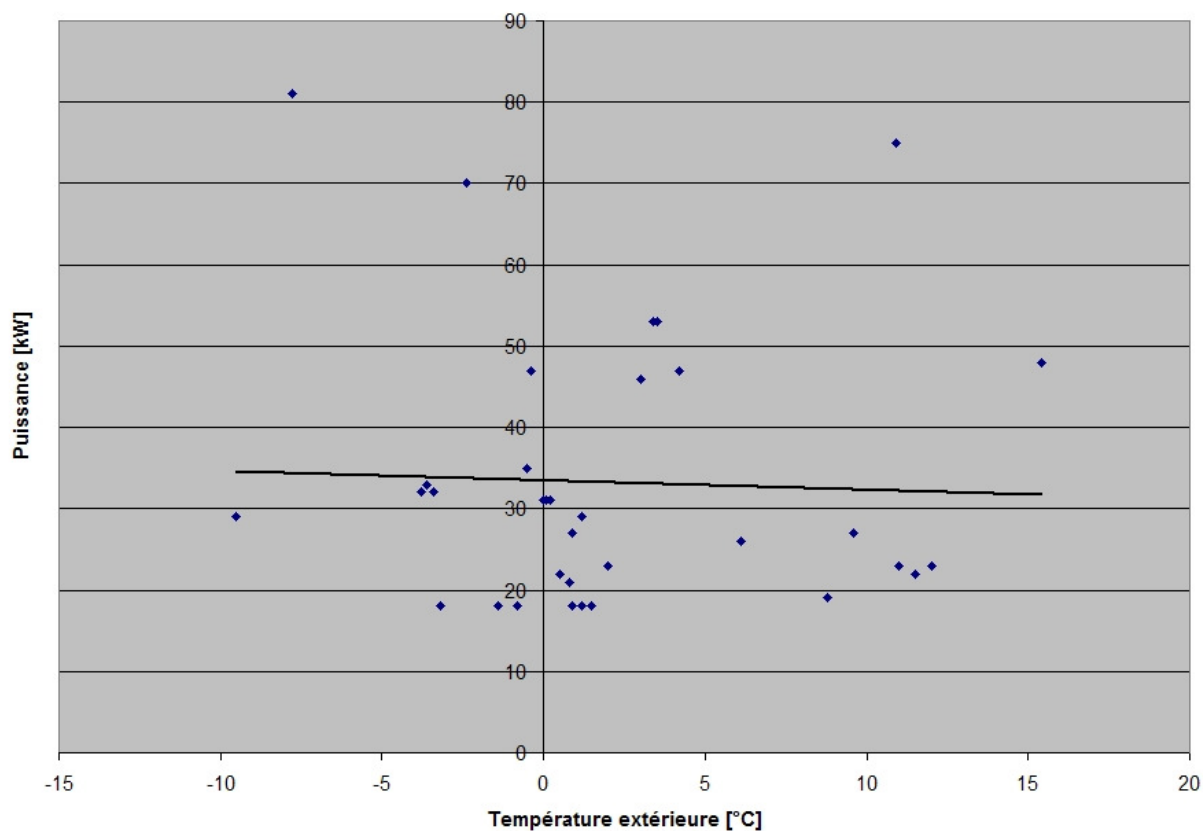


Figure 12 : puissance en fonction de la température extérieure.

Eau chaude 60°C, eau froide 20°C

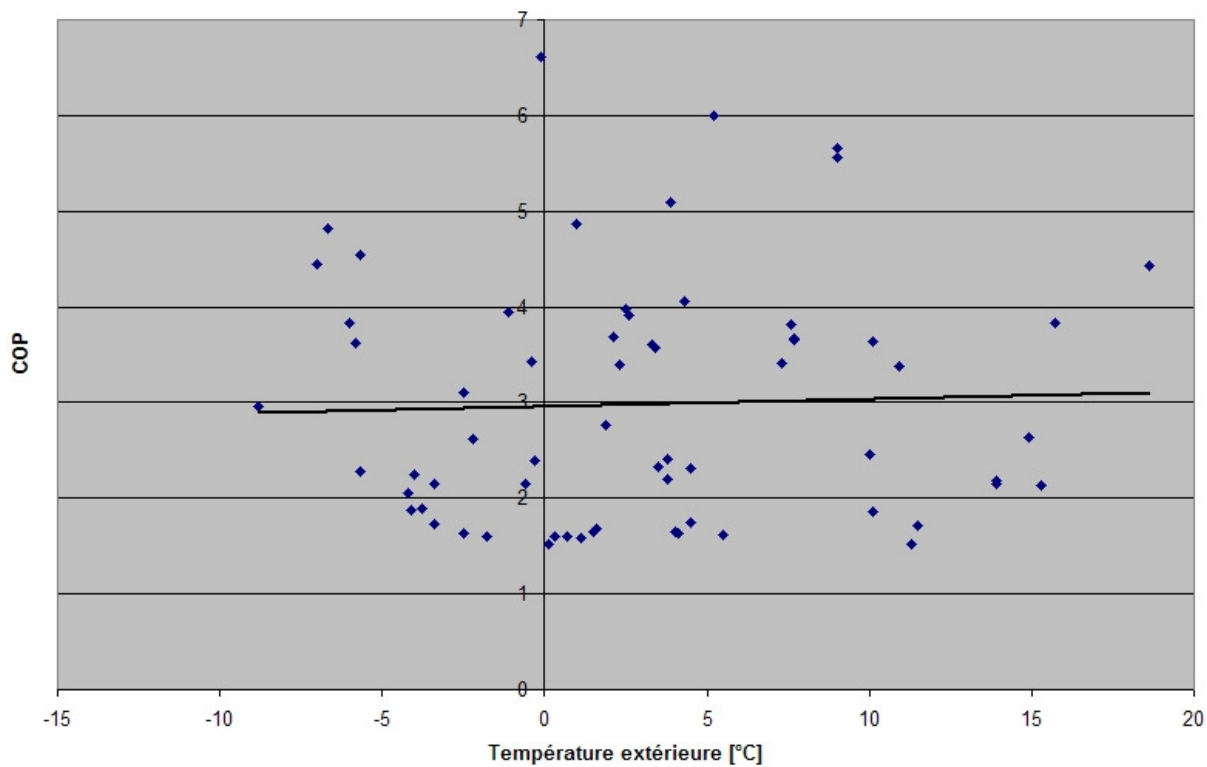


Figure 13 : COP en fonction de la température extérieure.

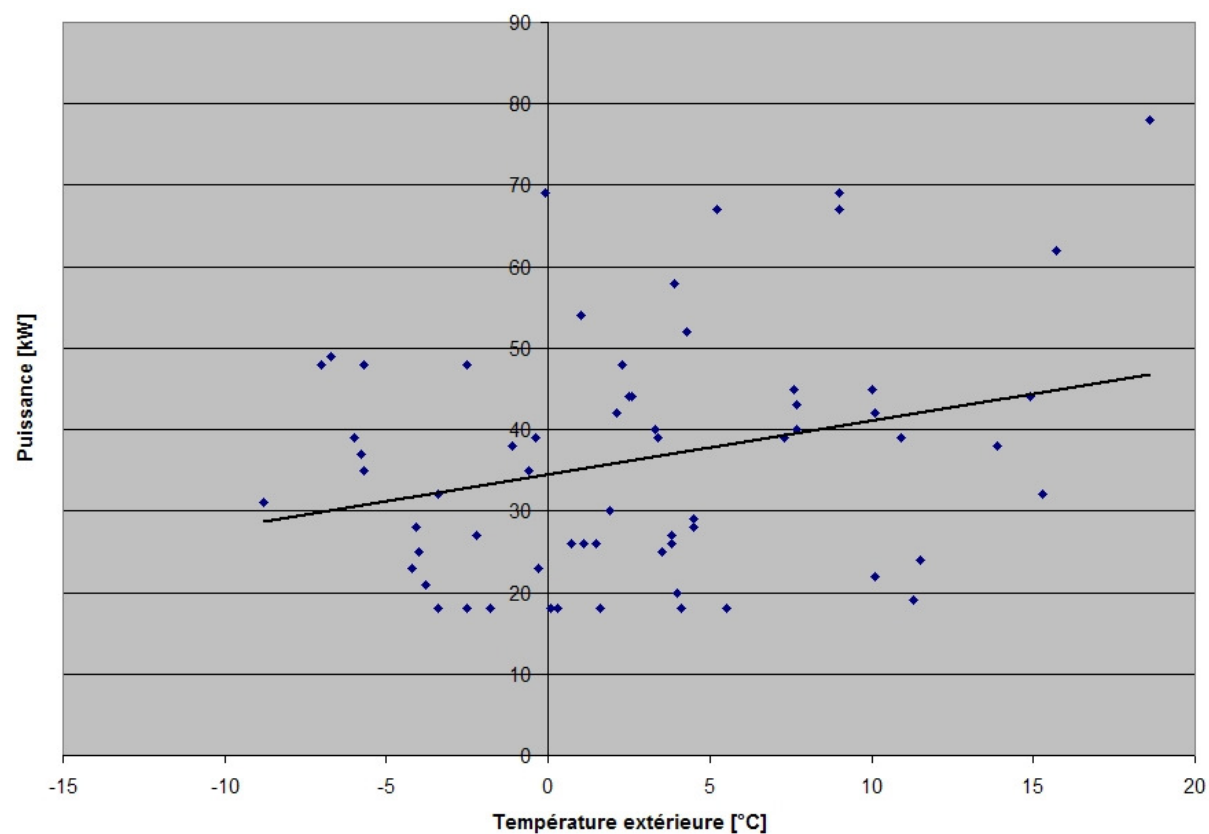


Figure 14 : puissance en fonction de la température extérieure.

Eau chaude 60°C, eau froide 25°C

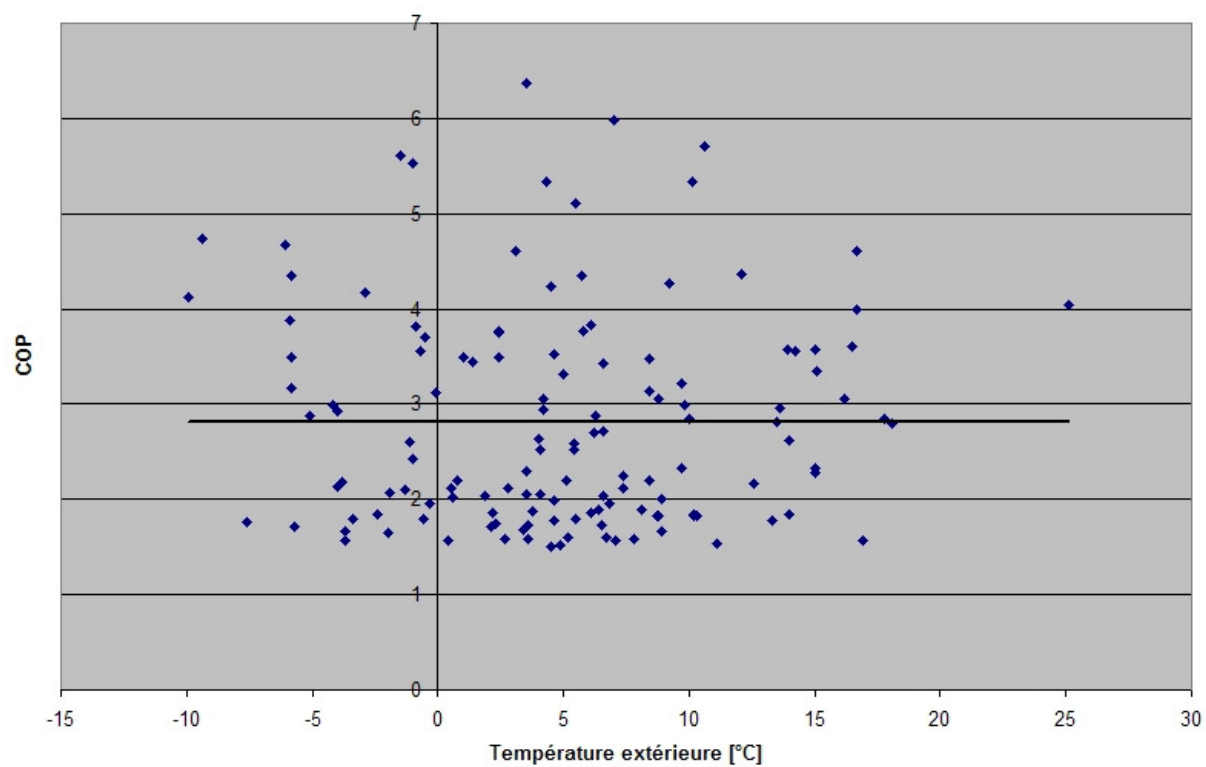


Figure 15 : COP en fonction de la température extérieure.

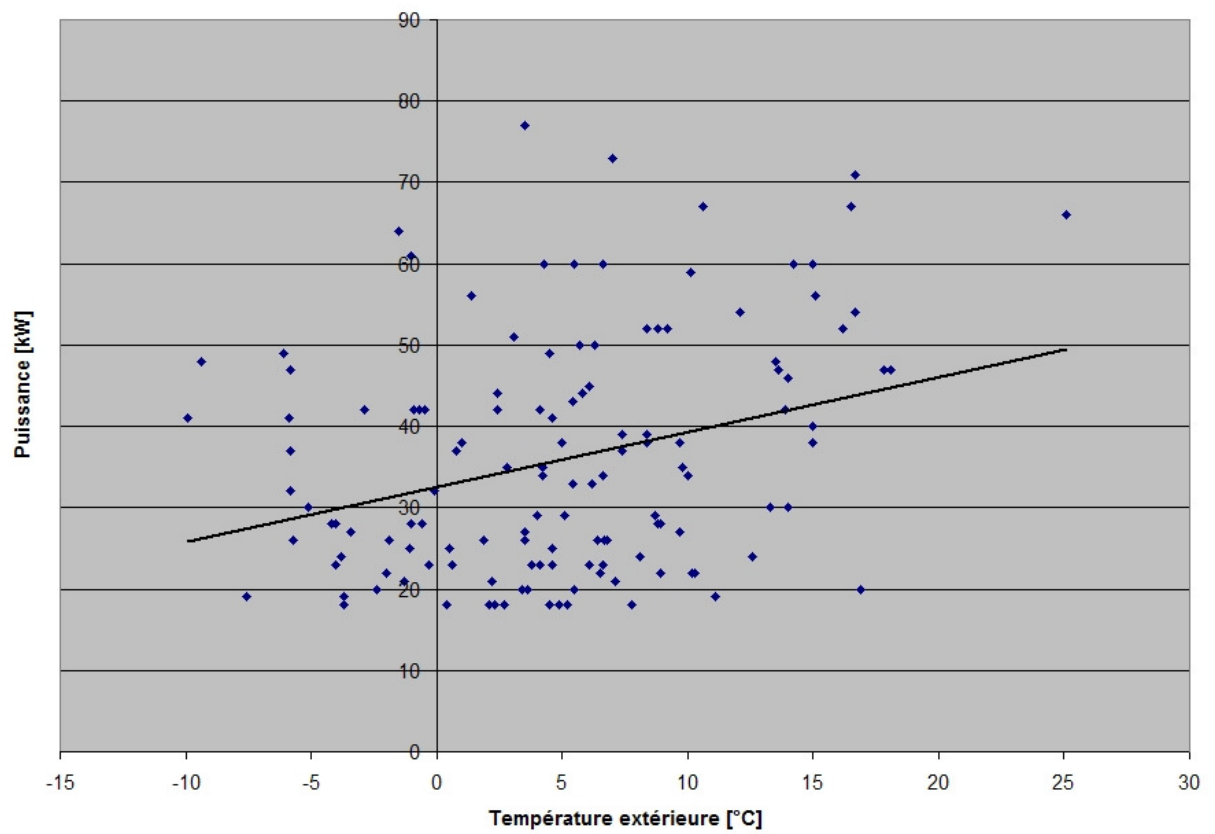


Figure 16 : puissance en fonction de la température extérieure.

Eau chaude 60°C, eau froide 45°C

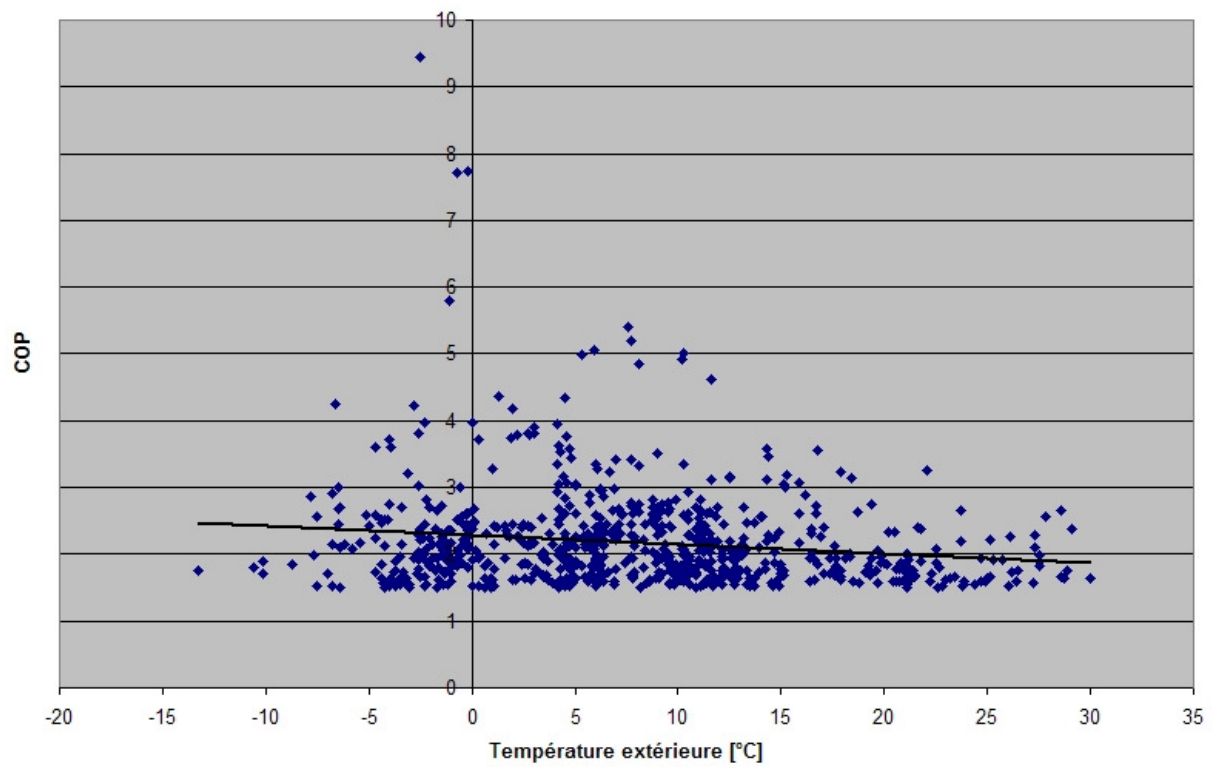


Figure 17 : COP en fonction de la température extérieure.

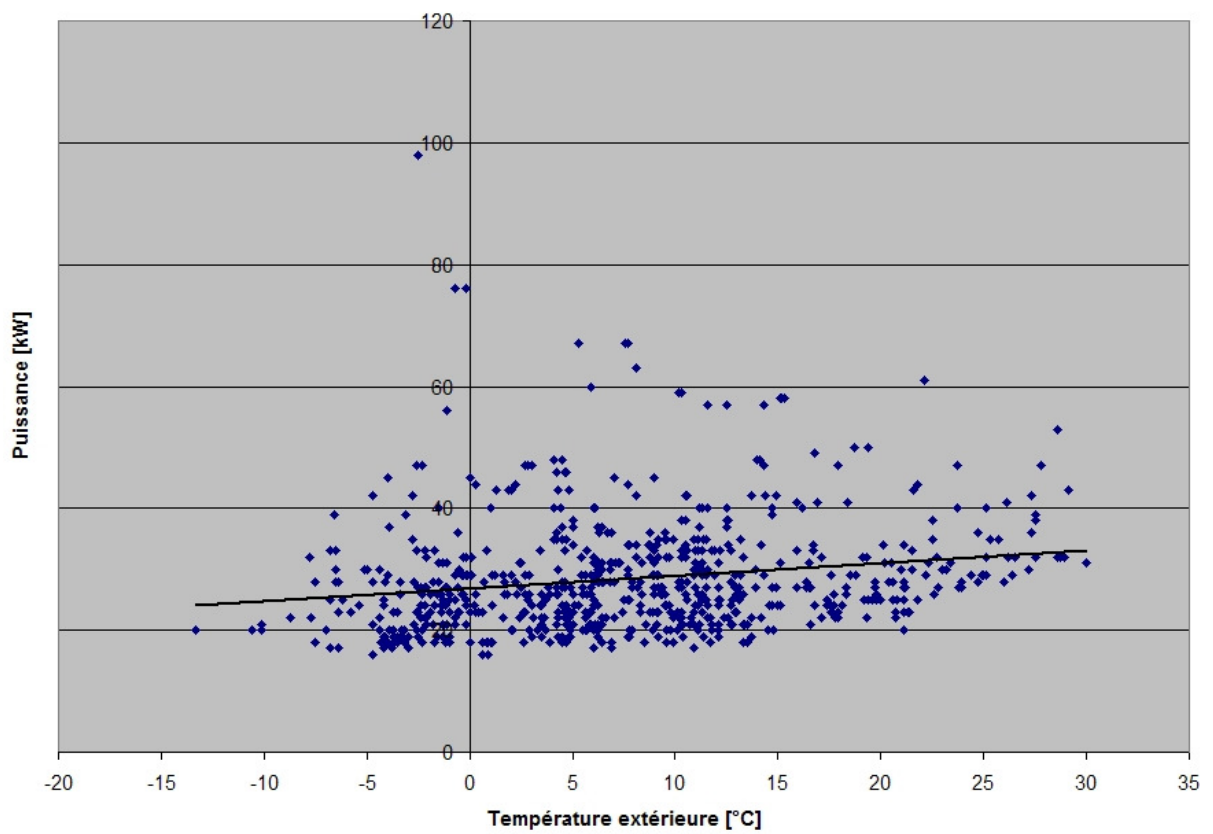


Figure 18 : puissance en fonction de la température extérieure.

Eau chaude 60°C, eau froide 50°C

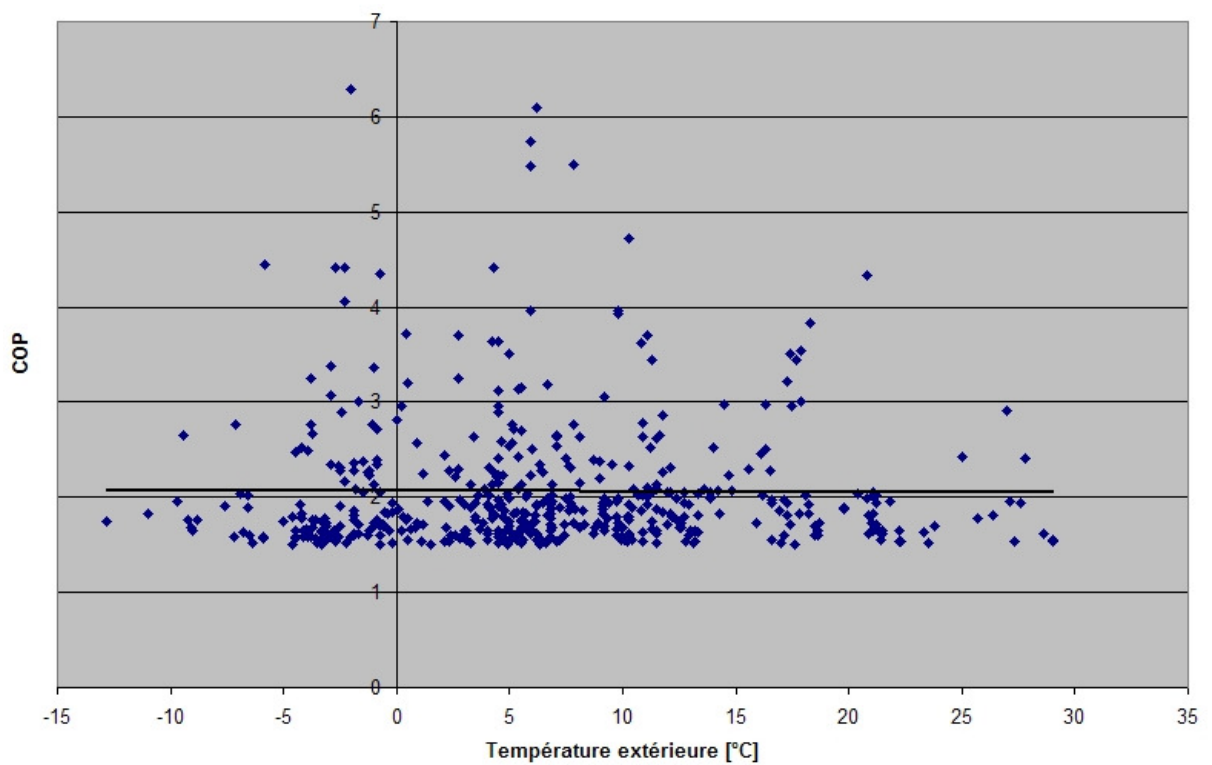


Figure 19 : COP en fonction de la température extérieure.

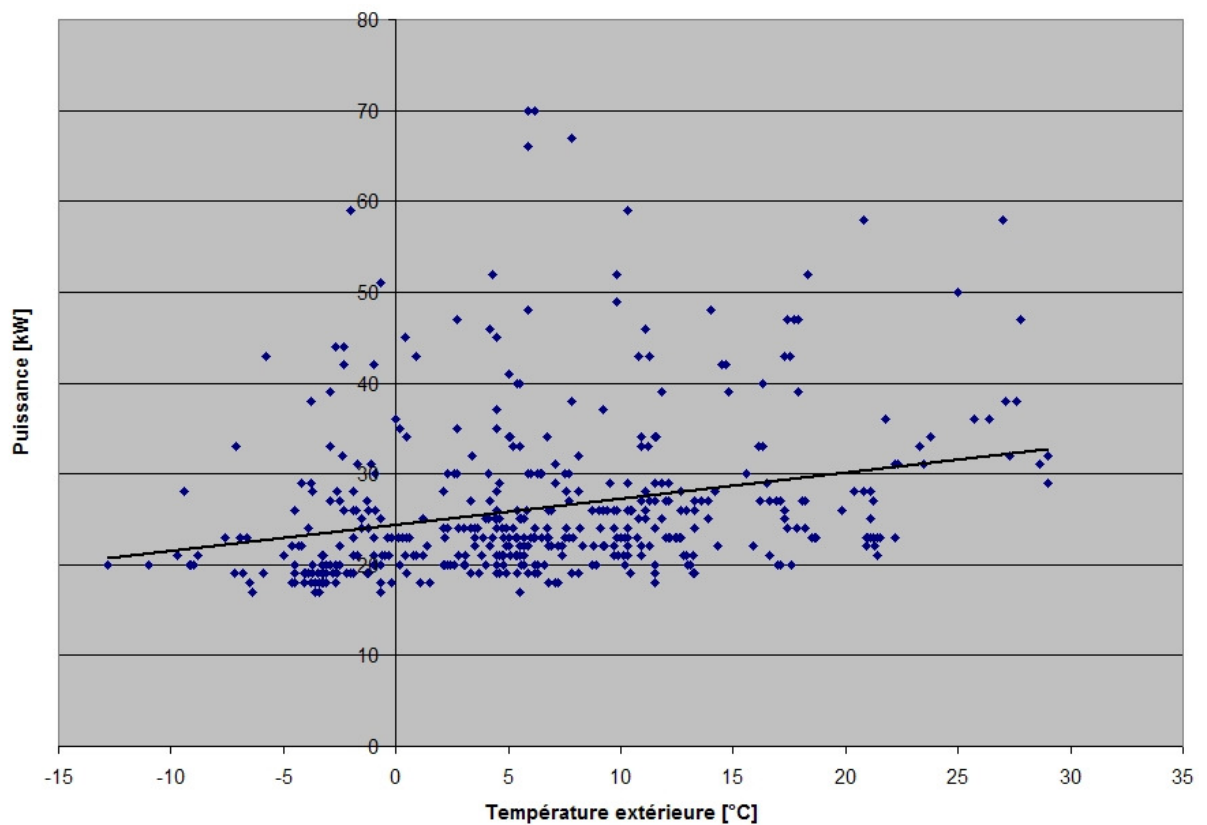


Figure 20 : puissance en fonction de la température extérieure.

Eau chaude 65°C, eau froide 10°C

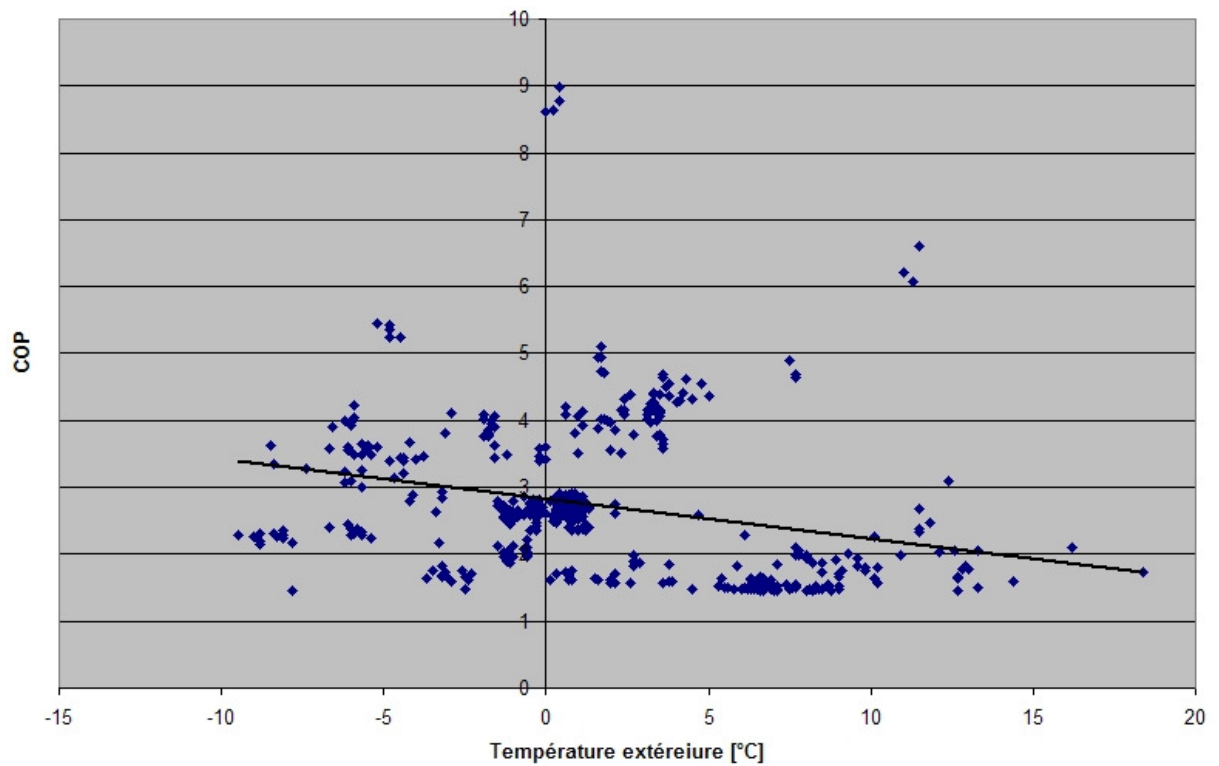


Figure 21 : COP en fonction de la température extérieure.

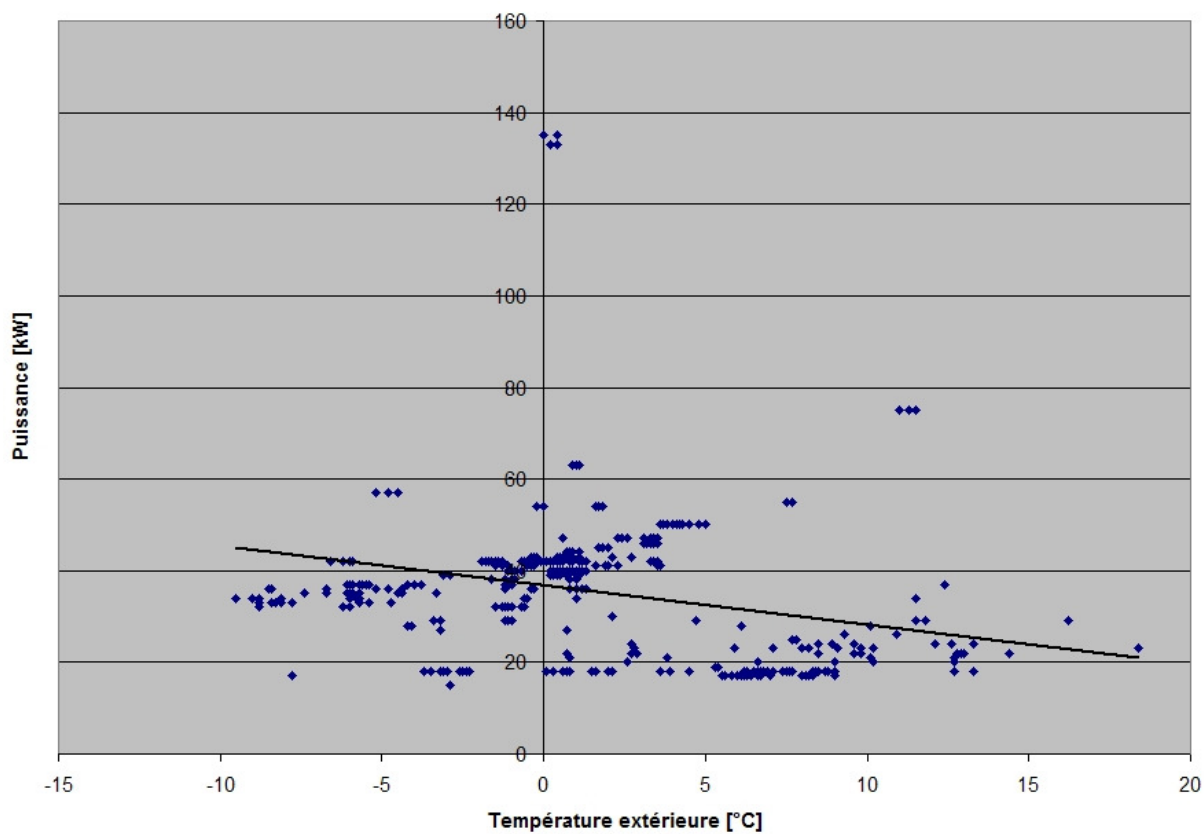


Figure 22 : puissance en fonction de la température extérieure.

Eau chaude 65°C, eau froide 15°C

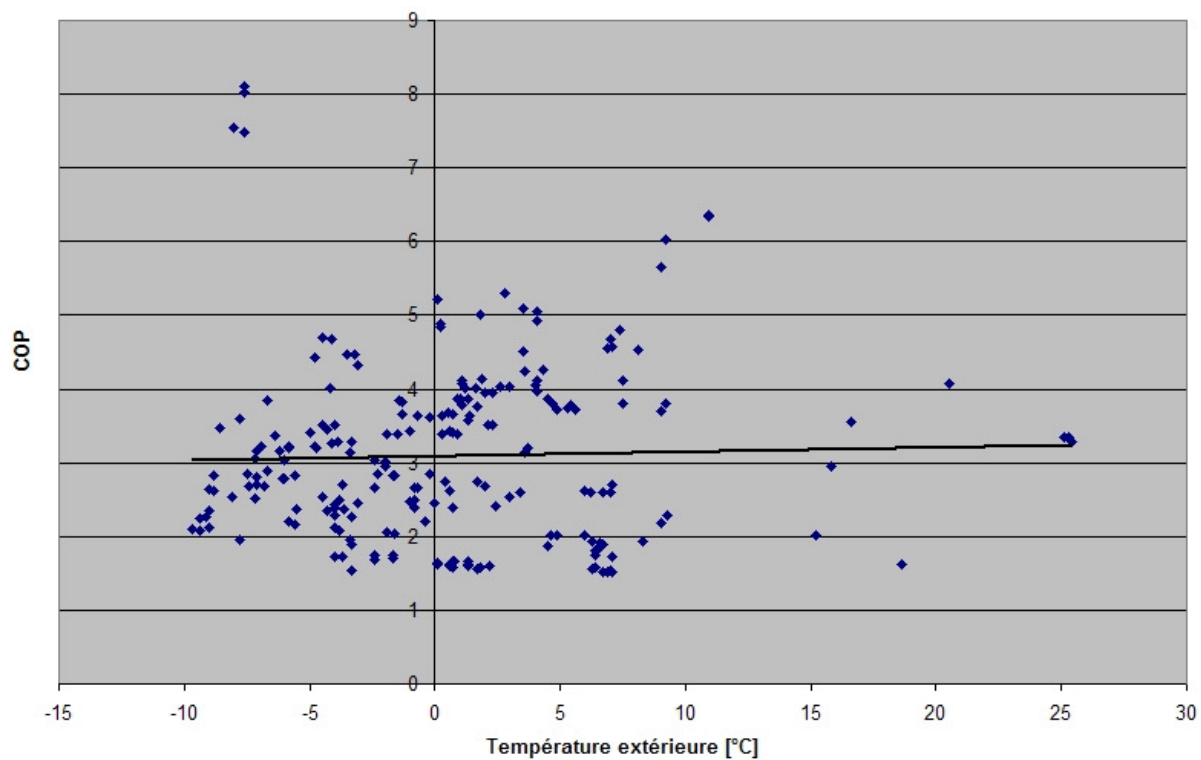


Figure 23 : COP en fonction de la température extérieure.

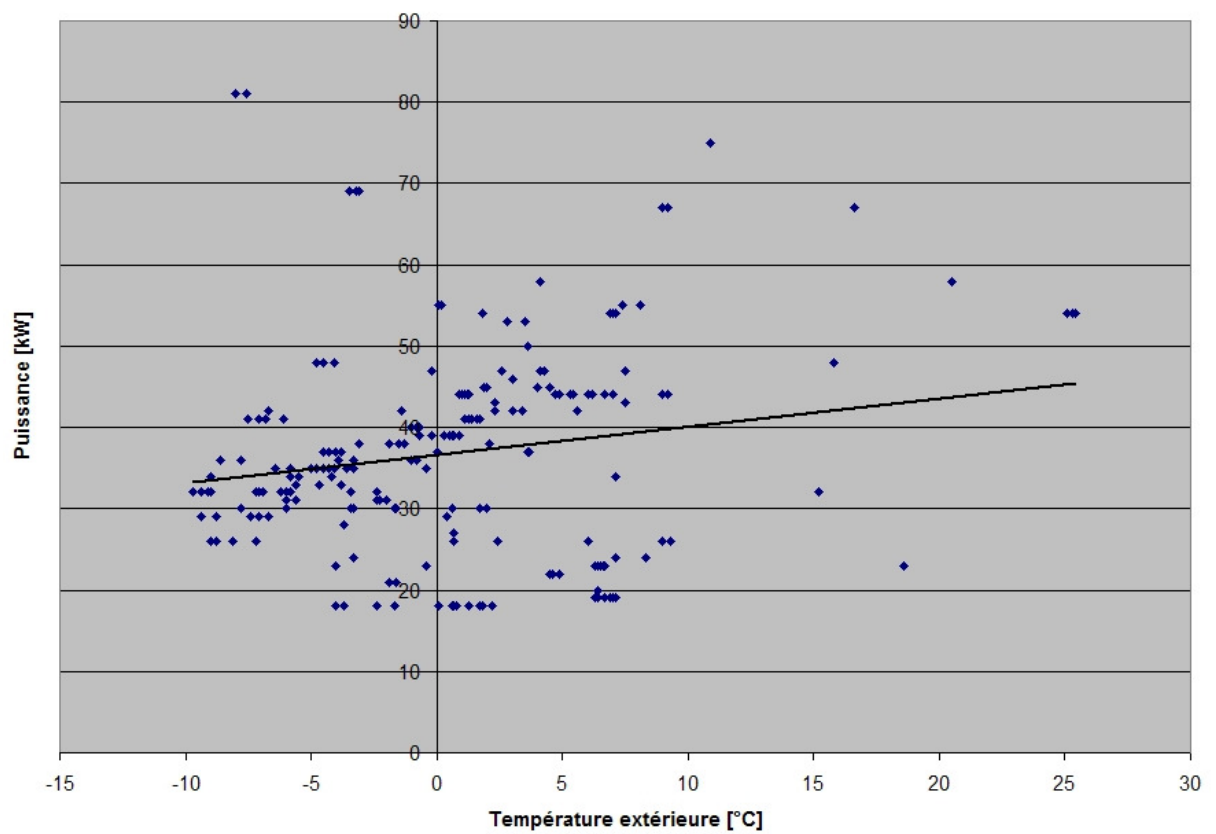


Figure 24 : puissance en fonction de la température extérieure.

Eau chaude 65°C, eau froide 20°C

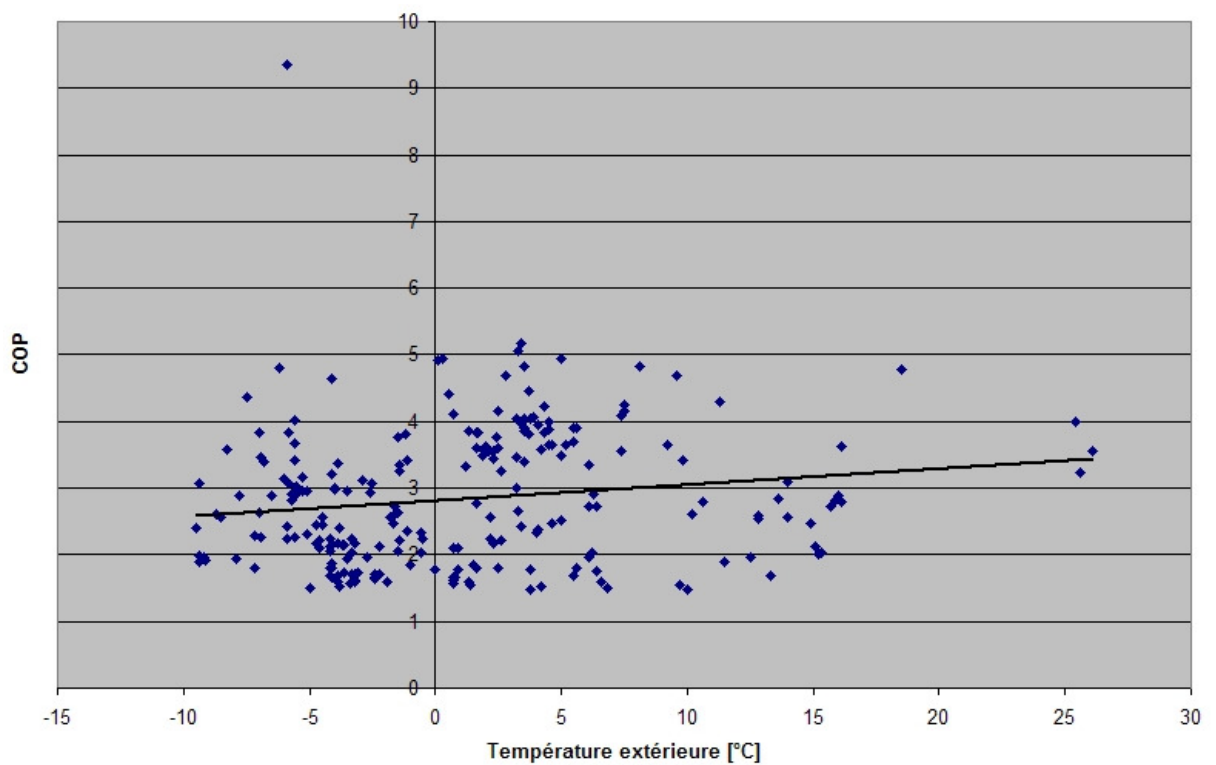


Figure 25 : COP en fonction de la température extérieure.

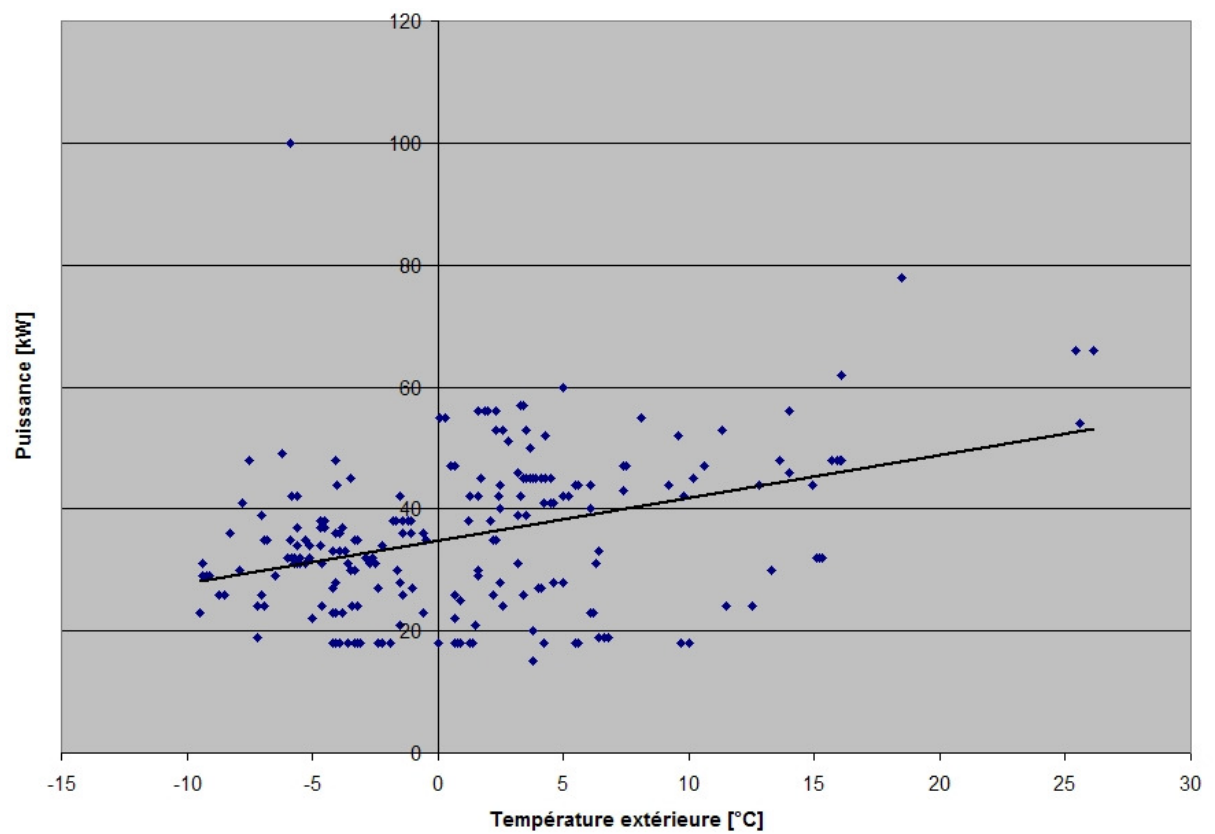


Figure 26 : puissance en fonction de la température extérieure.

Eau chaude 65°C, eau froide 25°C

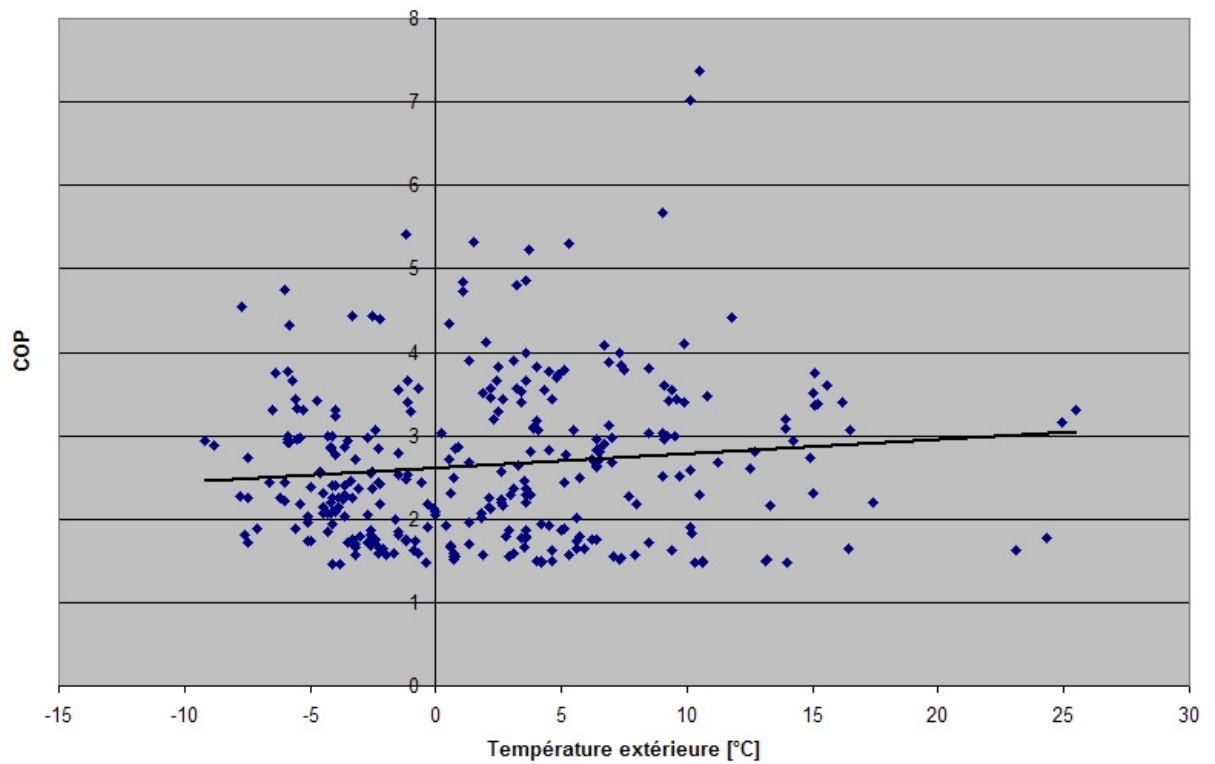


Figure 27 : COP en fonction de la température extérieure.

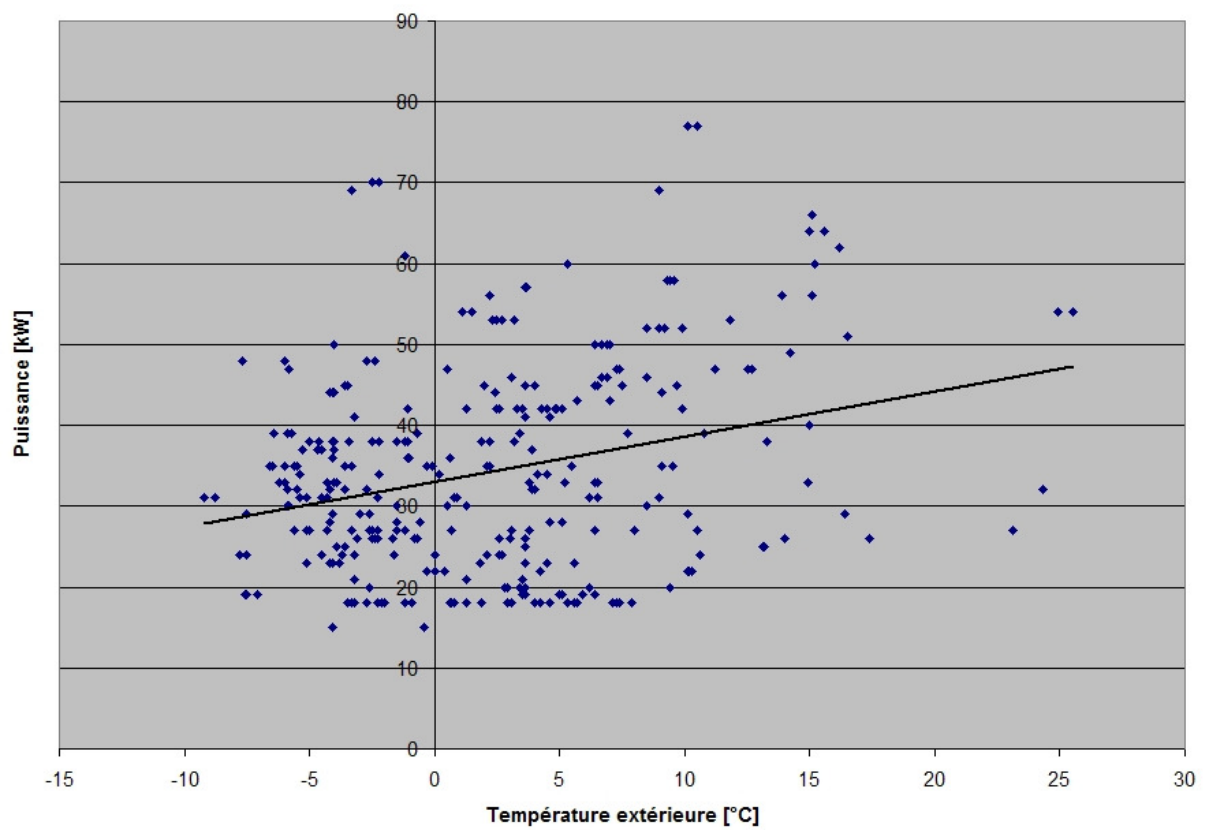


Figure 28 : puissance en fonction de la température extérieure.

Eau chaude 65°C, eau froide 45°C

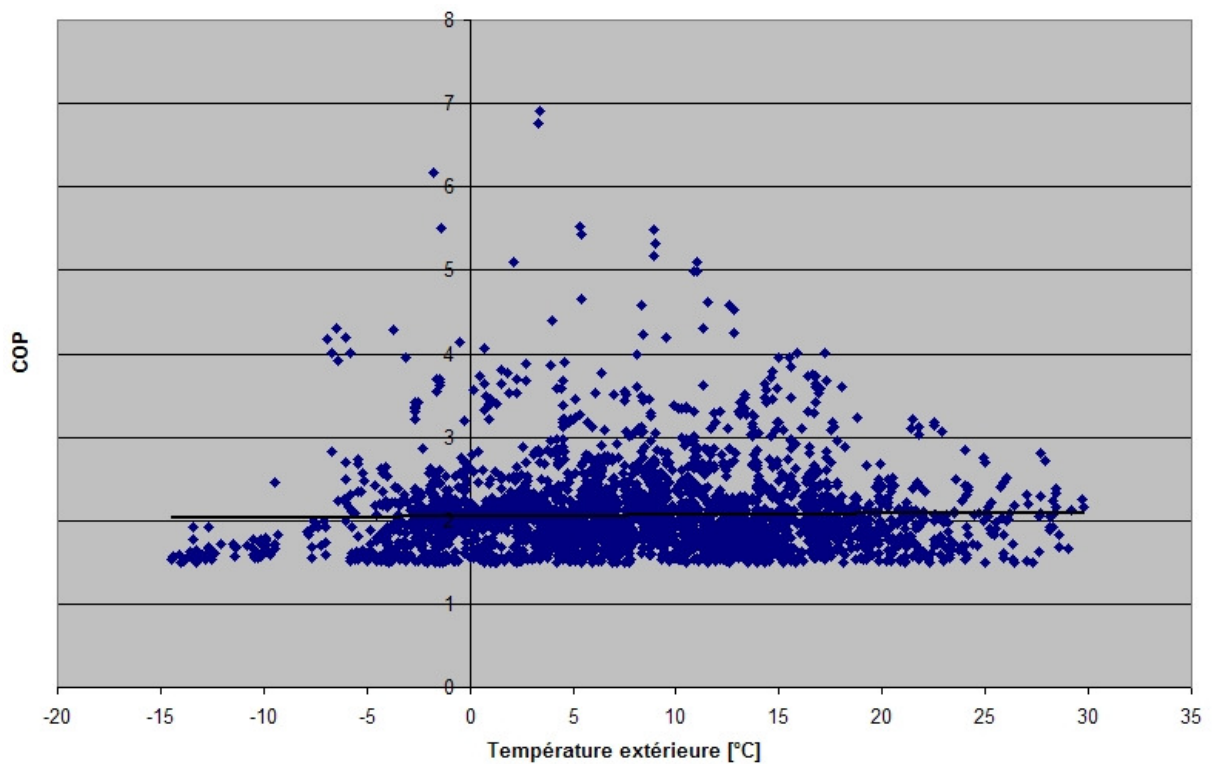


Figure 29 : COP en fonction de la température extérieure.

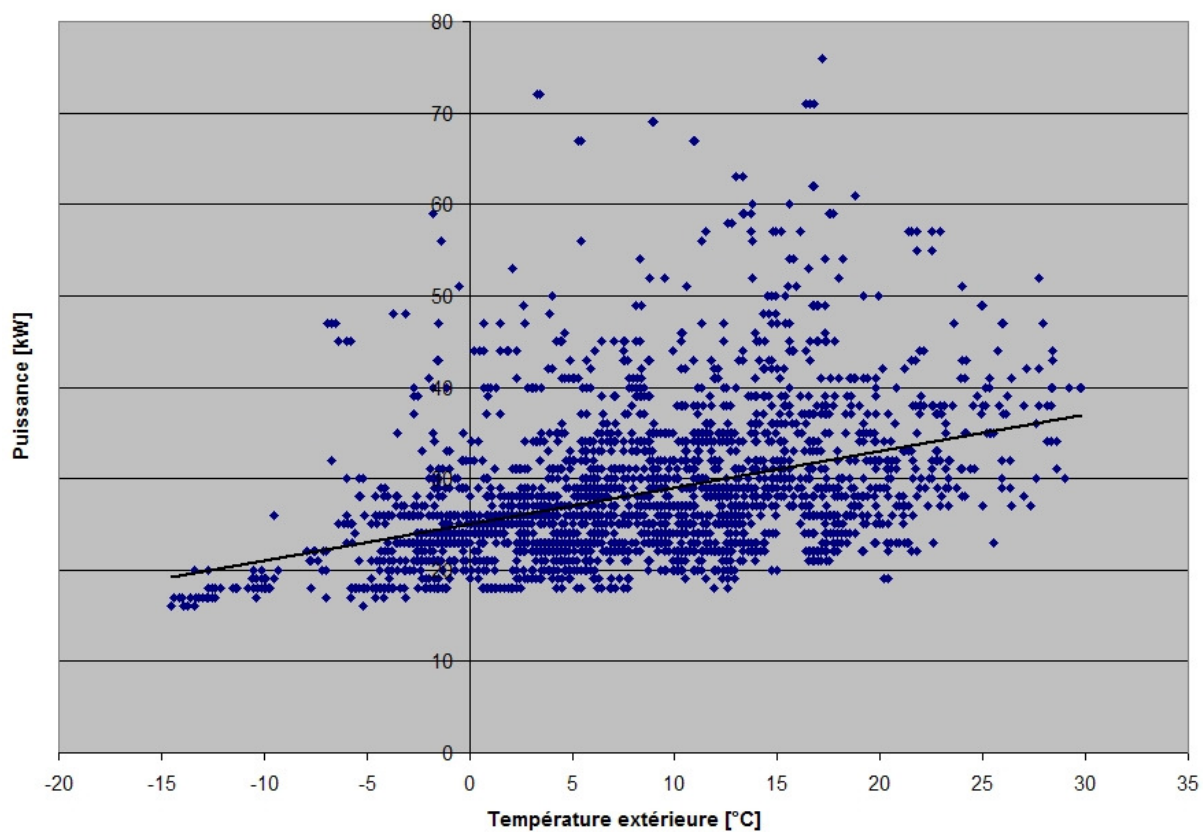


Figure 30 : puissance en fonction de la température extérieure.

Eau chaude 65°C, eau froide 50°C

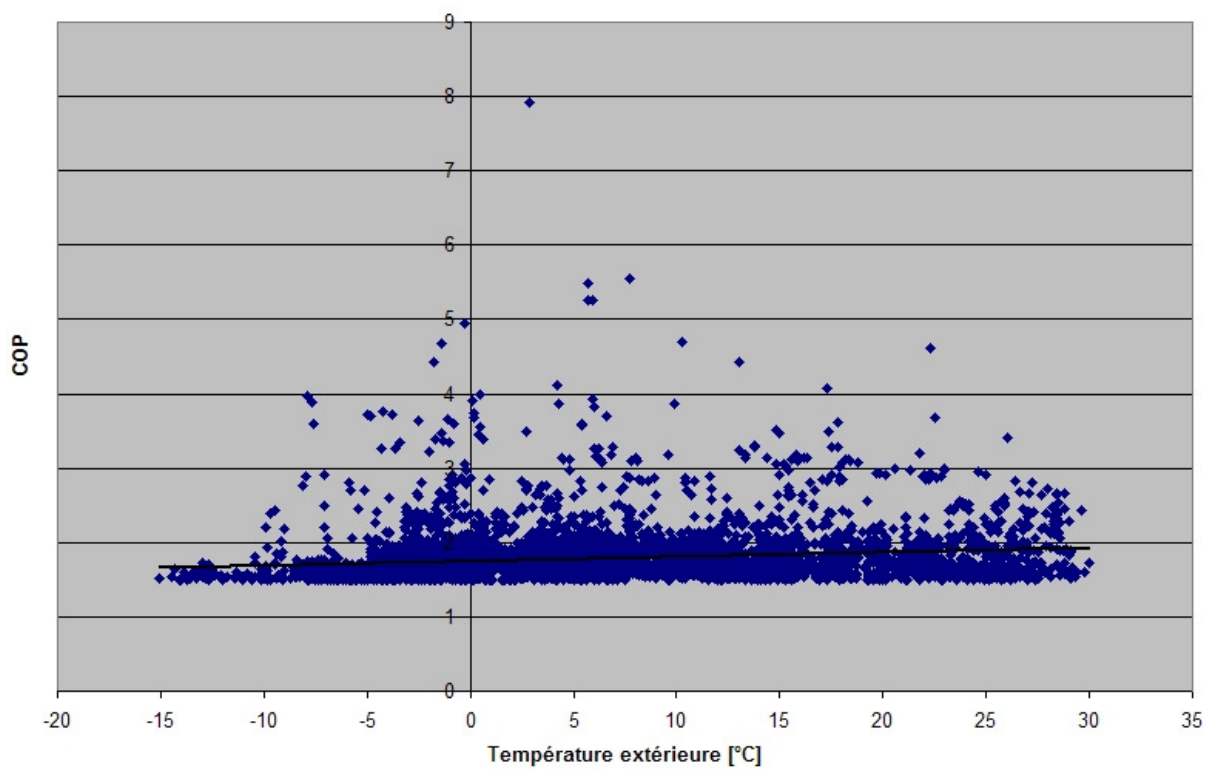


Figure 31 : COP en fonction de la température extérieure.

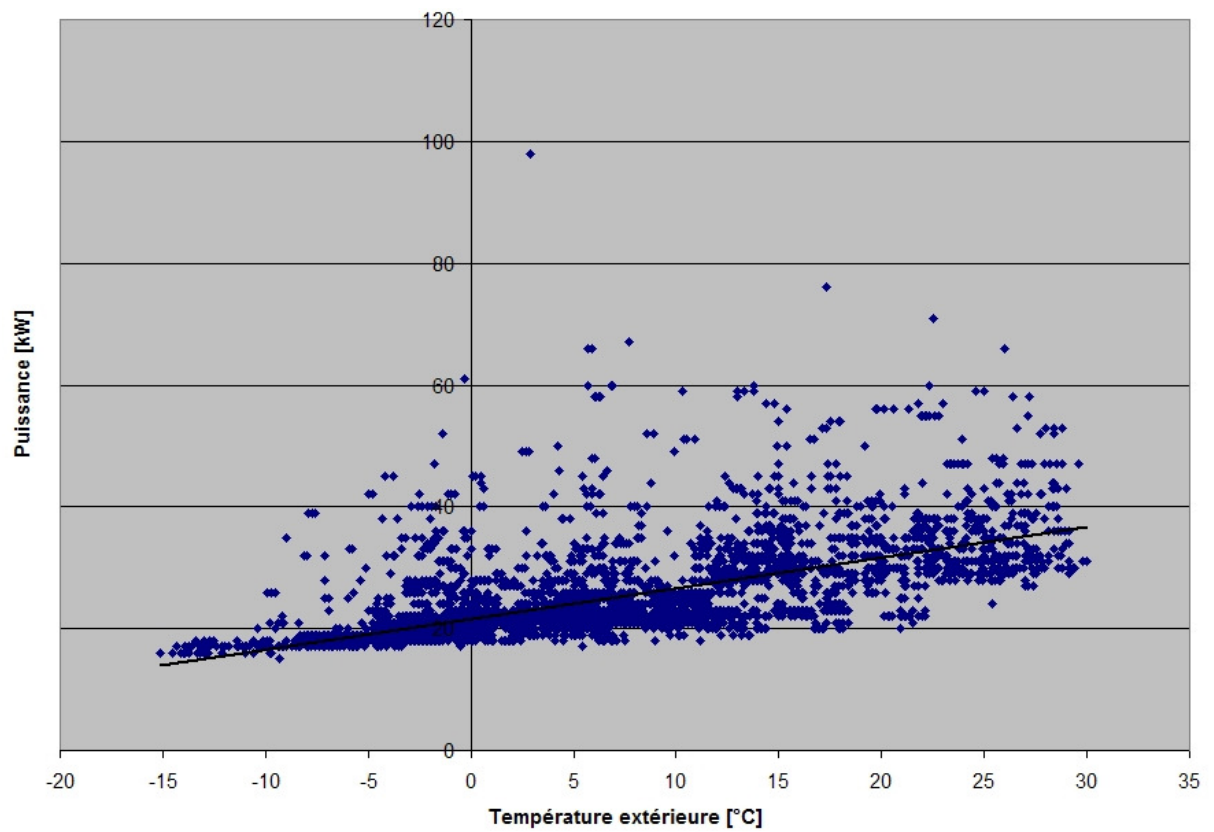


Figure 32 : puissance en fonction de la température extérieure.

Eau chaude 70°C, eau froide 10°C

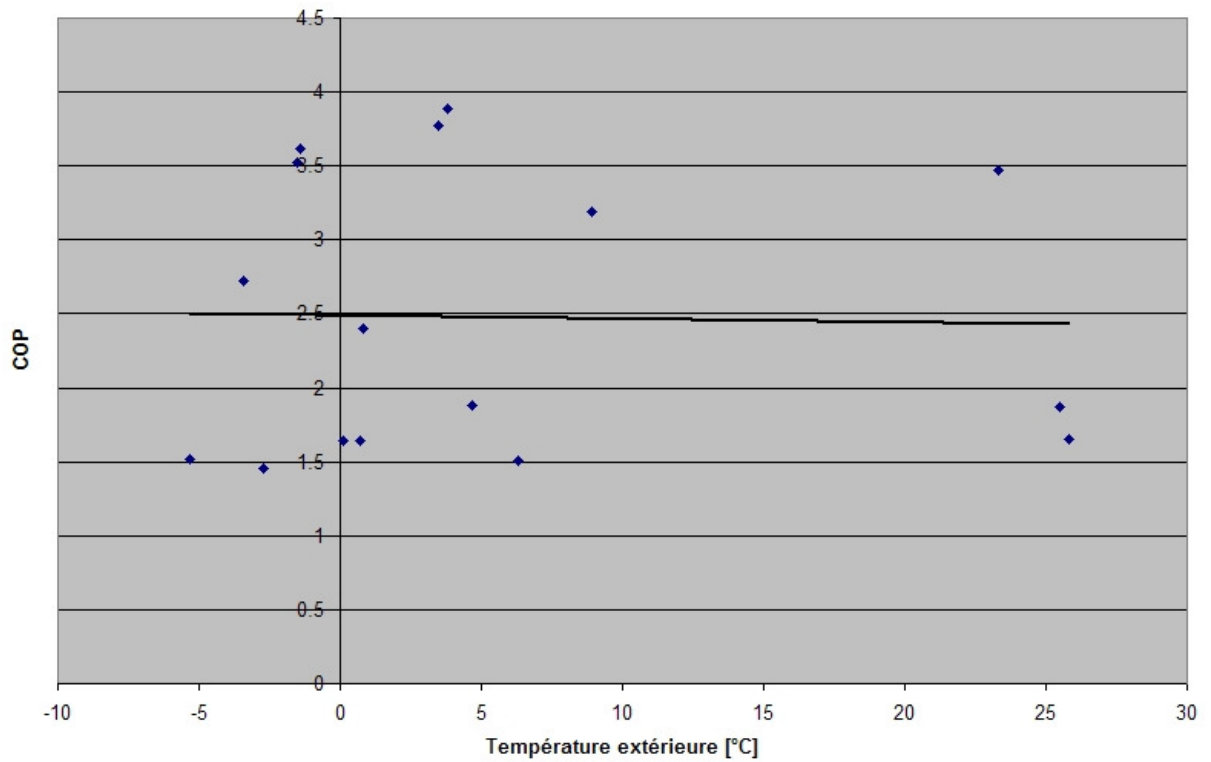


Figure 33 : COP en fonction de la température extérieure.

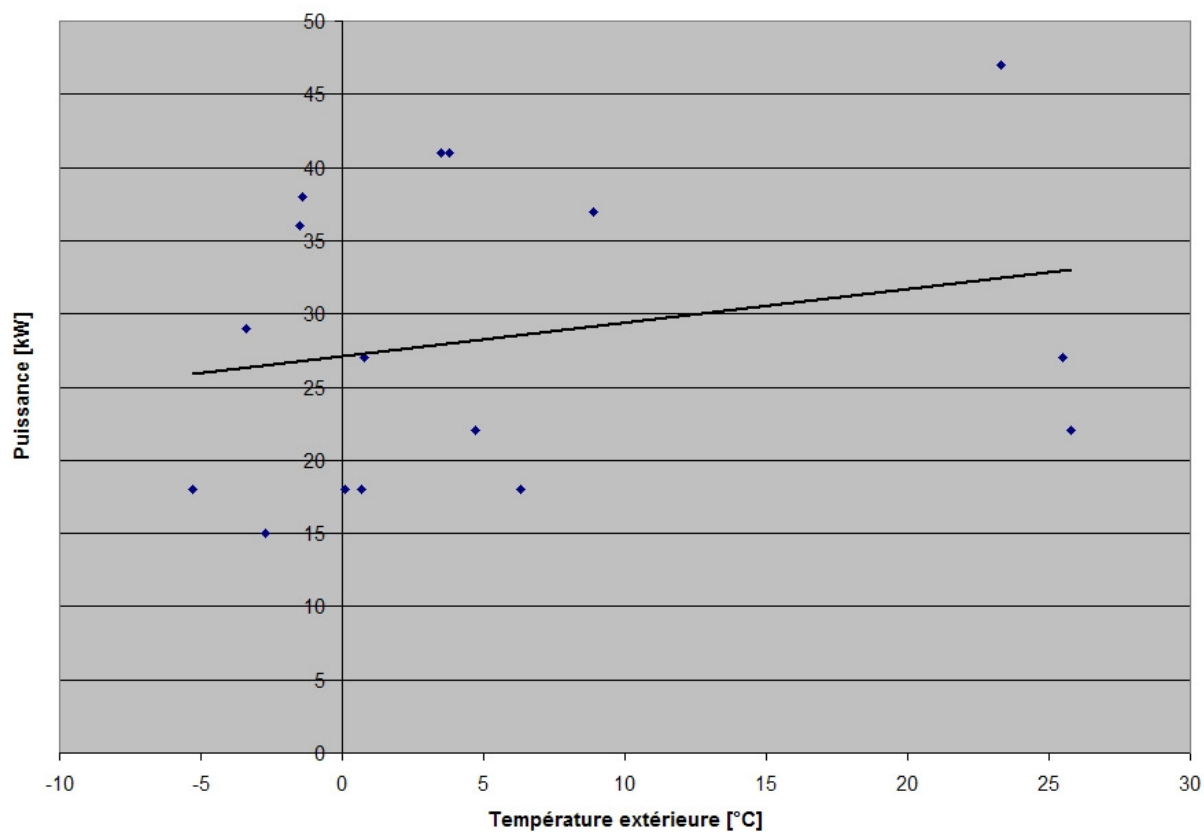


Figure 34 : puissance en fonction de la température extérieure.

Eau chaude 70°C, eau froide 15°C

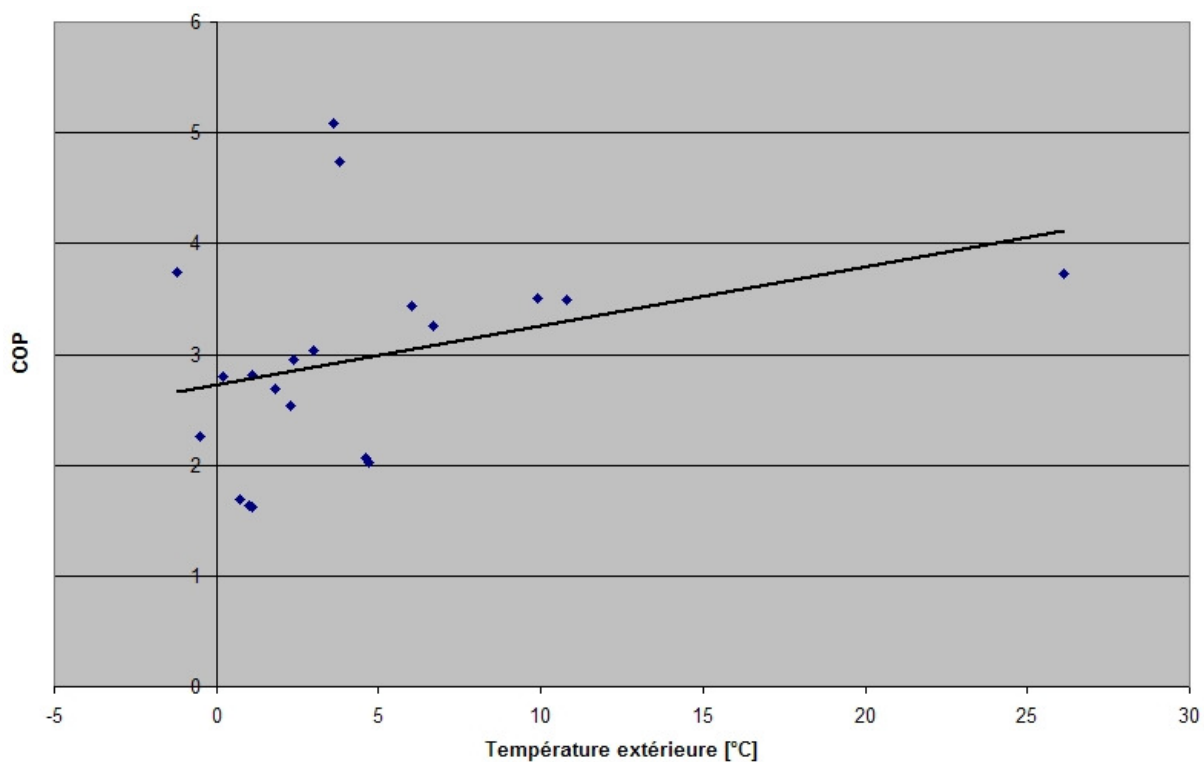


Figure 35 : COP en fonction de la température extérieure.

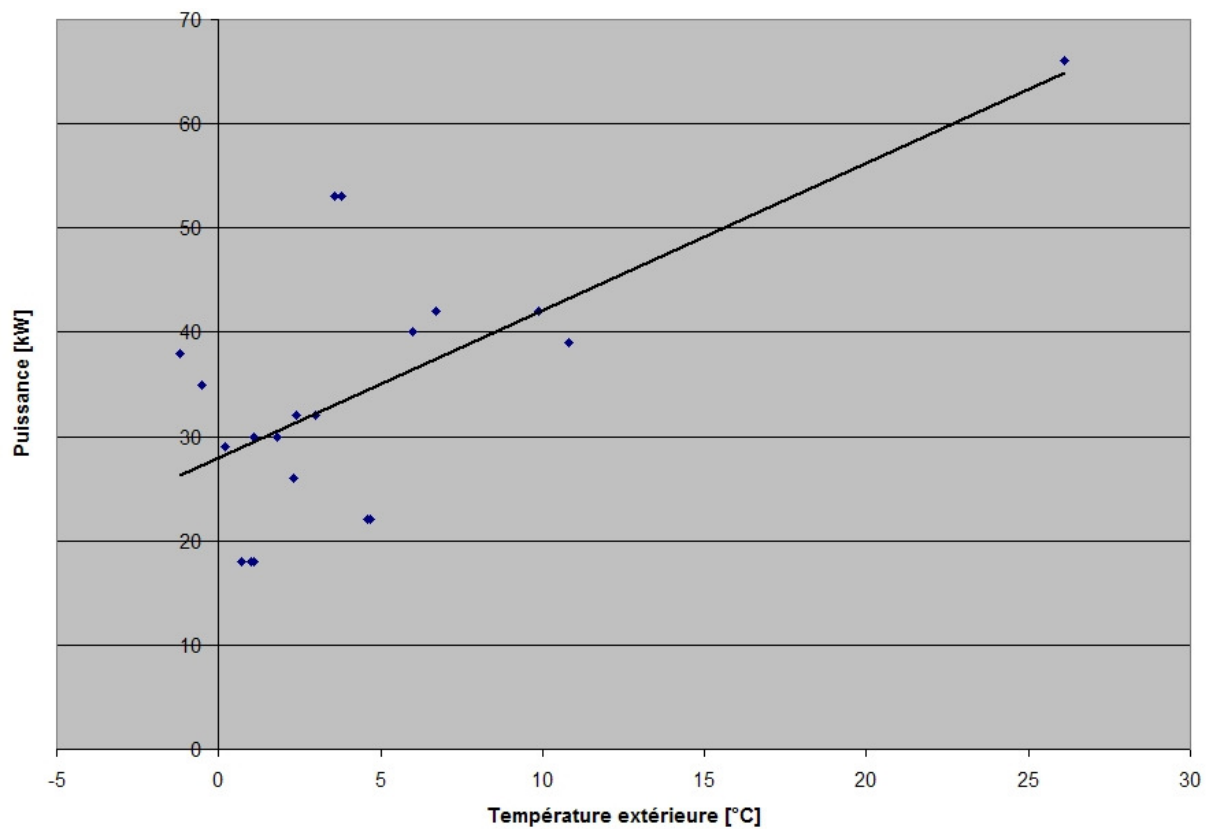


Figure 36 : puissance en fonction de la température extérieure.

Eau chaude 70°C, eau froide 20°C

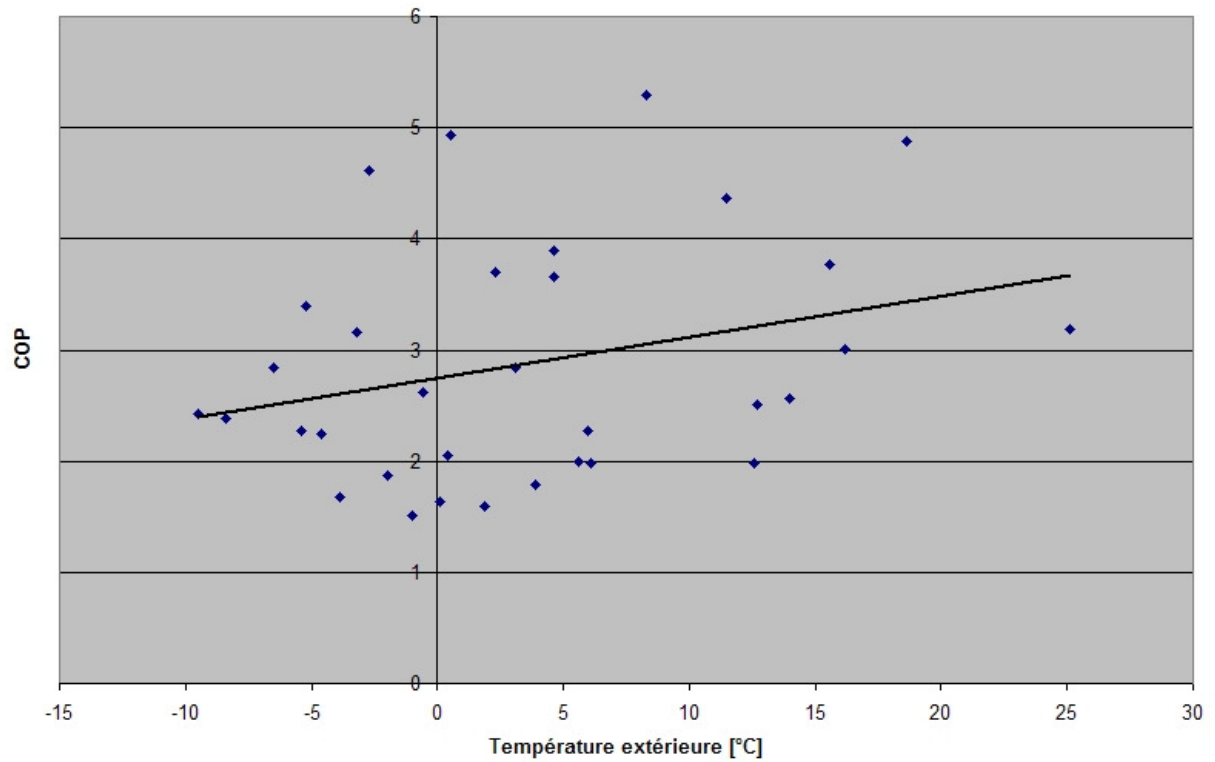


Figure 37 : COP en fonction de la température extérieure.

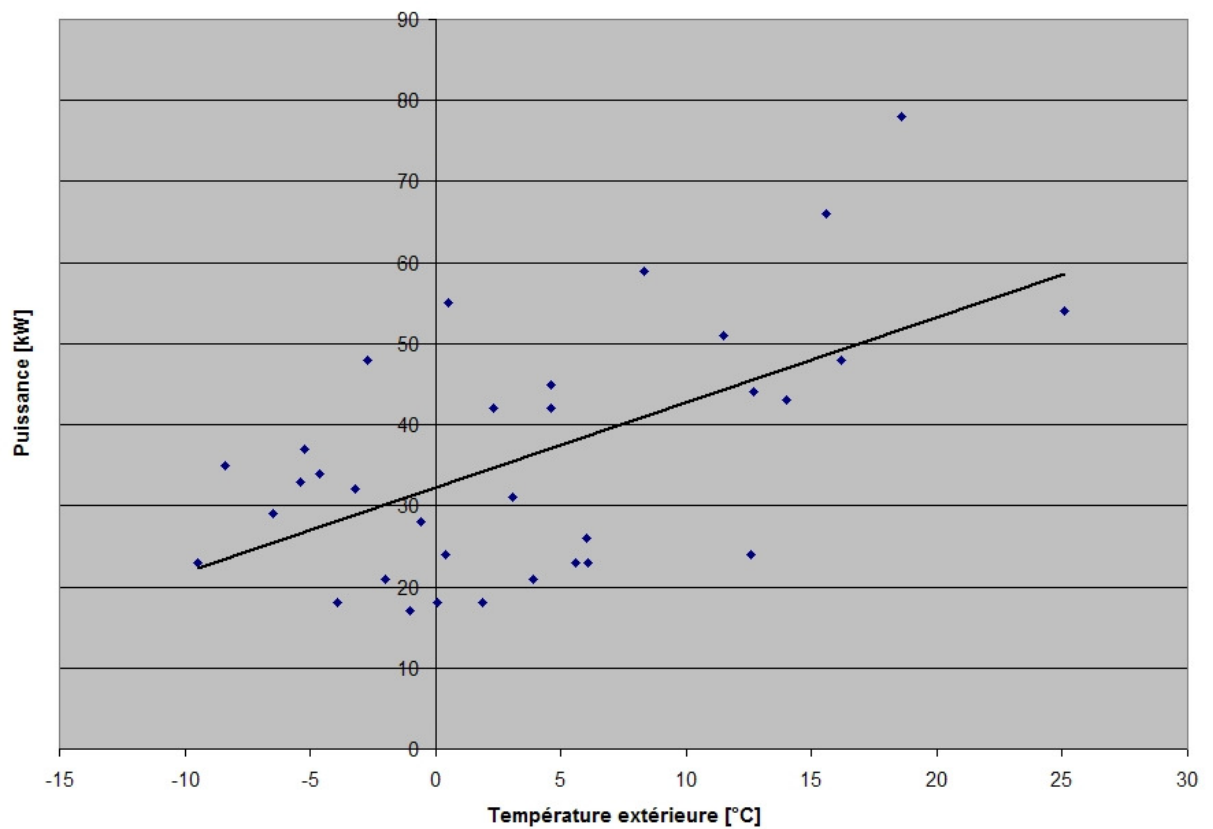


Figure 38 : puissance en fonction de la température extérieure.

Eau chaude 70°C, eau froide 25°C

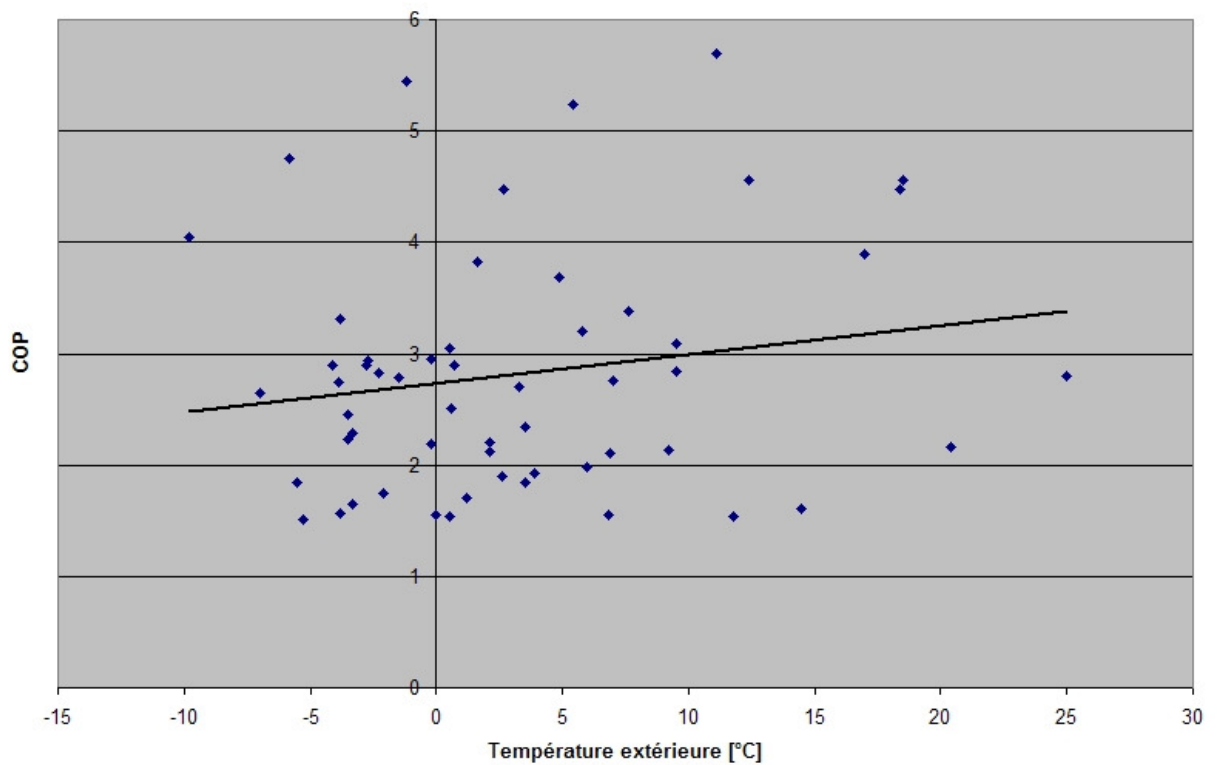


Figure 39 : COP en fonction de la température extérieure.

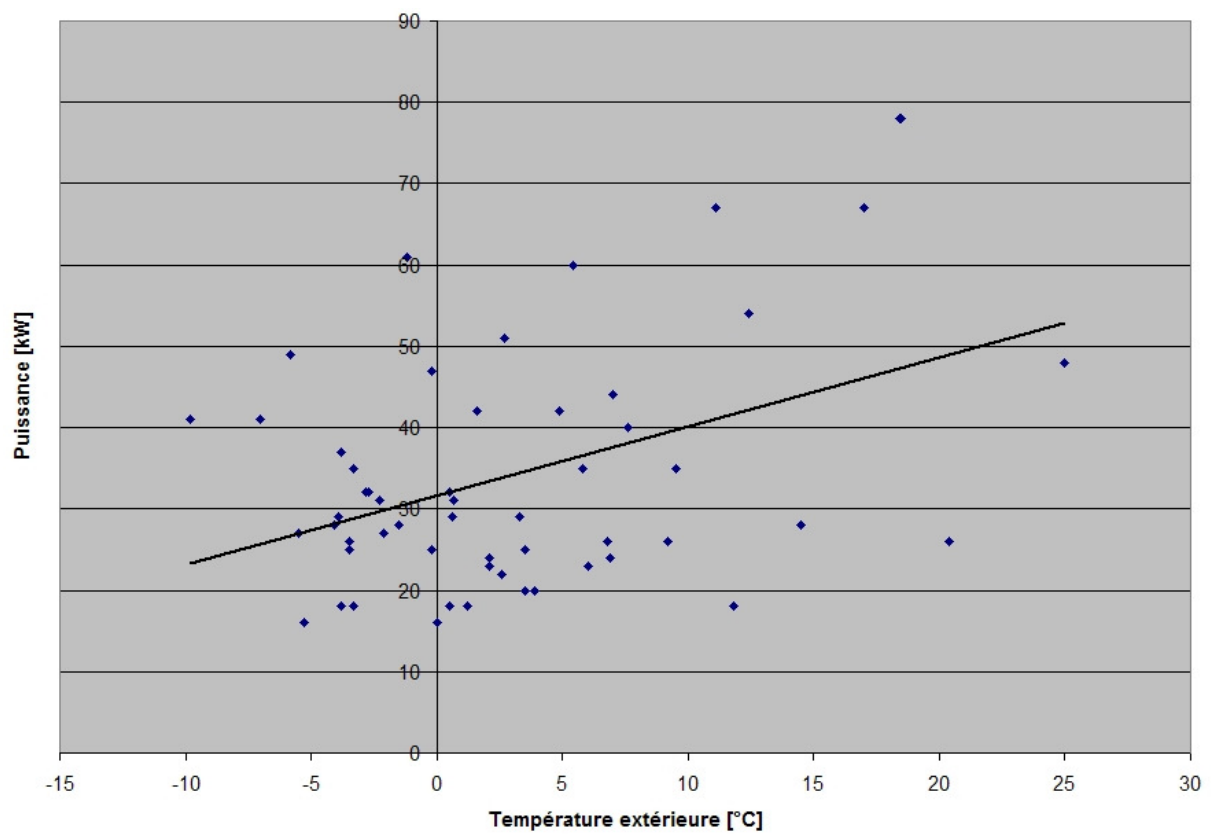


Figure 40 : puissance en fonction de la température extérieure.

Eau chaude 70°C, eau froide 45°C

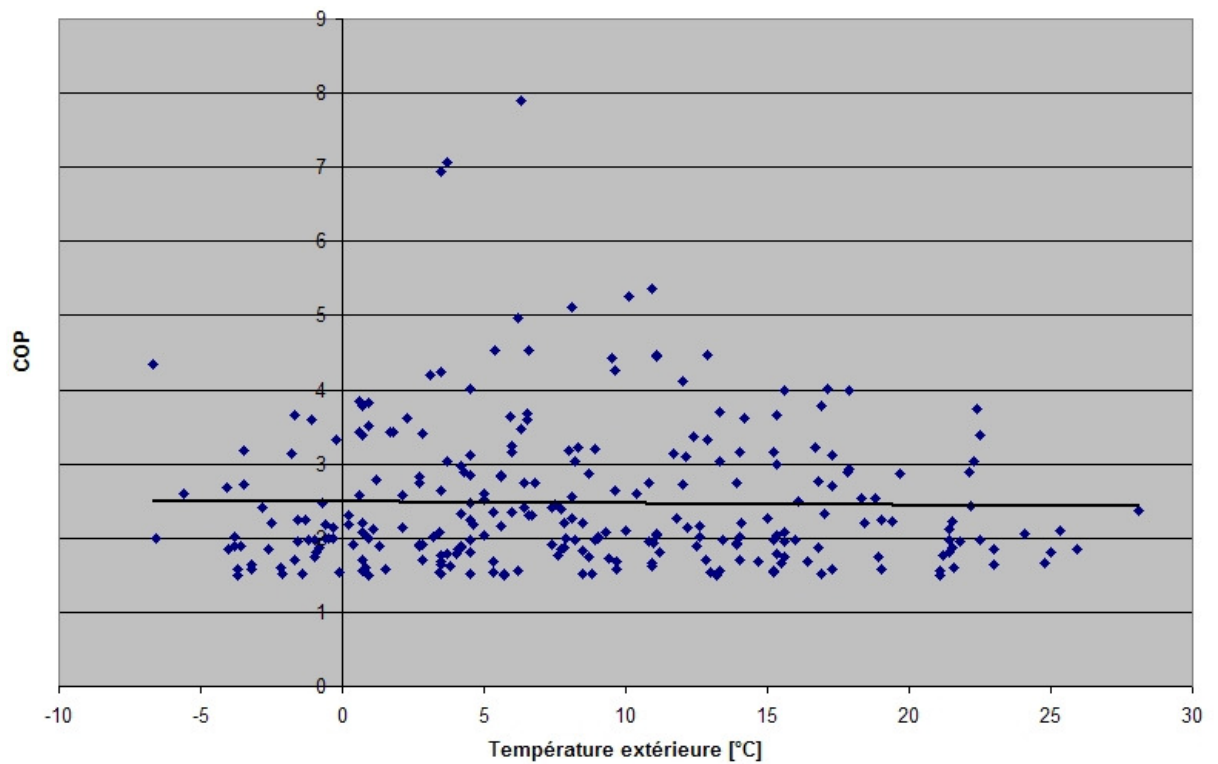


Figure 41 : COP en fonction de la température extérieure.

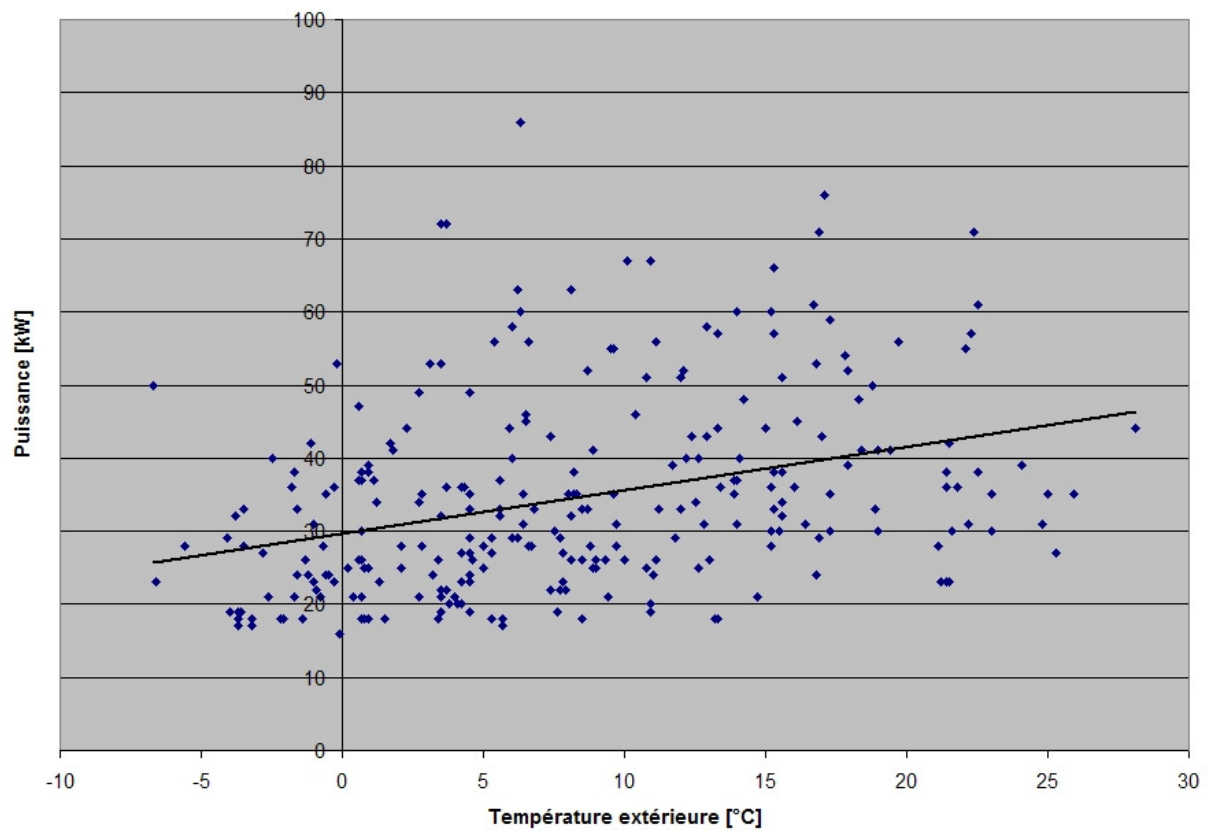


Figure 42 : puissance en fonction de la température extérieure.

Eau chaude 70°C, eau froide 50°C

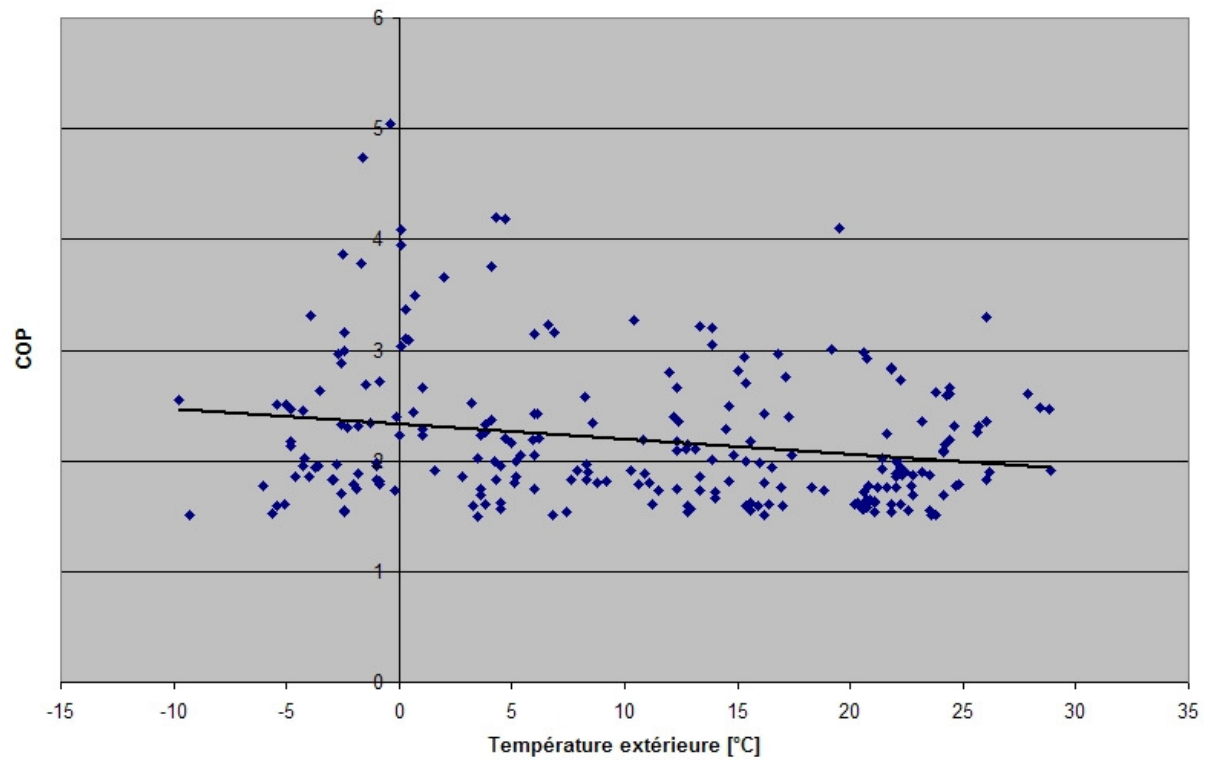


Figure 43 : COP en fonction de la température extérieure.

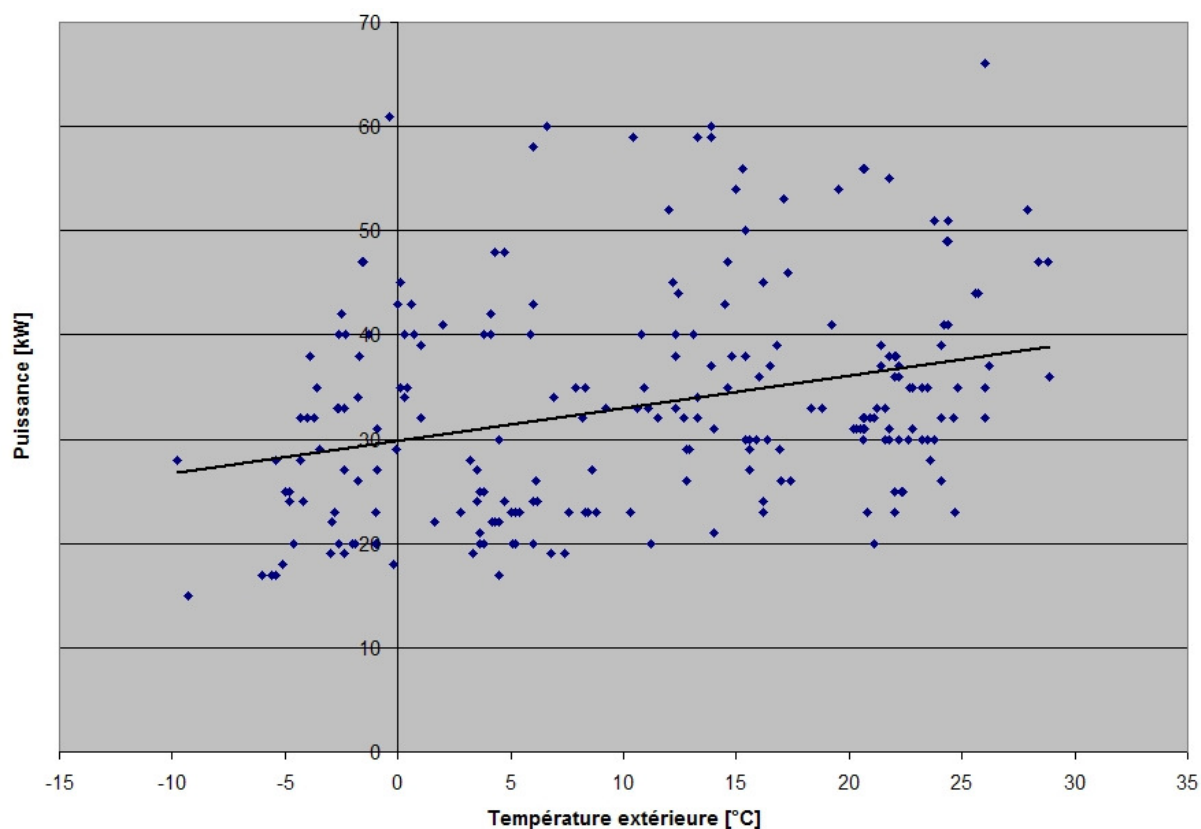


Figure 44 : puissance en fonction de la température extérieure.

Eau chaude 75°C, eau froide 10°C

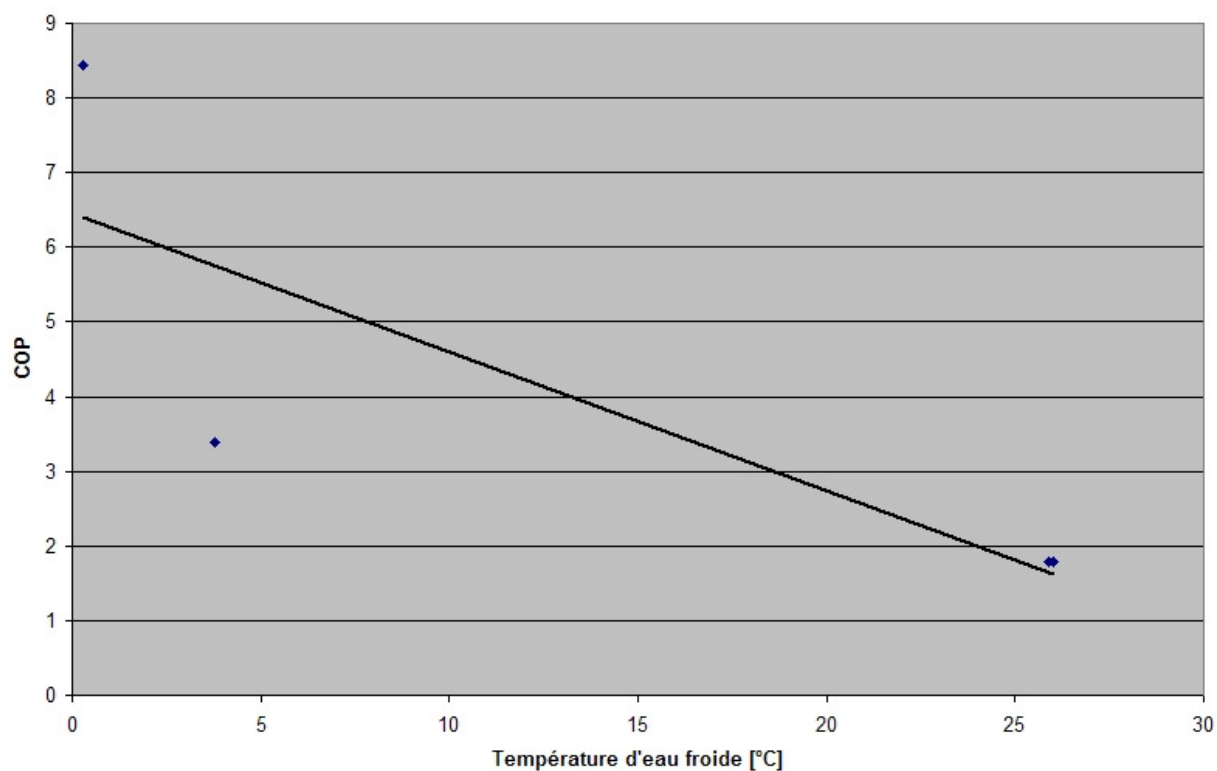


Figure 45 : COP en fonction de la température extérieure.

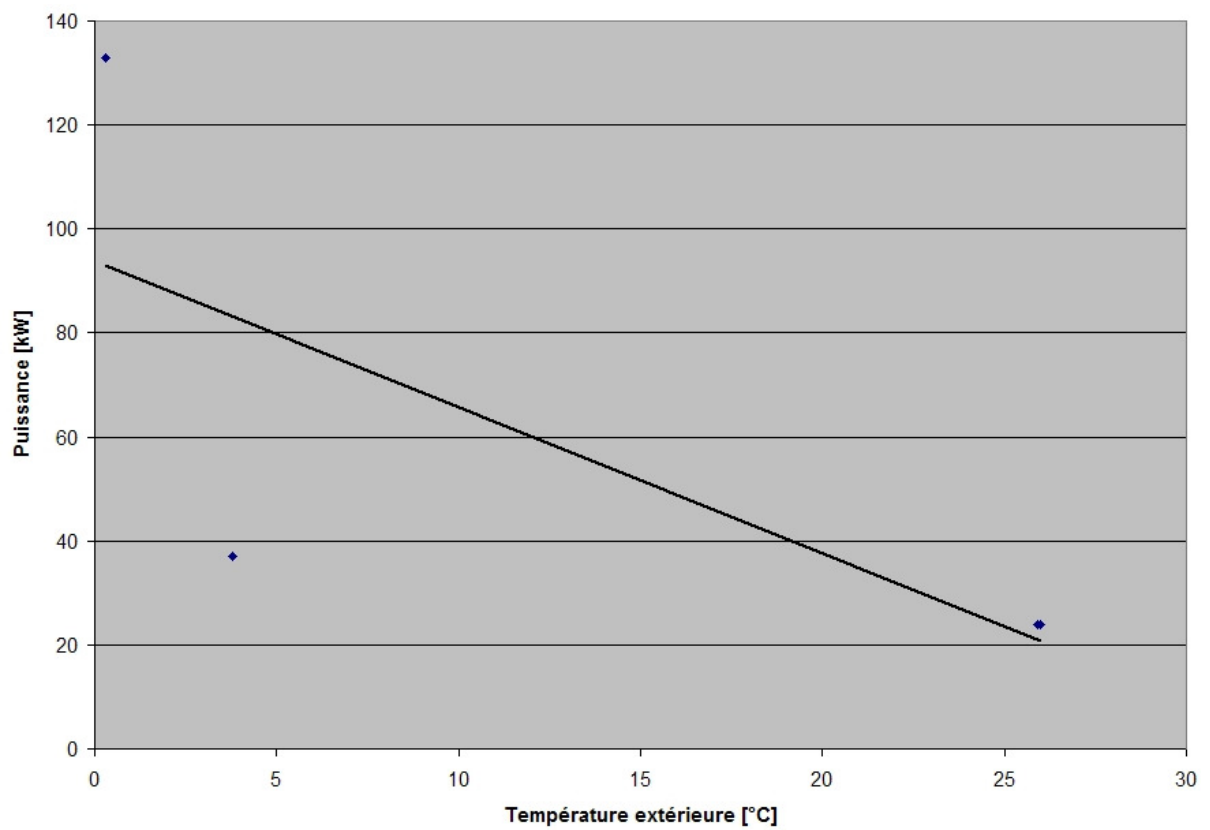


Figure 46 : puissance en fonction de la température extérieure.

Eau chaude 75°C, eau froide 15°C

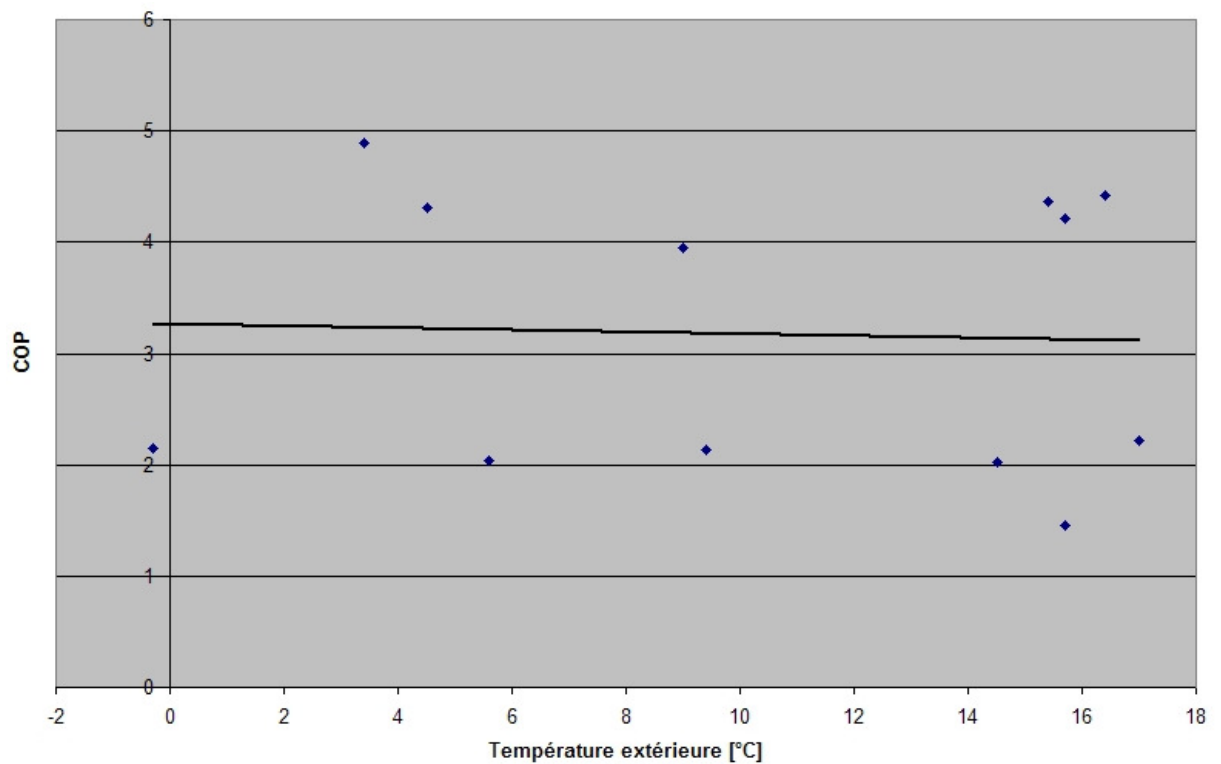


Figure 47 : COP en fonction de la température extérieure.

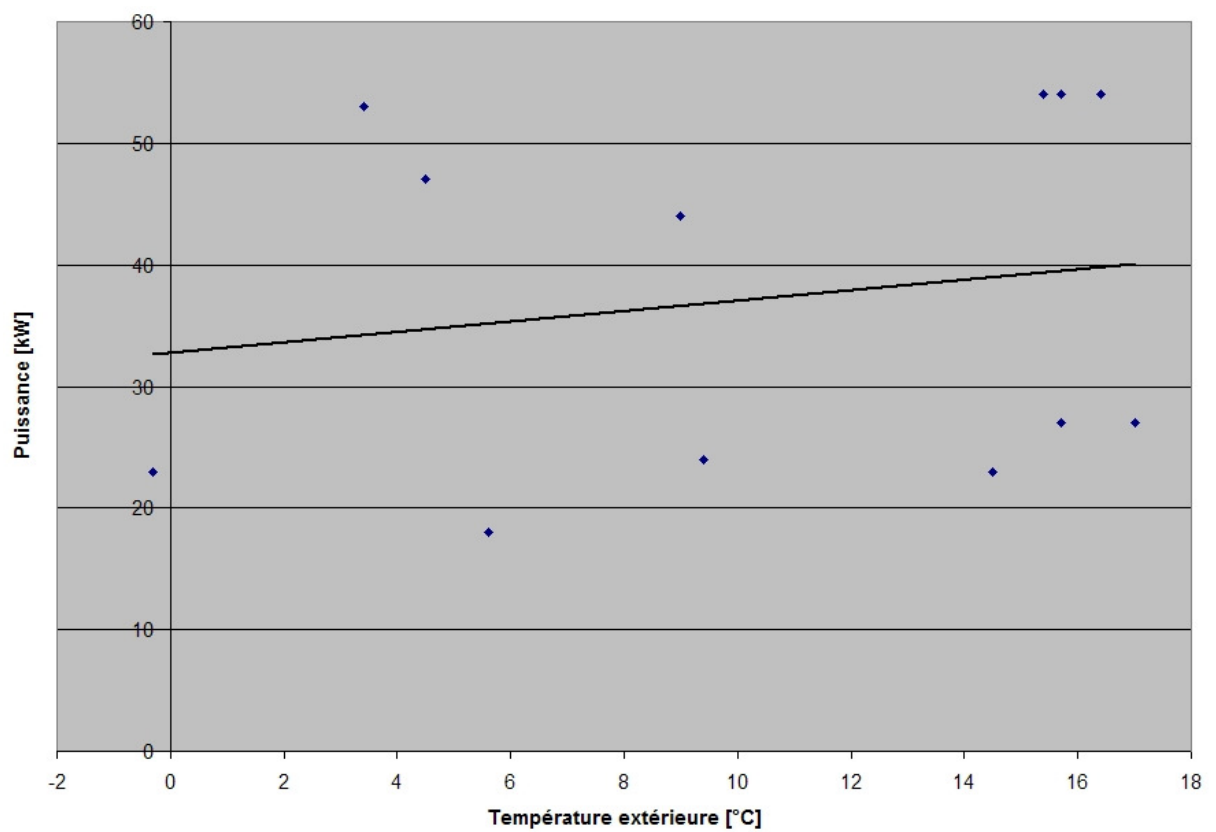


Figure 48 : puissance en fonction de la température extérieure.

Eau chaude 75°C, eau froide 20°C

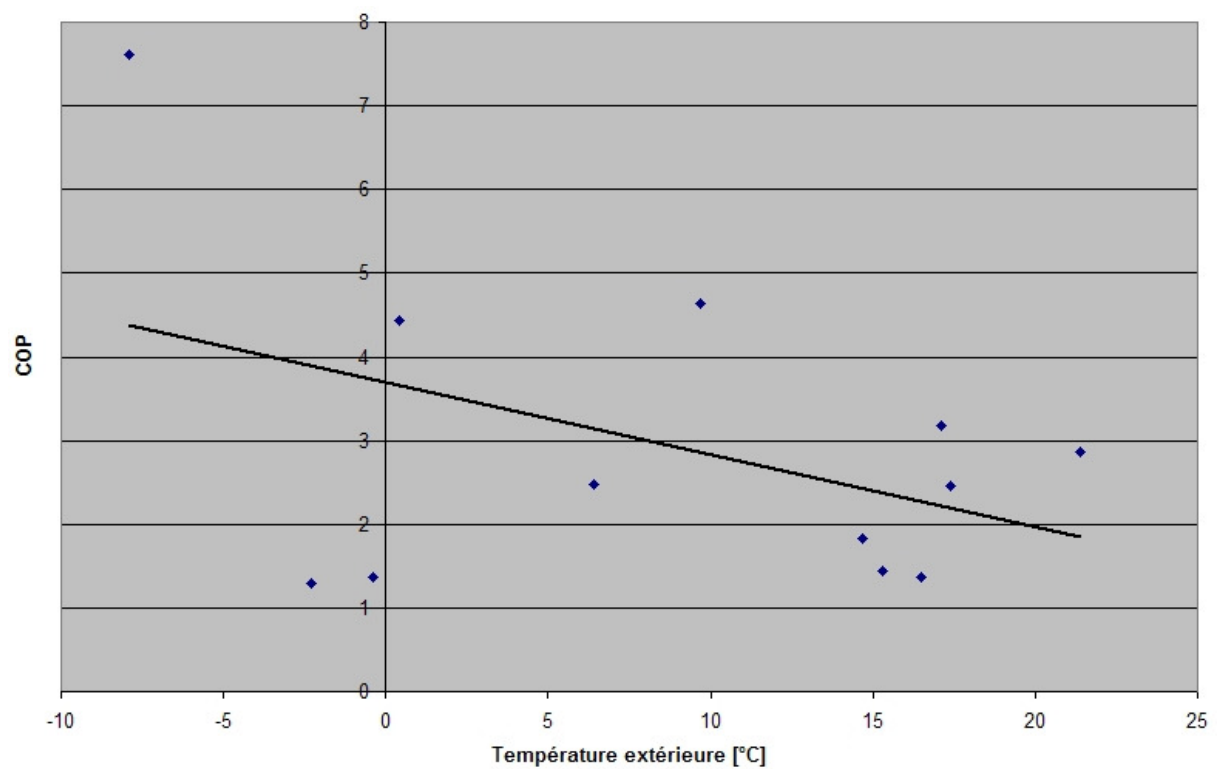


Figure 49 : COP en fonction de la température extérieure.

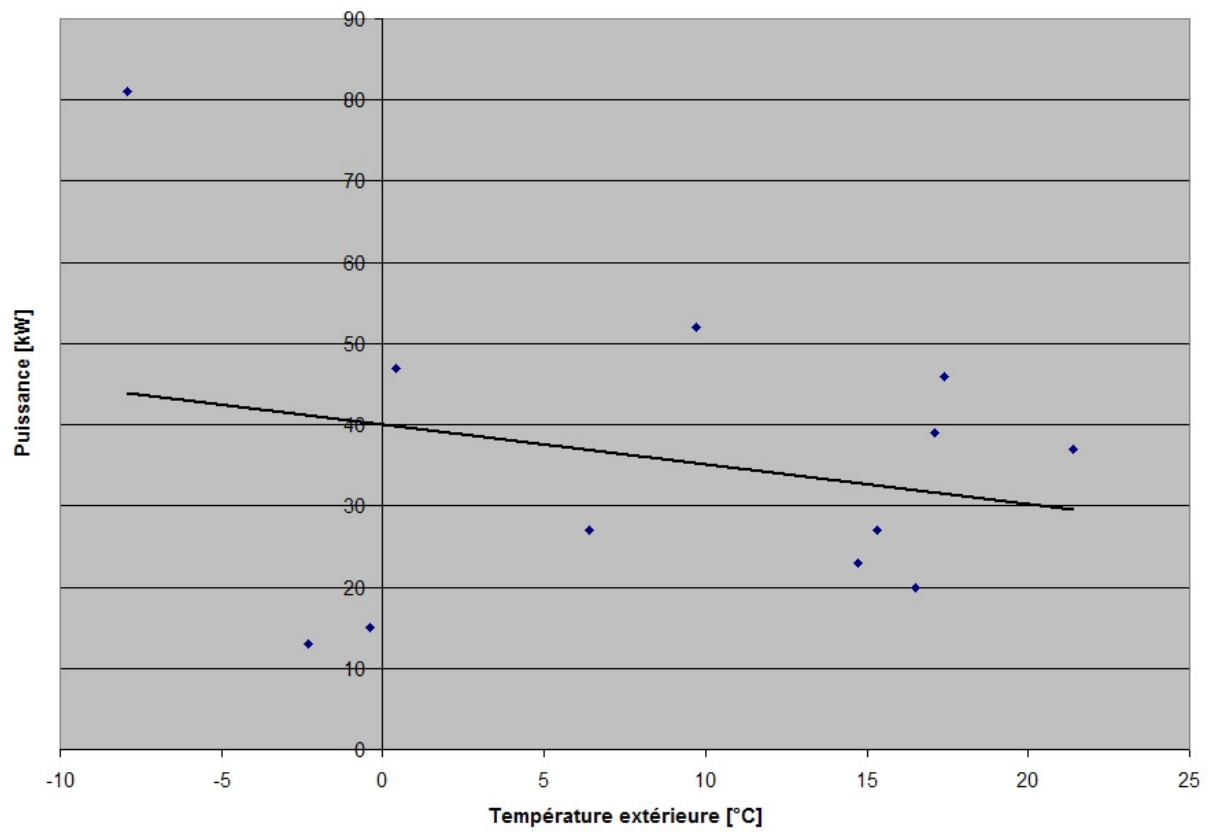


Figure 50 : puissance en fonction de la température extérieure.

Eau chaude 75°C, eau froide 25°C

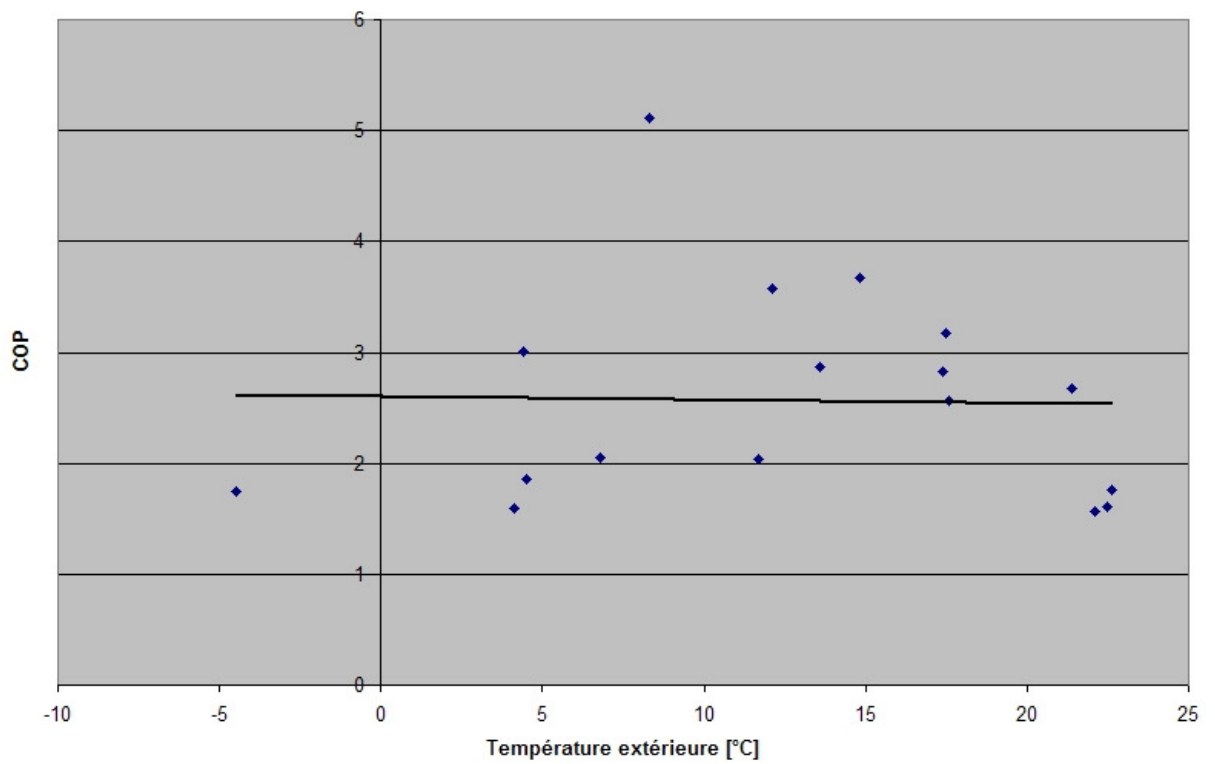


Figure 51 : COP en fonction de la température extérieure.

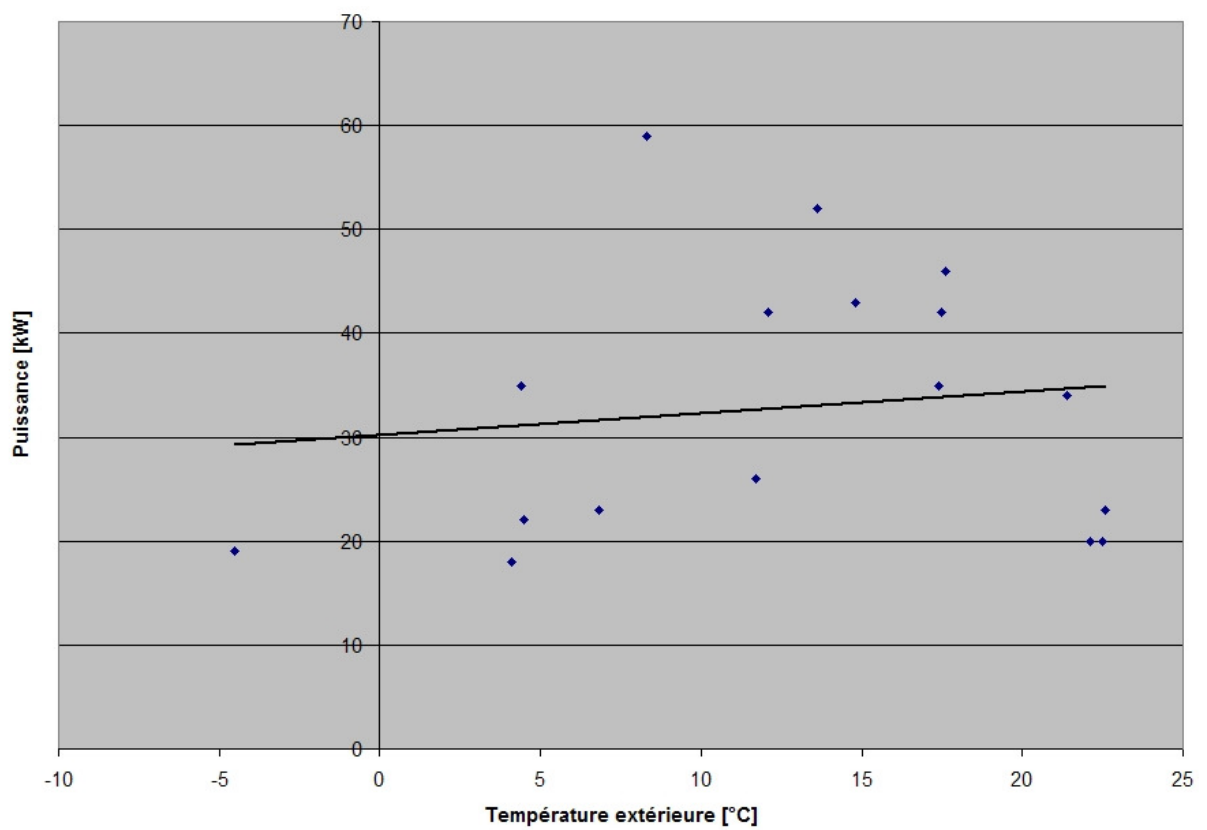


Figure 52 : puissance en fonction de la température extérieure.

Eau chaude 75°C, eau froide 45°C

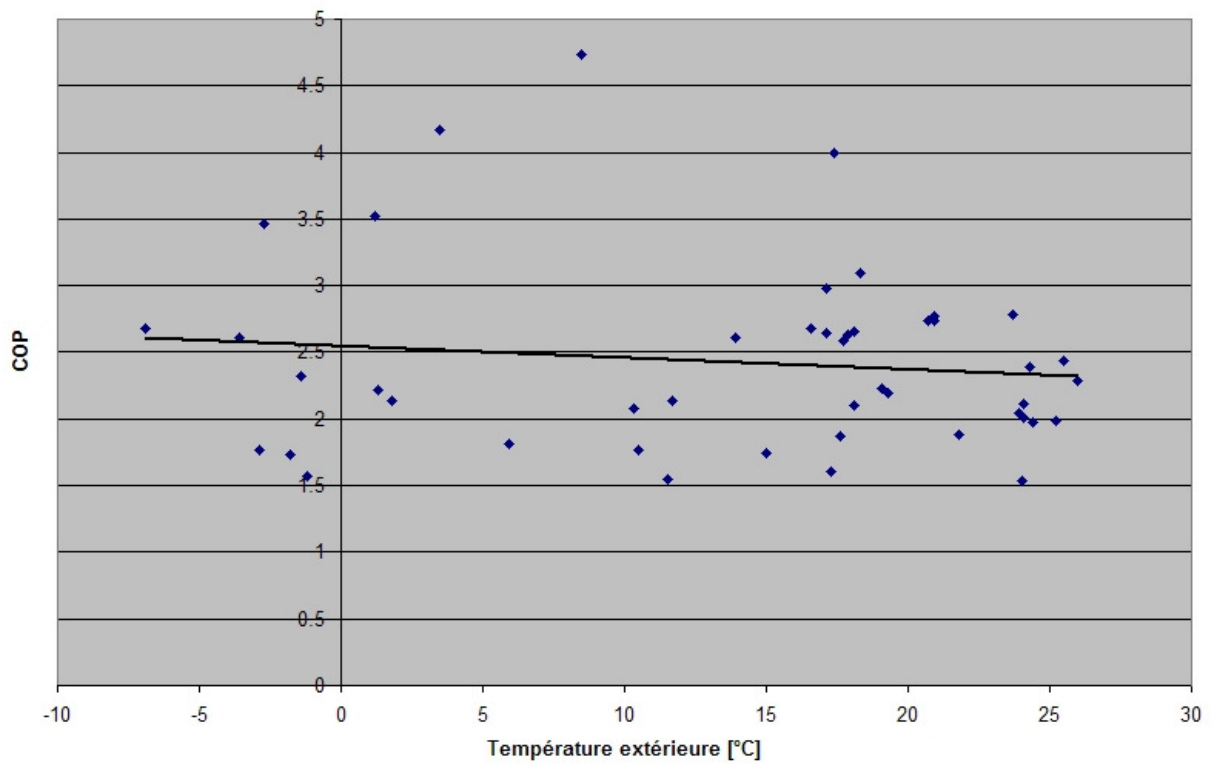


Figure 53 : COP en fonction de la température extérieure.

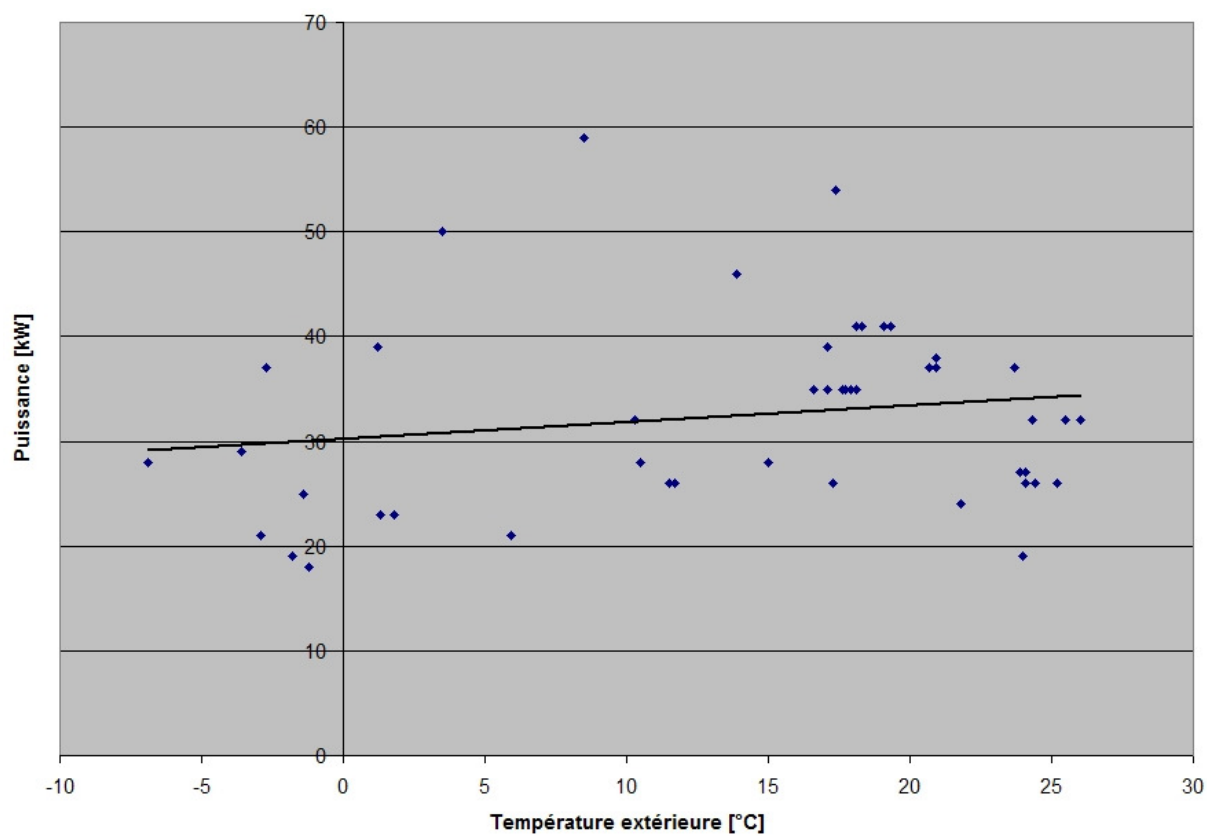


Figure 54 : puissance en fonction de la température extérieure.

Eau chaude 75°C, eau froide 50°C

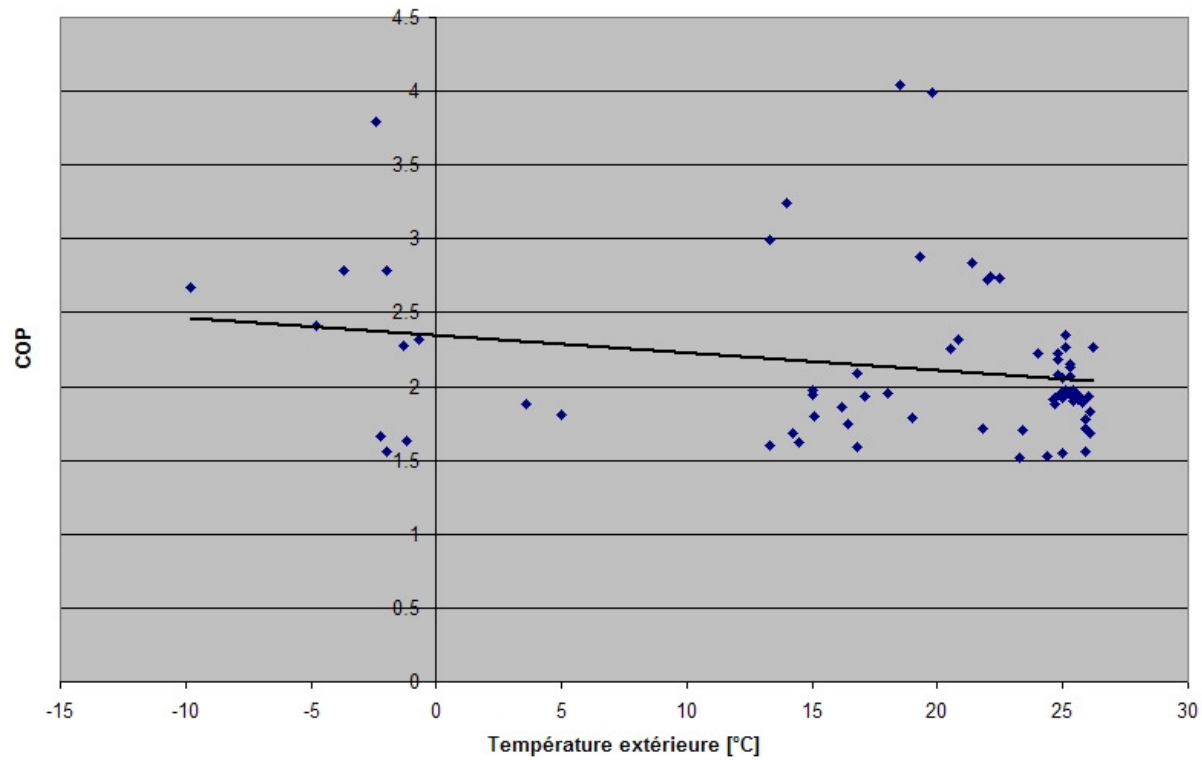


Figure 55 : COP en fonction de la température extérieure.

6. Conclusion

COMPARAISON VALEURS THÉORIQUES-MESURÉES

Eau chaude à 60 °C, eau froide à 10 °C

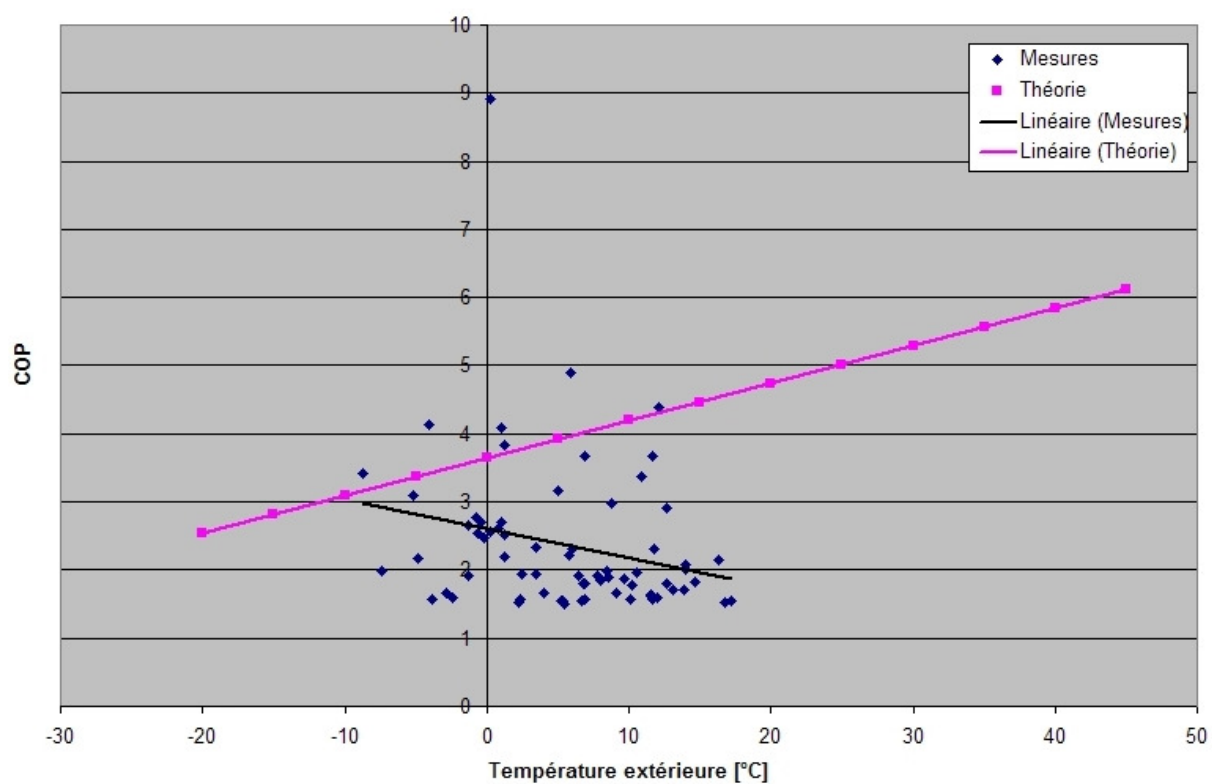


Figure 57 : COP en fonction de la température extérieure.

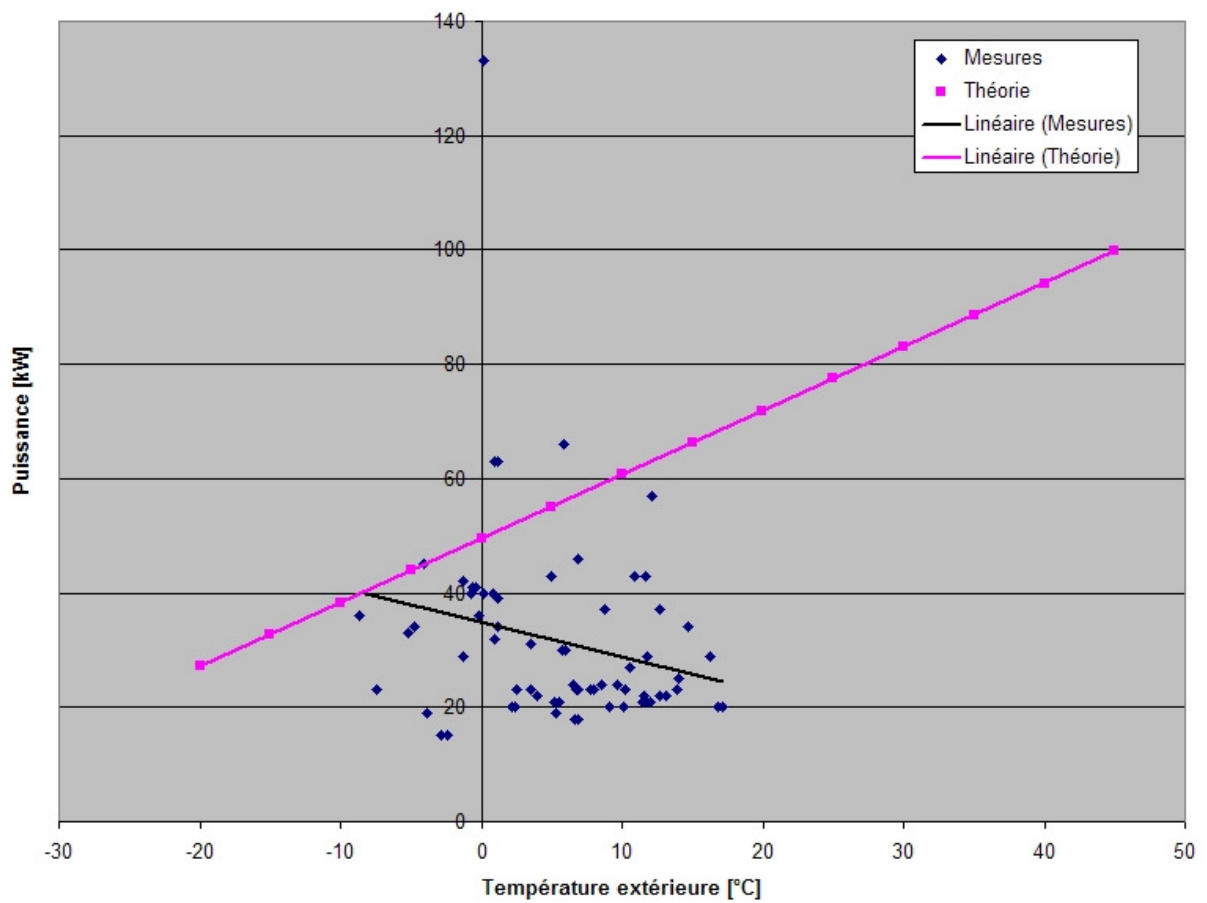


Figure 58 : Puissance en fonction de la température extérieure.

Eau chaude à 60°C, eau froide à 15°C

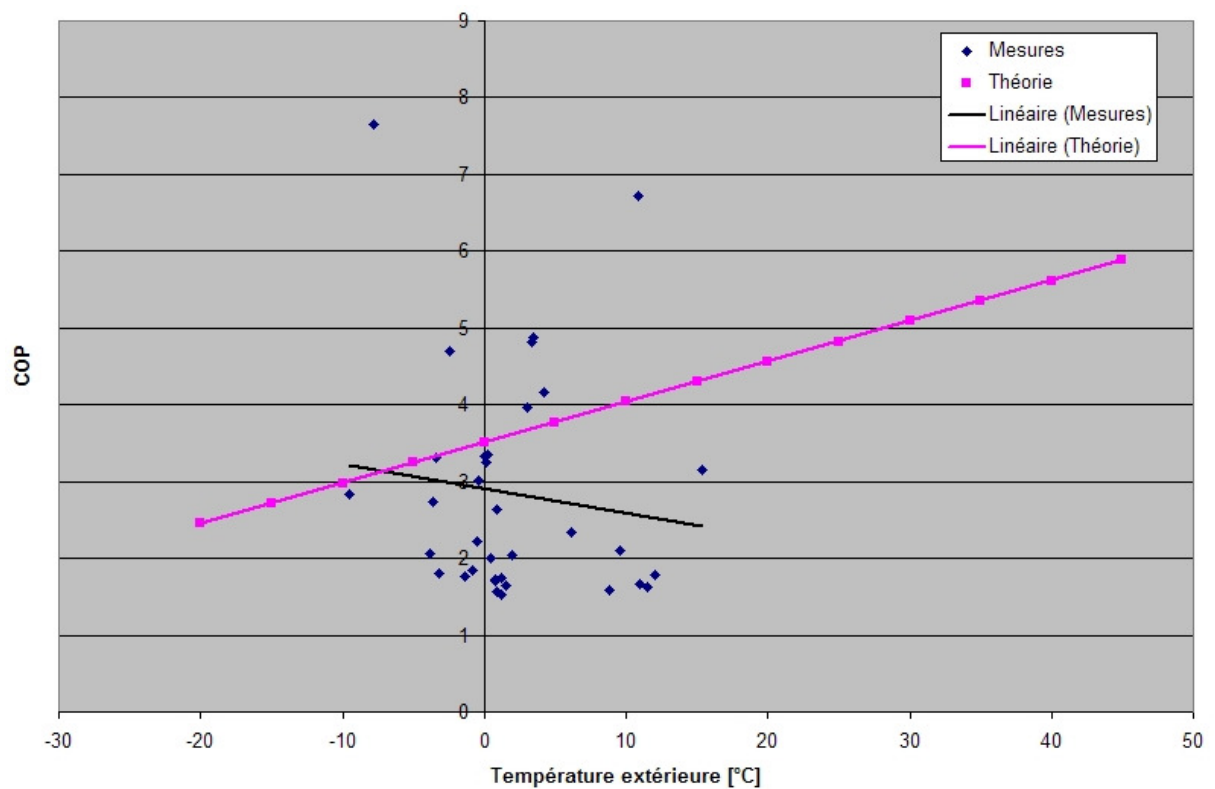


Figure 59 : COP en fonction de la température extérieure.

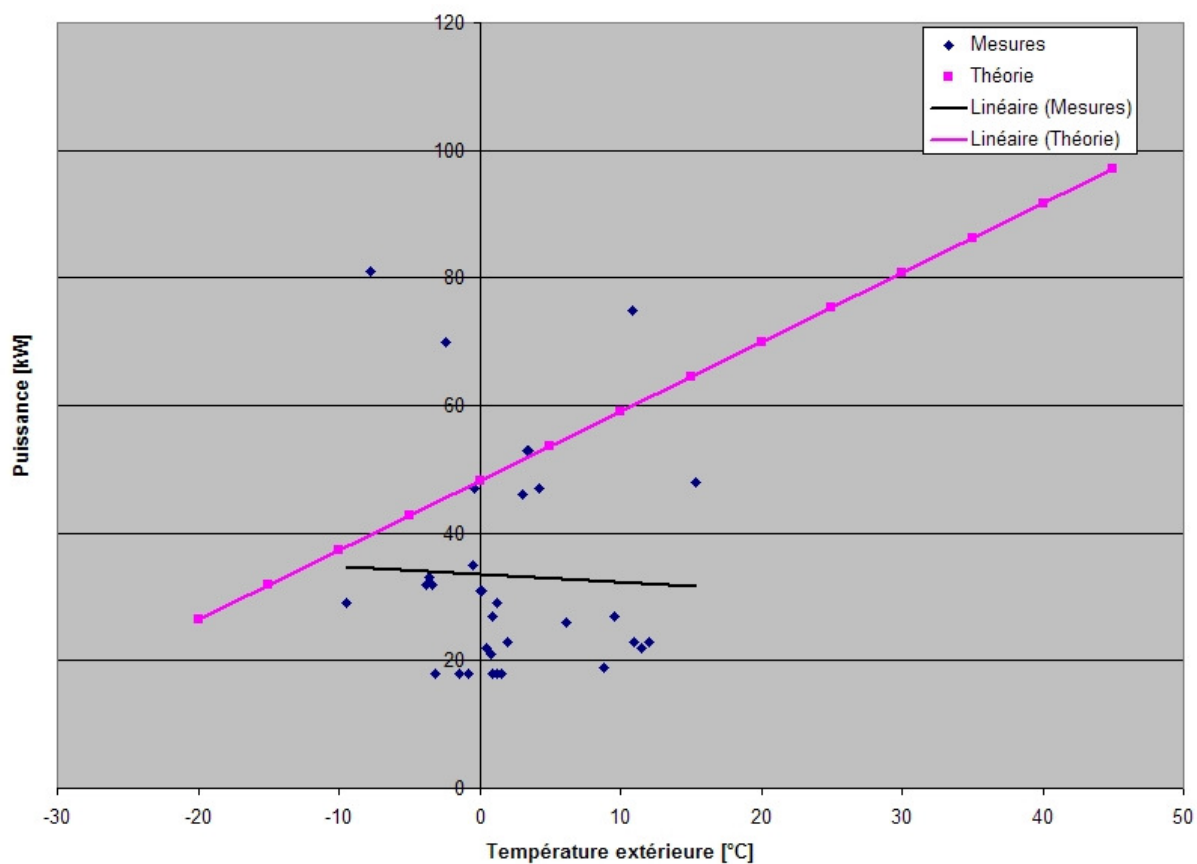


Figure 60 : Puissance en fonction de la température extérieure.

Eau chaude à 60 °C, eau froide à 20 °C

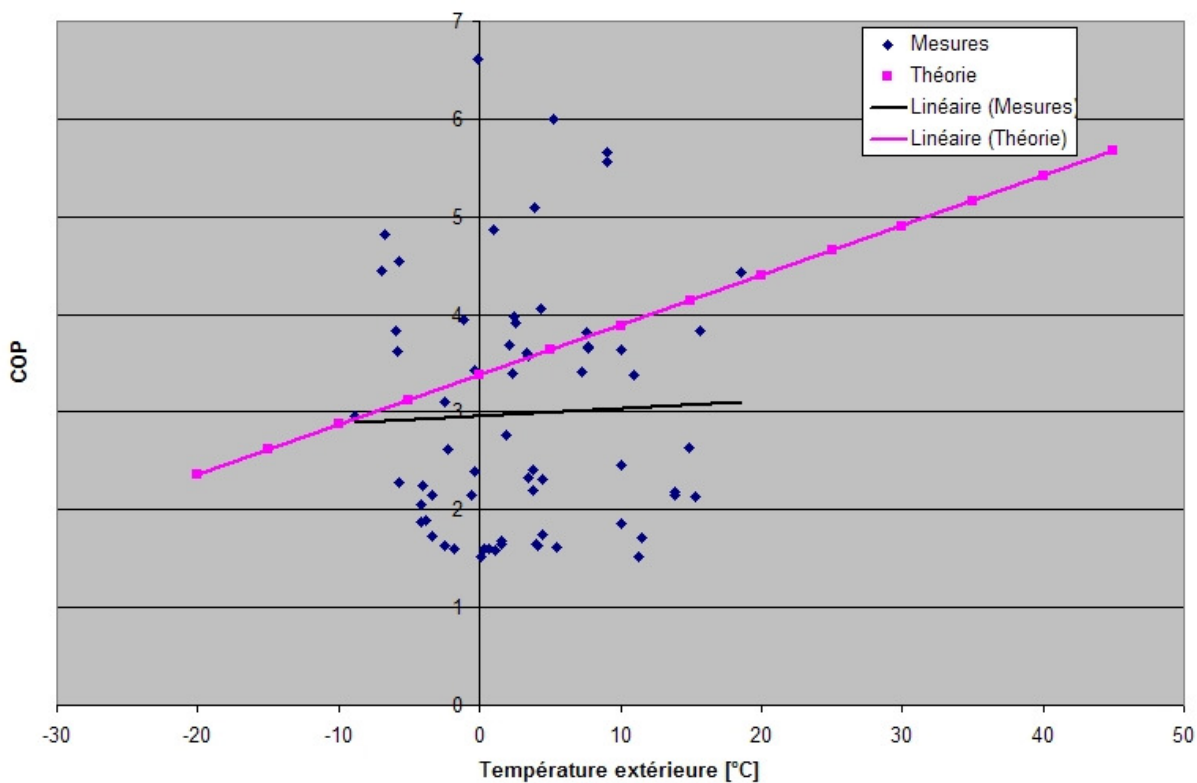


Figure 61 : COP en fonction de la température extérieure.

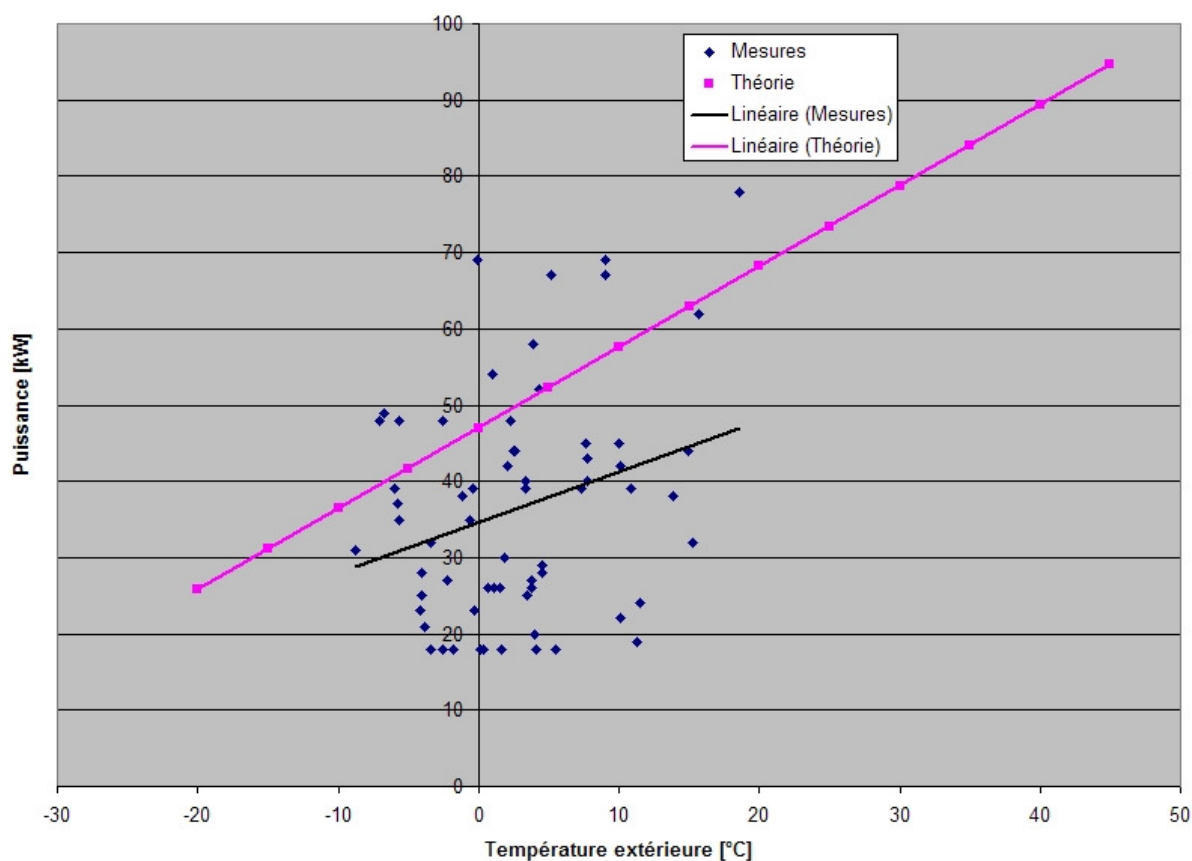


Figure 62 : Puissance en fonction de la température extérieure.

Eau chaude à 60 °C, eau froide à 25 °C

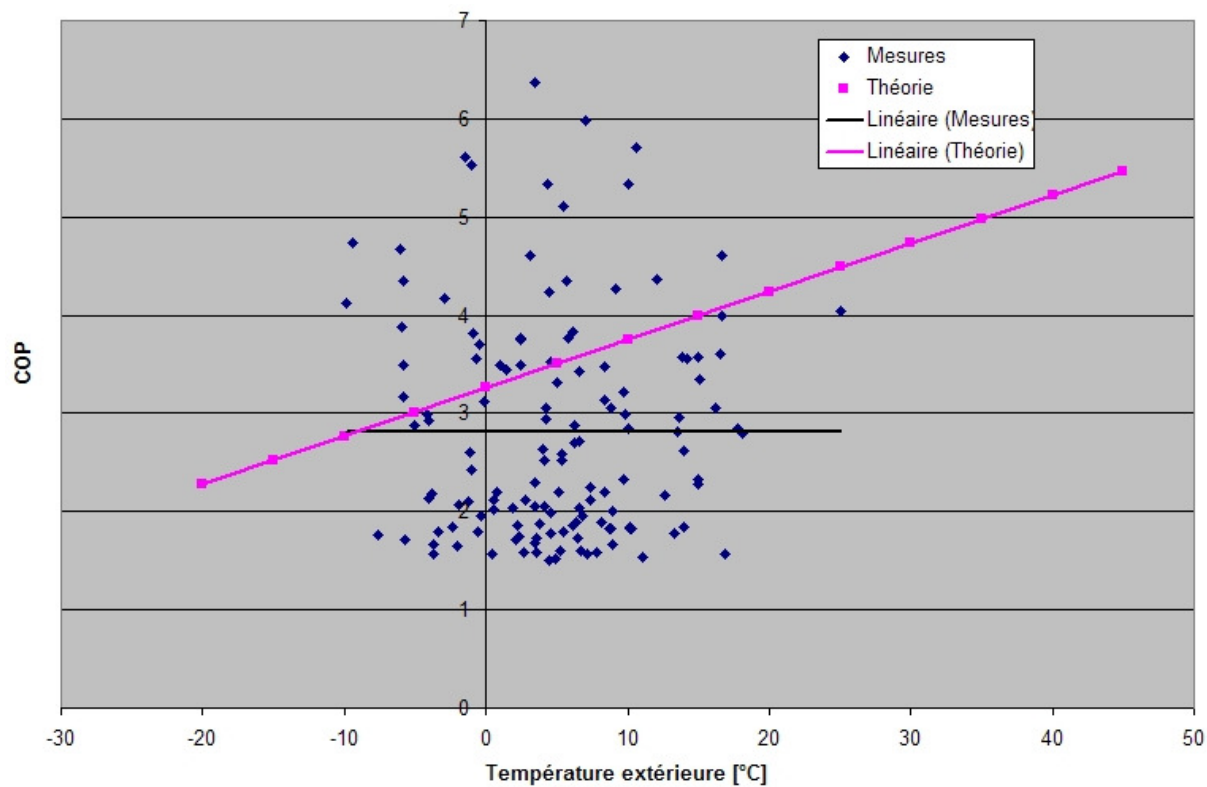


Figure 63 : COP en fonction de la température extérieure.

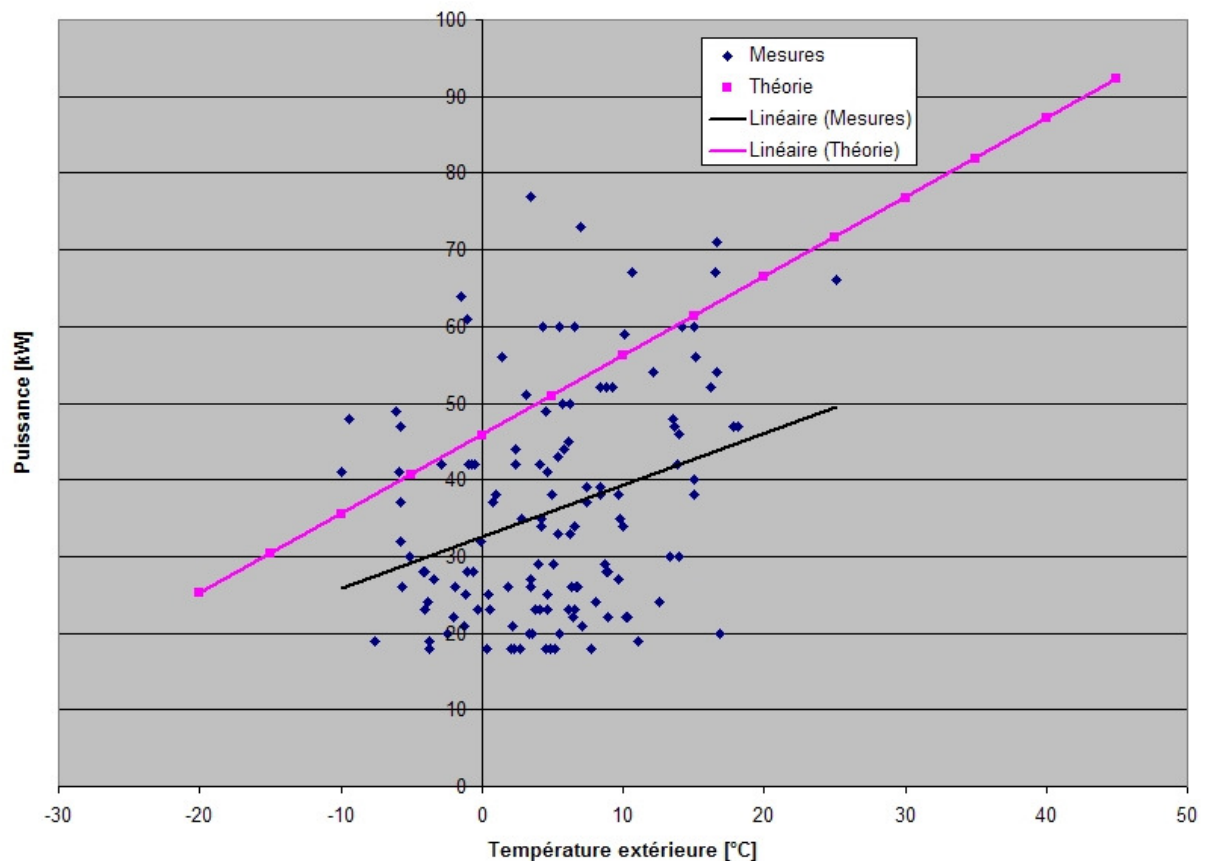


Figure 64 : Puissance en fonction de la température extérieure.

Les graphiques ci-dessus nous montre bien que les résultats théoriques fournis étaient optimistes. Néanmoins, en observant la courbe théorique, on se rend compte que l'on retrouve des résultats mesurés dans les mêmes valeurs. Une question se pose alors : est-ce que cet écart est dû au processus d'enregistrement des données qui commençait alors que la PAC n'était pas encore à son pleins régime?

Ainsi cette comparaison nous montre que d'un prime abord la PAC ne produit pas les résultats es-comptés, mais que néanmoins une étude plus approfondie pourrait nous permettre d'atteindre les résultats théoriques.

En conclusion :

Les COP mesurés sont tous inférieurs aux données théoriques du fournisseur.

Lors d'utilisation de l'eau chaude sanitaire à 60°C le COP varie de 2 à maximum 3 alors que les températures de retour de l'eau à la PAC sont très variables et instables durant la période de soutirage journalier.

On se rend compte que la variation de la température extérieure de l'air influe peu sur les données techniques de la PAC.

L'exploitation de l'utilisation de l'eau chaude à des températures supérieures à 60°C révèlent les mêmes données techniques.

La pompe à chaleur au CO₂ ne devrait pas être utilisée pour des circuits fermés de distribution de chauffage même à basse température, car la fluctuation de la température de retour à la PAC est trop variable et les écarts de température de 3K à 15K ne sont pas intéressants.

La pompe à chaleur au CO₂ ne devrait pas non plus être utilisée avec un stockage d'eau chaude car la température de retour à la PAC varie trop rapidement de 10 à 60°C, nuisant au rendement de celle-ci.

Ce type de PAC devrait donc essentiellement être utilisée comme système de préchauffage d'eau chaude à 60°C et pour une entrée d'eau froide garantie de 10 à maximum 15°C, sans accumulateur !

Références

- IEA : The latest developments in the use of CO₂ as refrigerant, Heat Pump centre news letter, 3/2006.
- Max Ehrbar et Fabrice Rognon : Potenziale von Gross-Wärmepumpen besser nutzen, Konzeption, Anwendungen, Kundensicht, Burgdorf, 2006.
- Thomas Kopp : Wärmepumpen-Forschung: Wärmequellen, Komponenten, Arbeitsmedien, Burgdorf, 2006.

Annexes

datas.xls : Fichier Excel contenant l'ensemble de valeurs mesurées lors de cette campagne (43041 enregistrements).