

Contexte

L'installation des pompes à chaleur (PAC) fait l'objet d'un développement croissant sur l'ensemble du territoire, elles répondent aux enjeux environnementaux et permettent de réaliser des économies d'énergie. Le gestionnaire de réseau ERDF, les installateurs et les utilisateurs sont confrontés à des dysfonctionnements d'un certain nombre d'appareils. Ces dysfonctionnements ont pour origines :

- Le non-respect des normes produits et/ou des normes d'installation
- Le fonctionnement en sous-puissance
- La non-compatibilité de la pompe à chaleur avec les caractéristiques du réseau

Les conséquences sont principalement :

- un mécontentement du client sur le mauvais fonctionnement de sa PAC et/ou de ses autres équipements ;
- des perturbations sur le réseau de distribution publique d'électricité pouvant se manifester chez le client concerné ou chez les voisins.

Aspects réglementaires

Caractéristiques de la tension d'alimentation

L'**arrêté qualité** (décret n°2007-1826 et arrêté du 24 décembre 2007) fournit des prescriptions techniques en matière de qualité des réseaux publics de transport et de distribution d'électricité. Il définit notamment les valeurs extrêmes de la tension délivrée aux utilisateurs du réseau basse tension :

- La valeur efficace de la tension nominale U_n en BT est 230 V en monophasé et 400 V en triphasé.
- La tension efficace, moyennée sur 10 minutes, doit rester dans la plage $U_n \pm 10 \%$.

L'arrêté qualité définit également au point de livraison un gradient de tension maximum de 2 %. Ce gradient est défini comme la chute de tension supplémentaire qui serait constatée si une charge monophasée supplémentaire de 1 kW était raccordée en ce point.

Règles de l'art pour la réalisation des installations électriques

Les normes d'installation NF C11-201 – NF C14-100 – NF C15-100, les normes harmonisées avec la directive européenne sur la compatibilité électromagnétique (dont le respect est obligatoire pour le marquage CE),

La norme NF C15-100 traite de la conception, de la réalisation, de la vérification et de l'entretien des installations électriques intérieures alimentées en basse tension. Cette norme préconise de limiter les intensités de démarrage des moteurs de manière à éviter des perturbations excessives (voir tableau 1). Elle ne fournit cependant pas de préconisation spécifique pour garantir un bon fonctionnement des matériels de type PAC qui peuvent avoir des courants de démarrage importants.

La norme NF C15-100 définit également la limite admissible de la chute de tension dans l'installation ($\leq 5 \%$ de la tension nominale en général). Ceci induit une tension d'utilisation aux bornes de la PAC (des appareils à maintenir) comprise entre $U_n + 10 \%$ et $U_n - 15 \%$.

Tableau 1 : Intensités maximales de démarrage des moteurs dans les installations (NF C 15-100)

Moteur raccordé	Locaux	Intensité maximale de démarrage	
		Réseau aérien	Réseau souterrain
En monophasé	habitation (branchement à puissance limitée)	45 A	45 A
	autres (branchement à puissance surveillée)	100 A	200 A
En triphasé	habitation (branchement à puissance limitée)	60 A	60 A
	autres (branchement à puissance surveillée)	125 A	250 A

Plan de protection des installations BT

Rapport entre le calibre du disjoncteur de branchement et la puissance maximale d'un départ BT issu du tableau de répartition du client en NF C 15-100.

En prenant un rapport de 2, un départ de 6kW est normalement le maximum pour une puissance de raccordement de 12kVA en monophasé.

En prenant la norme NF C 15-100 sur la partie installation domestique au §7-771.

Les puissances maximales suivant le tableau ci dessus sont :

- 8 kW entre phases et 7,25 kW entre phase et neutre uniquement pour des équipements de chauffage.

Pour rappel, les protections type « moteur », le fusible type aM, n'est pas autorisé en domestique mais uniquement en installation industrielle.

Conclusion :

En logement d'habitation, le départ d'installation maximal pour le chauffage est :

- **en monophasé** : 7,25 kW (courant assigné de 32A protection par disjoncteur et 25A protection par fusibles) ;
- **en triphasé** : 8 kW pour les branchements limités à 18 kVA (courant assigné de 20A protection par disjoncteur ou par fusibles).
Pour les branchements neufs 36 kVA il est autorisé d'avoir un départ chauffage de 18 kW.
Pour les PAC supérieures à 18 kW un raccordement à puissance surveillée est nécessaire

Les puissances exprimées en kW sont les puissances électriques absorbées.

Il est recommandé d'installer un disjoncteur courbe D pour les départs PAC

Aspects matériels

Les principes de fonctionnement des PAC sont détaillés en Annexe 3.

Normes permettant de limiter les perturbations émises par les appareils

Les matériels installés en Europe doivent disposer a minima du marquage CE. En particulier, ceci implique la conformité aux normes d'émission (normes européennes sur les moteurs et les appareils de démarrage progressif), en vigueur suivantes :

- norme **EN 61000-3-3** ou **EN 61000-3-11**, en matière de fluctuations de tension,
- norme **EN 61000-3-2** ou **EN 61000-3-12**, en matière d'émissions harmoniques.

En matière de fluctuations de tension, l'application de la norme EN 61000-3-3 implique :

- un courant de démarrage inférieur à environ 30 A pour les pompes à chaleur alimentées en monophasé
- inférieur à environ 50 A pour les pompes à chaleur alimentées en triphasé.

Attention, certains matériels « triphasés » n'ont de triphasé que les résistances d'appoint ; dans ce cas, ce sont les règles du monophasé qui s'appliquent pour le moteur de la pompe.

En présence d'une pompe à chaleur ayant un courant de démarrage plus élevé, le niveau de perturbations peut encore être maîtrisé si l'impédance du réseau d'alimentation, au point de livraison du client, est suffisamment faible.

Dans ce cas, le fabricant de l'équipement doit déclarer, dans le manuel d'instructions, au client :

- que la PAC ne peut être raccordée qu'à un réseau ayant une impédance inférieure à une valeur maximale Z_{max} (valeur à déclarer par le fabricant),
- ou que la PAC est réservée aux locaux présentant une capacité d'alimentation ≥ 100 A par phase

Normes et labels permettant de garantir les performances énergétiques des PAC

NOTA : Les différents labels cités correspondent tous à des essais réalisés selon la norme EN14511 qui précise les conditions d'essais.

Pour aider l'utilisateur dans le choix de son matériel, un certain nombre de normes et/ou labels ont été mis en place afin notamment de définir les conditions de mesure des performances des machines :

- Marque NF sur la PAC. Cette marque fixe des exigences minimales de performance énergétique pour chaque type de PAC. A titre d'exemple :

- Air extérieur/air : COP = 3,3 à 7°C / 20°C, COP = 1,6 à -7°C / 20°C, démarrage à -15°C.
- Air extérieur/ eau : COP = 3.3 à 7°C / 35°C, COP = 2 à -7°C / 35°C
- Les performances énergétiques de chaque type de PAC ainsi que la liste des matériels ayant obtenus la marque NF PAC (après demande d'évaluation et acceptation) est consultable sur le site : www.certita.org.

- L'Ecolabel / NF Environnement : Les écolabels distinguent des produits et des services plus respectueux de l'environnement. Leurs critères garantissent l'aptitude à l'usage des produits et services, et une réduction de leurs impacts environnementaux tout au long de leur cycle de vie. Pour les pompes à chaleur, ces exigences minimales de performances sont :

- Air extérieur / air : COP = 2,9 à +2°C / 20°C
- Air extérieur / eau : COP = 3.10 à 2°C/35°C

Le référentiel permettant d'atteindre les critères de l'Ecolabel est consultable sur le site : www.ecolabels.fr.

- Le Label DACH (D=Allemagne, A= Autriche, CH=Suisse) : Ce label, ne concerne que les PAC Air/eau. L'obtention du label est lié à une limite fixée sur un point à +2°C d'air extérieur : COP = 3 pour une PAC Air/Eau.

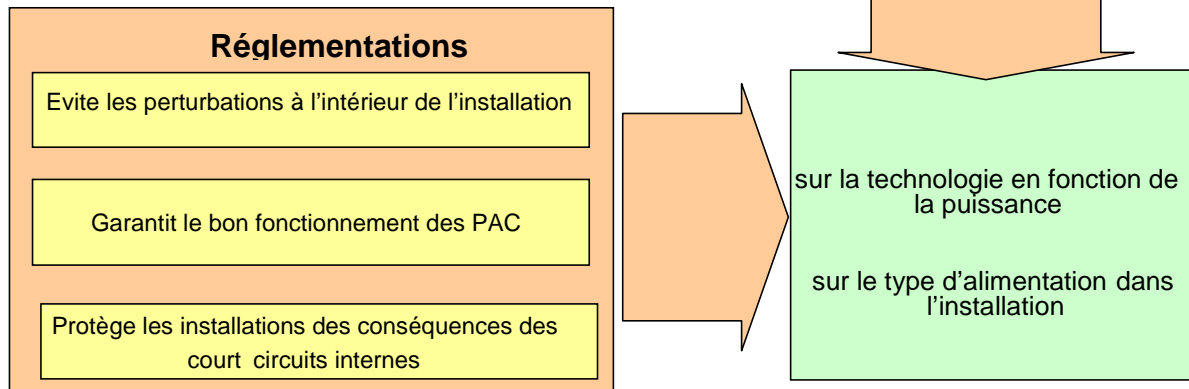
- Étiquette énergie (Europe) : La directive européenne 92/75/CE concernant la consommation d'énergie des climatiseurs à usage domestique impose l'étiquetage de tous les modèles concernés présentés à la vente dans les magasins de détail ou grandes surfaces. La classe d'efficacité énergétique dépend du COP. Par exemple pour un climatiseur réversible Air/Air de type multi-split (donc une PAC), la classe A correspond à un COP de 3,6 pour un air extérieur à +7°C et un air intérieur à 20°C.

- En complément de ces différents labels et normes, il existe également un marquage EUROVENT (certification privée) : Il s'agit d'une association de constructeurs de PAC certifiant les performances énergétiques de matériels thermodynamiques (production de froid et réversibles). L'objectif est de garantir les puissances et les COP (ou Efficacité Frigorifique) annoncés par les constructeurs. Les produits sont soumis à des essais de vérification des caractéristiques du catalogue par prélèvement au hasard (essais réalisés en laboratoire indépendant).

- Le site de l'Association Française des Pompes à Chaleur (www.afpac.org) peut également être utilement consulté.

Mise en œuvre

Préconisation sur l'utilisation des différentes technologies de PAC



Les tableaux ci dessous donnent une valeur indicative des courants nominaux et de la puissance nominale des PAC pour respecter les intensités de démarrage préconisées dans le cadre de l'application de la norme de fluctuation de tension EN 61000-3-3. Ils sont issus des ordres de grandeur observés entre le courant de démarrage ($I_{démarrage}$) et le courant nominal ($I_{nominal}$) selon les technologies de démarrage considérées.

L'utilisation de pompes à chaleur ne répondant pas aux exigences de la norme EN 61000-3-3, mais aux exigences de la norme NF C 15-100, est possible dans certaines conditions de réseau (voir chapitre « Aspects réglementaires »), mais présente un risque tant que les conditions d'impédance réseau maximum acceptable (valeur à déclarer par le fabricant de l'appareil) ne sont pas connues.

Tableau 2 : Valeurs préconisées des courants et puissances des PAC pour répondre aux exigences de la norme EN 61000-3-3 selon les systèmes de démarrage utilisés
Cas des pompes ou moteurs monophasés

PAC ou moteur Monophasée	Intensité maximale de démarrage I_d (A)	Intensité nominale du moteur I_n (A)	Puissance nominale maximale du moteur (kVA)	*Puissance de raccordement du branchement (kVA) à minima
Sans système de démarrage $I_d = 5 \times I_n$	30 A	6 A	≤ 1.2	12 kVA
Avec système de démarrage $I_d = 2 \times I_n$	30 A	15 A	≤ 3	12 kVA
Avec Inverter $I_d = I_n$	30 A	30 A	6	12 kVA
Moteur + chauffage d'appoint sur même départ	30 A pour l'ensemble	30 A pour l'ensemble	6 pour l'ensemble	12 kVA

*La puissance de raccordement doit être déterminée en tenant compte de l'ensemble des besoins électrique de l'installation

Tableau 3 : Valeurs préconisées des courants et puissances des PAC pour répondre aux exigences de la norme EN 61000-3-3 selon les systèmes de démarrage utilisés
Cas des pompes ou moteurs triphasés

PAC ou Moteur Triphasé	Intensité maximale de démarrage Id (A)	Intensité nominale du moteur In (A)	Puissance nominale maximale du moteur (kVA)	Puissance* de raccordement du branchement (kVA)
Sans système de démarrage Id=5 x In	50 A	10 A	6	36 kVA
Avec système de démarrage Id=2 x In	50 A	25 A	15	36 kVA
Avec Inverter Id=In	30 A	30 A	18	36 kVA
Moteur + chauffage d'appoint sur même départ	30 A pour l'ensemble	30 A pour l'ensemble	18 pour l'ensemble	36 kVA

*La puissance de raccordement doit être déterminée en tenant compte de l'ensemble des besoins électrique de l'installation

- Par ailleurs, du côté des installateurs de pompes à chaleur, il existe aujourd'hui une appellation QUALIPAC, délivrée par l'association QUALIT'EnR aux entreprises disposant de compétences sur les domaines suivants : dimensionnement, l'installation et la maintenance.

- Du côté des qualifications d'entreprise, il existe la qualification Electrothermie délivrée par QUALIFELEC, association technique et professionnelle de qualification des entreprises de l'équipement électrique.

Recommandation

La vérification du respect de ces conditions de raccordement est du ressort de l'installateur et du client. La première condition pourra être vérifiée en appliquant les conseils proposés ci-dessous :

Avec ou sans la connaissance de Z_{max} :

Il faut vérifier que le courant de démarrage du moteur est :

- **Pour les installations à puissance limitée (jusqu'à 36 kVA)**, inférieur à 30 A pour les PAC monophasées et inférieur à 50 A pour les PAC triphasées ;
- **Pour les installations à puissance surveillée (de 36 kVA à 250 kVA)**, inférieur à 100 A par phase ;

Pour ces cas, le réseau de distribution doit pouvoir fournir les puissances demandées.

○ Lorsque le constructeur de la PAC ne donne pas la valeur de l'impédance maximale Z_{max} :

▶ si l'intensité maximale de démarrage est comprise entre 30 et 45 A en monophasé ou entre 50 et 60 en triphasé, il est recommandé de demander au gestionnaire de réseau d'estimer la valeur de l'impédance réseau avec l'envoi de la fiche en annexe 1.

▶ si l'intensité maximale de démarrage est supérieure à 45 A en monophasé et à 60 A en triphasé, la PAC ne peut être raccordée au réseau public de distribution d'électricité.

○ Lorsque le constructeur de la PAC donne la valeur de l'impédance maximale Z_{max}

▶ si l'intensité maximale de démarrage est comprise entre 30 et 45 A en monophasé ou entre 50 et 60 en triphasé, il est recommandé de demander au gestionnaire de réseau d'estimer la valeur de l'impédance réseau avec l'envoi de la fiche en annexe 1 pour vérifier la compatibilité de la PAC avec l'état du réseau de distribution actuel.

▶ si l'intensité maximale de démarrage est supérieure à 45 A en monophasé et à 60 A en triphasé, la PAC ne peut être raccordée au réseau public de distribution d'électricité.

Formulaire et procédures

Les annexes 1, 2 et 2bis présentent les formulaires et procédures permettant d'échanger entre les installateurs et le gestionnaire de Distribution ERDF.

Le premier formulaire (annexe 1), permet de recueillir l'information nécessaire pour calculer **l'impédance du réseau** et vérifier la compatibilité de la PAC avec l'état du réseau de distribution actuel.

L'annexe 2 présente la Procédure de traitement des réclamations liées au démarrage d'une pompe à chaleur ainsi que le Formulaire de demande d'informations à fournir pour réclamations liées au fonctionnement d'une PAC.

Pour ERDF, l'accueil de ces demandes est réalisé par les accueils raccordement, qui orientent ces demandes vers les services concernés et assurent la réponse. Les coordonnées sont fonction des lieux concernés et sont disponibles sur le site : http://www.erdfdistribution.fr/Particuliers_contacter_ERDF

Le mode de traitement des réclamations ainsi que leurs délais de réponse sont précisés, quant à eux à l'adresse suivante : http://www.erdfdistribution.fr/ERDF_Reclamations

Annexe 1

Formulaire de demande d'informations à fournir au gestionnaire du réseau de distribution ERDF lors de la réalisation d'une étude de faisabilité

Ce formulaire peut être rempli par l'installateur (mandaté par son client), ou par le futur propriétaire de la pompe.

Je vais prochainement installer une pompe à chaleur :

Monophasée dont le courant de démarrage est **supérieur à 30A**

Triphasée dont le courant de démarrage est **supérieur à 50A**

Remarque : pour les pompes dont le courant de démarrage est inférieur à ces valeurs, cette demande n'est pas nécessaire.

Pourriez-vous m'informer de la valeur de l'impédance du réseau en amont de mon installation. Je vous fournis, ci-joint, quelques informations sur le matériel qui pourrait être raccordé.

Nom du Client			
Adresse			
Référence client sur la facture d'électricité			
Nom et adresse de l'Installateur mandaté (joindre une copie du mandat)			
Branchement	Monophasé <input type="checkbox"/> Triphasé <input type="checkbox"/> *		
Disjoncteur	Réglage : _____ A		
Pompe à Chaleur (PAC)			
Type de pompe	Monophasée <input type="checkbox"/> Triphasée <input type="checkbox"/> *		
Marque et référence du modèle :	_____		
Type de compresseur (sans le chauffage d'appoint)	Monophasée <input type="checkbox"/> Triphasée <input type="checkbox"/> *		
Puissance nominale de la PAC sans les éléments de chauffage d'appoint (kVA)	_____ (kVA) *		
Ou	Ou		
Intensité / courant nominal de la PAC sans les éléments de chauffage d'appoint (A)	_____ (A) *		
Intensité / courant démarrage de la PAC (A)	_____ (A) *		
L'impédance (Zmax) de la PAC déclarée par le fabricant	_____ (Ω)		
Mode de régulation de la puissance de la PAC	Vitesse fixe <input type="checkbox"/>		Vitesse variable <input type="checkbox"/>
Présence de système d'aide au démarrage pour les systèmes à vitesse fixe	Oui <input type="checkbox"/> *	Non <input type="checkbox"/> *	-
Eléments de chauffage d'appoint	Monophasé <input type="checkbox"/>		Triphasé <input type="checkbox"/>
	_____ kVA		
* : champ obligatoire pour qu'une réponse soit fournie par ERDF			

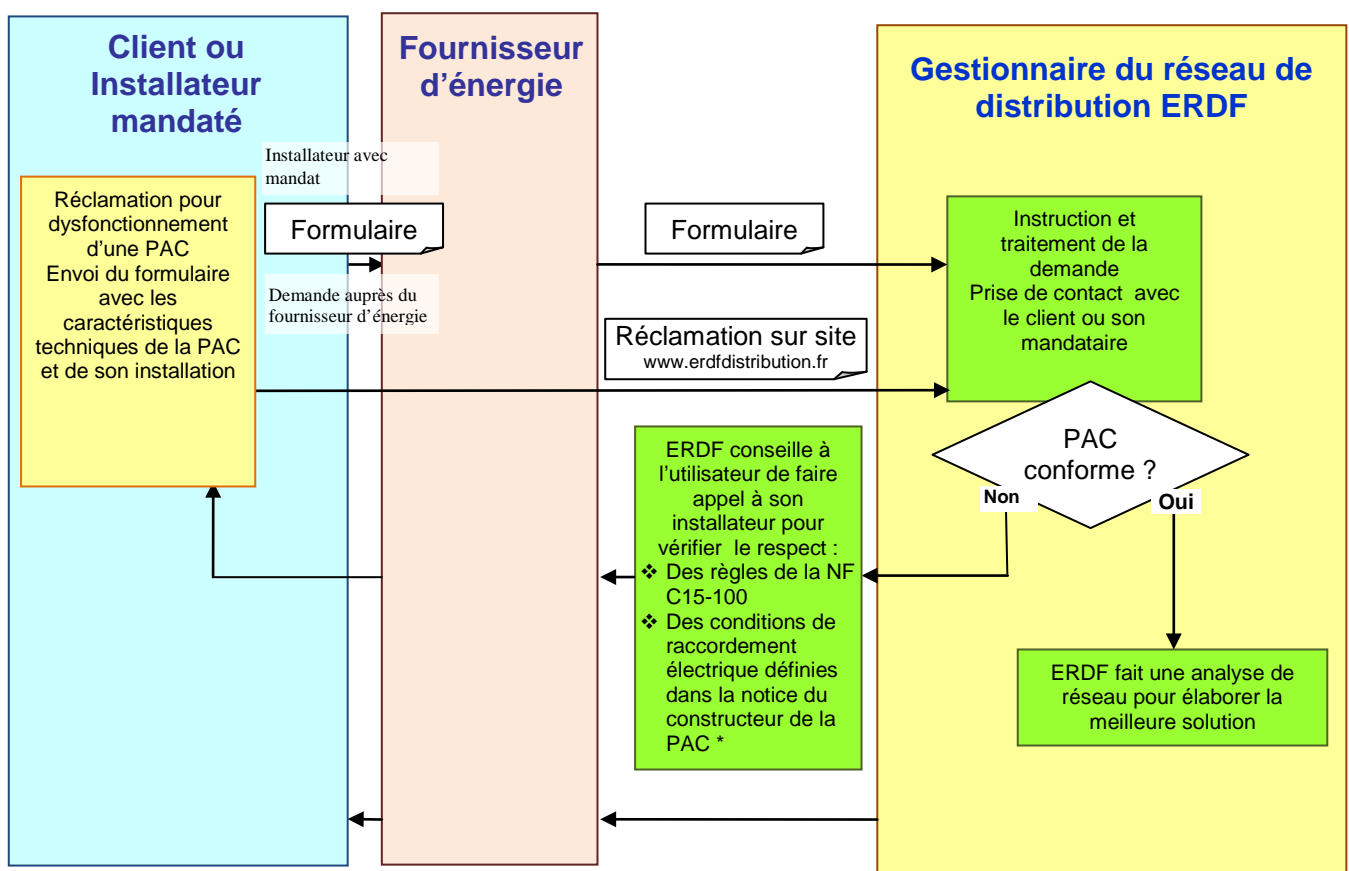
NB : L'impédance est une mesure de la « résistance » du réseau alternatif exprimée en Ohm

Annexe 2

Procédure de traitement des réclamations liées au démarrage d'une pompe à chaleur

En cas de dysfonctionnement lié au raccordement réseau d'une pompe à chaleur, le propriétaire de la pompe envoie le formulaire en Annexe 2.bis à son fournisseur d'énergie. Lorsque le formulaire est complet, le gestionnaire du réseau de distribution procède à une analyse du dossier. A partir des éléments en sa possession, le gestionnaire du réseau initiera une étude réseau ou conseillera à l'utilisateur de faire appel à son installateur pour vérifier :

- Le respect des dispositions de la norme NF C15100
- Les conditions de raccordement électrique définies dans la documentation fournie par le constructeur du matériel (normes matériel EN 61000-3-11, EN 61000-3-12).



Deux situations sont possibles :

1/ « Le gestionnaire du réseau de distribution ERDF conseille à l'utilisateur de faire appel à son installateur pour vérifier :

- Le respect des dispositions de la NF C15-100,
- Le respect des conditions de raccordement électrique définies dans la documentation fournie par le fabricant de la pompe à chaleur. »

En l'absence de restriction évoquée par le fabricant de la pompe à chaleur concernant son raccordement, le gestionnaire du réseau de distribution ERDF conseille de se rapprocher du fabricant de la pompe à chaleur.

2/ « Le gestionnaire du réseau ERDF fait une analyse de réseau pour trouver la meilleure des solutions »

Annexe 2.bis

Formulaire de demande d'informations à fournir gestionnaire du réseau de distribution ERDF pour réclamations liées au fonctionnement d'une PAC

Je dispose d'une pompe à chaleur qui présente un dysfonctionnement. Vous trouverez ci-joint les éléments concernant le matériel.

Nom du Client			
Adresse			
Référence client sur la facture d'électricité			
Nom et adresse de l'Installateur mandaté (joindre une copie du mandat)			
Branchement Disjoncteur	Monophasé <input type="checkbox"/> Triphasé <input type="checkbox"/> * Réglage : _____ A		
Pompe à Chaleur (PAC) Type de pompe Marque et référence du modèle : _____ Type de compresseur (sans le chauffage d'appoint) Puissance nominale de la PAC sans les éléments de chauffage d'appoint (kVA) _____ (kVA) * Ou Intensité / courant nominal de la PAC sans les éléments de chauffage d'appoint (A) _____ (A) *	Monophasée <input type="checkbox"/> Triphasée <input type="checkbox"/> * _____ Monophasée <input type="checkbox"/> Triphasée <input type="checkbox"/> * _____ (kVA) * Ou _____ (A) *		
Intensité / courant démarrage de la PAC (A)	_____ (A) *		
L'impédance (Zmax) de la PAC déclarée par le fabricant	_____ (Ω)		
Mode de régulation de la puissance de la PAC	Vitesse fixe <input type="checkbox"/>		Vitesse variable <input type="checkbox"/>
Présence de système d'aide au démarrage pour les systèmes à vitesse fixe	Oui <input type="checkbox"/> *	Non <input type="checkbox"/> *	-
Éléments de chauffage d'appoint	Monophasé <input type="checkbox"/>		Triphasé <input type="checkbox"/>
	_____ kVA		
* : champ obligatoire pour qu'une réponse soit fournie par ERDF			

NB : L'Impédance est une mesure de la « résistance » du réseau alternatif exprimée en Ohm

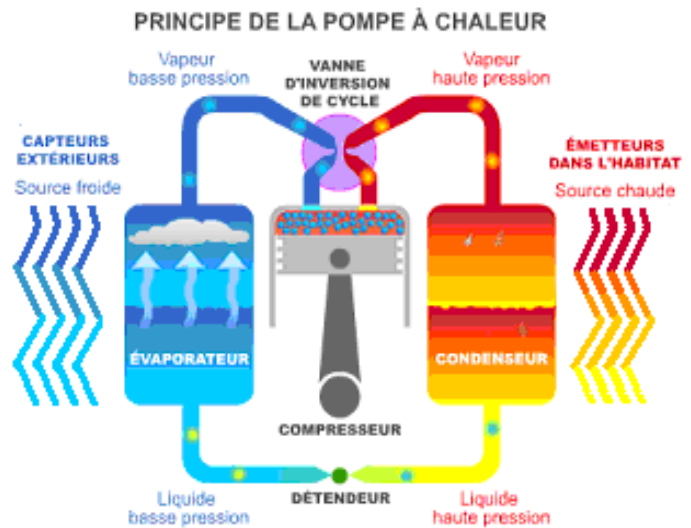
INFORMATION GENERALE SUR LE MODE DE FONCTIONNEMENT DES PAC

1. Principe de la PAC

La PAC est un dispositif qui permet de prélever de l'énergie dans un milieu froid pour la transférer dans un milieu chaud.

Les principaux composants d'une PAC sont :

- Le fluide frigorigène : grâce à des changements d'état, une condensation et une évaporation, il va assurer les transferts de chaleur (calorie) ; *Le décret du 7 mai 2007 impose une attestation de capacité aux entreprises qui manipulent les fluides frigorigènes.*
 - L'évaporateur : dans cet appareil, le fluide frigorigène va se vaporiser grâce à l'énergie présente dans le milieu extérieur ;
 - Le compresseur : il comprime le fluide frigorigène à l'état gazeux pour l'amener de la basse pression à la haute pression. Ce compresseur est entraîné par un moteur électrique ;
 - Le condenseur : dans cet appareil, le fluide frigorigène va transférer l'énergie qu'il a emmagasinée au milieu intérieur en se condensant ;
 - Le détendeur : il transforme le liquide à haute pression obtenu à la sortie du condenseur en un liquide basse pression qui peut alors rejoindre l'entrée de l'évaporateur et recommencer le cycle.
 - La vanne d'inversion de cycle : elle permet d'inverser le sens de la circulation du fluide frigorigène, permet ainsi d'inverser les rôles de l'évaporateur et du condenseur. La PAC va ainsi prélever les calories dans le milieu intérieur et les rejeter dans le milieu extérieur ; la PAC devient ainsi réversible. Ce mode de fonctionnement est aussi utilisé dans un cas bien particulier : le dégivrage de l'évaporateur.
- Pour que la PAC fonctionne, il faut ajouter des ventilateurs et/ou des circulateurs pour faciliter les échanges thermiques au niveau de l'évaporateur et du condenseur.

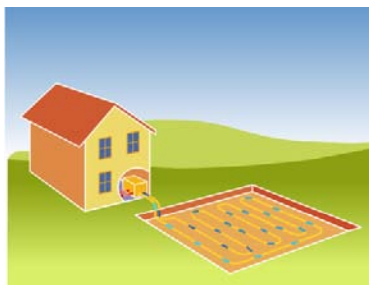


2. Les différents types de PAC



Les PAC Aérothermiques

- Air / Air : L'air extérieur et l'air intérieur sont utilisés pour prélever / restituer l'énergie ;
- Air / Eau : L'énergie est prélevée dans l'air ambiant extérieur et est restituée dans un réseau d'eau qui alimente un plancher chauffant, des ventilo-convecteurs, des radiateurs ;



Les PAC Géothermiques

1 - Eau/Eau :

- soit L'énergie est prélevée dans l'eau d'une nappe phréatique, d'un puits ou d'un forage au moyen d'un échangeur. La restitution de l'énergie se fait au moyen d'un circuit d'eau comme pour les PAC Air/Eau du cas précédent ;
- soit l'énergie est prélevée dans la terre au moyen de capteurs parcourus par une eau glycolée. Ces capteurs sont soit horizontaux (réseau de tuyauterie placée à 1 m de profondeur maximum) ou bien verticaux (puits d'une centaine de mètres de profondeur ; Attention, il faut se référer à la réglementation en vigueur). La restitution des calories se fait de la même manière que précédemment ;



2 - Sol/Sol (Détente Directe) :

Cette solution consiste à utiliser directement le fluide frigorigène dans les échangeurs (capteurs enterrés dans le terrain, plancher chauffant dans la maison). Cette solution présente un bon COP mais comme inconvénient une plus grande quantité de fluide avec risque de fuite de fluide plus important. Une variante est la PAC Sol/Eau où les calories sont restituées à un réseau d'eau comme pour les techniques précédentes

. Notion de COP et influence de la température extérieure sur les performances

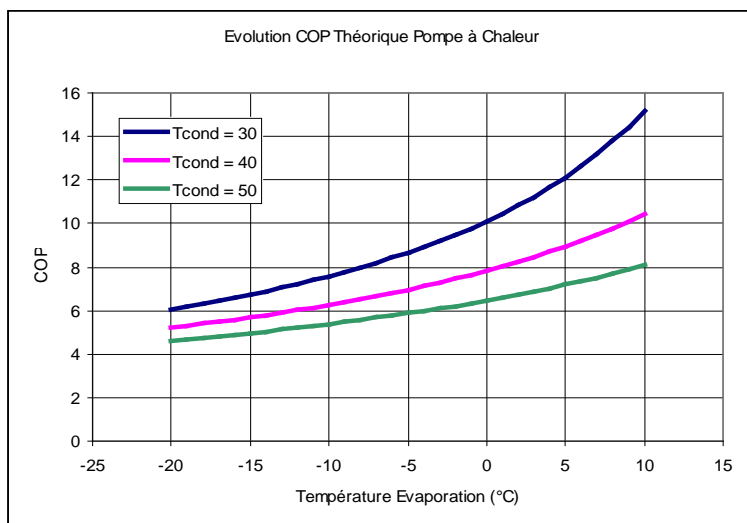
Le principal intérêt d'une PAC réside dans le fait que la quantité d'énergie transférée d'un milieu à l'autre est supérieure à la quantité d'énergie électrique consommée par le compresseur et les autres accessoires pour effectuer le transfert. Le fonctionnement d'une PAC est ainsi caractérisé par un Coefficient de Performance (COP).

Le COP peut être défini sur une durée variable définie au préalable. Il s'agit de faire le rapport entre l'énergie consommée et l'énergie thermique produite sur la durée considérée pour mesurer le COP : cycle, journée, semaine, saison. Le COP saisonnier va ainsi représenter l'efficacité globale de la PAC sur la saison de chauffe complète.

De manière conceptuelle, on démontre que le COP théorique (COP = énergie produite / énergie fournie » dit COP Carnot) dépend essentiellement de la température de condensation et de la température d'évaporation par la relation suivante qui implique que :

- Plus la température de l'évaporateur sera faible (air extérieur, eau, eau glycolée), moins la PAC sera puissante et performante : Pour une puissance électrique donnée, la PAC délivrera une puissance thermique plus faible ;
- Plus la température du condenseur (l'air ou l'eau) sera élevée, moins la PAC sera puissante et performante. Une PAC Air/Eau alimentant un plancher chauffant sera ainsi plus performante que si elle alimente des radiateurs à haute température.

La valeur réelle du COP est fatalement inférieure du fait de l'ensemble des pertes irréversibles de l'ensemble des composants du circuit frigorifique réel. Pour se fixer les idées, avec une température de condensation de 40°C, une température d'évaporation de -10°C, le COP Carnot = $313 / (313 - 263) = 6,26$. Le COP réel est plutôt de l'ordre de 3 dans ces conditions (pour une consommation de 1 kW, électrique la PAC restituera 3 kW thermiques)...



Courbe de principe du COP de Carnot en fonction de la température d'évaporation et de condensation (cas d'une PAC Air/Eau)

Ainsi, pour les pompes à chaleur sur l'air, le COP va diminuer en même temps que la température extérieure. En revanche pour les pompes à chaleur eau/eau ou sol/eau : le sol et l'eau sont à une température relativement constante (entre 12 et 14° en moyenne) : les performances moyennes seront donc plus constantes et linéaires.

Afin de préciser les performances de leurs équipements, les constructeurs de pompes à chaleur donnent la valeur du COP ou des puissances absorbées et fournies pour des points de fonctionnement bien particuliers.

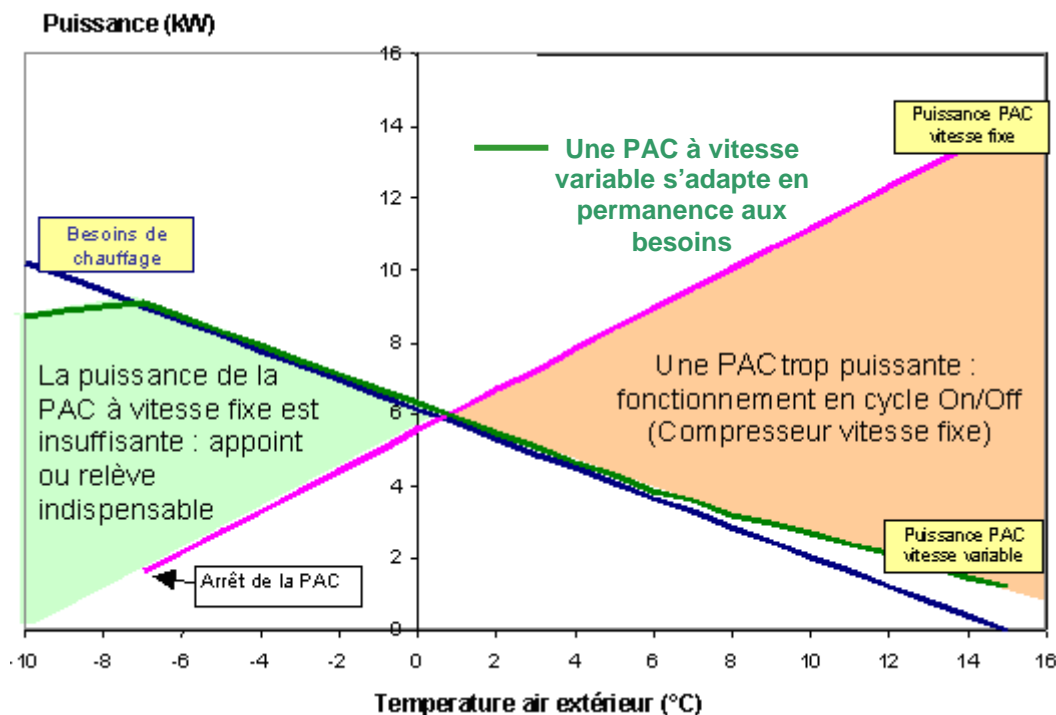
Ces points de fonctionnement sont définis dans la norme NF 14511, reprise dans un certain nombre de labels (cf. paragraphe 7).

4 Le dimensionnement d'une pompe à chaleur PAC : Cas de l'appoint et de la relève

Comme nous l'avons vu précédemment, la puissance thermique délivrée par une PAC va dépendre de la température du milieu extérieur dans lequel est puisé l'énergie : plus cette température est basse, moins la PAC délivre d'énergie. De son côté, le besoin de chauffage d'un logement dépend lui aussi de la température mais dans l'autre sens : plus la température est basse plus grands sont les besoins. Dans le cas d'une PAC sur l'air extérieur, la situation peut se résumer par le graphique de la Figure 1 où sont reportés les besoins de chauffage d'un logement, la capacité d'une PAC à vitesse fixe, la capacité d'une PAC à vitesse variable.

Plusieurs points caractéristiques sont notables :

- La température d'arrêt de la PAC : De part la conception des PAC, les constructeurs définissent une température minimale en dessous de laquelle la PAC ne peut plus fonctionner : elle s'arrêtera si la température atteint cette valeur. Ces dernières années, cette température minimale de fonctionnement ne cesse de diminuer ;
- La zone où la puissance de la PAC à vitesse fixe est supérieure aux besoins de chauffage : La PAC va fonctionner en cycles marche / arrêt afin d'adapter la production moyenne au besoin. Le compresseur de la PAC va ainsi démarrer plusieurs fois par heure dans cette zone ;
- La zone où la puissance de la PAC va être inférieure aux besoins de chauffage : la puissance délivrée par la PAC est insuffisante, sans aucun moyen de chauffage complémentaire la température désirée ne sera pas atteinte dans le logement ;
- La zone où la puissance de la PAC à vitesse variable est inférieure aux besoins de chauffage. Si cette zone correspond à des températures peu fréquentes, il peut être admissible de laisser la température du logement baisser légèrement.
- Il faut noter que l'avantage de la pompe avec un compresseur à vitesse variable apparaît nettement ici : la pompe va s'adapter exactement aux besoins de chauffage limitant ainsi les pertes par cyclage, adaptant la température du logement à la température désirée grâce à la fourniture d'une puissance suffisante quelle que soit les températures extérieures...



Besoins d'un logement et puissance d'une PAC (valeurs fictives pour illustration)

Figure 1 : Mode de fonctionnement des pompes à vitesse fixe et à vitesse variable

Ce graphique met en évidence ainsi plusieurs zones où la puissance de la PAC est insuffisante. Plusieurs moyens existent pour combler cette énergie manquante :

- L'utilisation de résistances d'appoint électrique : elles réchauffent l'air ou l'eau suivant le type de PAC. Dans ce fonctionnement, le COP du système va devenir proche de 1 !

Annexe 3/4

- Le fonctionnement avec une chaudière en relève : dans le cas d'une rénovation du système de chauffage d'un logement existant, si le propriétaire conserve sa chaudière existante, c'est cette chaudière qui prendra le relais lorsque la PAC ne peut pas fournir la puissance nécessaire. Deux fonctionnements sont possibles :

- alterné (PAC ou Chaudière),
- simultané (PAC avec Chaudière).

On notera que ce fonctionnement en relève peut soulager le réseau de distribution d'électricité lors des pointes de consommation. Toutefois la régulation d'un système PAC + Chaudière nécessite une attention particulière afin que l'utilisateur puisse en tirer effectivement tous les avantages possibles.

Deux types de PAC sont présentes sur le marché : vitesse fixe ou vitesse variable (Technologie « Inverter »). Ces technologies sont présentées en annexe. Il faut retenir que la PAC à vitesse fixe va fonctionner en tout ou rien pour réguler la puissance moyenne délivrée. Dans la PAC à vitesse variable, le compresseur verra sa vitesse modifiée en permanence afin que la PAC délivre une puissance qui correspond exactement au besoin de l'utilisateur.

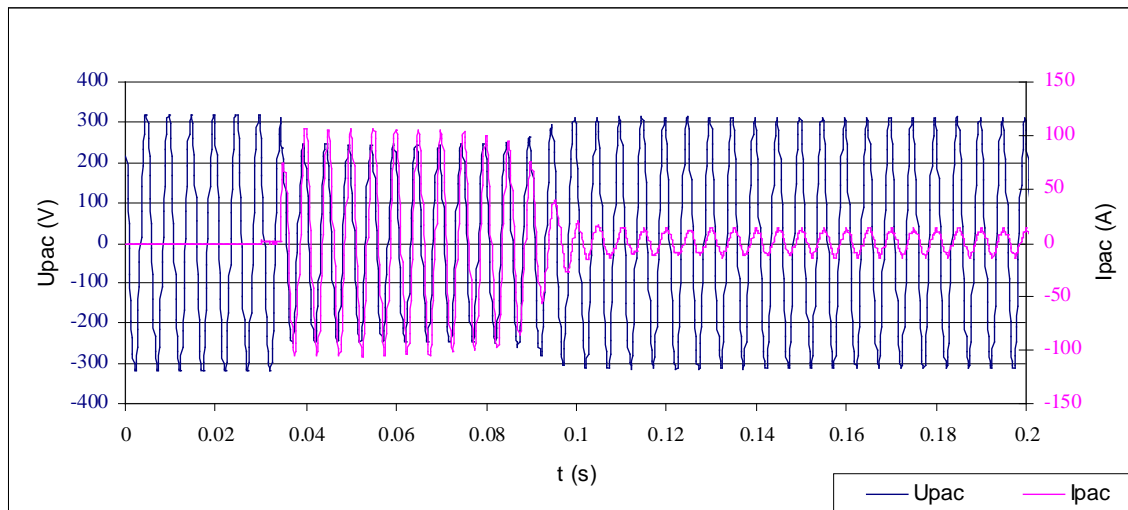
Ces éléments montrent bien que le dimensionnement d'une PAC passe par une excellente connaissance des besoins du logement ainsi que des performances de la PAC sur toute la plage de température du milieu extérieur.

5. L'influence de la qualité de la tension réseau sur le fonctionnement des PAC

Comme bon nombre de matériels, les PAC sont de plus en plus équipées de composants électroniques. Cela paraît évident pour la vitesse variable où la présence de l'inverter (dispositif permettant de limiter le courant d'appel) nécessite de l'électronique de puissance et une commande sophistiquée. Mais, c'est aussi le cas pour les PAC à vitesse fixe équipée d'un dispositif de démarrage. Bien souvent tous ces composants nécessitent une tension d'alimentation minimale. Si la tension au point de livraison du client n'est pas suffisante ($230\text{ V} - 10\% \Rightarrow 207\text{ V}$), la PAC (et les autres équipements) peut ne pas fonctionner...

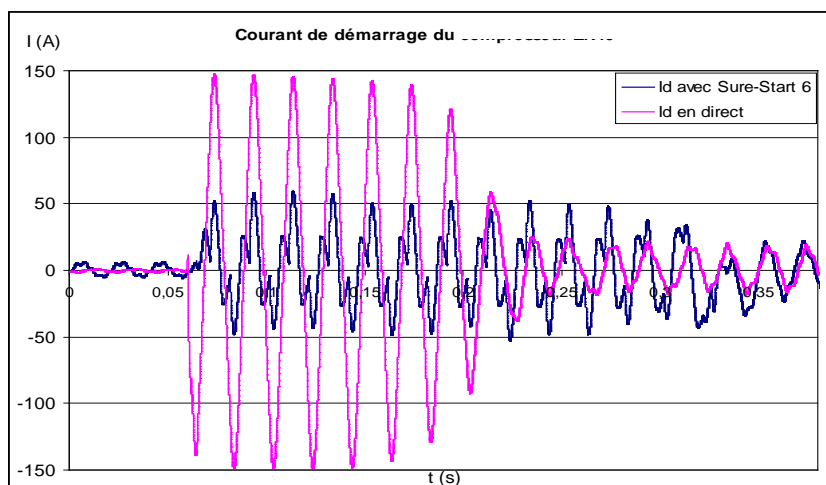
Compresseurs à vitesse fixe ou à vitesse variable ?

Les premières pompes à chaleur étaient construites autour d'un compresseur à piston entraîné par un moteur à vitesse fixe : un moteur asynchrone. L'avantage de ce moteur est sa simplicité, sa robustesse. Un premier inconvénient est qu'il nécessite un courant de démarrage est de 5 à 8 fois supérieur au courant nominal, tant en monophasé qu'en triphasé. Le courant de démarrage (courant de court-circuit, à rotor bloqué) important peut venir créer un creux de tension au moment du démarrage si le réseau n'est pas assez puissant.



Creux de tension au démarrage d'une pompe à chaleur monophasé

Ce creux de tension se manifeste par exemple par une baisse de niveau de l'éclairage (phénomène de flicker, papillotement), voire la perturbation d'autres équipements raccordés au même point. C'est pourquoi, les normes EN 61000-3-3 et EN 61000-3-11 définissent des limites d'émission et des conditions de raccordement pour limiter les perturbations en matière de fluctuations de tension. Pour limiter, dans la plupart des cas, le phénomène pour les moteurs monophasés, les constructeurs utilisent un dispositif électronique qui vient limiter le courant de démarrage à une valeur maximale de 45 A grâce à un démarreur progressif électronique.



Limitation du courant de démarrage

Pour les compresseurs triphasés, le problème est identique, il apparaîtra pour des puissances plus élevées (pour la même puissance un moteur triphasé absorbera un courant 3 fois plus faible). La solution consistera alors à intégrer dans la PAC un dispositif de démarrage du même type que pour des applications industrielles (démarreur progressif électronique).

Un deuxième inconvénient est le fonctionnement de la PAC en tout ou rien, délivrant lorsqu'elle est en fonctionnement sa puissance maximale. Ce type de fonctionnement peut présenter des inconvénients comme les pertes par cyclage. Afin d'améliorer les performances, les constructeurs utilisent de plus en plus des compresseurs à vitesse variable. Un système type (« inverter ») est intégré entre l'alimentation et le moteur électrique du compresseur qui dans ce cas fonctionne en triphasé. Les premières pompes à chaleur « inverter » utilisaient un moteur asynchrone, plus récemment l'utilisation de moteur à aimants permanents s'est généralisée, toujours dans un souci d'améliorer la performance. Les constructeurs vont alors parler de « DC inverter » (DC pour courant continu) car l'association variateur de vitesse + moteur à aimants permanent se comporte comme un moteur à courant continu où la commutation mécanique par un système de collecteur et balais est remplacée par une commutation électronique. D'autres constructeurs adoptent des systèmes bi-compresseur multi-étagés.

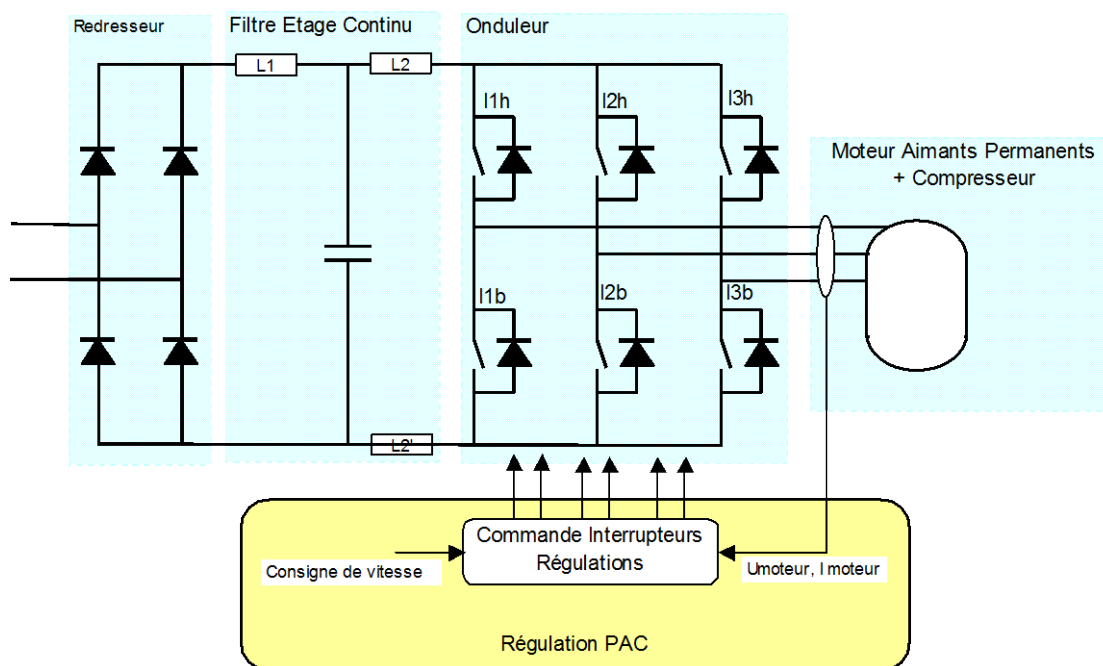


Schéma classique d'un compresseur « DC inverter » monophasé

Les compresseurs à vitesse variable sont d'abord apparus sur les systèmes Air/Air. Ils se développent maintenant sur les systèmes Air/Eau et devraient s'étendre aux machines Eau/Eau et Sol/Eau.

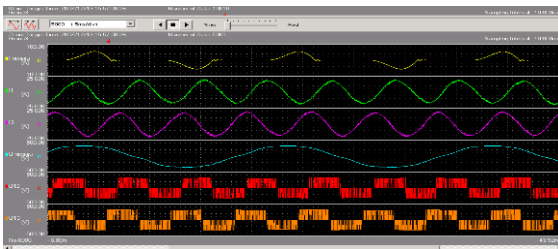
Le variateur de vitesse, maîtrisant totalement l'alimentation du moteur, le problème de courant de démarrage disparaît.

Toutefois, d'autres aspects de Compatibilité Electromagnétique apparaissent :

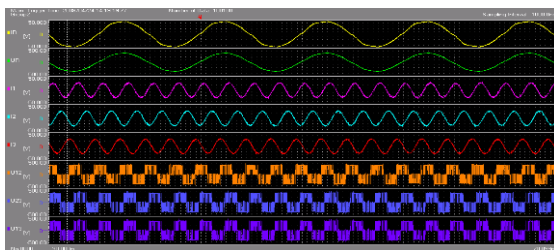
- Perturbations hautes fréquences : la présence d'interrupteurs fonctionnant à des fréquences élevées à plusieurs kilohertz, fait apparaître un risque de perturbations conduites et rayonnées. La réglementation dans le domaine existe et des solutions techniques sont mises en œuvre pour éviter la propagation des perturbations.

Annexe 4/3

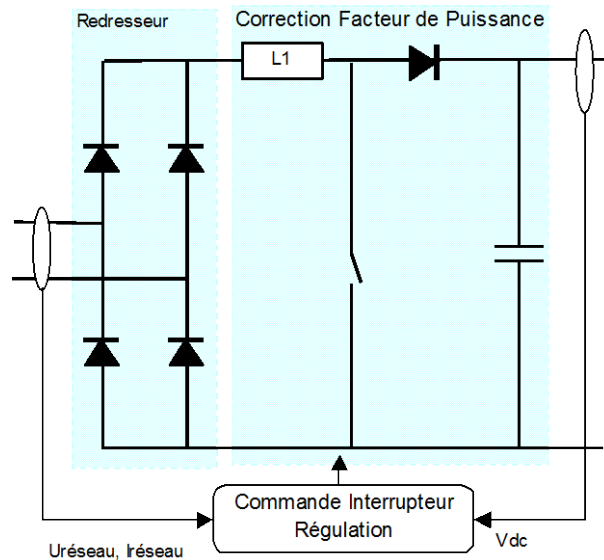
• Harmoniques basse fréquence : Un variateur de vitesse est une charge non linéaire. Les courants absorbés sur le réseau ne sont pas sinusoïdaux. La réglementation dans le domaine impose de prendre des mesures pour respecter les niveaux d'harmoniques autorisés. La première solution est d'augmenter la valeur des inductances et condensateurs situés après le pont de diode. Pour des puissances plus élevées, il faudra ajouter un circuit actif dit circuit correcteur du facteur de puissance (ou PFC : Power Factor Corrector).



Courant réseau sans PFC



Courant réseau avec PFC



Etage d'entrée d'un variateur de vitesse avec correction du facteur de puissance