

## **L'effacement diffus d'un parc de climatiseurs (ou de radiateurs électriques)**

### **Résumé**

Cette dissertation sur la régulation des réseaux électriques s'inspire de travaux universitaires chinois.

L'idée d'associer les compresseurs d'un parc de climatiseurs inverter aux générateurs d'électricité pour les synchroniser via le réseau est intellectuellement rafraîchissante. En France, l'idée est facilement transposable au parc de radiateurs électriques à thermostat électronique, même si on perd la magie du raisonnement en tours par seconde.

C'est l'occasion de revisiter les bases de la modulation des puissances mécaniques, électriques et thermiques et de la régulation en boucle fermée.

C'est aussi l'occasion de rappeler que, dans le cas du rafraîchissement ou du chauffage des locaux, le système thermorégulé ne se limite pas à l'appareil installé mais englobe tout le bâti et son environnement.

Pour soulager un réseau en tension, les chercheurs chinois suggèrent une stratégie d'effacement partiel très simple, rendue possible par la technologie inverter de chaque appareil. L'effacement de l'ensemble du parc est fondé sur un principe d'optimisation du confort collectif et sur un critère de tri individuel des logements inspiré de l'état de charge (SOC) d'une batterie de stockage domestique. Un algorithme de sortie d'effacement progressive est proposé afin de protéger le réseau contre un rebond en puissance trop brutal.

L'ordre de grandeur de la capacité d'effacement est de quelques dizaines de mégawatts pour cent mille appareils.

Pour dépasser le stade de la conjecture et évaluer la praticité de ce type d'effacement, on recense toutes les données à collecter pour faire tourner efficacement l'algorithme de délestage. L'auteur suggère de faire appel aux « data scientists » pour extraire les signatures thermiques des logements des séries chronologiques enregistrées dans le cloud.

Enfin l'auteur relève l'antagonisme entre l'intérêt général (protection contre le risque de black-out) et l'intérêt particulier (refus de lâcher la main sur le contrôle des appareils thermorégulés). La levée de boucliers suscitée en France par les compteurs Linky incite l'auteur au scepticisme sur le déploiement en France de l'effacement diffus décrit dans ce papier.

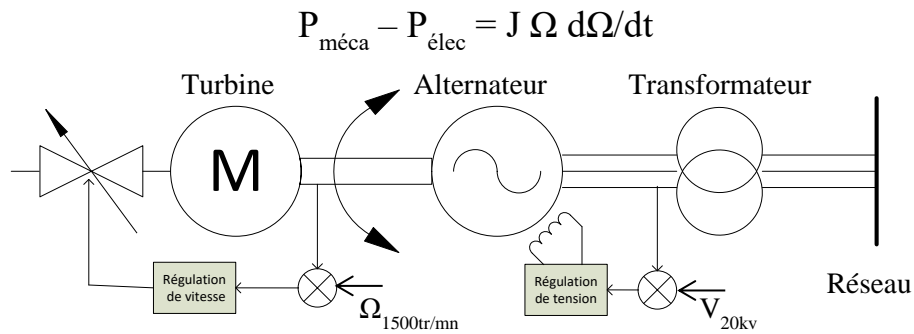
## Table des matières

Rappel sur la stabilité des réseaux électriques.....	3
Le pilotage du confort thermique pour stabiliser le réseau .....	4
Rappel sur les moteurs électriques, les variateurs de vitesse et les gradateurs.....	5
Modulation de puissances .....	7
Rappel sur la régulation à commande proportionnelle.....	9
La régulation du confort thermique.....	12
La stratégie d’effacement individuel.....	15
La stratégie d’effacement collectif.....	16
La sortie d’effacement individuel et collectif.....	17
L’identification de système .....	20
Les freins de société .....	23
Conclusion.....	23

## Rappel sur la stabilité des réseaux électriques

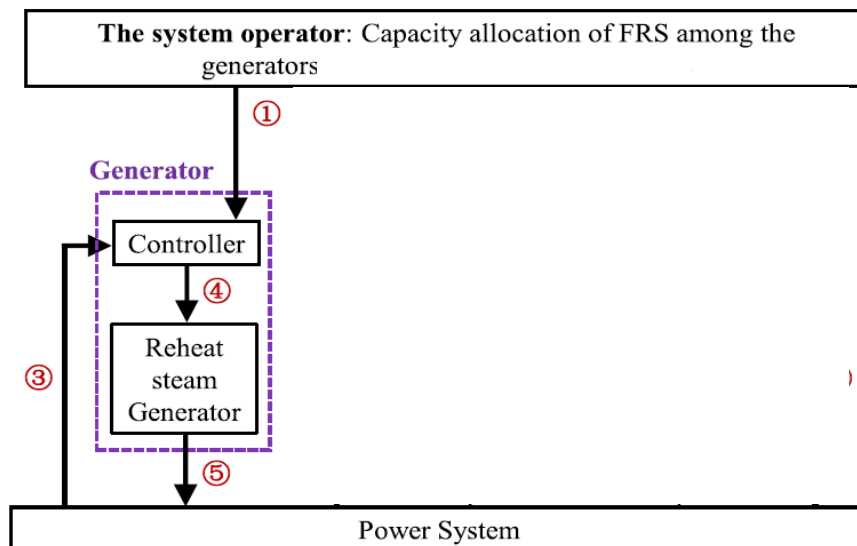
La fréquence du courant alternatif triphasé dans le réseau interconnecté est la même en tout point du réseau. Elle est en relation avec la vitesse de rotation des générateurs dits synchrones.

Pour stabiliser la fréquence à 50Hz, la puissance mécanique des turbines d'entraînement des alternateurs est adaptée en permanence pour être égale à la puissance électrique appelée par le réseau comme figuré sur le schéma ci-dessous (Fig.1).



**Figure 1**

En Anglais, la stabilisation de la fréquence par la vitesse de rotation des générateurs s'appelle Frequency Regulation Service (FRS). Ce service est schématisé ci-dessous (Fig. 2).



**Figure 2**

Un alternateur entraîné par une turbine à vapeur est une ressource de production électrique pilotable. Quand la puissance électrique appelée par le réseau augmente, la turbine a tendance à ralentir et la fréquence du courant à diminuer. Une boucle de régulation augmente alors l'injection de vapeur dans la turbine pour compenser la surcharge du réseau et stabiliser la fréquence.

Un alternateur entraîné par une turbine éolienne est une ressource de production électrique non pilotable. Quand la puissance électrique appelée par le réseau augmente, la turbine a tendance à ralentir mais on ne peut pas demander au vent de souffler plus fort. On peut demander à une ressource pilotable du réseau de compenser mais on peut aussi inciter les consommateurs à appeler moins de puissance.

Cette stabilisation par la consommation porte plusieurs noms en Français comme « gestion active (pilotage) de la consommation » ou plus radicalement « effacement de consommation ». En Anglais, le terme consacré est « Demand Response ».

Il est désormais admis qu'avec l'augmentation des générateurs non pilotables (éoliennes et photovoltaïques) dans le mix de production, la capacité de stabilisation par les générateurs pilotables peut s'avérer insuffisante et le pilotage de la consommation peut devenir une nécessité.

## Le pilotage du confort thermique pour stabiliser le réseau

Dans les pays occidentaux développés, on répute à confier ouvertement la gestion active à l'opérateur du réseau et on préfère susciter un contrat entre cet opérateur et des agrégateurs d'effacement, ces derniers passant eux-mêmes des contrats avec les consommateurs les plus motivés.

En France, dans le cas spécifique des particuliers et des appareils thermorégulés (Thermostatically Controlled Loads, TCL en Anglais), radiateurs électriques, pompes à chaleurs, climatiseurs, chauffe-eau électriques, EDF a toujours privilégié la tarification pour inciter les occupants des logements à la frugalité dans les périodes de surcharge.

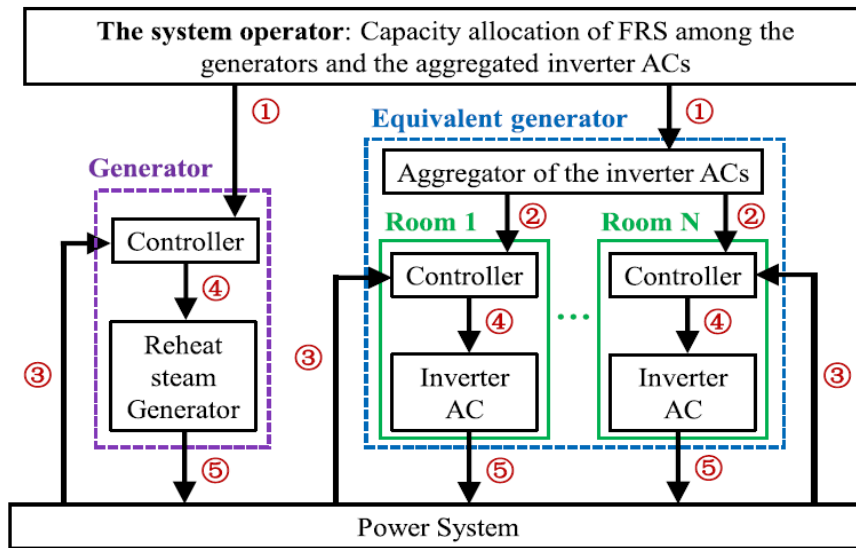
Depuis cinq ans, en Europe et aux Etats-Unis, le pilotage du confort thermique est invoqué pour diminuer la facture énergétique des ménages ou mieux tirer parti des panneaux photovoltaïques, mais n'est guère associé à la stabilisation du réseau électrique.

En Chine, en revanche, on constate depuis 2015 une explosion des publications associant le parc des climatiseurs inverter et le contrôle de la fréquence du réseau électrique (FRS). Pour vulgariser le propos et donner un avant-goût de ce qui va suivre, on peut dire ceci :

***Un bon moyen d'accélérer les turbines et les alternateurs de production d'électricité consiste à ralentir les compresseurs et les ventilateurs d'air conditionné.***

Il faut se pincer un peu mais, si on se dit qu'avec le réchauffement climatique et le bannissement des énergies fossiles la production électrique devient largement intermittente et les compresseurs électriques deviennent la source majoritaire de confort thermique, alors les Chinois sont peut-être logiques...

Comme on peut s’y attendre, les Chinois n’ont pas d’états d’âme pour confier le pilotage du confort thermique à l’opérateur du réseau (Fig. 3). Nous verrons néanmoins qu’ils ne sacrifient pas aveuglément le confort des usagers.

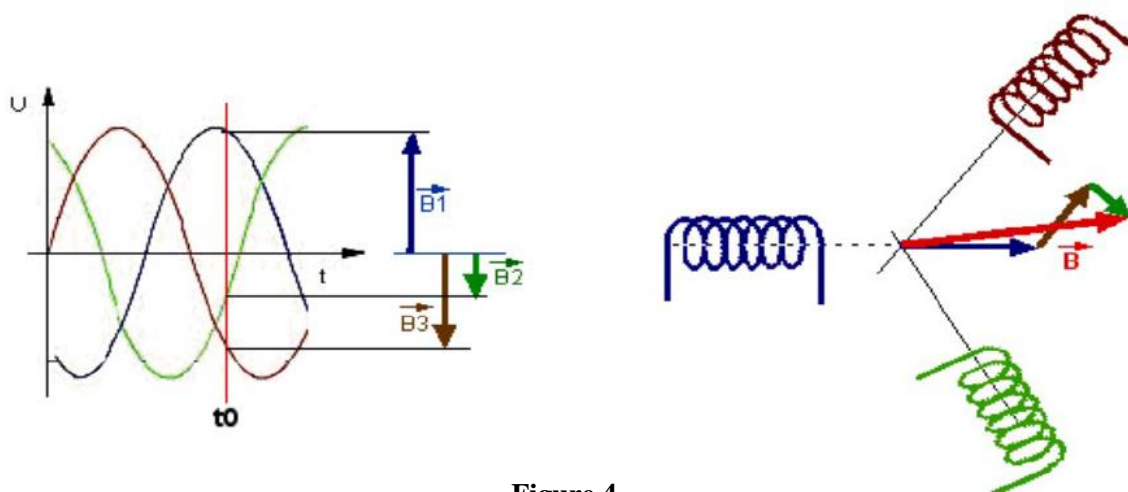


**Figure 3**

La technique et les modalités d’un tel pilotage paraissent suffisamment pédagogiques pour y consacrer une petite note, d’autant que ce qui s’applique à la modulation en fréquence des climatiseurs inverter s’applique à la modulation par trains d’ondes (gradataurs) des radiateurs à effet joule si spécifiques au chauffage français.

## Rappel sur les moteurs électriques, les variateurs de vitesse et les gradateurs

Le schéma ci-dessous (Fig. 4) illustre la création d’un champ magnétique tournant entre les trois bobines du stator d’un moteur électrique à courant alternatif (triphase).



**Figure 4**

Le vecteur de champ magnétique fait une rotation complète en un cycle du courant dans chaque bobine soit  $1/50^{\text{ème}}$  de seconde. Le théorème de **Ferraris** établit la proportionnalité de la vitesse de rotation du moteur à la fréquence du courant alternatif.

*Voir formule n°1.*

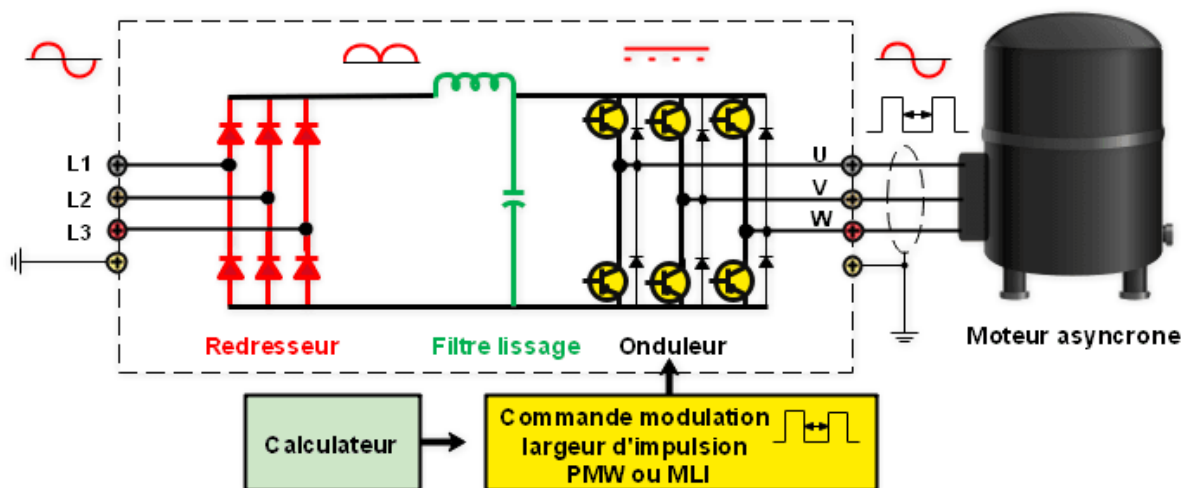
Le nombre de paires de pôles est en relation avec le nombre de bobines du stator qu'on peut multiplier pour que le moteur tourne moins vite mais plus « rond ». La vitesse de rotation d'un moteur asynchrone est inférieure à la vitesse de rotation du champ de quelques pour cent. C'est ce glissement qui engendre la force électromagnétique d'entraînement du rotor. Le glissement est nul pour les moteurs dits synchrones.

Fréquence (Hz)	Nb de paires de pôles	Glissement (%)	Vitesse (tr/mn)
50	1	0	3000
50	2	0	1500
50	2	4%	1440
30-150	2	0	900-4500

**Tableau 1**

La dernière ligne du tableau décrit la gamme des vitesses du moteur électrique en relation avec la gamme des fréquences du courant d'alimentation. Un dispositif électronique (Fig. 5) baptisé variateur de vitesse transforme le réseau triphasé à fréquence fixe en réseau triphasé à fréquence commandée. Onduleur se dit « inverter » en Anglais et comme le dispositif comporte toujours un onduleur, la modulation de vitesse est qualifiée de « technologie inverter » dans les documentations commerciales des climatiseurs.

Les moteurs à commutation électronique (EC motors) sont une version plus moderne mais aussi plus coûteuse de moteurs électriques à vitesse variable.



**Figure 5**

Dans le cas des radiateurs électriques, la régulation thermostatique se fait avec un circuit électronique beaucoup plus simple baptisé « gradateur à trains d'ondes ». Le gradateur à trains d'ondes est un interrupteur commandé. Toutes les 40 secondes (temps de cycle), il laisse passer entre 0 et  $40 \times 50$  (Hz) alternances électriques dans la résistance (Fig. 6).

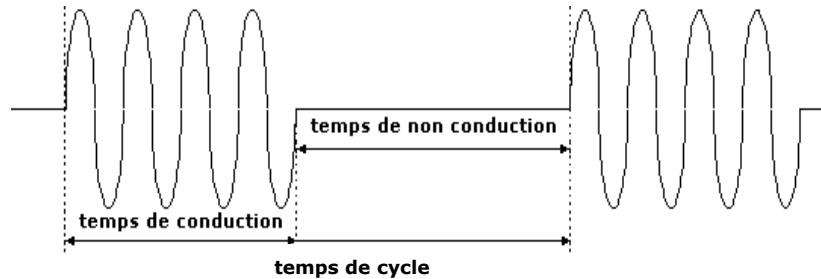


Figure 6

## Modulation de puissances

Nous utilisons le pluriel car la même modulation peut affecter une puissance mécanique, une puissance électrique et une puissance thermique.

Le cas le plus simple est celui du gradateur à trains d'ondes. La puissance électrique moyenne  $P_e$  injectée dans la résistance est proportionnelle au taux de marche ou rapport du temps de conduction par le temps de cycle.

*Voir formule n°2*

C'est aussi grosso modo la puissance thermique  $Q$  délivrée par la résistance au corps de chauffe qui enrobe cette dernière. Quand le taux de marche est de 100%, la puissance thermique transmise au corps de chauffe est égale à la puissance électrique du radiateur qui figure au catalogue. Tout taux intermédiaire correspond linéairement à une puissance thermique intermédiaire.

C'est plus compliqué pour les moteurs électriques et les climatiseurs. La puissance mécanique d'un couple est le produit du couple par la vitesse de rotation.

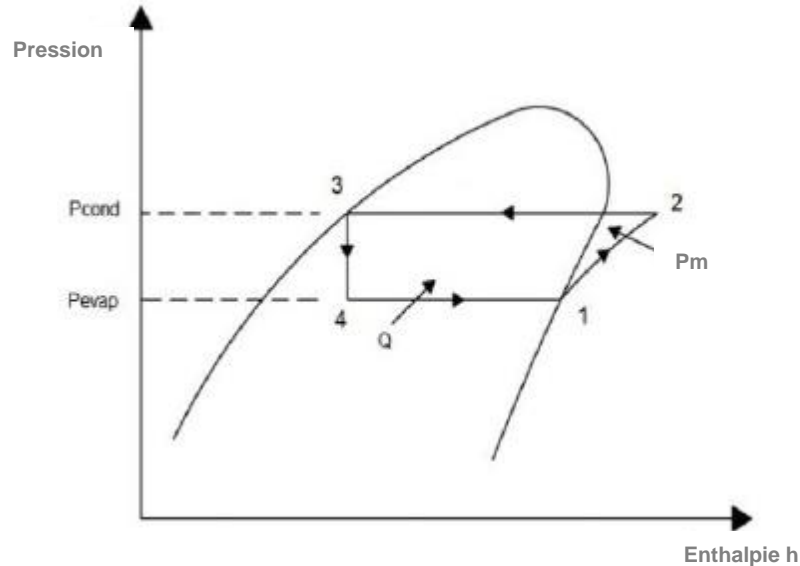
*Voir formule n°3*

Pour disposer de la puissance mécanique  $P_m$  à l'arbre du compresseur, il faut dépenser un peu plus que  $P_m$  en puissance électrique au moteur, à cause du frottement.

Convenons, avec les chercheurs chinois, que le couple mécanique et le rendement du moteur sont grosso modo constants dans la plage de fonctionnement normale du climatiseur. En tenant compte du théorème de Ferraris mentionné plus haut, on peut donc calculer la puissance électrique consommée par le climatiseur réversible comme une fonction affine de la vitesse de rotation donc de la fréquence du courant.

*Voir formules n°4 et n°5.*

Tous les ingénieurs frigoristes connaissent le diagramme de Mollier (Fig. 7) d'un fluide réfrigérant et la manière de dessiner par-dessus le cheminement cyclique d'une unité de masse de fluide qui parcourt le circuit fermé compresseur (1→2) – condenseur (2→3) – détendeur (3→4) – évaporateur (4→1) dans un climatiseur à compression de vapeur.



**Figure 7**

La puissance mécanique  $P_m$  à l'arbre du compresseur est le produit du débit en masse du fluide par l'augmentation d'enthalpie spécifique à la traversée du compresseur (branche 1→2).

La puissance thermique (de refroidissement)  $Q$  absorbée par l'évaporateur est le produit du débit en masse du fluide par l'augmentation d'enthalpie spécifique à la traversée de l'évaporateur (branche 4→1).

Le coefficient de performance (en froid) du climatiseur, le  $COP_{\text{froid}}$ , est le rapport de la puissance thermique  $Q$  par la puissance mécanique à l'arbre  $P_m$ . Pour un cycle frigorifique idéal, on peut l'évaluer comme le rapport des deux augmentations d'enthalpie spécifique lues sur le diagramme de Mollier.

*Voir formules n°6, n°7 et n°8.*

Convenons avec les chercheurs chinois que le COP thermodynamique du climatiseur varie avec la vitesse de rotation du compresseur mais assez faiblement dans la plage de fonctionnement normal de l'appareil. Dans ces conditions, la puissance thermique de refroidissement peut, comme la puissance mécanique à l'arbre et comme la puissance électrique au moteur, être approximée par une fonction affine de la fréquence du courant.

*Voir formules n°4 et n°9.*

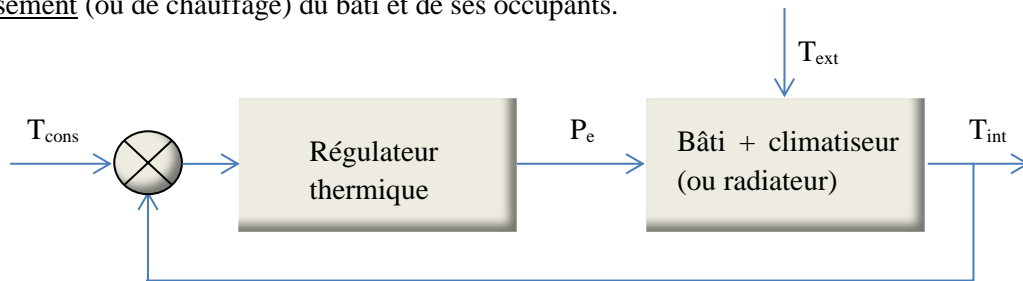


## Rappel sur la régulation à commande proportionnelle

En langage d'automaticien, un système électrique de confort thermique consiste en un bloc de régulation et un bloc thermique (Fig. 8). Ce dernier utilise la puissance électrique injectée  $P_e$  pour produire ou absorber de la chaleur à l'intérieur du bâti, ce qui a pour effet de maintenir une température intérieure  $T_{int}$  supérieure à la température extérieure  $T_{ext}$  en mode chauffage et inférieure à  $T_{ext}$  en mode refroidissement.

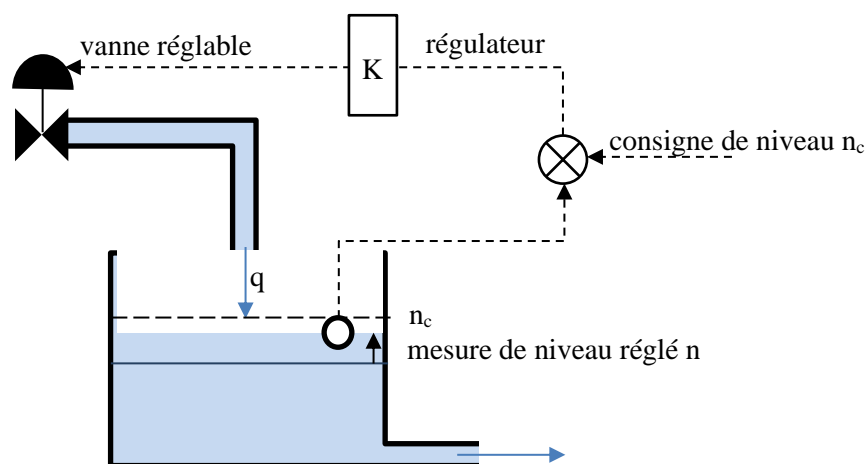
Le bloc de régulation est une carte électronique, souvent intégrée au climatiseur ou au radiateur, qui règle l'injection de puissance électrique pour minimiser à tout moment l'écart mesuré entre la température intérieure et une consigne de confort  $T_{cons}$  (typiquement 19°C en mode chauffage, 25 °C en mode rafraîchissement en Europe, ou 70°F et 80°F aux Etats-Unis).

On peut dire que le régulateur thermique en boucle fermée mesure à tout moment le besoin de refroidissement (ou de chauffage) du bâti et de ses occupants.



**Figure 8**

Tous les manuels d'automatique se servent d'une analogie hydraulique pour illustrer la régulation des systèmes dits du premier ordre. Comment stabiliser le niveau d'un réservoir qui est alimenté par une vanne d'arrivée d'eau réglable et qui se vide par un orifice en bas de la cuve (Fig. 9) ?



**Figure 9**

La théorie hydraulique indique qu'en régime établi il existe une relation directe entre le débit d'alimentation et le niveau d'eau dans la cuve. Une petite baisse de débit se traduit par une petite baisse de niveau et la relation entre ces deux baisses est linéaire.

Dans la pratique, la théorie hydraulique ne permet pas de remonter à un niveau de consigne en positionnant l'opercule de la vanne (à clapet) une fois pour toute. Il y a trop d'incertitude sur la géométrie de la cuve et sur la loi de débit du clapet.

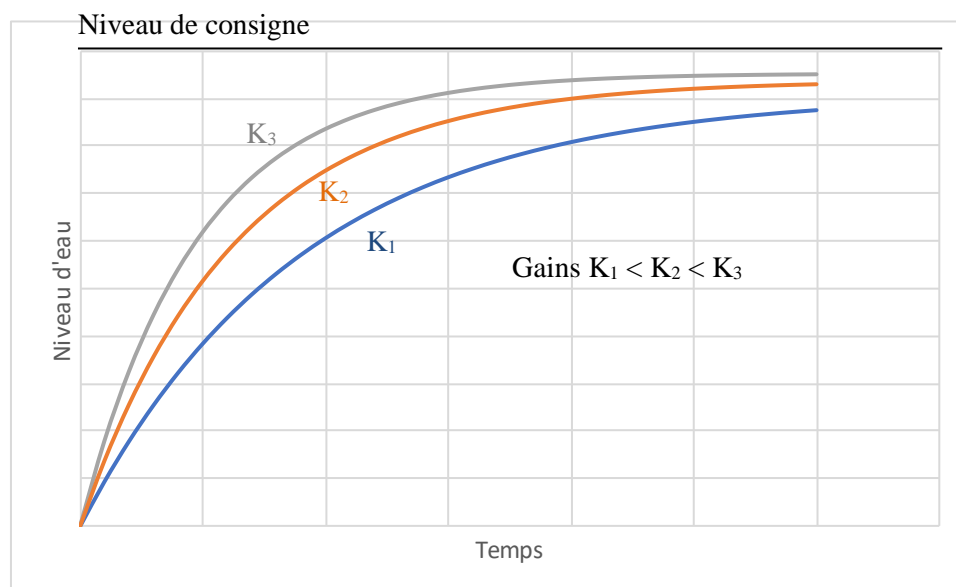
La théorie de la régulation préconise de régler progressivement la vanne en fonction d'une mesure du niveau d'eau dans la cuve, typiquement en ouvrant la vanne en grand puis en la refermant au fur et à mesure que le niveau rejoint le niveau de consigne. On a ainsi la garantie de rejoindre ce niveau en dépit des incertitudes géométriques.

La commande dite proportionnelle prévoit que le déplacement de l'opercule du clapet est égal à la distance entre le niveau d'eau actuel et le niveau à atteindre, multiplié par un facteur constant, le gain  $K$  du régulateur (pour autant qu'on soit dans la plage linéaire de la loi de débit du clapet).

*Voir formule n°10.*

En prime, la valeur du gain du régulateur conditionne la vitesse de remontée du niveau d'eau. Plus le gain est grand, plus le niveau remonte vite au début (Fig. 10).

*Voir formule n°11.*

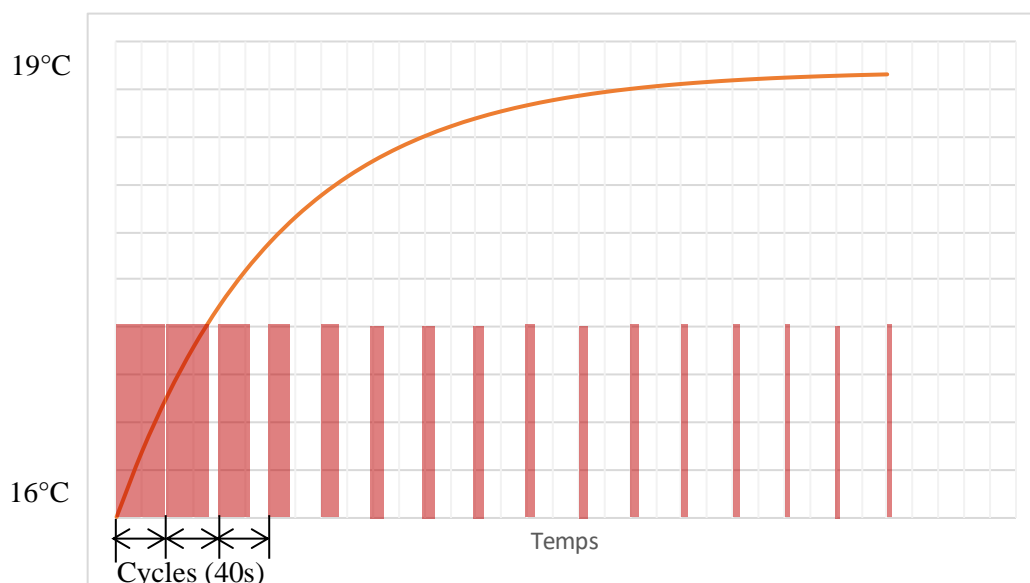


**Figure 10**

On montre facilement que la commande proportionnelle  $P$  ne permet pas d'atteindre la consigne stricto sensu et que ce petit défaut est corrigé par une commande dite proportionnelle et intégrale,  $PI$ . Pour ce qui va suivre, on en reste à la commande  $P$ , au prix d'un ajustement de la consigne.

La commande proportionnelle du gradateur à trains d'onde d'un radiateur électrique permet, exactement de la même façon, de réchauffer un logement après une période de chauffage réduit consécutive à l'inoccupation du logement par exemple.

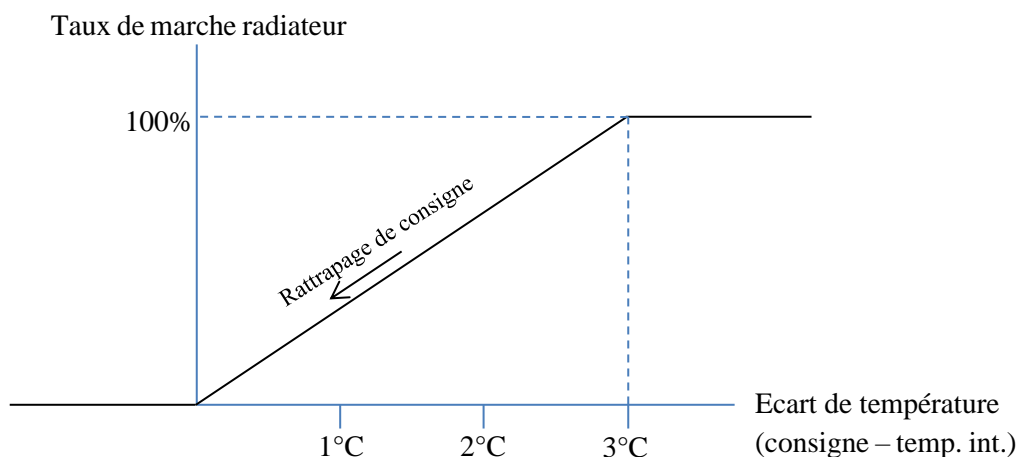
Il n'y a aucun moyen de fixer un taux de marche une fois pour toute pour remonter de 16°C à 19°C. Il y a trop d'incertitude sur les pertes du bâti et les apports thermiques dits gratuits. En pratique, le gradateur démarre avec un taux de marche de 100% puis diminue le taux au fur et à mesure qu'on se rapproche de la température de consigne (Fig. 11).



**Figure 11**

Il est essentiel de noter que la vitesse de remontée en température du logement dépend de la température qui déclenche le taux de marche maximum de 100% (16°C dans notre exemple) et de la puissance électrique nominale du radiateur.

On peut d'ailleurs affirmer que, dans un logement bien isolé, c'est cette réactivité de l'émetteur de chauffage qui conditionne son dimensionnement, plus que le besoin maximum de chauffage en régime établi.

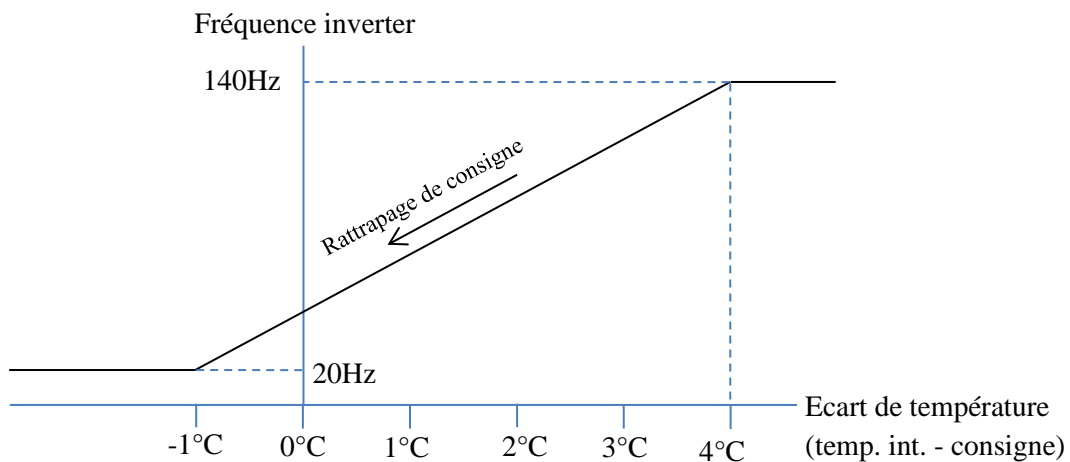


**Figure 12**

Pour un émetteur de puissance nominale donnée, 1500 watts par exemple, la régulation par commande proportionnelle est totalement déterminée par la courbe linéaire par morceau ci-dessus (Fig. 12).

La commande proportionnelle du variateur de fréquence d'un climatiseur inverter permet, exactement de la même façon, de rafraîchir un logement après une période de climatisation réduite consécutive à l'inoccupation du logement par exemple.

Il n'y a aucun moyen de fixer la vitesse du compresseur une fois pour toute pour rafraîchir le logement de 28°C à 24 ou 25°C. Il y a trop d'incertitude sur les échanges thermiques du bâti. En pratique, le compresseur démarre avec une vitesse maximum puis ralentit au fur et à mesure qu'on se rapproche de la température de consigne.



**Figure 13**

La loi qui règle la fréquence de l'inverter en fonction de la différence de température (Fig. 13) ne passe pas par l'origine des axes. C'est normal puisque la grandeur qu'on souhaite réellement contrôler est la puissance thermique de refroidissement. Or celle-ci s'annule pour une vitesse lente mais non nulle du compresseur.

## La régulation du confort thermique

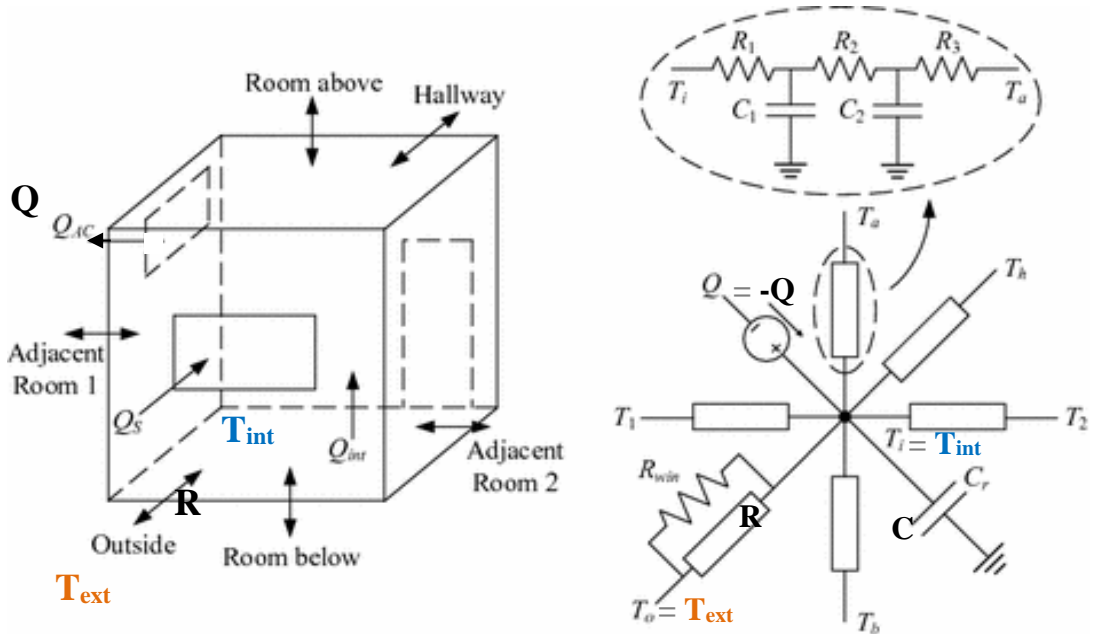
Quel est, pour le climatiseur ou le radiateur, l'équivalent du château d'eau des automaticiens, ou encore le système linéaire du premier ordre à contrôler par une commande proportionnelle ?

La courbe de rattrapage du château d'eau (Fig. 10) et celle du radiateur (Fig. 11) ont la même allure mais elles ne sont pas de même nature.

La courbe du château d'eau est bien caractéristique de la cuve et de sa boucle de rétroaction. La courbe du radiateur n'est pas propre au radiateur mais elle est propre au logement équipé de son organe de commande régulé, le radiateur. Elle dépend du volume chauffé, du type de bâti, de la météorologie du lieu et aussi du radiateur et de son thermostat. Pour forcer le trait, on peut voir les murs du logement comme de grandes ailettes de refroidissement fixées au corps de chauffe du radiateur.

De même que les automaticiens ont leur analogie hydraulique, les thermiciens du monde entier ont adopté l'analogie électrique ou circuit RC (Résistance-Capacité) pour modéliser le comportement thermique des pièces d'un logement climatisé.

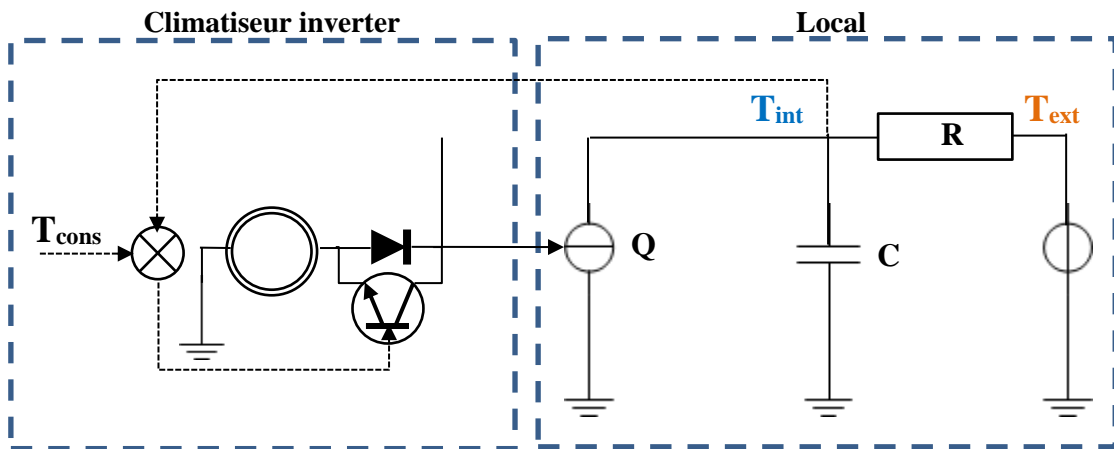
Comme le montre la figure ci-dessous (Fig. 14) le schéma électrique se complique vite dès qu'on veut traiter un logement réel composé de plusieurs pièces, voire plusieurs étages.



**Figure 14**

Suivons les chercheurs chinois dans leur simplification à outrance qui consiste à modéliser le local climatisé comme un seul volume à température uniforme  $T_{int}$ , protégé de l'ambiance extérieure à la température  $T_{ext}$  (supérieure à  $T_{int}$ ) par une enveloppe capable de stocker une partie du froid produit par le climatiseur (capacité  $C$ ) et de conduire la chaleur du côté chaud vers le côté froid (résistance  $R$ ). La formule qui en découle est bien celle d'un système linéaire du premier ordre.

*Voir formule n°12.*



**Figure 15**

Le seul intérêt du schéma ci-dessus (Fig. 15) avec ses symboles électroniques est de montrer graphiquement que le système multiphysique constitué d'un équipement électrique, le climatiseur, et d'une enceinte thermique, le local climatisé, forme un système unique.

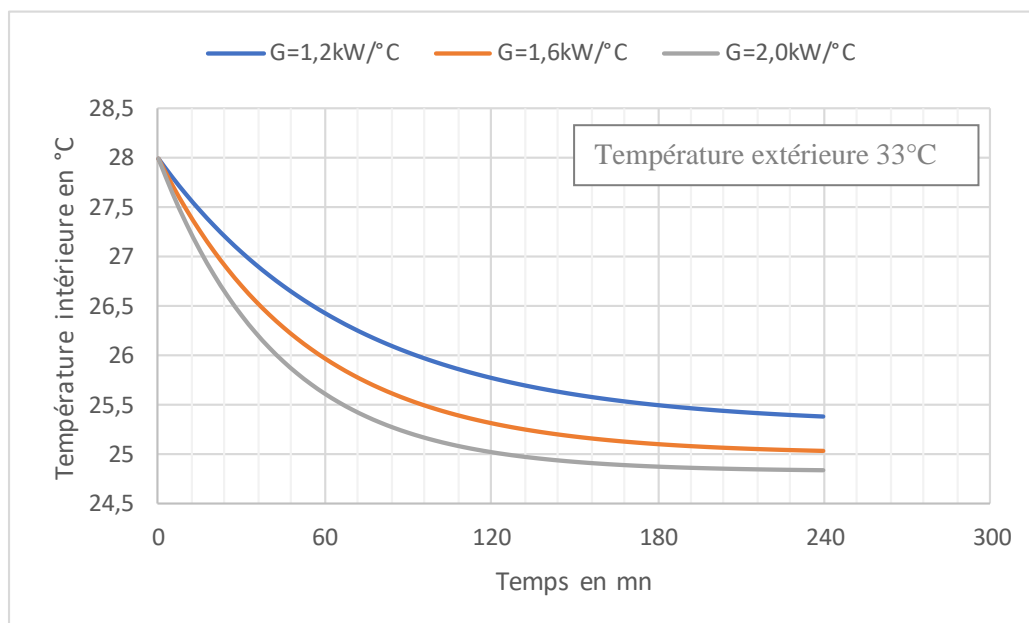
Il est bon de fixer les idées et les ordres de grandeur avec un exemple.

Volume du local		300 m <sup>3</sup>
Conductance thermique	1/R	200 W/°C
Capacité thermique	C	6000 kJ/°C
Température de consigne	T <sub>cons</sub>	24°C
Température maximum tolérée	T <sub>max</sub>	28°C
Puissance de refroidissement maximum		6400 W
Gain de la commande proportionnelle	G	1600 W/°C
Température extérieure	T <sub>ext</sub>	33°C

**Tableau 2**

La commande proportionnelle du climatiseur est une commande numérique. On simule donc le système multiphysique en résolvant l'équation d'état en temps discret au pas de temps de 5mn. On a fait figurer (Fig. 16) trois puissances de refroidissement différentes correspondant à trois gains de régulation différents.

Voir formules n°13, n°14 et 14bis



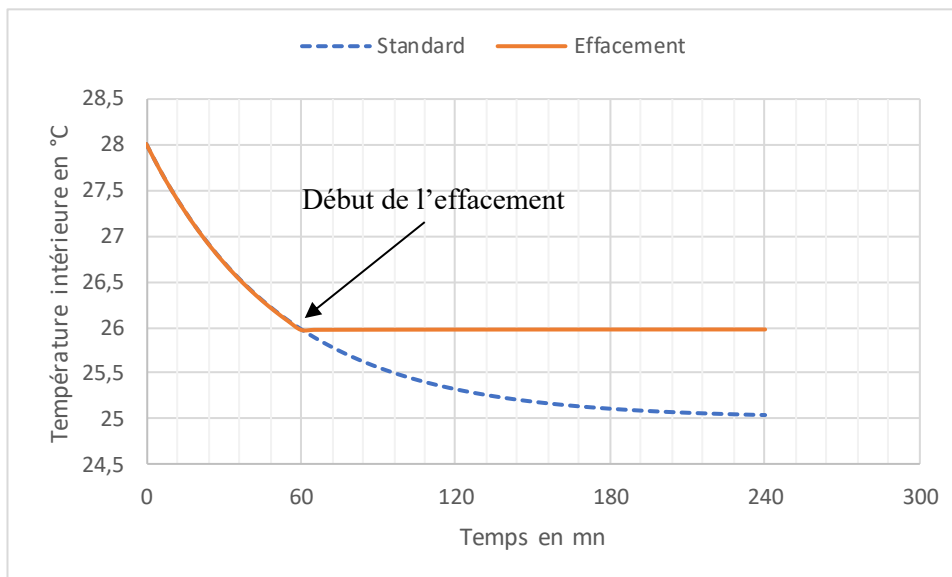
**Figure 16**

Le climatiseur se déclenche quand la température intérieure atteint 28°C, la température maximum tolérée pour le confort des occupants, et met grosso modo quatre heures à rafraîchir le logement, parois comprises. Pendant ces quatre heures, la poursuite de la consigne à 24° fait passer la fréquence de l'inverter (de puissance intermédiaire, en rouge) d'un maximum de 140Hz (6,4 kW de froid) à une valeur de régime permanent de 50Hz (1,6 kW de froid).

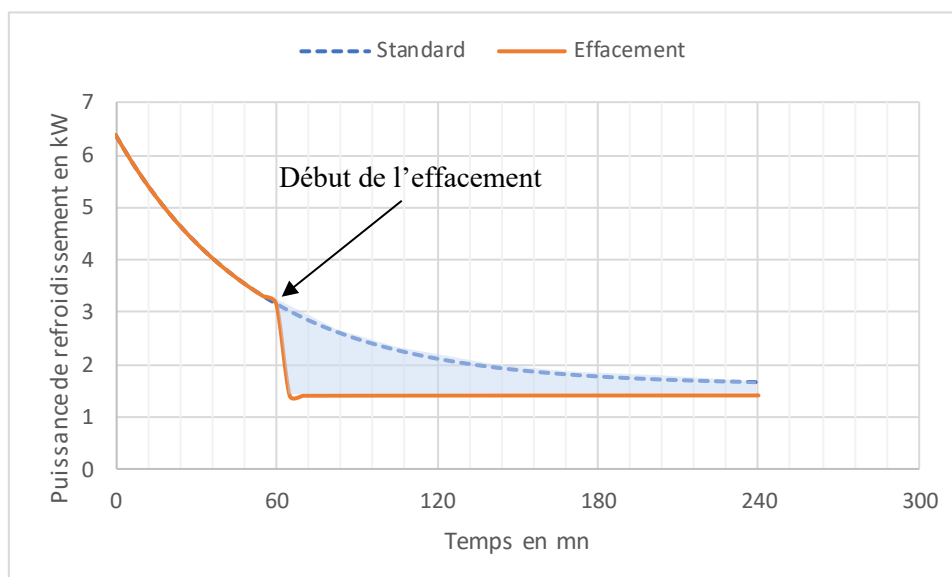
## La stratégie d'effacement individuel

Imaginons qu'au bout d'une heure de marche du climatiseur un ordre d'effacement arrive. Les chercheurs chinois proposent de prendre la main sur la boucle de contrôle et de forcer l'inverter à stabiliser la vitesse du compresseur à la valeur atteinte à l'heure du début d'effacement.

Nous suggérons une méthode moins intrusive qui consiste à remplacer la consigne de 24°C par une nouvelle consigne égale à la température intérieure atteinte à l'heure du début d'effacement (Fig. 17). Le résultat est équivalent mais la régulation continue de traiter les perturbations de la météo notamment.



**Figure 17**



**Figure 18**

Sur quatre heures de fonctionnement du climatiseur, l'effacement partiel au bout d'une heure permet d'économiser 1,9kWh sur un total de 11kWh d'énergie thermique extraite sans effacement (surface grisée Fig. 18). Il est aisé de vérifier que la puissance de refroidissement pendant la période d'effacement ne fait qu'équilibrer l'entrée de chaleur depuis l'extérieur. A l'instant de l'effacement, la puissance de refroidissement est réduite de 1620 watts.

*Voir formule n°15*

On se souvient que la fréquence de l'inverter (ou la vitesse du compresseur) est une fonction connue de la puissance de refroidissement et que la puissance électrique appelée est à son tour une fonction connue de la fréquence de l'inverter. Ainsi l'économie d'énergie thermique (Fig. 18) est directement transposable en économie de consommation électrique.

*Voir formule n°16*

L'économie réalisée est d'autant plus importante que l'effacement survient tôt dans la période de rafraîchissement du logement, au prix, certes, d'un moindre confort des occupants. A ce stade néanmoins, il ne s'agit pas d'un compromis : l'ordre d'effacement arrive quand il arrive.

Il est utile de noter que l'estimation de l'économie ex ante requiert le modèle dynamique complet pour l'économie d'énergie thermique mais seulement un modèle statique sans capacité pour la réduction de puissance thermique au moment de l'effacement.

Grandeur estimée	Type de modèle	Paramètres
Economie d'énergie thermique	Signature énergétique dynamique + régulation	C, R, G
Réduction de puissance thermique	Signature énergétique simple + régulation	R, G

**Tableau 3**

## La stratégie d'effacement collectif

Supposons que le besoin d'effacement concerne une branche régionale de réseau électrique alimentant un parc de cent mille climatiseurs. Les Chinois caractérisent très simplement le besoin collectif d'effacement par un objectif de réduction de puissance électrique, 30 mégawatts par exemple, et une durée d'effacement limitée, deux heures par exemple.

Envoyer le même ordre d'effacement à tous les climatiseurs du parc est inutilement brutal. Au signal de délestage, certains logements peuvent se trouver au seuil de la température maximum tolérée et la stratégie de stabilisation de la température est une atteinte au confort des occupants. A l'inverse, certains logements sont au seuil de la température de consigne et la stabilisation de la température est sans conséquence notable sur le confort des occupants.

Peut-on hiérarchiser les logements et n'effacer que les plus favorisés ? Quel critère de tri mettre en œuvre ?

Les Chinois suggèrent de considérer chaque logement climatisé comme un accumulateur de froid, chargé à 100% quand la température intérieure est la température de consigne et complètement déchargé, soit 0% de charge, quand le logement est à la température maximum tolérée. Ils empruntent même la notion d'état de charge (SOC en Anglais pour State Of Charge) à la technique des batteries électriques. Le tableau ci-dessous est propre à chaque logement et aux choix de confort thermique de ses occupants.



Variable	Symbole et formule	Valeur indicative
Température de consigne	Tcons	24°C
Température maximum tolérée	Tmax	28°C
Température intérieure	Tint	26°C
Etat de charge	$SOC\% = \frac{T_{max} - T_{int}}{T_{max} - T_{cons}} \times 100$	50%

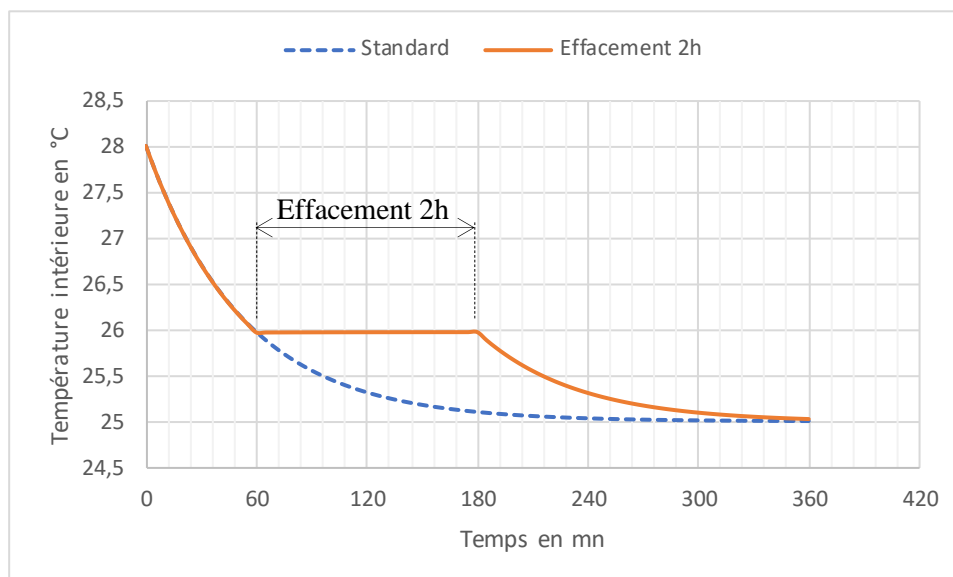
**Tableau 4**

Au signal de délestage, on évalue l'état de charge de chaque logement et on trie les logements par ordre de SOC décroissant. Pour chaque logement, en commençant par le plus chargé, on calcule la réduction de puissance attendue en stabilisant la température intérieure (Fig. 18 et formule n°15), on cumule cette réduction aux précédentes, et on poursuit avec le logement suivant jusqu'à attendre l'objectif collectif de réduction de puissance. Un ordiogramme (Ordi. 1) décrit une version simplifiée de l'algorithme de délestage.

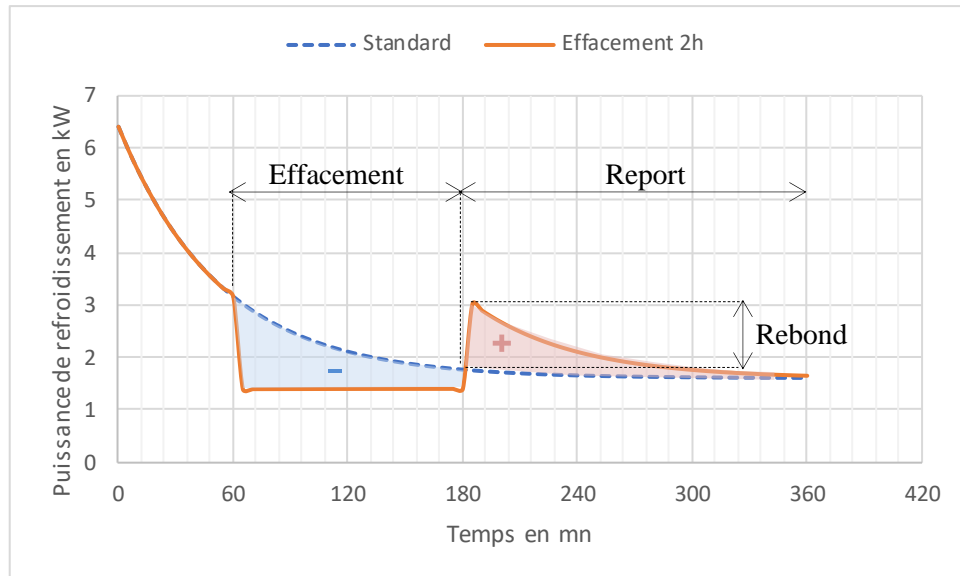
Si l'ensemble des logements rafraîchis ne suffit pas à atteindre l'objectif d'effacement, on peut prolonger l'algorithme aux pas de temps suivant en espérant que certains logements de charge négative ou nulle passeront en positif et contribueront à atteindre l'objectif. Dans ce cas, le processus de délestage devient lui-même un processus temporel et contrôlé.

## La sortie d'effacement individuel et collectif

Voyons d'abord la sortie d'effacement individuel. Au signal de fin de délestage, on rétablit la consigne initiale de 24°C et le rafraîchissement redémarre (Fig. 19). Assez logiquement, la poursuite de la consigne prend deux heures de plus et la séquence totale dure six heures (360mn).



**Figure 19**



**Figure 20**

La Commission de Régulation de l'Énergie (CRE) définit sur son site pédagogique Smart Grids-CRE le vocabulaire de l'effacement.

*L'effet rebond* peut être défini comme l'augmentation de consommation en puissance (sur une courte durée) d'un site de soutirage à l'issue d'une période d'effacement. La remise en route de l'appareil effacé peut ainsi engendrer un appel de puissance électrique supérieur à son niveau initial pendant quelques instants. Ce rebond peut alors générer des contraintes sur le réseau, notamment dans le cas où une multitude d'appareils effacés seraient redémarrés de façon synchrone.

*L'effet report* correspond au surcroît d'énergie qui est consommée à la suite d'un effacement de consommation. Un effacement de consommation est temporaire et n'a pas comme vocation première de réduire la consommation globale d'électricité. La consommation effacée sera ainsi la plupart des cas reportée, partiellement ou totalement, à une période ultérieure, et ce dans le but d'assurer un niveau de confort équivalent au consommateur.

Les données de notre exemple (Tableau 2 et Fig. 20) sont présentées dans le tableau ci-dessous. Attention, les énergies et puissances sont des grandeurs thermiques qu'il convient de convertir en grandeurs électriques par l'intermédiaire de la fréquence de l'inverter.

Données thermiques	Durée	Valeur
Consommation effacée (aire -)	120mn	1577 Wh
Consommation reportée (aire +)	180mn	1145 Wh
Taux de report		72,6%
Puissance max après effacement		3024 W
Puissance std au moment du max		1749 W
Rebond en puissance		1275 W
Taux de rebond		72,9%
Réduction de puissance (délestage)		1620 W
Regain de puissance (relance)		1620 W

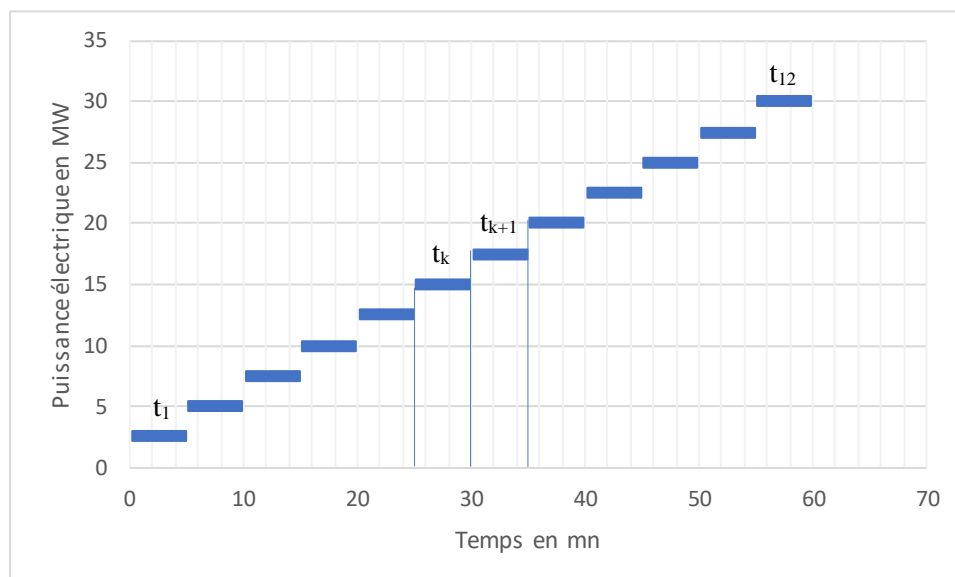
**Tableau 5**

Si la température extérieure varie peu pendant l'effacement, le regain de puissance de refroidissement à la relance est égal à la réduction de puissance au délestage puisqu'on reprend le cours des choses exactement là où on les avait laissées deux heures avant (Fig. 19).

Mais la relance collective de tous les logements en même temps présente, pour un réseau fragilisé, le risque signalé par la CRE. Les Chinois suggèrent une relance étalée dans le temps, pendant une heure par exemple.

L'idée consiste à relancer les climatiseurs effacés ( $\leq 100000$ ) par tranches de puissance supplémentaires de 2,5 MW toutes les cinq minutes (Fig. 21). Pour chaque tranche, la procédure de relance se sert de l'algorithme de sélection utilisé pour le délestage, en accélérant les climatiseurs au lieu de les ralentir (Ordi. 2).

En prime, quand tous les climatiseurs sont relancés, on peut vérifier que le regain de puissance appelée sur le réseau est inférieur à la somme des contributions individuelles. Pendant l'heure de relance, en effet, les premiers climatiseurs relancés ont eu le temps de « charger » leurs logements et de ralentir leurs compresseurs.



**Figure 21**

Ceci termine la transcription de publications universitaires chinoises à propos des parcs régionaux de climatiseurs individuels de type inverter et du rôle qu'ils pourraient jouer dans la gestion active du réseau électrique régional.

On en a profité pour revisiter quelques idées de base de l'électrotechnique, de la régulation industrielle, et de la thermique du bâtiment.

Les chapitres suivants évoquent les questions techniques et sociétales qui conditionnent le réalisme de la proposition, notamment dans un pays occidental comme la France. Rappelons seulement qu'il s'est vendu 700000 climatiseurs individuels, tous inverter, en France, en 2020.

## L'identification de système

Récapitulons tous les paramètres à stocker et les variables à mesurer pour chaque pièce climatisée avec un climatiseur inverter (Inverter Room Air Conditioner).

Classe	Grandeur	Type	Paramètres	Mesures	Source
<b>Climatiseur</b> inverter	Fréquence inverter	scalaire		1	Capteur
	Puissance thermique	fonction	2		Fiche appareil
	Puissance électrique	fonction	2		Fiche appareil
	Commande proportionnelle	fonction	4		Fiche appareil
<b>Pièce</b> Confort Etat de charge	Température de consigne	scalaire	1		Réglage
	Température maximum	scalaire	1		Réglage
	Température opérative	scalaire		1	Capteur
<b>Météorologie</b>	Température extérieure	scalaire		1	Service Web
<b>Bâti</b>	Résistance thermique	scalaire	1		Boîte grise
	Capacité thermique	scalaire	1		Boîte grise
<b>Total</b>			<b>12</b>	<b>3</b>	

**Tableau 6**

Le tableau se transpose facilement aux radiateurs électriques. On remplace le suivi de la fréquence de l'inverter par le suivi du taux de marche du radiateur, et les huit paramètres fonctionnels du moteur thermodynamique par deux paramètres seulement pour le corps de chauffe et sa régulation.

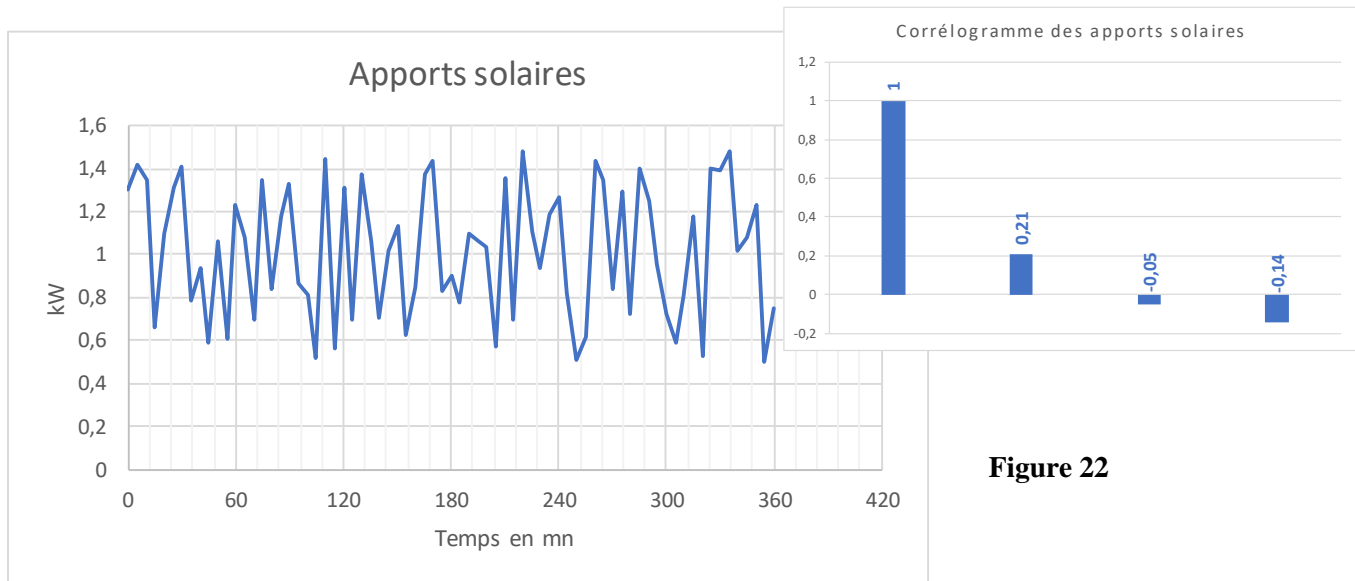
Sans la connaissance de la plupart des données du tableau, il est impossible de mettre en œuvre la stratégie de délestage sélectif et de relance progressive décrite aux chapitres précédents. Néanmoins l'acquisition et le stockage de ce petit corpus de données techniques dans le cloud ne pose aucune difficulté, surtout si on l'associe à un contrat de télémaintenance du climatiseur (ou de la pompe à chaleur réversible).

En revanche, la nature même des quatre dernières lignes du tableau soulèvent d'immenses questions pour deux raisons :

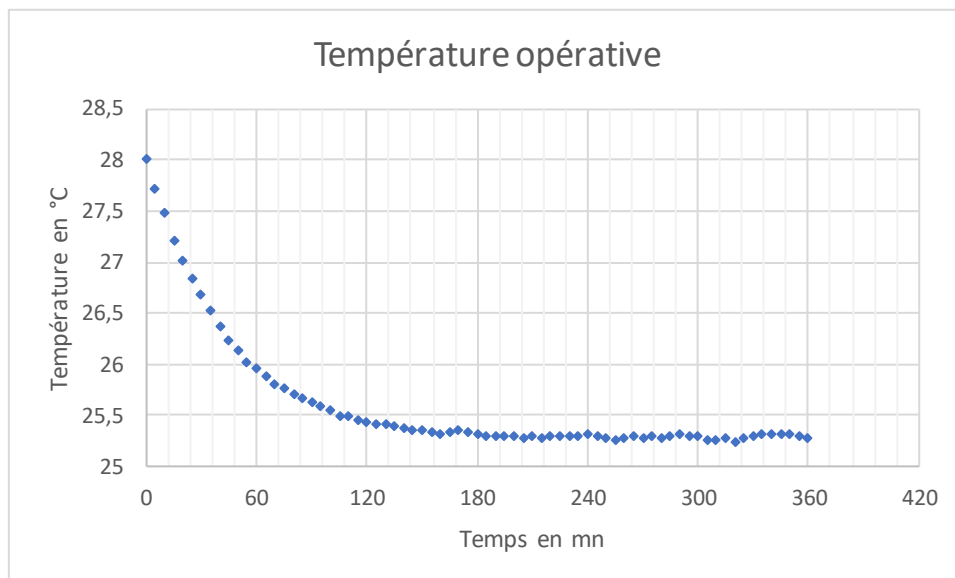
1. les valeurs sont bruitées (on dit aussi qu'elles sont stochastiques),
2. les valeurs sont multivariées (on dit aussi qu'elles sont vectorielles).

Pour illustrer le caractère stochastique des données du bâti et de son environnement on a simulé un rayonnement solaire aléatoire, d'un kilowatt de moyenne, chauffant les murs du logement à travers les ouvertures vitrées (Fig.22). On a répercuté cet apport d'énergie dans la solution en temps discret de notre courbe de refroidissement du logement (Fig.23). Pour compenser l'effet du soleil, on a augmenté la puissance et le gain du climatiseur (gain 2 kW/°C, Fig.16). On constate que la régulation remplit plutôt bien son office.

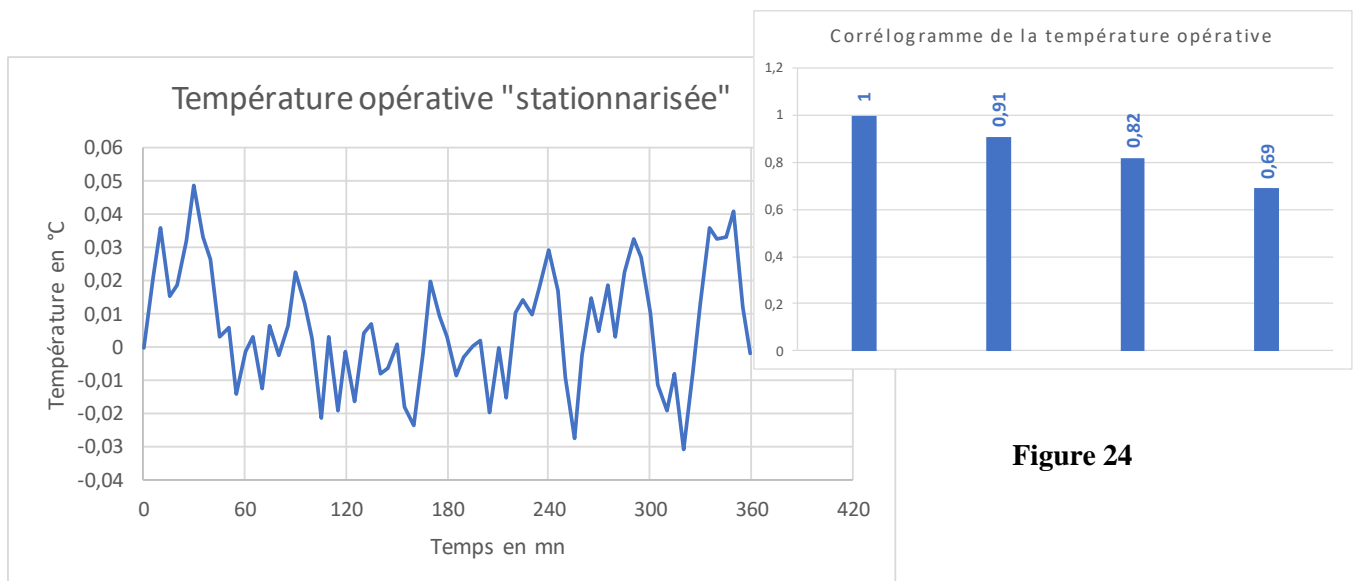
Dans les années 1970, les deux statisticiens britanniques George Box et Gwilym Jenkins ont pris conscience de la puissance de prédiction enfouie dans les séries temporelles les plus chaotiques. La série apparemment désordonnée des températures de notre logement climatisé soumis aux aléas solaires (Fig.24) est caractéristique d'un processus répertorié AR(1), pour autorégressif d'ordre 1.



**Figure 22**



**Figure 23**



**Figure 24**

Or, dire que la série des températures est AR(1), c'est dire qu'elle est sûrement produite par un système linéaire du premier ordre comme notre château d'eau, soumis à une perturbation aléatoire. Une analyse mathématique fine (boîte grise) de la série des températures révèle en prime les valeurs clés de la signature thermique du bâti.

Pour illustrer le caractère vectoriel des variables d'état du système, on rappelle que la température opérative (ou ressentie) dans le logement est une combinaison de la température de l'air intérieur et de la température des murs. La température d'une pièce est donc au minimum de dimension deux, une dimension pour l'air (et le mobilier) et une pour les murs.

Mais la vraie difficulté réside dans le couplage entre les pièces (Fig.14). La température d'un logement est donc de dimension au minimum deux fois le nombre de pièces climatisées. La formulation rigoureuse porte donc sur des tableaux de variables et de coefficients reflétant le cloisonnement des volumes thermiques.

*Voir formule n°18*

La mauvaise nouvelle, c'est que seule une poignée d'experts de bureaux d'études maîtrise le remplissage à la main de ces tableaux et la configuration des logiciels de Simulation Thermique Dynamique du bâtiment. L'approche n'est donc pas réaliste pour la gestion active du parc de climatiseurs inverter, même ceux installés récemment.

La bonne nouvelle, c'est que les héritiers de Box et Jenkins, qu'on appelle aujourd'hui « data scientists », sont aussi à l'aise avec les vecteurs et les tableaux qu'avec les scalaires et savent faire des prédictions justes et précises à partir des enregistrements de mesures multivariées. Il faut tout de même leur indiquer la dimension du système global à identifier ce qui revient sans doute à fournir un dessin d'architecte et l'implantation des appareils et des capteurs.

Gageons que, si la régulation du réseau électrique par la gestion active du confort thermique est un enjeu suffisamment fort, les data scientists seront ravis de spécifier le corpus minimum de données d'architecture nécessaire à l'interprétation des données des appareils de climatisation/chauffage connectés.

## Les freins de société

Depuis 2008 c'est la société RTE, Réseau de Transport d'Electricité, filiale d'EDF créée en 2005, qui a la haute main sur les effacements électriques en France. Elle pratique l'effacement diffus (agrégation de petits effacements unitaires, objet du document) avec circonspection, notamment dans les deux péninsules énergétiques, Bretagne et Provence-Alpes-Côte d'Azur.

En 2020, un seul opérateur fait concrètement le lien entre RTE et les particuliers avec une offre gratuite de boîtier électronique monté au tableau électrique et des coupures à distance d'une dizaine de minutes, « sans conséquences sur le confort de chauffage, climatisation et eau chaude ». La capacité d'effacement est inférieure à 100 mégawatts pour cent mille abonnés.

L'effacement diffus n'est pas une technique compliquée. Sa justification économique et commerciale est infiniment plus mystérieuse. Le service d'intérêt général est modeste mais néanmoins avéré puisque RTE admet de rémunérer l'intermédiaire. Cela évite de démarrer des petites centrales à combustible fossile. Mais quel est le bénéfice individuel pour le candidat à l'effacement volontaire ?

A cause de l'effet report, un argument d'économie d'énergie est nettement spécieux. Par ailleurs la coupure totale et le rétablissement des systèmes thermorégulés entraînent un fort rebond en puissance. Si on étale les relances, le confort individuel n'est plus assuré.

L'auteur s'avoue incapable de dissenter sur le coût d'un black-out électrique, le juste prix de l'abonnement, la couverture contre le risque etc... Il souhaite néanmoins faire remarquer le paradoxe qui existe entre la défense de l'intérêt général (protection contre le blackout) qui suppose la participation du plus grand nombre et le recours au volontariat d'un petit nombre de candidats.

Le paradoxe est d'ailleurs ancré dans la société française. Il y a d'une part une exigence d'intérêt général incarnée et revendiquée par les pouvoirs publics avec leurs taxes, leurs tarifs réglementés, leurs aides et subventions et d'autre part une exaltation de l'intelligence individuelle pratiquée par les distributeurs d'appareils thermorégulés comme par les distributeurs d'énergie. Comment justifier une baisse de confort, même bénigne mais à la discrétion d'un tiers et non rémunérée, quand tous les commerçants vantent la supériorité d'une programmation personnelle du confort domestique et un gain assuré sur la facture d'électricité ?

## Conclusion

On démontre avec les chercheurs chinois qu'une stratégie d'effacement diffus d'appareils thermorégulés modernes peut faire beaucoup mieux qu'une gestion purement on/off à condition d'identifier assez précisément chaque système cible, y inclus le bâti, son environnement et ses occupants.

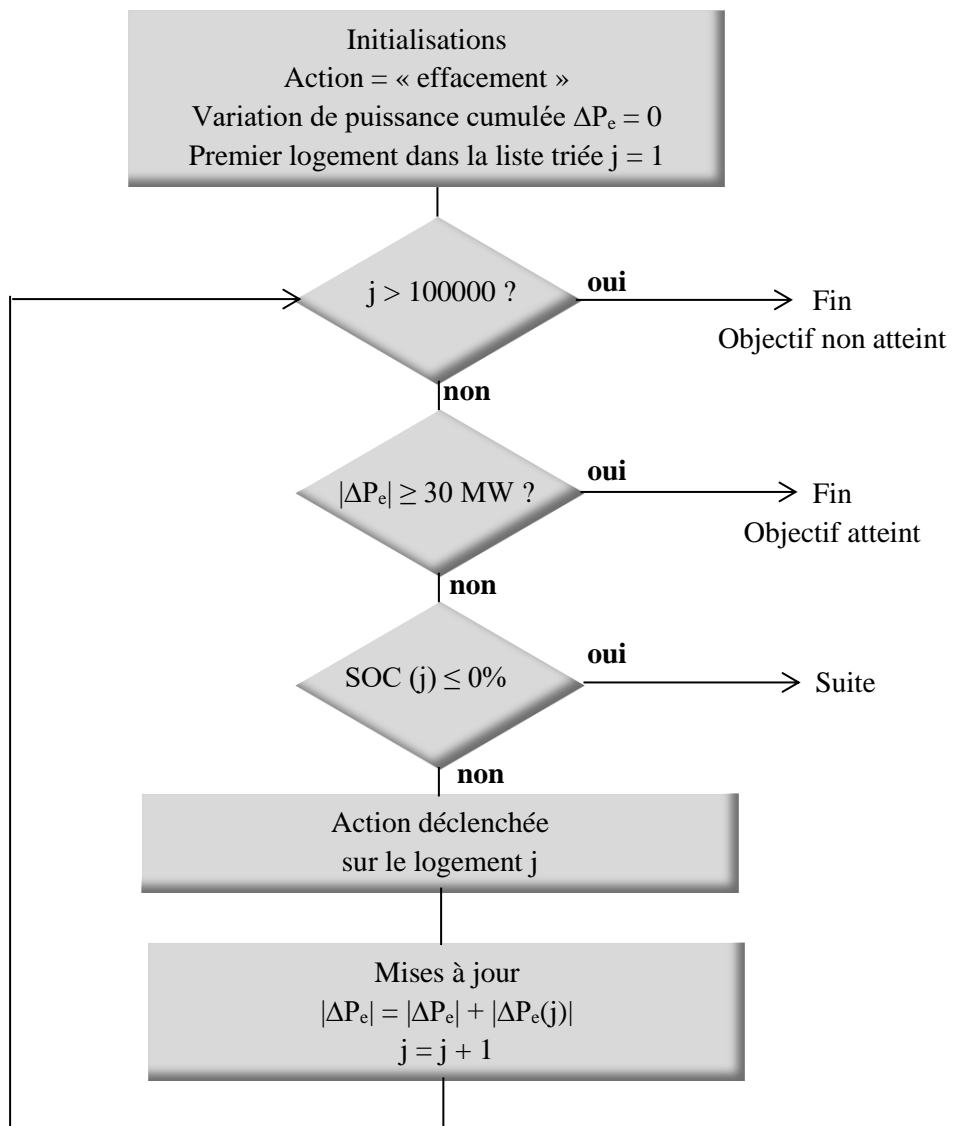
Les difficultés techniques sont largement à la portée des spécialistes de la connectivité et des « data scientists ».

L'auteur reste néanmoins sceptique sur le déploiement de ce type d'effacement diffus en France à cause des incitations commerciales et sociétales à ne pas lâcher la main sur le contrôle des radiateurs et des chauffe-eau individuels (« syndrome du compteur Linky »).

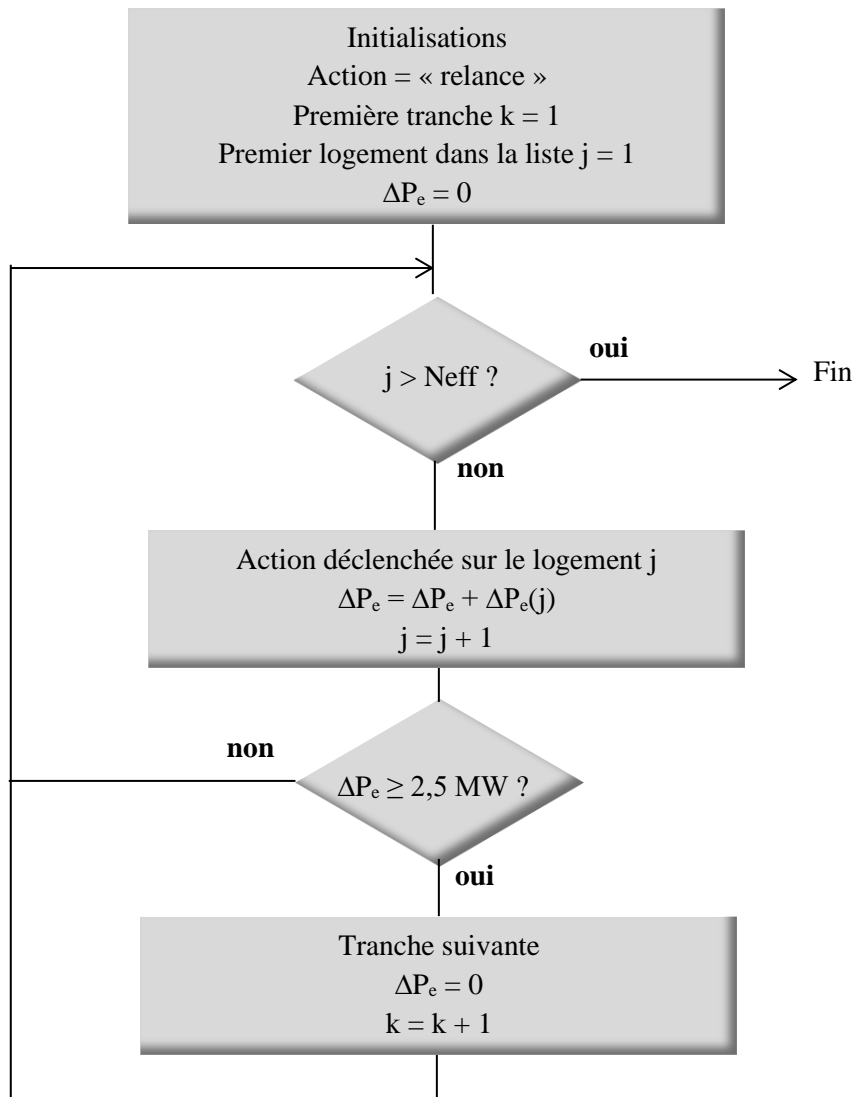
Grandeur	Symbole	Unité
<b>Rappel sur les moteurs électriques...</b>		
Vitesse de rotation en tr/mn	$\Omega$	tr/mn = $60 \times \text{tr/s} = 60 \times 2\pi$ rad/s
Vitesse de rotation en rad/s	$\omega$	rad/s $\approx 9,55$ tr/mn
Fréquence du courant	f	Hertz
Nombre de paires de pôles	p	-
<b>Modulation de puissances</b>		
Puissance électrique	$P_e$	Watt
Tension efficace du réseau	$V_{\text{eff}}$	Volt
Résistance électrique	R	Ohm
Taux de marche	$\phi$	-
Puissance mécanique	$P_m$	Watt
Couple mécanique	G	Newton.mètre
Rendement mécanique d'un moteur électrique	$\eta$	-
Coefficient de proportionnalité	a, c	Watt par Hertz
Talon	b, d	Watt
Puissance de refroidissement	Q	Watt
Débit en masse de fluide	$\dot{m}$	Kilogramme par seconde
Enthalpie spécifique	h	Joule par kilogramme
Coefficient de performance en mode froid	$\text{COP}_{\text{froid}}$	-
<b>Rappel sur la régulation à commande proportionnelle</b>		
Débit d'eau réglé (par unité de surface du réservoir)	q	m par seconde
Gain du régulateur	K	par seconde
Niveau d'eau réglé	n	m
Consigne de niveau d'eau réglé	$n_c$	m
Constante de temps (de vidange)	T	seconde
<b>La régulation du confort thermique</b>		
Température intérieure (opérative)	$T_{\text{int}}$	$^{\circ}\text{K}$
Température extérieure	$T_{\text{ext}}$	$^{\circ}\text{K}$
Température de consigne	$T_{\text{cons}}$	$^{\circ}\text{K}$
Capacité thermique	C	Joule par $^{\circ}\text{K}$
Résistance thermique	R	$^{\circ}\text{K}$ par Watt
Gain du régulateur	G	Watt par $^{\circ}\text{K}$
<b>La stratégie d'effacement individuel</b>		
Réduction de puissance thermique attendue	$\Delta Q$	Watt
Réduction de puissance électrique attendue	$\Delta P_e$	Watt
Réduction de fréquence de l'inverter	$\Delta f$	Herz
<b>La stratégie d'effacement collectif</b>		
Température maximum tolérée	$T_{\text{max}}$	$^{\circ}\text{K}$
Etat de charge	SOC	-
<b>L'identification de système</b>		
Vecteur d'état, de commande, de sortie	$X_k, U_k, Y_k$	$^{\circ}\text{K}$
Matrice dynamique, de commande, d'observation	[A],[B],[C]	-



N°	Formules
	<b>Rappel sur les moteurs électriques...</b>
1	$\Omega = (60 \times f / p) - \text{glissement}$
	<b>Modulation de puissances</b>
2	$P_e = (V_{\text{eff}}^2/R) \times (\text{temps de conduction} / \text{temps de cycle}) = (V_{\text{eff}}^2/R) \times \varphi$
3	$P_m = G \times \omega = G \times 9,55 \times \Omega$
4	$P_m = G \times 9,55 \times ((60 \times f / p) - \text{glissement})$
5	$P_e = P_m/\eta = a \times f + b$
6	$P_m = \dot{m} (h_2 - h_1)$
7	$Q = \dot{m} (h_1 - h_4)$
8	$\text{COP}_{\text{froid}} = Q/P_m = (h_1 - h_4)/(h_2 - h_1)$
9	$Q = P_m \times \text{COP}_{\text{froid}} = c \times f + d$
	<b>Rappel sur la régulation à commande proportionnelle</b>
10	$q = K (n_c - n)$
11	$dn/dt = q - n/T = -n (K + 1/T) + K n_c$
	<b>La régulation du confort thermique</b>
12	$C (dT_{\text{int}}/dt) = (T_{\text{ext}}(t) - T_{\text{int}}(t))/R - Q(t)$
13	$Q(t_k) = G (T_{\text{int}}(t_k) - T_{\text{cons}})$
14	$(T_{\text{int}}(t_k) - T_{\text{int}}(0))/(T_{\text{int}}(\infty) - T_{\text{int}}(0)) = 1 - \alpha^k$ $\Delta = t_k - t_{k-1}, \tau = RC, \sigma = RG, T_{\text{int}}(\infty) = (T_{\text{ext}} + \sigma T_{\text{cons}})/(1 + \sigma)$ $\alpha = 1 - (1 - \exp(-\Delta/\tau))(1 + \sigma)$
14bis	$T_{\text{int}}(t_{k+1}) = \alpha T_{\text{int}}(t_k) + (1 - \alpha) T_{\text{int}}(\infty)$
	<b>La stratégie d'effacement individuel</b>
15	$t_k = t_{\text{délestage}}, \Delta Q = G (T_{\text{int}}(t_k) - T_{\text{cons}}) - R^{-1}(T_{\text{ext}}(t_k) - T_{\text{int}}(t_k))$
16	$\Delta f = \Delta Q/c = \Delta P_e/a$
	<b>La stratégie d'effacement collectif</b>
17	$\text{SOC} = (T_{\text{max}} - T_{\text{int}})/(T_{\text{max}} - T_{\text{cons}})$
	<b>L'identification de système</b>
18	$\mathbf{X}_{k+1} = [\mathbf{A}]\mathbf{X}_k + [\mathbf{B}]\mathbf{U}_k, \mathbf{Y}_k = [\mathbf{C}]\mathbf{X}_k$



**Ordinogramme 1**



**Ordinogramme 2**