



Régulation d'une chaufferie hybride

Afin d'assurer le confort des occupants, les régulations performantes contrôlent la température de l'eau au départ de la chaudière ou du condenseur en liaison avec l'équilibrage hydraulique et permettent de faire des économies de combustible. Il y a pour simplifier deux principes de régulation. Le premier plutôt utilisé pour les maisons individuelles fonctionne en tout ou rien. Il consiste à comparer la température régnant dans la pièce de vie à une valeur de référence la génération s'arrêtant lorsque le seuil d'erreur est dépassé en se remettant automatiquement en marche lorsque la température intérieure chute (La plage peut être relativement faible et voisine de 0,5°C). Le deuxième principe plutôt utilisé pour les immeubles fonctionne en continu. Dans ce cas le capteur de température est implanté à l'extérieur de l'immeuble et la correction est proportionnelle la génération fournissant uniquement la puissance nécessaire avec un rendement amélioré. Dans ce dernier cas le contrôle de la température se fait à deux niveaux : celui qui module la température du circuit de chauffage en fonction de la température extérieure et celui qui permet la programmation journalière du chauffage et de l'eau chaude sanitaire selon divers mode de fonctionnement. Le principe de la régulation devra être discuté avec le BE retenu pour l'audit thermique et les fabricants des générateurs de chaleur (Par exemple *De Dietrich* pour la chaudière GAZ et *Waterkotte* pour la PAC). Le principe de la régulation n'est abordé ici que très succinctement. Sans trop s'impliquer dans le dispositif de contrôle mais il semble important de rappeler qu'elles sont les boucles d'asservissements que le dispositif comprend généralement :

1) Pour le chauffage

A) Une boucle de régulation *externe* agissant sur la température régnant en amont de la valve 3 voies. Qu'il s'agisse de la pompe à chaleur ou de la combustion, ces bouclages bien que totalement distincts ont la même finalité : adapter dans la mesure du possible la température de départ chaudière ou de départ condenseur au besoin thermique. Ceci en agissant sur le débit d'air de combustion et sur le débit d'alimentation en gaz dans le cas de la combustion et d'autre part sur le débit du fluide caloporteur dans le cas de la pompe à chaleur. Ces deux boucles externes qu'il s'agisse du fonctionnement en mode combustion ou en mode EnR ont pour fonction d'éviter que la boucle de température interne ne sature lorsque la température extérieure baisse. La température de consigne de cette boucle externe est dans la pratique le reflet de la courbe de chauffe avec un fonctionnement automatique sans nécessité de retouche manuelle l'adaptation de la température en amont de la valve 3 voies en fonction de la température extérieure se faisant automatiquement.

Prise d'information de la boucle externe

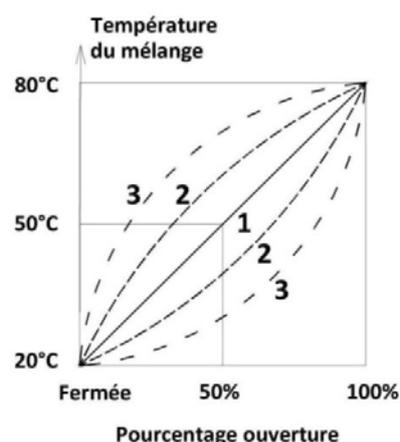
Pour mieux anticiper les variations de températures extérieures, le signal délivré par une prise de température généralement située à l'extérieur du bâtiment en face nord est utilisé dans les deux modes de fonctionnement de la chaufferie mixte combustion et EnR. Il ne semble pas souhaitable pour parfaire ce bouclage d'utiliser des capteurs de température situés à l'intérieur de celui-ci.

B) Une boucle de régulation *interne* assurée par une valve 3 voies motorisée contrôlant la température du circuit de chauffage alimentant les émetteurs thermiques.

Cas pratique

Cette vanne 3 voies motorisée électriquement assure un dosage entre l'eau plus chaude qui sort du corps de chauffe de la chaudière (ou du condenseur de la PAC) et l'eau moins chaude qui revient des radiateurs ou des planchers chauffants. Ceci de telle sorte que l'eau alimentant les radiateurs soit à une température suffisante pour assurer le confort dans les appartements. Relativement sensible à la pollution et aux frottements secs qu'elle provoque, l'hystérésis de cette vanne 3 voies augmente avec les frottements comme dans toute vanne hydraulique asservie. (Voir figure ci-dessous)

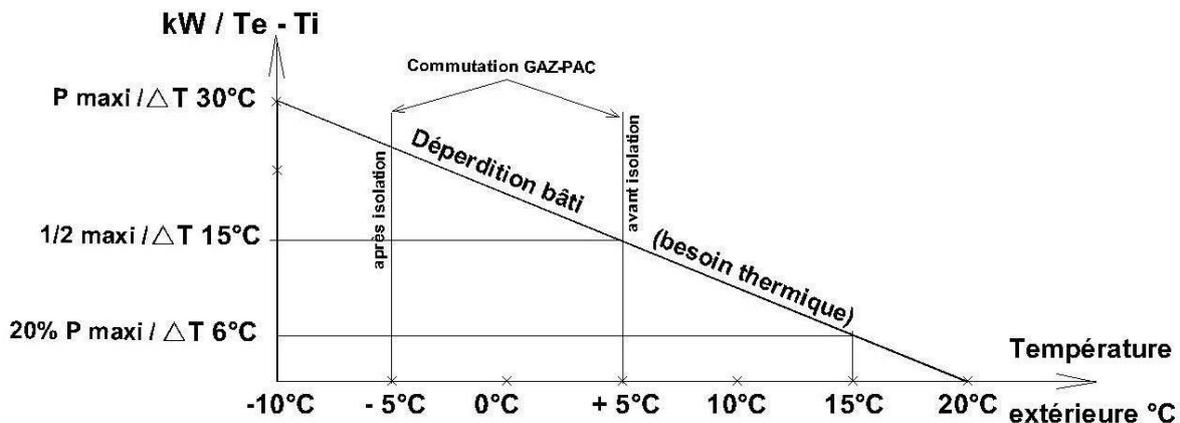
Le but des deux bouclages ci-dessus est d'éviter que l'opérateur ne soit obligé de retoucher manuellement la consigne pour maintenir une température acceptable dans les appartements et aussi d'assurer un démarrage et un arrêt automatique du générateur de chaleur au début ou à la fin de la saison de chauffe. Les deux sous-ensembles chaudière(s) et pompe à chaleur doivent pouvoir assurer le besoin en cas d'incident sur l'un d'eux et également lors de l'entretien de la PAC. Pour cette raison les deux boucles externes des modes PAC et GAZ sont totalement indépendantes.



Les valeurs de gain ainsi que les correcteurs électroniques éventuels laissés à l'appréciation de chacun des deux fournisseurs font qu'ils seront ainsi chacun responsable du bon fonctionnement de l'ensemble dans le mode de marche dont ils ont la charge. La maîtrise d'œuvre d'une chaufferie hybride suppose une formation préalable minimum de thermodynamicien permettant d'assurer une supervision efficace lors de la réalisation puis de la mise en service. Il semble logique que la responsabilité de la commutation GAZ vers PAC et PAC vers GAZ incombe à celui qui fournit la pompe à chaleur par le fait que le thermodynamicien est bien au courant des limitations des performances de la PAC en fonction des températures requises. La commutation entre les deux modes de marche se fera dans des conditions évidemment moins favorables pour l'utilisateur en termes de dépense combustible tant que l'isolation à minima ne sera pas réalisée. Ceci par le fait que la réduction des déperditions dans le bâti et la diminution du besoin en température qui en résulte améliore les performances de la pompe à chaleur. L'état actuel des connaissances, les fluides caloporteurs les plus utilisés limitent la température à la sortie du condenseur de la pompe à chaleur à 60°C. L'ordre de commutation vers la combustion sera donc donné si la température extérieure impose à la génération thermique une température de l'eau alimentant les radiateurs supérieure à cette valeur. Il est important de comprendre que le dimensionnement des émetteurs thermiques a une grande influence sur la température imposée à la génération thermique pour satisfaire le besoin. Cela explique l'apparition sur le marché des radiateurs basse température se rapprochant du niveau de température des planchers chauffants hydraulique améliorant les performances du chauffage thermodynamique. Cette amélioration des performances permet d'envisager la commutation vers la combustion à une température extérieure plus basse qu'elle ne serait avec les radiateurs habituels. Disons qu'une commutation assurée dans un premier temps avant **isolation à minima** et avec les radiateurs d'origine à une température de +5 °C extérieure peut passer à une température proche de -5 °C après isolation et mise en place des radiateurs de telle sorte que le fonctionnement du système évolue progressivement du fonctionnement en relève vers le fonctionnement en substitution de chaudière préservant le portefeuille de l'utilisateur. Cette commutation commence à être mieux maîtrisée par les constructeurs de pompe à chaleur. Il faut dire que les constantes de temps

Cas pratique

thermiques souvent importantes des immeubles avec leurs planchers en béton permettent au système de se recalculer sans problème si l'ordre de commutation ne se fait pas dans les premiers temps à la température idéale. L'exemple ci-dessus d'une commutation évoluant de +5°C vers -5°C sont des ordres de grandeur donnés à titre indicatifs et peuvent naturellement varier selon les immeubles. Pour réduire les frais et simplifier la fourniture, on ne voit pas pourquoi il ne serait pas possible d'utiliser les mêmes capteurs pour assurer les deux modes. Vu l'urgence de la cohabitation entre les deux fluides, les choses devraient maintenant prendre place progressivement. A défaut, d'une bonne intégration entre les parties gaz et PAC, des doigts de Gand peuvent éventuellement être mis en place pour duplication. Ceci dit, il semble préférable que le Maître d'œuvre s'assure que le fournisseur de la partie gaz communique les valeurs de sortie de ses capteurs pour utilisation du signal par le fournisseur de la pompe à chaleur. Les deux régulations ne seraient en l'occurrence tout au plus imbriquées qu'au niveau des contacts orientant les valeurs de retour des capteurs de température. La puissance thermique utile du générateur de chaleur se modifie bien évidemment lorsque la température extérieure change



La puissance perdue dans le bâti de l'immeuble est proportionnelle à $Te - Ti$

Air Température extérieure Te °C	$\Delta\theta^* = Te - Ti$ en °C	Puissance P	Eau Température radiateurs Tr °C	Eau/Air $\Delta\theta = Tr - 20^\circ\text{C}$
-10	30	P maxi	70	50
-5	25	0,83 maxi	61,6	41,5
+5	15	½ maxi	45	25
+14	6	20% maxi*	30	10
+20	0	nulle	20	0

Un capteur de température disposé à l'extérieur du bâtiment le plus souvent en face nord délivre un signal égal à $\Delta\theta$

La pente et le chauffage thermodynamique

Appelée parfois "loi d'eau" par le constructeur de la PAC la « pente » est l'accroissement de la température de l'eau du chauffage qu'il est nécessaire de prévoir lorsque la température extérieure diminue de 1 °C pour maintenir inchangée la température dans les appartements. Le réglage de la pente dépend principalement des récepteurs thermiques. Avec :

Tr = température de l'eau de chauffage dans les radiateurs

Ti = température ambiante de l'air à l'intérieur de l'habitation (constante)

Te = température de l'air à l'extérieur de l'habitation

$$\text{Pente} = (Tr - Ti) / (Ti - Te)$$

Cas pratique

Exemple de calcul dans le cas du tableau ci-dessus:

Dans une maison chauffée à 20 °C, la température d'eau dans les radiateurs est de 45 °C lorsqu'il fait +5° C dehors. La pente est $(45 - 20) / (20 - 5) = 1,66$. Si la température extérieure chute de 10 °C, la température d'eau de retour des radiateurs devra augmenter de : $10 \times 1,66 = 16,6$ °C.

Les nouvelles températures sont alors :

- Température extérieure : $+5 - 10 = -5$ °C
- Température d'eau dans les radiateurs : $45 + 16,6 = 61,6$ °C
- Température ambiante : réglée à 20 °C.

La pente peut être de 1 pour les planchers chauffants et voisine de 1,2 pour des radiateurs basse température. Elle dépend principalement de la surface d'échange des radiateurs. Lorsque le compresseur est entraîné par un moteur à vitesse variable, la régulation électronique adapte automatiquement le débit du fluide caloporteur en fonction de la "pente" du réseau de chauffage de l'habitation. Ceci en faisant varier la vitesse du compresseur ou en déviant une partie du débit délivré par celui-ci avec la mise à vide des compresseurs spiral

La puissance thermique délivrée par la PAC est égale à $P = e_f Q_f = c_e Q_e \Delta\theta_e$ Avec :

- e_f = « chaleur latente (massique) de transformation » appelée aussi l'enthalpie du fluide caloporteur exprimé en kJ/kg
- Q_f le débit massique en kg/s du fluide caloporteur

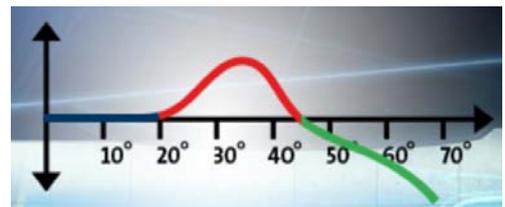
A noter qu'elle est aussi égale au débit d'eau dans le secondaire de l'échangeur à plaque du condenseur ainsi qu'à l'augmentation $\Delta\theta_e$ de la température de l'eau dans celui-ci $\Delta\theta_e = T_e - T_s$,

1) Pour l'eau chaude sanitaire

Une deuxième valve 3 voies raccordées en parallèle avec celle du chauffage et alimentée par les chaudières ou le condenseur de la PAC selon le mode de marche prend en charge la régulation en température du circuit assurant la fourniture de l'eau chaude sanitaire (ECS). Cette production d'eau chaude sanitaire est souvent assurée en instantanée. La meilleure solution semble être celle qui consiste à prévoir un petit ballon en amont de cette deuxième valve 3 voies sur le circuit fermé du chauffage. Ce ballon, d'une capacité correspondant sensiblement au ¼ du besoin journalier

étant raccordé sur le primaire de l'échangeur à plaque étant totalement et isolé du circuit ouvert de l'ECS pour améliorer la sécurité sanitaire et prévenir la formation de légionellose. Ceci également pour temporiser les variations de températures à l'entrée de la valve 3 voies et favoriser la régulation. La loi de conservation de l'énergie permet de vérifier le gradient de baisse

ou de remontée en température dans le ballon selon que la puissance délivrée par la génération est supérieure ou inférieure à l'utilisation. Le système comprend un capteur de température et une petite régulation autonome qui corrige l'ouverture de la valve 3 voies afin de faire varier le débit d'eau chaude dans le primaire de l'échangeur à plaques à contre-courant assurant ainsi la température d'eau chaude souhaitée sur le circuit ECS. Les températures individuelles plus basses requises dans les appartements étant assurées par des mitigeurs ou des valves thermostatiques privatives.



Risque formation légionellose (Courtesy Grundfos)

Calcul du besoin journalier

La consommation moyenne jour/personne en eau chaude sanitaire (ECS) est de l'ordre de 40 litres. Pour un immeuble de 65 lots d'appartements occupés en moyenne par 1,5 personne pour chaque

Cas pratique

appartement cela fait une consommation journalière globale sensiblement inférieure à 4 m³ (1500 m³ d'eau chaude à l'année). Pour générer un tel besoin journalier en eau chaude, il faut 200 kWh (50 kWh/m³ d'eau chaude). Même si l'on ne se donnait qu'une heure pour le faire avec une production pratiquement en instantané, il faut une puissance de 200 kW. En fait environ 250 kW si l'on tient compte de la déperdition dans les tuyaux proche de 50 kW. Cette puissance peut être délivrée par la PAC *eau eau* et à fortiori par la partie gaz. Compte tenu de la constante de temps thermique importante des immeubles en béton (Voir le comportement en transitoire d'un immeuble et de sa chaufferie), constante de temps supérieure à 50 heures, si l'on devait couper le chauffage 2 h pendant la nuit pour produire l'ECS dans un cycle de nuit permettant d'économiser un peu d'énergie primaire, la température dans les appartements ne chuterait que de deux à trois degrés maximum ramenant la température dans les appartements à environ 17 à 18°C température très acceptable pour dormir avec une couverture.

Régime de température dans les ballons ECS en transitoire

Pertes par défaut de calorifugeage du ballon mises à part, la loi de conservation de l'énergie permet de dire que la puissance apportée par la génération **P_g** (Chaudière ou PAC) au ballon ECS diminuée de celle consommée vers l'ECS (**P_{ecs}**) est égale à la vitesse à laquelle l'énergie interne **m c dT/dt** dans le ballon tampon se modifie. Si la puissance prélevée dans le ballon ECS est inférieure à la puissance apportée par la génération, la température dans le ballon augmente et inversement si le besoin en eau chaude sanitaire est important alors que la génération a du mal à suivre, la température dans le ballon diminue.

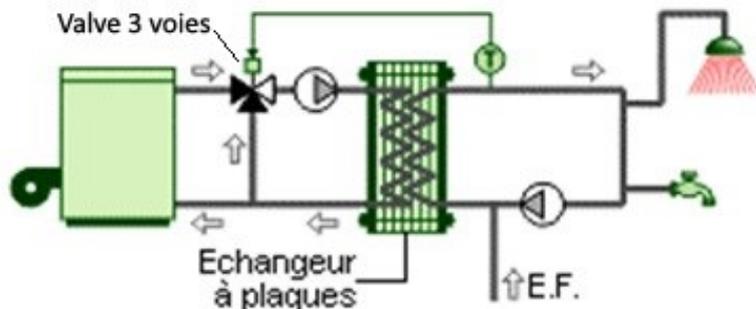
Exemple de circuit ECS avec un ballon de 1 m³ :

Prenons l'exemple ci-dessus. Le ¼ du besoin journalier est de 4000 litres/4 = 1 m³

Si **P_g** = 200 kW et **P_{ecs}** = 120 kW > énergie interne +80 kW

Augmentation de la température de l'eau dans le ballon ECS : On a **P_g - P_{ecs} = m c dT/dt** soit **dT/dt = (P_g - P_{ecs}) / m c = (200 000 - 120 000)/(1000 x 4180) = 0,019 °C / s** ou environ 60°C/heure. La montée en température dans le ballon va donc être très rapide.

La puissance **P_g** = 200 kW pouvant être émise au condenseur à la source chaude de la pompe à chaleur est on le voit largement suffisante. De plus cette puissance sera délivrée avec des performances excellentes dans la mesure où le COP sera plus proche de 6 que de 3 vu le bas niveau de température requis à la source chaude de 40°C.



Circuit type de génération d'eau chaude sanitaire en instantané.

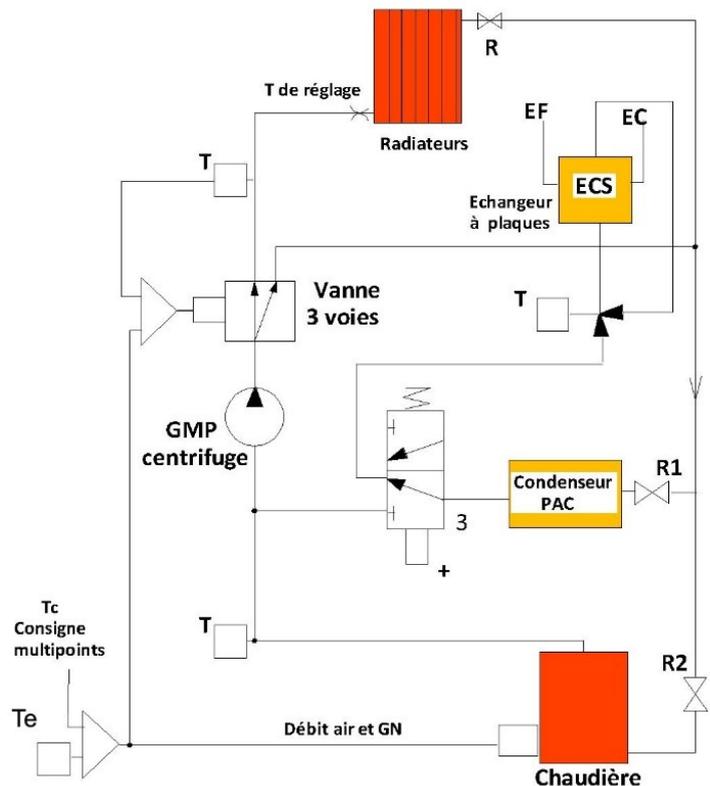
Un ballon tampon (non représenté sur le schéma) peut on vient de le voir être avantageusement être ajouté sur le primaire de l'échangeur. L'eau chaude sanitaire est ainsi délivrée en instantané. La valve 3 voies fait varier le débit dans le primaire de l'échangeur à plaque pour asservir la température de l'eau dans le ballon à une température voisine de 55°C +/- 5°C selon le besoin de telle sorte que l'ECS soit supérieure à 45°C, température minimum requise pour assurer la sécurité sanitaire et éviter tout risque de légionellose moyennant l'adjonction d'une pompe de circulation

Ballon d'expansion sur le circuit chauffage

Les constructeurs de chaudières à gaz modernes prévoient un ballon tampon dit « casse pression » sur le circuit *chauffage*. Ce ballon de petite capacité est équipé d'un purgeur en partie haute joue le rôle de pot à boue en partie basse. Sa fonction principale est d'assurer le mélange entre l'eau chaude venant du générateur de chaleur et l'eau de retour des émetteurs thermiques. Le fait que le volume de ce ballon soit faible n'a pas de conséquence défavorable avec les régulations modernes équipées de brûleurs modulants fonctionnant en continu. Les constructeurs de PAC formulent la même remarque depuis l'arrivée des compresseurs avec « inverter » théorie et pratique allant dans le même sens. En pratique le dispositif « inverter » n'est autre que le dispositif qui permet de faire varier le débit du fluide caloporteur de la pompe à chaleur. Contrairement aux anciennes pompes à chaleur marchaient en tout ou rien avec des compresseurs entraînés à vitesse constante, les nouvelles pompe à chaleur fonctionnent maintenant en continu. On peut ainsi éviter la dépense inutile de ces ballons tampons imposées sur les anciens circuits qui imposaient un volume de 15 litres par kW thermique utile avec des encombrements en chaufferie parfois inconciliable avec la place disponible. Ces recommandations sont maintenant sans objet et ces ballons d'expansion qui étaient anciennement implantés en partie haute des immeubles puis en chaufferie n'ont plus raison d'être.

Circuit simplifié d'une chaufferie fonctionnant selon les deux modes bivalent // et alternatif

La pompe centrifuge assurant la circulation sur le circuit chauffage est parfois implantée en aval de la valve 3 voies. Les deux valves d'arrêt **R1** et **R2** en amont de la chaudière et du condenseur de la PAC orientent l'eau tiède en retour des radiateurs vers le générateur de chaleur adapté au mode de marche GAZ ou PAC sélectionné. Le schéma est représenté dans la configuration de circuit correspondant au mode bivalent parallèle dans lequel la combustion et la génération de chaleur thermodynamique travaillent simultanément en hiver. Le chauffage à une température plus élevée et la PAC sur l'ECS à une température plus basse pour améliorer les performances de l'ensemble. (Se reporter au projet de circuit d'une chaufferie hybride figure 11 avec plus de détails)



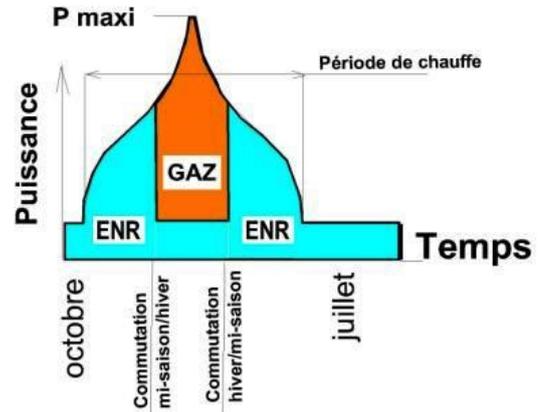
Les modes bivalent alternatif et parallèle

La vanne de commutation 3 permet de cumuler les flux thermiques de la combustion et du chauffage thermodynamique en hiver diminuant le besoin en GN et la puissance des chaudières (mode bivalent //). En mi-saison et en été la valve 3 est au repos et les flux thermiques ne sont pas cumulatifs. (Mode bivalent alternatif). Dans ce mode la PAC assure à la fois le chauffage et l'ECS successivement en profitant de la constante élevée de l'immeuble. Les ballons tampon éventuels ne sont pas représentés.

Cas pratique

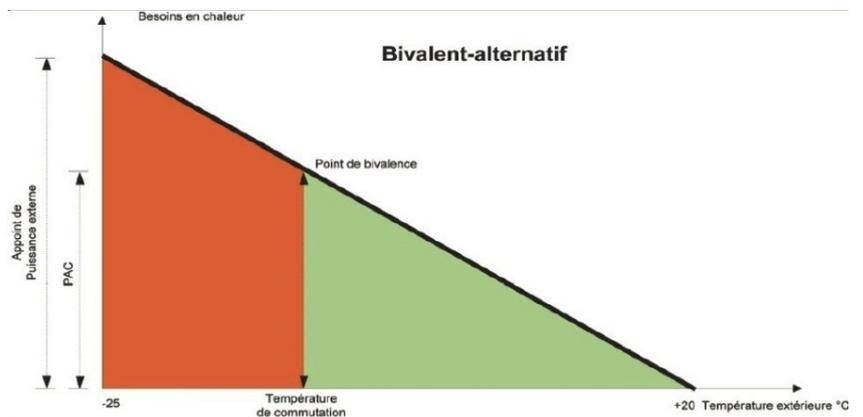
La zone centrale en rouge correspondant à la combustion. Son épaisseur diminue au fur et à mesure que les travaux d'isolation se mettent en place diminuant d'autant les dépenses en combustible. La PAC assure la fourniture de l'ECS pendant toute l'année diminuant drastiquement ce poste très lourd et parfois sujet de débats houleux au sein de la copropriété.

Figure 1



Un point important concerne la compréhension de l'ensemble constitué par la pompe à chaleur et les chaudières à gaz en ce qui concerne la régulation:

Les deux flux thermiques pouvant être émis par la PAC et par les chaudières gaz ne sont pas cumulatifs dans le mode bivalent alternatif dans la mesure où les flux thermiques délivrés par le condenseur de la PAC et les chaudières ne peuvent s'additionner sur le chauffage comme cela est le cas avec un complément de chauffage par feu de cheminée ou convecteur électrique d'appoint au mode GAZ.



Chaufferie mixte GAZ/PAC
Courtesy **Waterkotte** Figure 2

Par contre les deux flux thermiques émis par la PAC et les chaudières gaz peuvent être utilisés simultanément pour les besoins du chauffage et de l'eau chaude sanitaire comme indiqué sur la figure 1



Partie GAZ constituée de deux chaudières de 300 kW (Courtesy De Dietrich)

Cas pratique

Le brûleur modulant

Le brûleur d'une chaudière moderne (Figure de gauche) est équipé d'un variateur de vitesse sur l'arrivée d'air de combustion et de gaz naturel. La possibilité de moduler la puissance de 20 à 100% soit à partir de 60 kW pour une chaudière ayant une puissance nominale de 300 kW est intéressante en mi-saison. Cette modulation s'obtient en faisant varier les débits d'air et de gaz (Figure du milieu) permettant d'obtenir un fonctionnement à charge réduite avec une perte de rendement beaucoup plus faible par rapport au fonctionnement d'une chaudière surpuissante fonctionnant en tout ou rien.

Le condensat

La figure de droite montre la tuyauterie de récupération des eaux du condensat. L'autorisation est donnée de rejeter le condensat dans les eaux usées mais seulement après traitement. Le non-respect de la réglementation peut entraîner deux ans d'emprisonnement et 75 000 € d'amende. Le condensat est en effet acide pour la raison que le gaz carbonique CO_2 soluble dans l'eau H_2O , forme un acide carbonique CH_2O_3 très acide ayant un pH voisin de quatre dans le cas de la condensation avec le gaz alors que le rejet doit avoir un pH supérieur à 6,5. Le passage du condensat acide dans du charbon actif élimine tout d'abord les traces éventuelles de combustible dans le cas du fioul. On le fait ensuite traverser un lit de graviers calcaires ce qui suffit à "neutraliser" l'acidité avant le rejet. A noter que le condensat non traité attaque les métaux. (Cette attaque éventuelle ne concerne que la tuyauterie de couleur bleu). La fonte d'aluminium au silicium, le cuivre, et l'acier inoxydable sont les métaux qui résistent le mieux à cet acide. Les fournisseurs de chaudières travaillent en collaboration avec des sociétés assurant la fourniture des tuyauteries d'évacuation des gaz brûlés. Celles-ci sont prévues en inox pour les chaudières de forte puissance alors que pour l'individuel, ces tuyauteries sont parfois prévues en PVC. Ce sont ces mêmes sociétés qui traitent le condensat avant rejet.

A propos des chaufferie hybride EnR-GAZ

Vu la volonté de la France de ne pas exploiter le gaz de schiste sur son territoire, les pompes à chaleur à absorption utilisant le gaz pour assurer leur fonctionnement devraient être progressivement abandonnées. Elles ont des performances modestes sensiblement inférieures à celle des PAC à compression *air eau* en relève. Le fait que certains constructeurs français puissent prendre la responsabilité de la régulation pour une chaufferie hybride GAZ EnR avec une PAC à absorption à un seul fluide en fournissant une solution que l'on pourrait appeler *gaz gaz* donne confiance dans la capacité de ces sociétés de faire cohabiter le gaz et l'électricité en intégrant une chaudière conventionnelle et une pompe à chaleur à compresseur au sein d'une chaufferie hybride. Mais cela ne signifie pas pour autant qu'elles ont les capacités de jouer le rôle de Maître d'œuvre. Il semble préférable de dissocier dans la mesure du possible les régulations en séparant les circuits hydrauliques comme indiqué sur la figure page 395. Une solution peut en effet consister à conserver la régulation standard du prestataire habitué au mode GAZ avec la marche en cascade des chaudières, solution intéressante en termes de performances pendant l'hiver (Voir par exemple une régulation du type *Diematic* telle que *De Dietrich* les montent sur ses chaudières). Dans ce cas la Maîtrise d'œuvre pourrait revenir à un nouveau prestataire prenant la décision d'orienter le projet vers un automate programmable gérant les deux systèmes la commutation d'un système vers l'autre et la mise en service de l'ensemble. Ceci étant entendu qu'il ne fait aucun doute que la partie thermodynamique est mieux à même de fournir le besoin thermique en mi saison qu'un système surdimensionné faisant fonctionner deux chaudières surpuissantes fonctionnant en // !