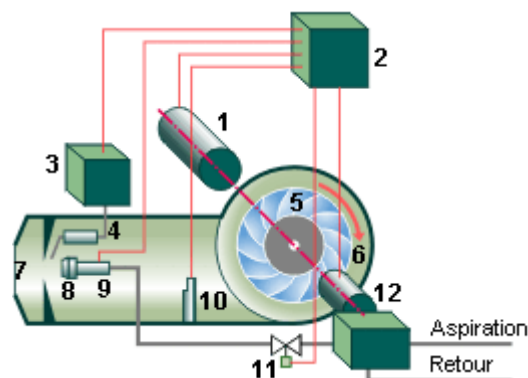


Le brûleur fuel



- [Composants d'un brûleur](#)
- [La pompe fuel et l'électrovanne](#)
- [Le gicleur](#)
- [Le réchauffeur de fuel](#)
- [L'alimentation en air](#)
- [La tête de combustion](#)
- [Séquences de démarrage d'un brûleur](#)
- [Dispositif de sécurité](#)
- [Brûleurs low NOx](#)
- [Brûleurs 1, 2 allures et modulant](#)

Composants d'un brûleur



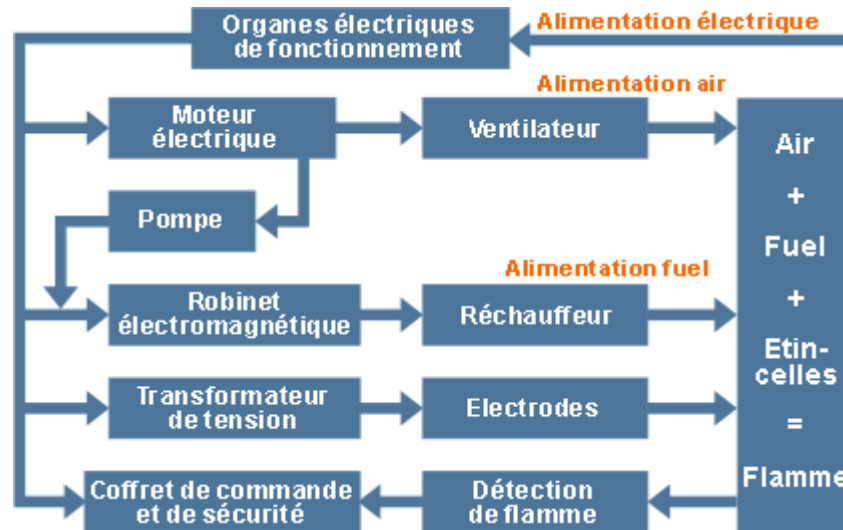
Le brûleur fuel :

- 1. moteur, 2. boîte de contrôle, 3. transformateur, 4. électrodes, 5. ventilateur, 6. volute, 7. déflecteur, 8. gicleur, 9. réchauffeur, 10. cellule photosensible, 11. électrovanne, 12. pompe et régulateur de pression.*

Le brûleur fuel a pour fonction de mélanger, dans des [proportions correctes](#), l'air comburant et le fuel pour permettre la combustion.

L'alimentation en air est assurée par un [ventilateur](#) qui puise l'air ambiant de la chaufferie.

L'alimentation en fuel est assurée par une pompe qui puise dans le réservoir. La pompe a également pour mission de maintenir, via un régulateur, une pression suffisante au fuel pour permettre sa pulvérisation. L'électrovanne libère le combustible au moment déterminé par la programmation. Le gicleur assure la pulvérisation du fuel en des milliards de gouttelettes et le réglage du débit de fuel. On parle donc de "brûleur à pulvérisation".

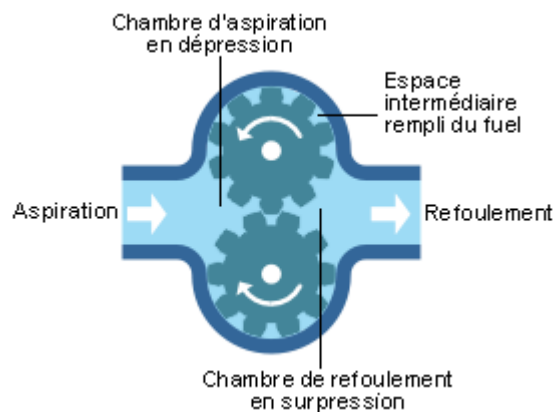


Principe de fonctionnement d'un brûleur fuel.

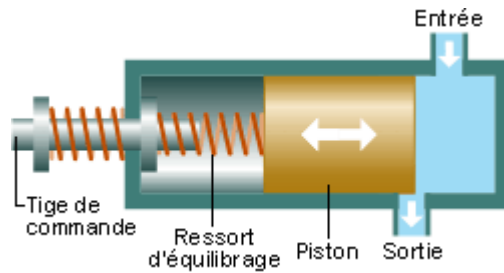
La pompe fuel et l'électrovanne



L'alimentation en fuel se fait via une pompe (le plus souvent une pompe à engrenage), reliée à l'arbre du moteur. La pompe est équipée d'un régulateur de pression qui renvoie l'excès de fuel vers le réservoir.



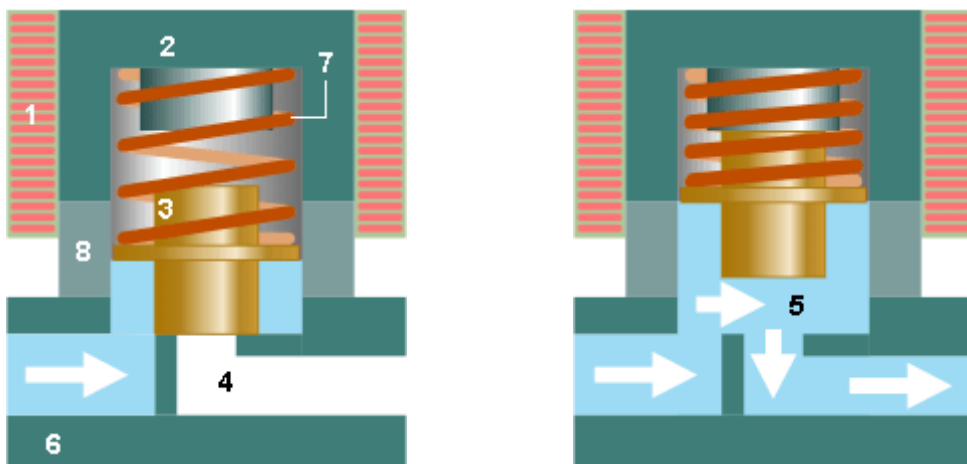
Pompe à fuel



Régulateur de pression :

La pression d'alimentation du gicleur est assurée par un ressort d'équilibrage. Le surplus de fuel est renvoyé vers le réservoir par la sortie

Une ou plusieurs électrovannes permettent ensuite au gicleur d'être alimenté.



Electrovannes :

1. bobinage, 2. armature concentrant le champ magnétique, 3. noyau mobile, 4. clapet de fermeture, 5. siège du clapet, 6. corps de vanne, 7. ressort, 8. partie métallique non conductrice de champ magnétique.

Electrovanne hors tension (fermée)

Electrovanne sous tension (ouverte).

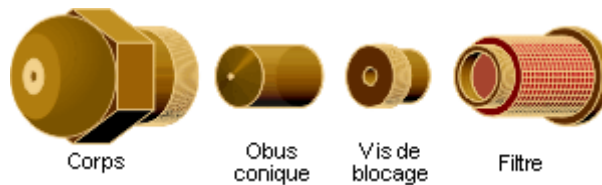
Le Champ magnétique créé par le bobinage sous tension attire le noyau mobile qui porte le clapet de fermeture.

Le gicleur



La pulvérisation du fuel a pour objectif d'augmenter la surface de contact entre le fuel et l'air comburant. Cela permet une évaporation plus importante du fuel à sa surface et favorise son mélange avec l'air.

Par exemple, 1 litre de fuel pulvérisé à 7 bars donne 15 à 20 milliards de gouttelettes et représente une surface de contact avec l'air de 500 m².



Un gicleur est composé de 4 éléments. L'obus conique et la pression de la pompe engendrent la rotation du combustible avant sa pulvérisation par le trou du corps de gicleur.

Un gicleur est caractérisé par trois valeurs :

- le débit nominal en [gal/h],
- l'angle de pulvérisation en [deg],
- le mode de pulvérisation.

Ces données sont reprises d'une part sur la [fiche d'entretien annuel](#) du brûleur et sur le [marquage du gicleur](#) même.

Le débit

Le débit nominal du gicleur est donné jusqu'à présent en [gal/h].

Le débit est fonction du diamètre de l'orifice du corps. Il est donné pour les conditions de référence :

- pression de la pompe : 7 [bars],
- viscosité : 4,4 [mm²/s],
- densité relative : 0,83 (rapport de la masse volumique du fuel (à 15°C) et de la masse volumique de l'eau (à 4°C)).

Sachant que :

$$1 \text{ [gal/h]} = 3,78 \text{ [litres/h]}$$

On peut connaître le débit réel du gicleur installé et donc la puissance réelle du brûleur par les formules :

$$q_{\text{fuel}}[\text{litres/h}] = q_{\text{gicteur}}[\text{gal/h}] \times 3,78 [\text{litres/gal}] \times \sqrt{\frac{p[\text{bars}]}{7}}$$

$$P_{\text{brûleur}}[\text{kW}] = q_{\text{fuel}}[\text{litres/h}] \times 10 [\text{kWh/litre}]$$

où

- q_{fuel} = le débit réel du gicleur [litres/h]
- q_{gicteur} = débit nominal du gicleur [gal/h]
- p = pression d'alimentation du gicleur [bars]
- $P_{\text{brûleur}}$ = puissance installée du brûleur [kW]

Conformément à la norme européenne EN 293, le débit nominal des gicleurs sera désormais donné en [kg/h], pour une pression de 10 [bars] et une masse

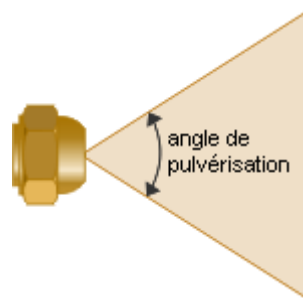
volumique de 840 [kg/m³]. Dans ce cas, on peut connaître le débit réel du gicleur par la formule :

$$q_{\text{fuel}} [\text{litres/h}] = 1000 \times \frac{q_{\text{gicleur}} [\text{kg/h}]}{840 [\text{kg/m}^3]} \times \sqrt{\frac{p [\text{bars}]}{10}}$$

Attention cependant, ces formules ne fonctionnent pas pour les [gicleurs particuliers dits "à retour"](#) dont le débit dépend non seulement de la pression d'alimentation, mais aussi de la pression de refoulement du gicleur même.

L'angle de pulvérisation

A la sortie du brûleur, les gouttelettes de fuel se répartissent suivant un cône. L'angle d'ouverture du cône est donné par le fabricant du gicleur.



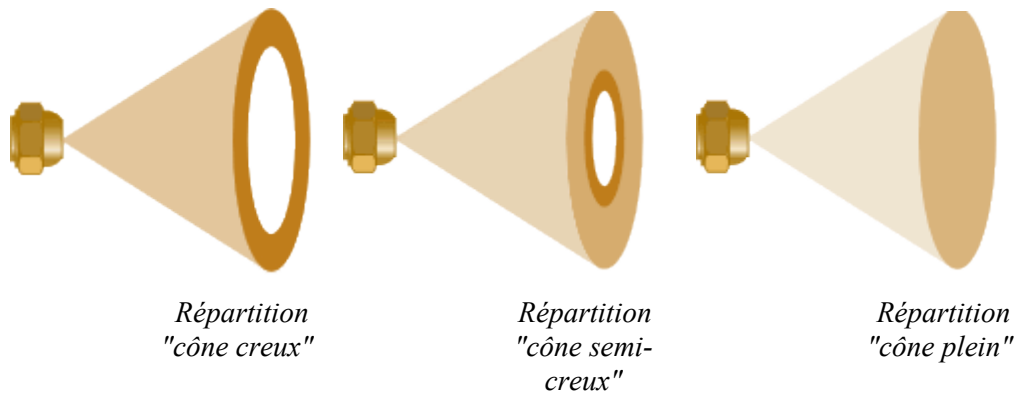
Les angles les plus courants sont :

- pour une pression d'essai de 7 bars (méthode US) : 30°, 45°, 60°, 70°, 80°, 90°
- pour une pression d'essai de 10 bars (norme EN) : 60°, 70°, 80°, 90°, 100°

L'angle de pulvérisation conditionne en partie la forme de la flamme. Plus l'angle est petit, plus la flamme sera longue et effilée. A l'inverse, un angle important fournit une flamme courte mais large. Notons qu'en pratique, l'angle de pulvérisation augmente avec la pression d'alimentation. De même, lorsque la pression d'alimentation augmente, la taille des gouttelettes diminue, ce qui favorise le contact entre l'air comburant et le combustible et donc améliore la combustion.

Composition du cône

En fonction de la puissance du brûleur, la composition du cône de pulvérisation est différente. Le cône est généralement creux (toutes les gouttelettes sont réparties sur la périphérie du cône) ou semi-plein (périphérie plus épaisse) pour les grosses puissances ($P > 250$ kW). Il est généralement plein (tout le volume du cône est rempli de gouttelettes) pour les plus petites puissances.



Marquage du gicleur

La norme EN293 prévoit un double marquage des gicleurs (marquage US et marquage EN) :



L'index en chiffre romains indique le type de répartition du cône pulvérisé :

- I. = répartition pleine (très dense),
- II. = répartition semi-pleine,
- III. = répartition semi-creuse,
- IV. = répartition creuse (peu dense).

Le réchauffeur de fuel



En augmentant la température du combustible avant sa pulvérisation, le réchauffeur a pour objectif :

- de diminuer la viscosité du fuel et donc d'améliorer sa pulvérisation et donc sa combustion,
- d'atténuer les variations de viscosité du fuel liées à la température de stockage et aux caractéristiques du fuel acheté.

L'alimentation en air



L'air nécessaire à la combustion est amené dans le brûleur au moyen d'un ventilateur centrifuge. Ce ventilateur doit assurer le débit d'air nécessaire à la combustion en vainquant la résistance que rencontre l'air jusqu'à la flamme, la résistance que rencontrent la flamme et les fumées dans la chambre de combustion.

Le ventilateur tournant à vitesse constante, un registre d'air permet de régler le débit d'air garantissant une combustion correcte (il faut 10 .. 12,5 m³ d'air pour brûler 1 litre de fuel). Ce registre peut être installé à l'aspiration ou au refoulement du ventilateur.



Registre d'air et son réglage, placés sur le refoulement du ventilateur.

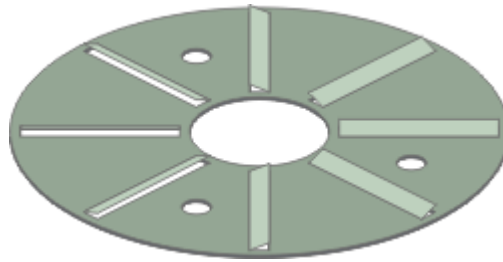
Pour limiter le balayage du foyer de la chaudière lorsque le brûleur est à l'arrêt et donc l'évacuation de sa chaleur par tirage naturel vers la cheminée, les fabricants prévoient sur les brûleurs une fermeture automatique du registre d'air lorsque le brûleur est à l'arrêt :

- Soit avec un servo-moteur électrique assurant l'ouverture et la fermeture.
- Soit avec un contrepoids (qui peut être le propre poids du registre) ou un ressort. Dans ce cas, la dépression ouvre le registre et le flux d'air le maintient en position ouverte.

La tête de combustion

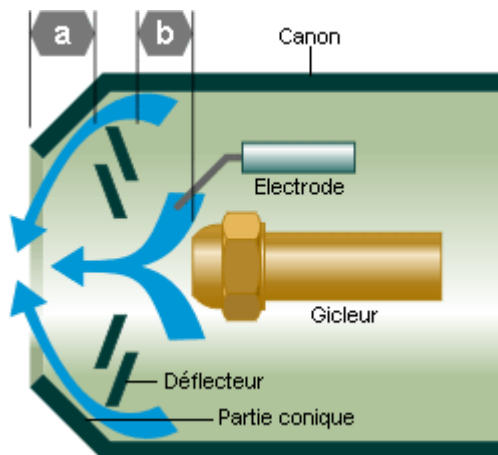


La tête de combustion du brûleur est constituée d'un embout ou gueulard qui guide la flamme. Celle-ci est allumée au moyen d'électrodes alimentées en haute tension, créant un arc électrique.



Défecteur.

La flamme est maintenue en position grâce au déflecteur. En effet, le flux d'air autour de ce dernier crée une dépression qui maintient la flamme en position.



Le réglage de la tête de combustion, c'est-à-dire des distances (a et b) entre le gicleur, le déflecteur et l'embout, est essentiel au bon fonctionnement du brûleur en répartissant les débits d'air primaire (passant au centre du déflecteur) et d'air secondaire (passant à la périphérie).

Séquences de démarrage d'un brûleur



Les séquences de fonctionnement d'un brûleur sont les suivantes :

- Préventilation ou prébalayage : mise en marche du moteur du ventilateur pour amorçage du tirage de la cheminée, évacuation éventuelle de gaz dans le circuit des fumées. Pour les brûleurs de plus de 300 kW, le prébalayage s'effectue à l'aide du ventilateur et dure au minimum 15 secondes. Pour les brûleurs de moins de 300 kW, le prébalayage peut se faire par tirage naturel vers la cheminée, avec une durée minimale de 5 secondes.
- Préallumage : simultanément mise sous tension du transformateur.
- Mise à feu : quelques secondes après, ouverture de l'électrovanne du fioul.

- Post-allumage : pour permettre à la flamme de se stabiliser, l'étincelle est maintenue un court instant après l'apparition de la flamme.
- Régime de fonctionnement : après l'apparition de la flamme, mise hors tension du circuit d'allumage.
- Arrêt : dès satisfaction des besoins calorifiques, arrêt du brûleur par mise hors tension du moteur du ventilateur et de l'électrovanne.

Pour automatiser ces opérations, il faut un moyen fiable pour chronométrer la durée des séquences, qui doivent se répéter fidèlement pendant des années. Les coffrets actuels comportent tous une période de pré et post-allumage. Pour les grosses puissances, il y a en plus une préventilation.

Dispositif de sécurité



Un contrôle continu de la flamme du brûleur est nécessaire pour arrêter ce dernier immédiatement en cas de défaut :

- si la flamme n'apparaît pas quand le combustible est libéré,
- si la flamme disparaît en cours de fonctionnement,
- si une flamme parasite apparaît alors que le brûleur est en phase de démarrage.

De plus, le défaut doit être signalé par une alarme, qui avertit un technicien chargé du dépannage.

Le but est d'éviter de pulvériser du fuel dans une chaudière sans le brûler. On risquerait d'inonder le foyer (et même la chaufferie) et l'allumage intempestif pourrait provoquer une explosion.

Cellule photorésistante

Actuellement, la détection de la flamme fuel se fait fréquemment par cellule photorésistante. La cellule photorésistante réagit directement à la lumière émise par la flamme. Cette réaction est pratiquement instantanée, ce qui permet une commande rapide du système de sécurité. La cellule est constituée par un semi-conducteur dont la résistance varie en fonction inverse de son éclairage : ce matériau a la propriété de ne permettre le passage du courant que lorsqu'il est éclairé. Il est commode de vérifier l'efficacité d'une telle cellule par la mesure de sa résistance dans l'obscurité et, par exemple à la lumière d'une lampe de poche. En règle générale, les cellules photorésistantes sont destinées à la surveillance des flammes fuel (flamme jaune à infra-rouge) et moins à la surveillance des flammes gaz, qui émettent plus de rayons ultra-violets.

Cellule photoélectrique

La cellule photoélectrique est sensible au rayonnement lumineux situé dans le spectre visible. Lorsqu'elle est soumise à ce rayonnement une tension apparaît à ses bornes. La cellule se comporte comme un générateur de courant : tout

incident annule le signal émis et provoque la mise en sécurité du brûleur. Les cellules photoélectriques ne sont utilisées que pour les flammes fuel. Leur principal inconvénient est un vieillissement rapide.

Brûleurs low NOx



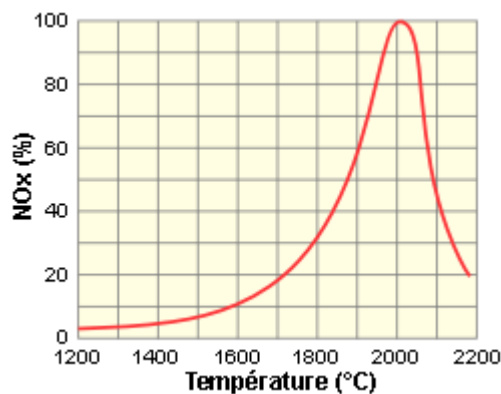
Les derniers développements en matière de brûleur ont principalement visé à diminuer les émissions polluantes comme les imbrûlés, CO, SO₂, NO_x. Les technologies appliquées sont semblables pour les [brûleurs gaz](#) ou les brûleurs fuel.

Idéalement lors d'une réaction de combustion, l'azote N₂ contenu dans l'air comburant, est rejeté tel quel sans être modifié. Cependant, sous certaines conditions, il se combine avec l'oxygène pour former des NO_x.

Non seulement, ceux-ci peuvent être directement toxiques pour la santé, mais contribuent à la formation d'ozone, de smog et de pluies acides. ils font également partie des gaz à effet de serre. Leur émission doit donc être réduite au minimum.

Les paramètres influençant la production de NO_x sont :

- la température élevée de la flamme (supérieure à 1 200°C),
- l'excès d'air, c'est-à-dire la présence importante d'oxygène (O₂) n'ayant pas réagi dans les fumées,
- le temps de séjour des atomes d'azote (N) dans la zone chaude de la flamme,
- la concentration du combustible en N₂.



Evolution de la production de NOx en fonction de la température de la flamme.

Les deux premiers paramètres dépendent de la conception du brûleur, le troisième dépend de la conception de la [chaudière](#).

Pour les brûleurs pulsés (fuel ou gaz), la technique la plus courante pour diminuer les émissions d'oxyde d'azote est le recyclage des gaz de combustion dans la tête du brûleur.

En fait, cela consiste à mélanger une partie des gaz de fumée à l'air comburant, dans le but de :

- diminuer la température de la flamme car même avec plusieurs centaines de degrés, les gaz brûlés sont plus froids que la flamme,
- réduire la concentration en oxygène du mélange,
- favoriser la vaporisation des combustibles liquides et de modifier favorablement les conditions de combustion.

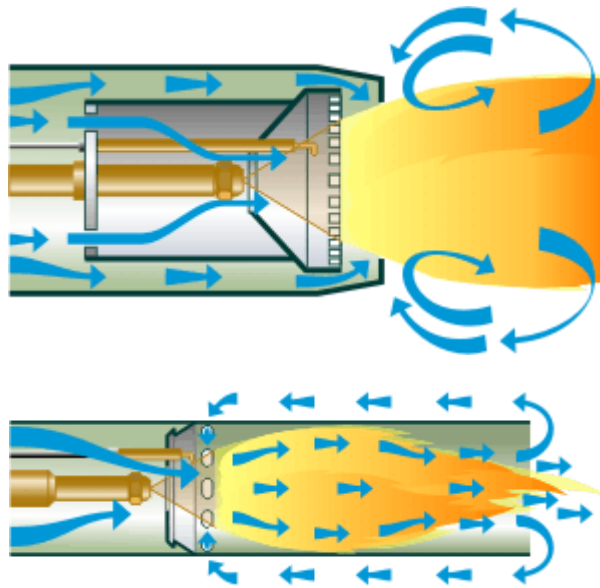
La configuration aéroulque pour réaliser cette recirculation des gaz varie selon les constructeurs. D'une manière générale, c'est l'impulsion de l'air de combustion en mouvement qui sert de force motrice au recyclage : un passage plus étroit au niveau de la tête de combustion provoque une accélération du flux de gaz. Cela génère une dépression et amorce la recirculation des gaz de combustion.

On peut également encore descendre la température de la flamme en élargissant le front de flamme, On recherche ainsi à avoir une flamme en forme d'entonnoir, ce qui augmente sa surface de refroidissement et donc diminue sa température.

Par rapport au brûleur "classique", le brûleur Low-NOx à recirculation interne des gaz de combustion présente les inconvénients suivants :

- la recirculation demande de l'énergie. La comparaison entre un brûleur à pulvérisation traditionnel et un brûleur Low NOx (le Ventilateur et la chambre de combustion étant identiques) montre que la dépression au niveau la tête du brûleur Low NOx réduit la puissance calorique maximale et modifie les caractéristiques intrinsèques du brûleur;
- la vitesse d'écoulement élevée suscite des turbulences à hauteur du venturi. Il peut en résulter un accroissement du niveau sonore;
- la recirculation des gaz de combustion dans la tête du brûleur entraîne un encrassement plus rapide des électrodes d'allumage. Un entretien préventif est dès lors nécessaire;
- la recirculation des gaz de combustion dans la tête du brûleur entraîne une gazéification des particules de mazout pulvérisées à hauteur du gicleur. La combustion de ce mazout gazeux forme une flamme bleue peu intense et difficile à détecter par une photorésistance (LDR). Il est dès lors souvent nécessaire d'utiliser un détecteur infrarouge (IR) ou ultraviolet (UV), plus onéreux. Cette caractéristique est pleinement exploitée dans les brûleurs dits à "[flamme bleue](#)".

En revanche, un brûleur Low-NOx produit de 20 à 50 % d'émissions NOx en moins qu'un brûleur à pulvérisation traditionnel.



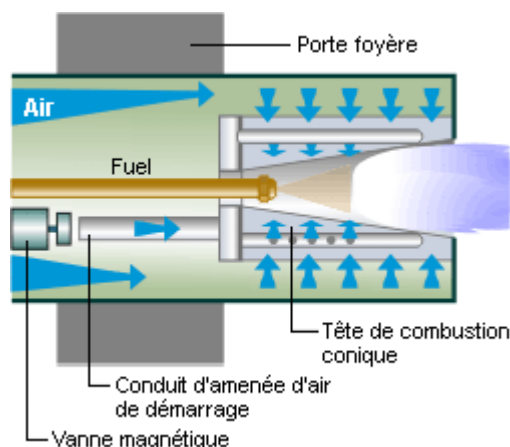
Brûleurs Low Nox.

La recirculation s'effectue dans le foyer à hauteur de la tête de combustion. Une zone de dépression aspire à nouveau les gaz de combustion et les mélange à la flamme. La recirculation peut également être externe.

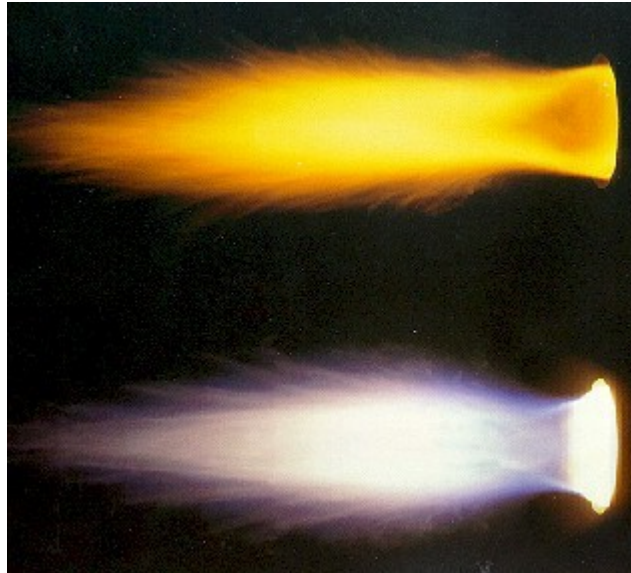
Cas particulier des brûleurs "flamme bleue"

Le **brûleur à "flamme bleue"** est un brûleur dans lequel le mazout pulvérisé est entièrement vaporisé avant la combustion. On parle aussi de "**brûleur à gazéification**". La chaleur requise pour l'évaporation est fournie par les gaz de combustion recyclés. Il en résulte une combustion quasi totale dans la phase gazeuse avec un excès d'air minime et une production nulle de suies. Comme le mazout est brûlé à l'état gazeux, la flamme de ce brûleur présente la couleur bleue typique d'une flamme gaz, c'est pourquoi on parle de brûleur à "flamme bleue". Le principe du brûleur à flamme bleue et celui du brûleur Low NO_x à recirculation présentent de nombreuses similitudes notamment, une faible émission de NO_x.

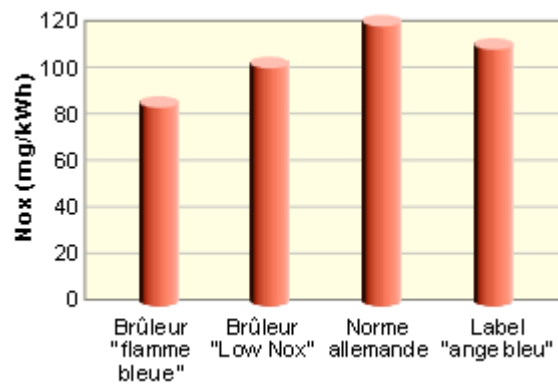
Au niveau du coût d'un tel brûleur, donnons l'exemple d'un fabricant allemand. Dans sa gamme de brûleur allant de 15 à 315 kW, le surcoût d'un brûleur à "flamme bleue" par rapport à un brûleur à "flamme "jaune" varie de 15 à 60 %.



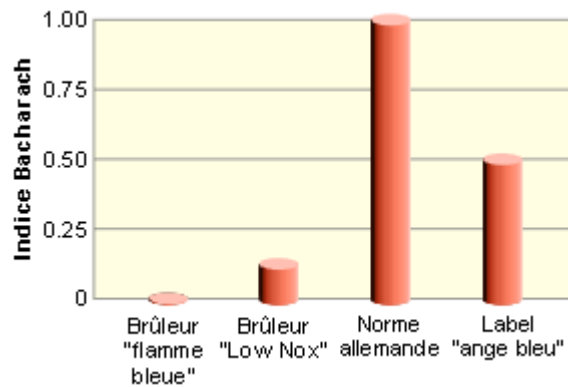
Exemple de brûleur à "flamme bleue" : l'air de combustion est acheminé par deux conduites latérales et amené au point de combustion via un mouvement tangentiel. Lors de la sortie de la forme conique, il se produit un effet de tourbillon qui provoque la recirculation de 50 % des gaz de combustion. Deux canaux d'amenées d'air de démarrage envoient un léger excès d'air dans la flamme durant la première minute après l'allumage, jusqu'à ce que la partie frontale du gueulard du brûleur ait atteint une température suffisante pour passer à la gazéification.



Flamme "jaune" et flamme "bleue".



Emission de NOx des brûleurs "flamme bleue" et Low NOx comparée aux exigences des norme et label allemands



Emission de suies des brûleurs "flamme bleue" et Low NOx comparée aux exigences des norme et label allemands

Brûleurs 1, 2 allures et modulant



On répertorie 4 modes de fonctionnement des brûleurs fuel :

- en tout ou rien,
- en 2 allures,
- en tout ou peu progressivement,
- en modulation.

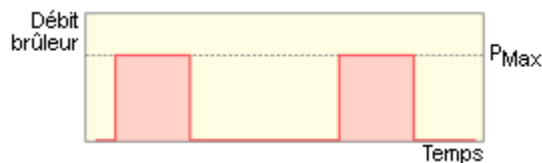
Brûleur tout ou rien

On parle de brûleur tout ou rien lorsque pour toute demande de chaleur, le brûleur s'enclenche, fournit sa pleine puissance, et s'arrête lorsque les besoins sont satisfaits.

Les brûleurs tout ou rien se différencient par leur mode de démarrage :

Démarrage à pleine puissance

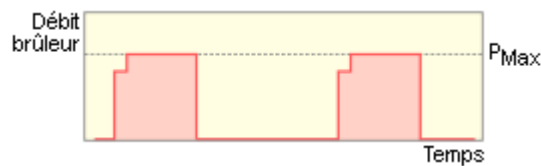
Ce type de brûleur est utilisé pour les puissances inférieures à 100 kW. Lors de la demande de chaleur, le brûleur démarre directement à pleine puissance.



Démarrage à débit limité

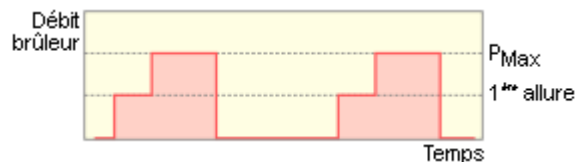
Lors d'une demande de chaleur et grâce à un jeu d'électrovannes, le brûleur démarre avec une puissance de l'ordre de 75 % et passe à sa pleine puissance après le temps de post-allumage. Cela permet d'atténuer l'onde de choc provoquée par l'allumage du combustible. Comme dans ce type de brûleur, le

réglage du [registre d'air](#) est manuel, la phase initiale du démarrage se produit avec un excès d'air trop important et donc une combustion médiocre.



Démarrage à petite allure

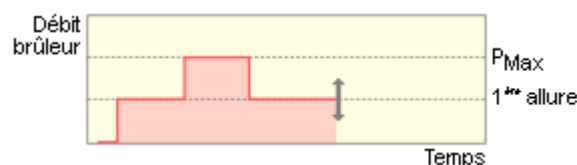
Ce mode de démarrage peut s'appliquer aux brûleurs de plus de 50 kW. Il repose sur le même principe que dans le cas précédent. Il se différencie cependant par la réduction plus importante de la puissance au démarrage. Il s'agit en fait de [brûleurs 2 allures](#) mais dont la commande ne permet pas le choix de l'allure en fonction des besoins. Le temps séparant l'allumage du passage à la deuxième allure est fixé (relais programmable).



Brûleur 2 allures

En cas de demande de chaleur, le brûleur est enclenché en première allure (qui représente entre 40 et 60 % de la puissance nominale). Après un délai déterminé (relais programmable), le brûleur passe à pleine puissance sauf si le régulateur signale que cette pleine puissance n'est pas nécessaire. Dans ce dernier cas, la première allure est maintenue.

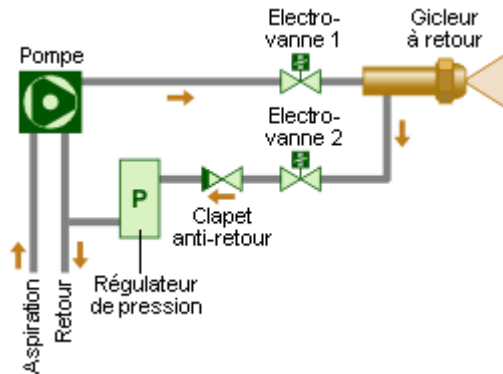
Lorsque le brûleur fonctionne en deuxième allure, il est possible que le régulateur estime que la pleine puissance n'est plus requise et le brûleur repasse en première allure. Si la puissance requise est inférieure à la puissance en allure réduite, le brûleur s'arrête. Dans le cas inverse, il repasse en deuxième allure.



Deux possibilités constructives sont exploitées dans les brûleurs 2 allures :

- Soit une pompe alimente deux gicleurs différents via deux électrovannes : la petite allure est assurée par l'ouverture d'une électrovanne et l'alimentation du premier gicleur; pour assurer la grande allure, la deuxième électrovanne est activée (la première restant ouverte) et alimente le second gicleur en complément.
- Soit une pompe à deux étages alimente un seul gicleur, via deux régulateurs de pression.

- Soit un gicleur à retour (pour les grosses puissances). Il s'agit en fait d'un gicleur dont une partie du fuel qui l'alimente n'est pas pulvérisée et est renvoyée vers la cuve. Par un jeu de vanne automatique, la résistance du circuit retour du gicleur permet une variation du débit pulvérisé.



Brûleur 2 allures avec gicleur à retour :

- en petite allure, les électrovannes (1) et (2) sont ouvertes. La pression de pulvérisation est réglée par le régulateur de pression,
- en grande allure, l'électrovanne (2) est fermée et le gicleur est soumis à la pression de la pompe.



Brûleur à deux gicleurs et deux électrovannes.

Dans les différents cas, le registre d'air est à deux positions fixées :

- soit par un vérin hydraulique activé par la pression de combustible,
- soit un servomoteur électrique,
- soit un électro-aimant.

Le brûleur 2 allures présentent des avantages énergétiques indéniables :

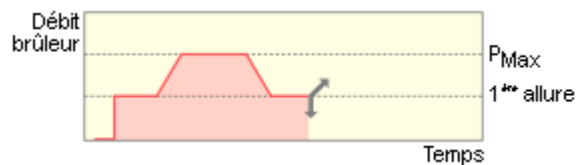
- L'adaptation de la puissance aux besoins allonge le temps de fonctionnement du brûleur et diminue le nombre de cycles d'allumage sources d'imbrûlés et d'émissions polluantes.

- Les temps d'arrêt de la chaudières et donc les pertes du même nom sont moindres.
- La diminution de la puissance du brûleur par rapport à la puissance de la chaudière augmente le rendement de combustion. En effet, la taille de l'échangeur augmente par rapport à la puissance de la flamme et donc les fumées sortent plus froides de la chaudière. Un gain de rendement de combustion de 2 .. 2,5 % est ainsi possible entre la petite allure (60 % de la puissance nominale) et la grande allure.

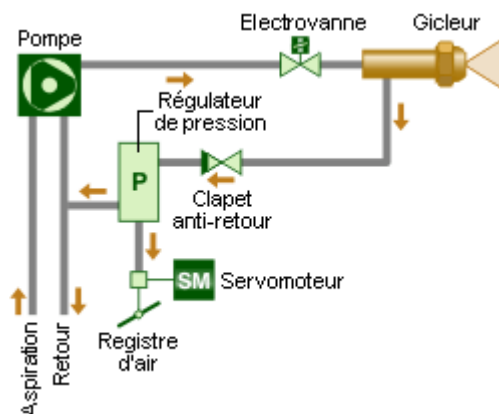
Brûleur "tout ou peu progressif"

Le principe de fonctionnement de ce type de brûleur est semblable à celui d'un brûleur 2 allures. Ce brûleur ne permet que 2 allures. Le passage de la première à la deuxième allure n'est cependant plus brutal, mais progressif (en un temps minimum de 30 secondes).

Si la demande de chaleur est inférieure à la puissance en première allure, le brûleur se met à l'arrêt. Si elle y correspond, le brûleur maintien son fonctionnement en première allure. Si elle en est supérieure, le brûleur passe progressivement en deuxième allure.



Le brûleur "tout ou peu progressif" est équipé d'un gicleur à retour.

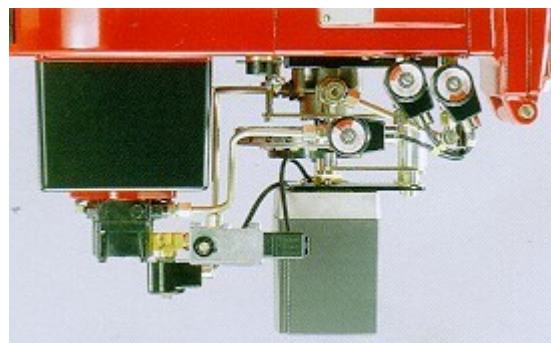
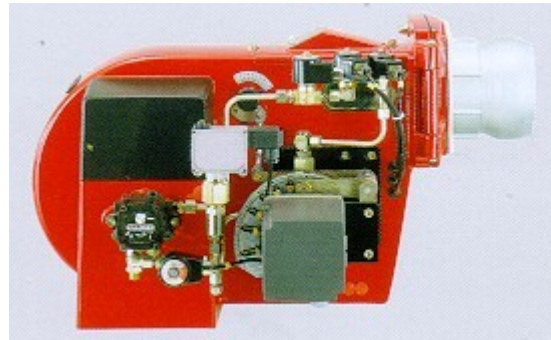
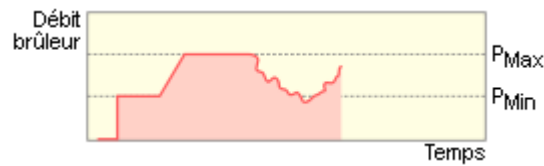


Fonctionnement d'un brûleur "tout ou peu progressif" :

- en petite allure, l'électrovanne est ouverte et le servomoteur commandant le régulateur de pression est en position minimum,
- lors du passage en deuxième allure, le servomoteur actionne progressivement le régulateur de pression et le registre d'air pour atteindre le maximum d'ouverture en deuxième allure.

Brûleur modulant

Avec un brûleur modulant, toutes les allures de fonctionnement sont possibles, au delà d'un minimum souvent de l'ordre de 30 %. Les débits d'air et de fuel sont réglés en continu en fonction de la puissance de chauffage requise, ce qui permet un fonctionnement quasi continu.

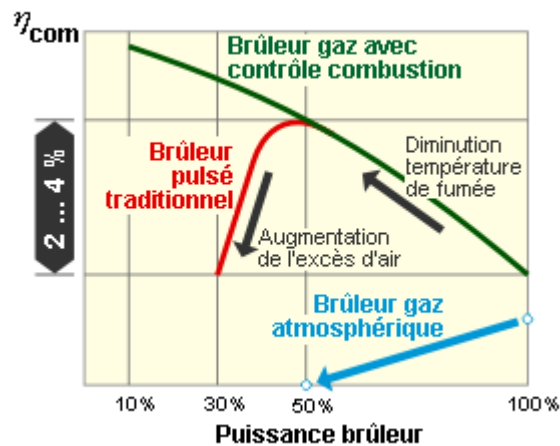


Brûleur modulant fuel

Les avantages du brûleur modulant sont du même ordre que ceux du brûleur 2 allures. L'adaptation de la puissance est cependant encore plus fine, ce qui limite encore les temps d'arrêt d'un brûleur. La modulation a cependant ses limites. En effet, à basse puissance, le réglage de l'[excès d'air](#) devient difficile. De plus, si la puissance du brûleur diminue trop fortement, des condensations risquent d'apparaître dans la chaudière.

C'est pourquoi, les brûleurs modulants fuel ne peuvent descendre en dessous d'une puissance de l'ordre de 30 % et à ce moment, la chaudière doit fonctionner à haute température.

Exemple :



Evolution du rendement de combustion des brûleurs actuels en fonction de la modulation de sa puissance.

Pour les brûleurs pulsés modulant fuel (de 30 à 100 %) : dans un premier temps, lorsque la puissance du brûleur diminue (à partir de 100 % de puissance), la température des fumées diminue et le rendement augmente. A partir d'un certain moment, la diminution de la quantité de particules de combustible et leur dispersion (la pulvérisation du fuel devient difficile) imposent d'augmenter l'excès d'air pour éviter les imbrûlés. Le rendement diminue de nouveau.

Pour les nouveaux brûleurs gaz modulant avec contrôle de la combustion : le contrôle de la combustion permet de maintenir un excès d'air correct, sans production d'imbrûlé, sur toute la plage de modulation. On obtient donc une plage de modulation plus grande (10 à 100 %) avec une qualité de combustion constante et des fumées qui se refroidissent de plus en plus (pour arriver à la condensation).

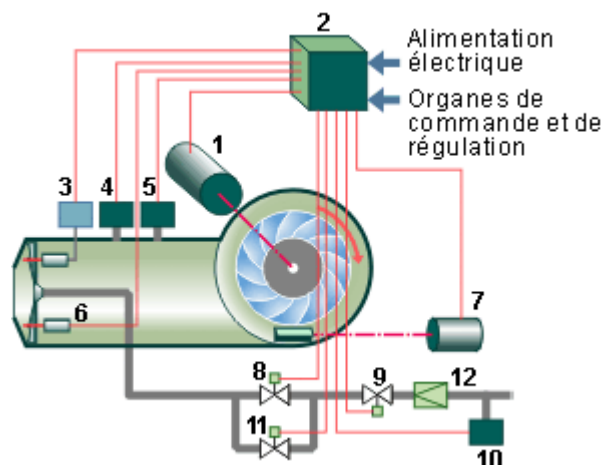
Pour les brûleurs gaz atmosphérique 2 allures (sans ventilateur) (50 % / 100 %) : l'air de combustion est amené dans la chaudière naturellement. L'excès d'air n'est donc pas contrôlé. Si la puissance du brûleur diminue de moitié, ce n'est pas le cas de la quantité d'air aspirée. L'excès d'air augmente donc et le rendement chute.

Les brûleurs gaz



- **Composants d'un brûleur à air pulsé**
- **Vannes gaz et réglage du débit**
- **L'alimentation en air**
- **La tête de combustion**
- **Dispositif de sécurité**
- **Brûleurs low NOx**
- **Brûleurs 1, 2 allures et modulant**
- **Cas particulier des brûleurs atmosphériques**

Composants d'un brûleur à air pulsé

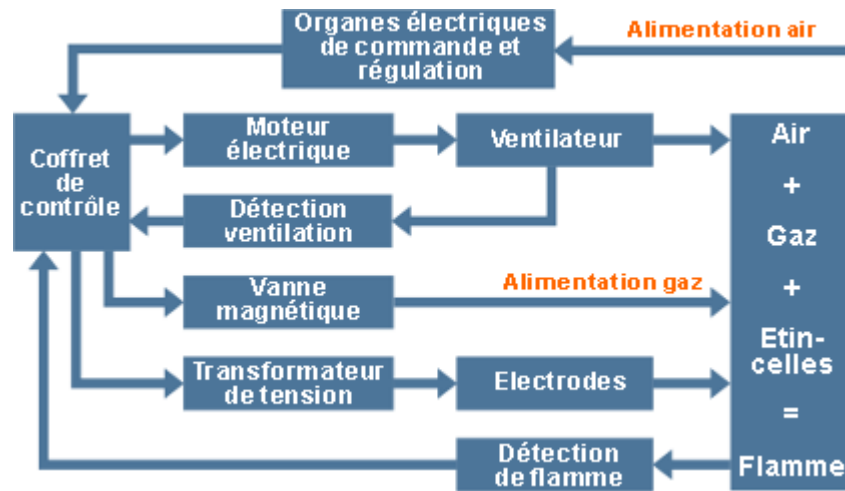


Brûleur gaz à air pulsé :

- 1. moteur, 2. boîte de contrôle, 3. transformateur, 4. pressostat mini air (brûleur 1 allure), 5. pressostat mini air (brûleur 2 allures), 6. électrodes, 7. moteur volet d'air, 8. électrovanne (2ème allure), 9. électrovanne de sécurité, 10. pressostat mini gaz, 11. électrovanne (1ère allure), 12. régulateur de pression.*

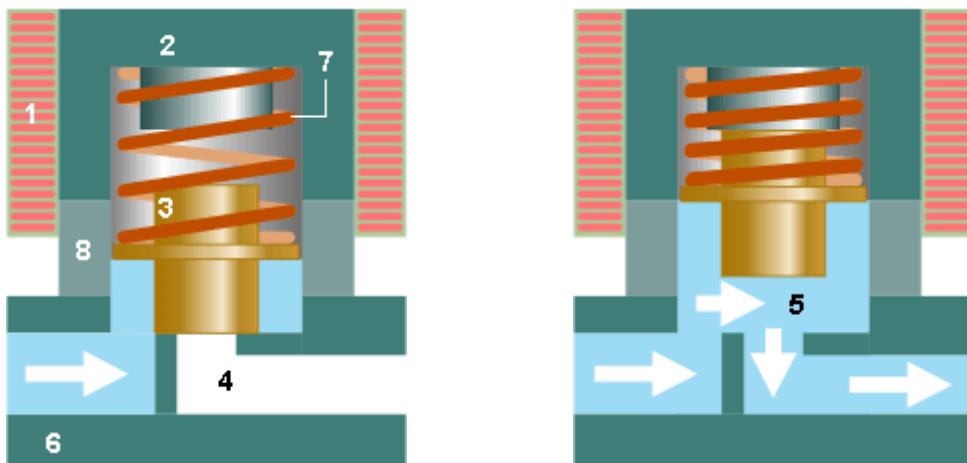
Le brûleur gaz a pour fonction de mélanger, dans des proportions correctes, l'air comburant et le gaz pour permettre la combustion. L'alimentation en air est assurée par un ventilateur qui puise l'air ambiant de la chaufferie.

L'alimentation en gaz est assurée par une électrovanne et des régulateurs de pression.



Principe de fonctionnement d'un brûleur gaz à air pulsé.

Vannes gaz et réglage du débit



Electrovannes gaz :

1. bobinage, 2. armature concentrant le champ magnétique, 3. noyau mobile, 4. clapet de fermeture, 5. siège du clapet, 6. corps de vanne, 7. ressort, 8. partie métallique non conductrice de champ magnétique.

Electrovanne hors tension (fermée).

Electrovanne sous tension (ouverte).

Le Champ magnétique créé par le bobinage sous tension attire le noyau mobile qui porte le clapet

de fermeture.

La pression d'alimentation de gaz est constante, le réglage du débit se fait, par étranglement, avant l'entrée dans la [tête du brûleur](#) :

- soit par un té de réglage indépendant de la vanne gaz,
- soit par un boisseau incorporé à la vanne gaz,
- soit par un limiteur de déplacement du clapet de la vanne gaz.

Dans les [brûleurs à deux allures](#), les électrovannes sont composées de deux bobinages et de deux noyaux mobiles.

Il existe également des vannes hydrauliques dont le clapet est manoeuvré par un piston à huile. L'avantage de ce système est une ouverture plus progressive liée à la vitesse de la pompe et une fermeture plus rapide liée à la pression du ressort plus importante que pour les électrovannes. Un démarrage plus lent peut être obtenu au moyen de deux vannes magnétiques montées en parallèle.

Les vannes gaz comportent un contact de fin de course qui interdit le démarrage du brûleur si le clapet n'est pas correctement fermé.

La puissance du brûleur

La puissance "P" du brûleur dépend du débit "q_{gaz}" de gaz. Celui-ci peut être mesuré au niveau du compteur gaz.

En première approximation, en négligeant l'influence de la pression et de la température sur le débit ainsi que la variation du pouvoir calorifique du gaz distribué, on peut déterminer la puissance du brûleur par :

$$P \text{ [kW]} = q_{\text{gaz}} \text{ [m}^3\text{/min]} \times 60 \text{ [min/h]} \times 10 \text{ [kWh/m}^3\text{]}$$

L'alimentation en air



L'air nécessaire à la combustion est amené dans le brûleur au moyen d'un [ventilateur centrifuge](#). Ce ventilateur doit assurer le débit d'air nécessaire à la combustion en vainquant la [résistance](#) que rencontre l'air jusqu'à la flamme, la résistance que rencontrent la flamme et les fumées dans la chambre de combustion.

Le ventilateur tournant à vitesse constante, un registre d'air permet de régler le débit d'air garantissant une [combustion correcte](#) (il faut 10 .. 13 m³ d'air pour brûler 1 m³ de gaz). Ce registre peut être installé à l'aspiration ou au refoulement du ventilateur.

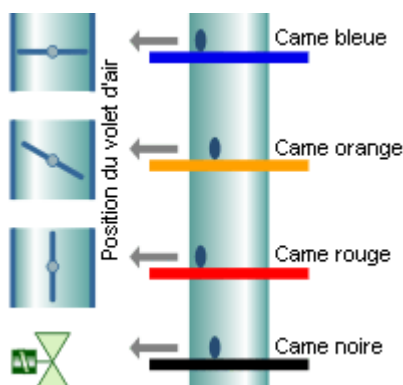


Le réglage manuel du registre d'air d'un brûleur une allure se fait souvent au moyen d'un secteur gradué.

Pour limiter le balayage du foyer de la chaudière lorsque le brûleur est à l'arrêt et donc l'évacuation de sa chaleur par tirage naturel vers la cheminée, les fabricants prévoient sur les brûleurs une fermeture automatique du registre d'air lorsque le brûleur est à l'arrêt :

- soit avec un servo-moteur électrique assurant l'ouverture et la fermeture,
- soit avec un contrepoids (qui peut être le propre poids du registre) ou un ressort. Dans ce cas, la dépression ouvre le registre et le flux d'air le maintient en position ouverte.

Dans les brûleurs 2 allures, la détermination de la position du registre d'air peut, par exemple, être réglée (système mécanique) au moyen de cames.



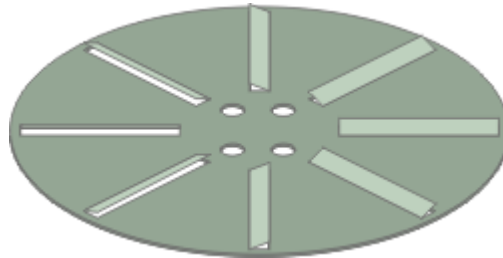
*La came bleue commande la fermeture totale à l'arrêt,
la came orange commande l'ouverture en première allure,
la came rouge commande l'ouverture en deuxième allure,
la came noire commande l'ouverture de la vanne gaz de deuxième allure.
Un disque repère situé en bout d'arbre permet de visualiser les différentes positions d'ouverture.*

Notons en outre que pour des raisons de sécurité, la pression d'air est contrôlée en permanence avant la tête de combustion par un (brûleur une allure) ou deux pressostat (brûleur 2 allures). En cas de défaut, le coffret de commande stoppe l'alimentation de gaz.

La tête de combustion

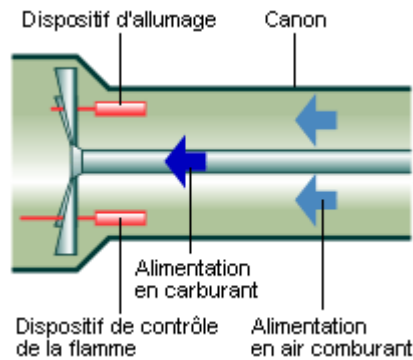


La tête de combustion du brûleur est constituée d'un embout ou gueulard qui guide la flamme. Celle-ci est allumée au moyen d'électrodes alimentées en haute tension, créant un arc électrique.

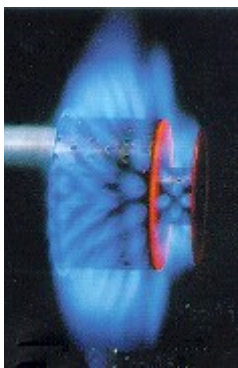


Exemple de déflecteur.

La flamme est maintenue en position grâce au déflecteur. En effet, le flux d'air autour de ce dernier crée une dépression qui maintient la flamme en position.



Tête de combustion d'un brûleur gaz.



Les modèles de brûleur gaz à air pulsé se différencient pas la forme de la tête de combustion. On retrouve ainsi des tubes percés de trous ou de fente, des tubes à gaz, des dispositifs tourbillonneurs, des accroche-flammes à fentes ou trous, ...

Le réglage de la tête de combustion, c'est-à-dire de la distance entre le déflecteur et l'embout, est essentiel au bon fonctionnement du brûleur en répartissant les débits d'air primaire (passant au centre du déflecteur) et d'air secondaire (passant à la périphérie). Il s'agit d'obtenir une vitesse de mélange air/combustible correcte. Une vitesse trop importante entraîne des difficultés d'allumage et d'accrochage de la flamme. Une vitesse trop lente provoque une combustion oscillatoire. Dans les 2 cas, il y a des risques d'accumulation de gaz dans la chaudière et donc d'explosion.

Dispositif de sécurité



Un contrôle continu de la flamme du brûleur est nécessaire pour arrêter ce dernier immédiatement en cas de défaut :

- si la flamme n'apparaît pas quand le combustible est libéré,
- si la flamme disparaît en cours de fonctionnement,
- si une flamme parasite apparaît alors que le brûleur est en phase de démarrage.

De plus, le défaut doit être signalé par une alarme, qui avertit un technicien chargé du dépannage. Le but est d'éviter d'admettre du gaz dans une chaudière sans le brûler. L'allumage intempestif de ce gaz pourrait provoquer une explosion. Comme élément de détection de la flamme on utilise :

- un thermocouple sensible à la chaleur de la flamme (système de détection lent utilisé sur les chaudières atmosphériques de moins de 70 kW,
- un détecteur infrarouge également sensible à la chaleur de la flamme,
- une cellule UV qui émet un signal électrique grâce à l'ionisation d'un gaz contenu dans la cellule, sous l'effet des rayons UV émis par les flammes gaz,
- une sonde d'ionisation. Cette sonde est sensible à la présence d'ions et d'électrons dans toute flamme. Il suffit dès lors d'essayer de faire passer un courant dans la flamme. Si le courant passe, c'est qu'il y a une flamme.

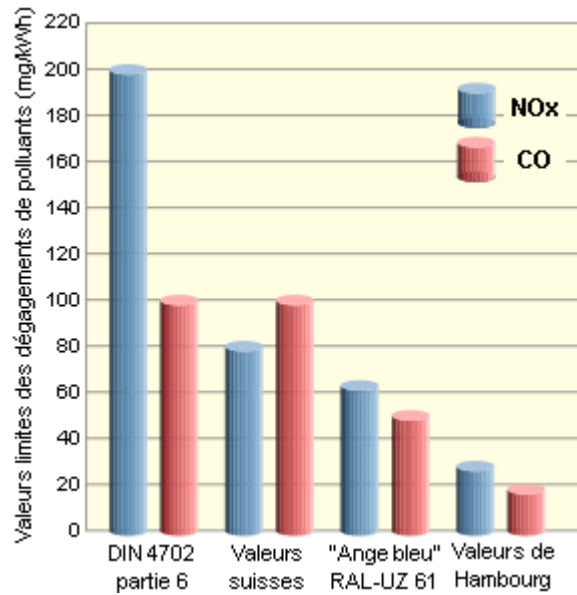
Brûleurs low NOx



Les derniers développements en matière de brûleur ont principalement visé à diminuer les émissions polluantes comme les imbrûlés, CO, NO_x. Les technologies appliquées sont semblables pour les brûleurs gaz ou les [brûleurs fuel](#).

Idéalement lors d'une réaction de combustion, l'azote N₂ contenu dans l'air comburant, est rejeté tel quel sans être modifié. Cependant, sous certaines conditions, il se combine avec l'oxygène pour former des NO_x.

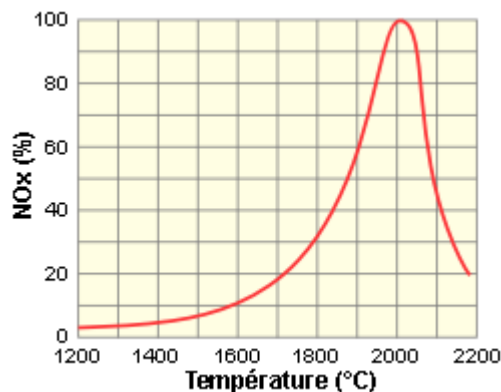
Non seulement, ceux-ci peuvent être directement toxiques pour la santé, mais contribuent à la formation d'ozone, de smog et de pluies acides. ils font également partie des gaz à effet de serre. Leur émission doit donc être réduite au minimum.



Exemples de règlements et de labels limitant la production de NO_x des chaudières en Allemagne et en Suisse.

Les paramètres influençant la production de NO_x sont :

- la température élevée de la flamme (supérieure à 1 200°C),
- l'excès d'air, c'est-à-dire la présence importante d'oxygène (O₂) n'ayant pas réagi dans les fumées,
- le temps de séjour des atomes d'azote (N) dans la zone chaude de la flamme,
- la concentration du combustible en N₂.



Evolution de la production de NO_x en fonction de la température de la flamme.

Les deux premiers paramètres dépendent de la conception du brûleur, le troisième dépend de la conception de la [chaudière](#).

Pour les brûleurs pulsés (fuel ou gaz), la technique la plus courante pour diminuer les émissions d'oxyde d'azote est le recyclage des gaz de combustion dans la tête du brûleur.

En fait, cela consiste à mélanger une partie des gaz de fumée à l'air comburant, dans le but de :

- diminuer la température de la flamme car même avec plusieurs centaines de degrés, les gaz brûlés sont plus froids que la flamme,
- réduire la concentration en oxygène du mélange,
- favoriser la vaporisation des combustibles liquides et de modifier favorablement les conditions de combustion.

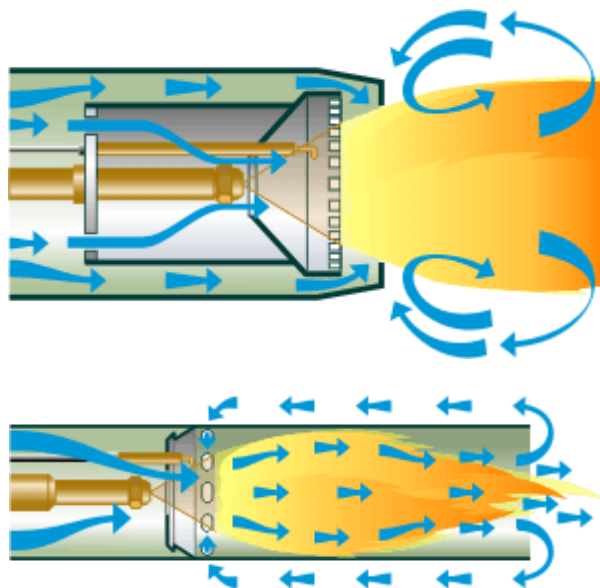
La configuration aéroulrique pour réaliser cette re-circulation des gaz varie selon les constructeurs. D'une manière générale, c'est l'impulsion de l'air de combustion en mouvement qui sert de force motrice au recyclage : un passage plus étroit au niveau de la tête de combustion provoque une accélération du flux de gaz. Cela génère une dépression et amorce la re-circulation des gaz de combustion.

On peut également encore descendre la température de la flamme en élargissant le front de flamme, On recherche ainsi à avoir une flamme en forme d'entonnoir, ce qui augmente sa surface de refroidissement et donc diminue sa température.

Par rapport au brûleur "classique", le brûleur Low-NOx à re-circulation interne des gaz de combustion présente les inconvénients suivants :

- la re-circulation demande de l'énergie. La comparaison entre un brûleur à pulvérisation traditionnel et un brûleur Low NOx (le Ventilateur et la chambre de combustion étant identiques) montre que la dépression au niveau la tête du brûleur Low NOx réduit la puissance calorique maximale et modifie les caractéristiques intrinsèques du brûleur;
- la vitesse d'écoulement élevée suscite des turbulences à hauteur du venturi. Il peut en résulter un accroissement du niveau sonore;
- la re-circulation des gaz de combustion dans la tête du brûleur entraîne un encrassement plus rapide des électrodes d'allumage. Un entretien préventif est dès lors nécessaire.

En revanche, un brûleur Low-NOx produit de 20 à 50 % d'émissions NOx en moins qu'un brûleur traditionnel.



Brûleurs Low Nox (ici en version fuel).

La re-circulation s'effectue dans le foyer à hauteur de la tête de combustion. Une zone de dépression aspire à nouveau les gaz de combustion et les mélange à la flamme. La re-circulation peut également être externe.

Brûleurs 1, 2 allures et modulant



on répertorie 4 modes de fonctionnement des brûleurs gaz pulsés :

- en tout ou rien,
- en 2 allures,
- en tout ou peu progressivement,
- en modulation.

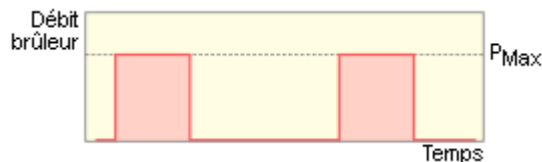
Brûleur tout ou rien

On parle de brûleur tout ou rien lorsque pour toute demande de chaleur, le brûleur s'enclenche, fournit sa pleine puissance, et s'arrête lorsque les besoins sont satisfaits.

Les brûleurs tout ou rien se différencient par leur mode de démarrage :

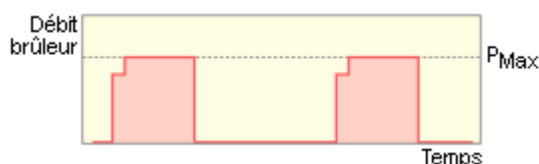
Démarrage à pleine puissance

Ce type de brûleur est utilisé pour les puissances inférieures à 100 .. 120 kW. Lors de la demande de chaleur, le brûleur démarre directement à pleine puissance.



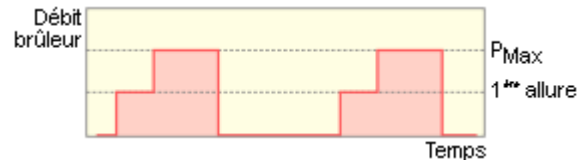
Démarrage à débit limité

Lors d'une demande de chaleur et grâce à un jeu d'électrovannes (2 vannes magnétiques ou bien d'une seule vanne à 2 étages), le brûleur démarre avec une puissance de l'ordre de 75 % et passe à sa pleine puissance après le temps de post-allumage. Cela permet d'atténuer l'onde de choc provoquée par l'allumage du combustible. Comme dans ce type de brûleur, le réglage du [registre d'air](#) est manuel, la phase initiale du démarrage se produit avec un excès d'air trop important et donc une combustion médiocre.



Démarrage à petite allure

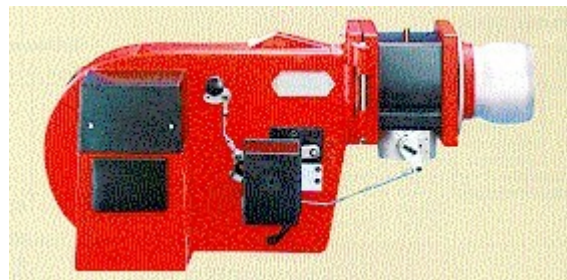
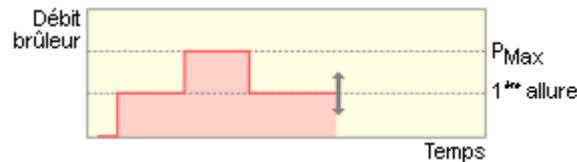
Ce mode de démarrage repose sur le même principe que dans le cas précédent. Il se différencie cependant par la réduction plus importante de la puissance au démarrage. Il s'agit en fait de [brûleurs 2 allures](#) mais dont la commande ne permet pas le choix de l'allure en fonction des besoins. Le temps séparant l'allumage du passage à la deuxième allure est fixé (relais programmable).



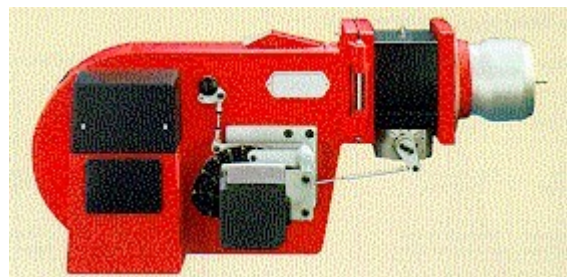
Brûleur 2 allures

En cas de demande de chaleur, le brûleur est enclenché en première allure (qui représente entre 40 et 60 % de la puissance nominale). Après un délai déterminé (relais programmable), le brûleur passe à pleine puissance sauf si le régulateur signale que cette pleine puissance n'est pas nécessaire. Dans ce dernier cas, la première allure est maintenue.

Lorsque le brûleur fonctionne en deuxième allure, il est possible que le régulateur estime que la pleine puissance n'est plus requise et le brûleur repasse en première allure. Si la puissance requise est inférieure à la puissance en allure réduite, le brûleur s'arrête. Dans le cas inverse, il repasse en deuxième allure.



Brûleur gaz 2 allures.



Brûleur gaz modulant.

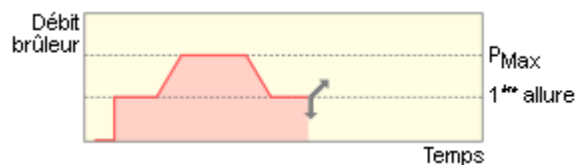
Le brûleur 2 allures présentent des avantages énergétiques indéniables :

- L'adaptation de la puissance aux besoins allonge le temps de fonctionnement du brûleur et diminue le nombre de cycles d'allumage sources d'imbrûlés et d'émissions polluantes.
- Les temps d'arrêt de la chaudières et donc les pertes du même nom sont moindres.
- La diminution de la puissance du brûleur par rapport à la puissance de la chaudière augmente le rendement de combustion. En effet, la taille de l'échangeur augmente par rapport à la puissance de la flamme et donc les fumées sortent plus froides de la chaudière. Un gain de rendement de combustion de 2 .. 2,5 % est ainsi possible entre la petite allure (60 % de la puissance nominale) et la grande allure.

Brûleur "tout ou peu progressif"

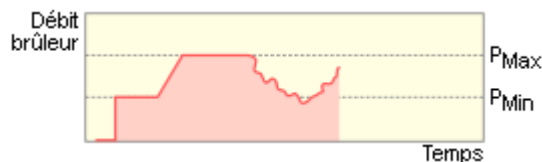
Le principe de fonctionnement de ce type de brûleur est semblable à celui d'un brûleur 2 allures. Ce brûleur ne permet que 2 allures. Le passage de la première à la deuxième allure n'est cependant plus brutal, mais progressif (en un temps minimum de 30 secondes).

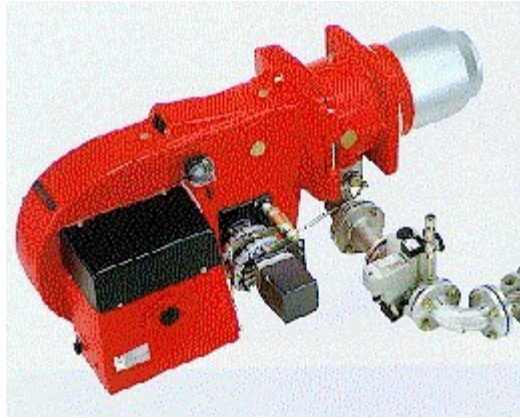
Si la demande de chaleur est inférieure à la puissance en première allure, le brûleur se met à l'arrêt. Si elle y correspond, le brûleur maintien son fonctionnement en première allure. Si elle en est supérieure, le brûleur passe progressivement en deuxième allure.



Brûleur modulant

Avec un brûleur modulant, toutes les allures de fonctionnement sont possibles, au delà d'un minimum souvent de l'ordre de 30 %. Les débits d'air et de fuel sont réglés en continu en fonction de la puissance de chauffage requise, ce qui permet un fonctionnement quasi continu.





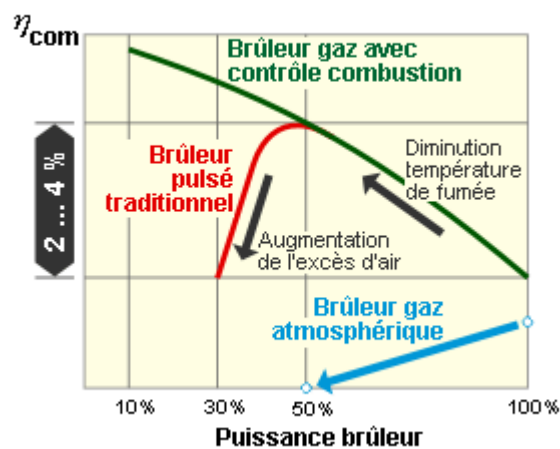
Brûleur gaz modulant.

Les avantages du brûleur modulant sont du même ordre que ceux du brûleur 2 allures. L'adaptation de la puissance est cependant encore plus fine, ce qui limite encore les temps d'arrêt d'un brûleur. La modulation a cependant ses limites. En effet, à basse puissance, le réglage de l'excès d'air devient difficile. De plus, si la puissance du brûleur diminue trop fortement, des condensations risquent d'apparaître dans la chaudière.

C'est pourquoi, les brûleurs modulants traditionnels (utilisés sur les chaudières qui ne sont pas à condensation) ne peuvent descendre en dessous d'une puissance de l'ordre de 30 % et à ce moment, la chaudière doit le plus souvent fonctionner à haute température.

Actuellement, les fabricants de chaudières à condensation ont mis au point, pour leurs propres chaudières, des brûleurs gaz modulants pouvant moduler leur puissance jusqu'à 10 % de la puissance nominale. Un meilleur contrôle des paramètres de la combustion leur permet en outre de maintenir une qualité optimale du mélange gaz-air sur toute la plage de modulation.

Exemple :



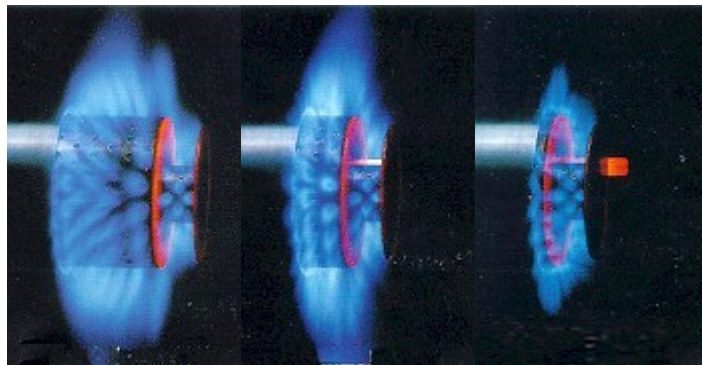
Evolution du rendement de combustion des brûleurs actuels en fonction de la

modulation de sa puissance.

Pour les brûleurs pulsés modulateurs traditionnels (fuel ou gaz) (de 30 à 100 %) : dans un premier temps, lorsque la puissance du brûleur diminue (à partir de 100 % de puissance), la température des fumées diminue et le rendement augmente. A partir d'un certain moment, la diminution de la quantité de particules de combustible et leur dispersion imposent d'augmenter l'excès d'air pour éviter les imbrûlés. Le rendement diminue de nouveau.

Pour les nouveaux brûleurs gaz modulant avec contrôle de la combustion : le contrôle de la combustion permet de maintenir un excès d'air correct, sans production d'imbrûlé, sur toute la plage de modulation. On obtient donc une plage de modulation plus grande (10 à 100 %) avec une qualité de combustion constante et des fumées qui se refroidissent de plus en plus (pour arriver à la condensation).

Pour les brûleurs gaz atmosphérique 2 allures (sans ventilateur) (50 % / 100 %) : l'air de combustion est amené dans la chaudière naturellement. L'excès d'air n'est donc pas contrôlé. Si la puissance du brûleur diminue de moitié, ce n'est pas le cas de la quantité d'air aspirée. L'excès d'air augmente donc et le rendement chute.

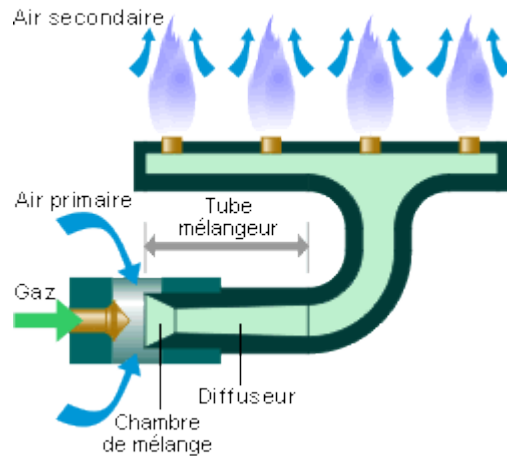


Exemple de nouveau brûleur pulsé modulant (10 à 100 %) : la modulation se fait grâce à un cylindre coulissant découvrant progressivement la tête de combustion.

Cas particulier des brûleurs atmosphérique



Les brûleurs atmosphériques sont des brûleurs gaz dans lesquels l'alimentation en air ne se fait pas par un ventilateur. L'air est entraîné dans un venturi par le jet de gaz au niveau d'injecteurs.



Principe de fonctionnement d'un brûleur gaz atmosphérique.

Le rétrécissement dans le tube mélangeur augmente la vitesse du gaz. Cela crée une dépression qui aspire une partie de l'air comburant (appelée "air primaire") et le mélange au gaz.

Le mélange air primaire - gaz débouche au niveau d'une série de trous (circulaires, pentes, ...) disposés sur une ou plusieurs rampes.

L'allumage du mélange se fait au moyen d'une veilleuse ou d'un système électrique (étincelle ou électrode incandescente). Le complément d'air nécessaire à la combustion (appelé "air secondaire") est aspiré au niveau de la flamme, par induction due à la force ascensionnelle.



Electrode incandescente d'allumage d'un brûleur atmosphérique.

Dans ce type de brûleur, le pourcentage d'air primaire varie de 40 à 50 %.

Toutes les parties du brûleur (injecteurs, tube de mélange, rampes, ...) doivent être adaptées les unes aux autres pour permettre une combustion stable, sans décrochement et sans retour de flamme. C'est pourquoi, les possibilités de réglage sur ce type de brûleur sont nulles.

Le gros avantage des chaudières équipées d'un brûleur atmosphérique (puissance jusqu'à 1 MW) est la simplicité du système. Les gros désavantages sont :

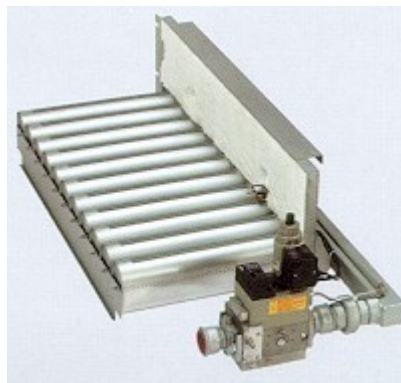
- l'absence de fermeture automatique du foyer à l'arrêt du brûleur. Il en résulte des pertes à l'arrêt importantes pour les chaudières,

- l'excès d'air trop important provoquant un mauvais rendement de combustion,
- une production importante de NO_x.

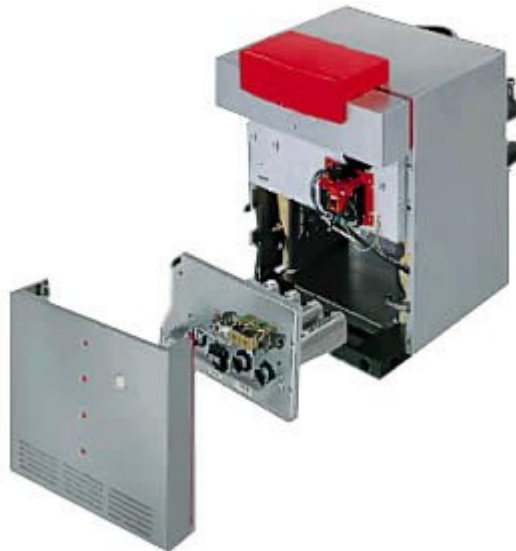
Brûleurs à prémélange

Pour éviter les imbrûlés et la production de CO, les brûleurs atmosphériques doivent fonctionner avec un excès d'air important. Il en résulte une production importante de NO_x.

L'évolution technologique de ces brûleurs conduit à ce qu'on appelle les brûleurs à prémélange. Dans ces brûleurs, l'air est entièrement mélangé au gaz dans une chambre de prémélange, avec ou sans l'aide d'un ventilateur. Le mélange est alors réparti sur une surface d'accrochage (par exemple, en treillis métallique) où se développe la flamme.



Brûleur à prémélange sans ventilateur.



Chaudière gaz avec brûleur à prémélange total sans ventilateur.

Cette technique de brûleur permet d'affiner le dosage entre l'air et le gaz et donc de diminuer l'excès d'air. De plus, la surface d'accrochage peut être étudiée pour augmenter la surface des flammes et diminuer leur longueur. Il

en résulte une augmentation du rendement de combustion et une diminution des émissions polluantes (NO_x).



Flamme d'un brûleur atmosphérique à prémélange, en forme de trèfle.

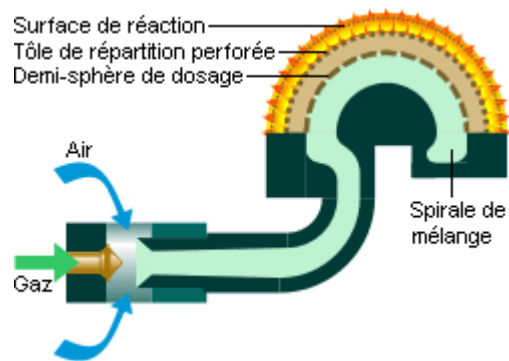
Brûleurs radiants ou rayonnants

Les brûleurs rayonnants ou radiants vont encore plus loin dans l'optimisation des émissions. Le but est de réduire au maximum la température de la flamme. Si la surface d'accrochage de la flamme est en matériau réfractaire (céramique ou acier inoxydable réfractaire), elle va absorber une partie de la chaleur de réaction et la restituer par rayonnement au foyer. La température de combustion s'en trouve abaissée sous $1\ 200\ ^\circ\text{C}$, ce qui réduit fortement la production d'oxydes d'azote ($\text{NO}_x < 15\ \text{mg/kWh}$).

Exemple :



Une application de cette technologie est le brûleur hémisphérique radiant. Il est composé d'une grille en forme de demi sphère. La grille est en acier inoxydable spécial réfractaire. Elle rougeoie et recède sa chaleur par rayonnement.



Brûleur hémisphérique radiant (existe aussi en version plane) : le mélange air-gaz réparti sur la surface de combustion avec une vitesse très faible puisque cette surface est nettement plus importante que pour les brûleurs atmosphériques traditionnels. Le mélange brûle alors directement, pratiquement sans flamme visible et cède une partie de sa chaleur directement à l'élément réfractaire.

Notons que ces brûleurs existent aussi avec un ventilateur qui assure l'alimentation en air, ce qui pourrait les classer dans la catégorie des brûleurs à air pulsé. La présence du ventilateur permet :

- d'améliorer le mélange air/gaz,
- de vaincre les pertes de charge des brûleurs et des foyers dont l'échange est optimisé (notamment pour les chaudières à condensation),
- de moduler la puissance du brûleur en faisant varier la vitesse du ventilateur ou en freinant le mélange air/gaz par un clapet.