

POMPE A VAPEUR D'EAU ET COMBUSTION HUMIDE

Explications et performances

Par Rémi Guillet

La pompe à vapeur d'eau

Ayant initié au début des années 1970 des travaux de recherche et développement sur les générateurs de chaleur à condensation (de produits de combustion), ceci afin de limiter la condensation atmosphérique des fumées du nouveau combustible qu'était, à l'époque, le gaz naturel, ... d'augmenter corrélativement le rendement de la combustion grâce à ce type de générateur de chaleur, la crise de l'énergie issue du choc pétrolier de 1973 devait me donner l'occasion de poursuivre dans cette voie... afin d'étendre leur champ d'application (en vérité bien restreint !).

En effet, la condensation effective de l'eau issue de la combustion dans un générateur de chaleur suppose que la température la plus basse de la « source froide », ou la température de l'eau y entrant dans le cas d'une chaudière, soit inférieure à la température de rosée des gaz issus de la combustion (soit environ 60°C dans le cas de produits de combustion du gaz naturel).

On peut même observer que la vapeur d'eau n'étant pas pure, la condensation n'est pas isotherme et une condensation significative suppose un rejet des produits de combustion à au moins 15°C en dessous de ladite température de rosée : une contrainte limitant fortement le champ d'application des générateurs à condensation.

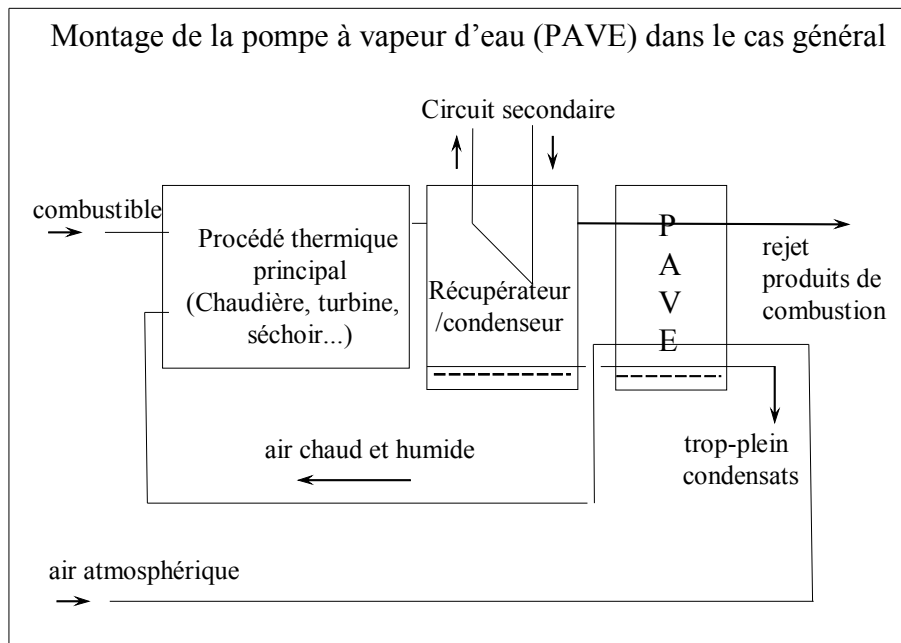
Donc, comment élargir ce champ d'application... sachant que la température de l'eau d'une boucle de chauffage par eau chaude au retour chaudière atteint 70°C ? Mise en pression des produits de combustion, séparation de la vapeur d'eau des autres gaz... autant de solutions envisagées par les ingénieurs et autres universitaires impliqués dans la recherche thermique après le choc pétrolier de 1973.

Pour ce qui me concerne, la solution proposée a été d'augmenter la tension de la vapeur d'eau dans les produits de combustion traversant le générateur de chaleur, en procédant à un échange (ultime) d'enthalpies entre les gaz sortants (et saturés en vapeur d'eau à l'issue d'une première séquence de condensation dans le générateur à condensation ou plus souvent dans le récupérateur/condenseur associé à un générateur traditionnel) et l'air de combustion, ledit échange portant à la fois sur la chaleur sensible résiduelle, recyclée par préchauffage de l'air entrant, et sur la chaleur latente de condensation résiduelle issue d'une condensation ultime de la vapeur d'eau du côté gaz sortants et recyclée par évaporation de cette eau dans l'air entrant, ainsi humidifié.

D'un point de vue quantitatif et à ce stade ultime d'échanges, tout se passe dans la *pompe à vapeur d'eau* comme s'il y avait *pompage de la vapeur d'eau* contenue dans les gaz sortants du récupérateur/condenseur et recyclage de cette vapeur dans l'air entrant.

Corrélativement, à l'issue de cet échange, les chaleurs sensible et latente rejetées à la cheminée devenant quasi nulles, le rendement de combustion atteint le maximum possible, soit 100% (rapporté au pouvoir calorifique supérieur du combustible)...

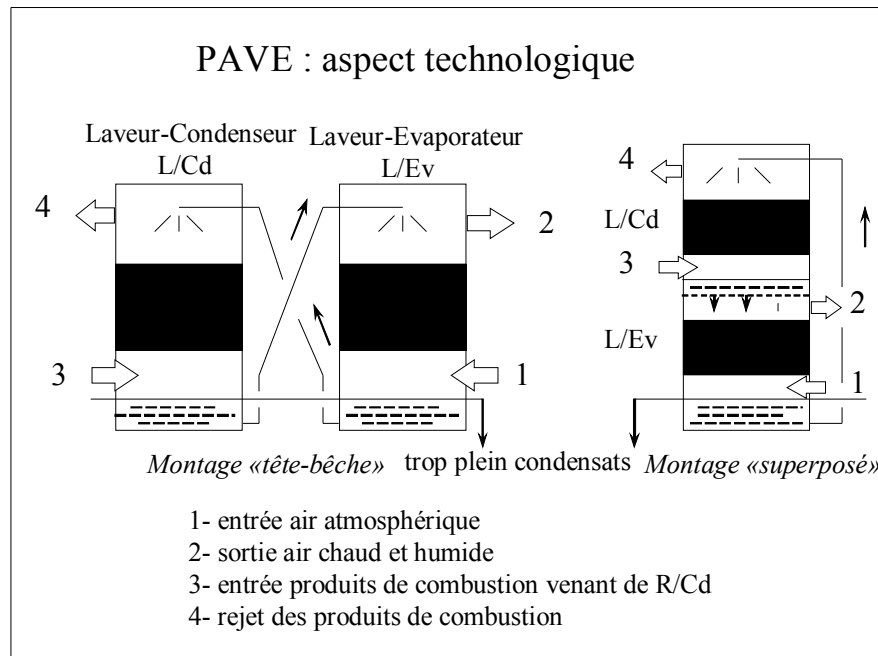
Avec la mise en place de la pompe à vapeur d'eau, la combustion se développe avec de l'air saturé (à une température pouvant atteindre 65°C), donnant lieu à la formation de produits de combustion dont la tension de vapeur d'eau est doublée par rapport à une combustion avec l'air atmosphérique, aboutissant à une hausse de la température de rosée d'environ 12°C par rapport à une combustion avec l'air atmosphérique, pour atteindre 72°C... La perspective de récupération de la chaleur latente de condensation de l'eau de combustion en générateur de chaleur à condensation (générateur équipé de récupérateur/condenseur) devient possible y compris en cas de chauffage par boucle d'eau chaude dont la température de retour atteint 70°C), en même temps que la récupération du pouvoir calorifique supérieur de combustible est en vue,... que le panache de condensation atmosphérique devient très discret (l'eau issue de la combustion étant évacuée en phase liquide au niveau des échangeurs).



La pompe à vapeur d'eau ne récupère aucune énergie pour le compte des « utilités ». Elle ne fait que recycler, avec l'air comburant préchauffé et pratiquement saturé en vapeur d'eau à sa température de préchauffage, les chaleurs sensible et latente véhiculées par les gaz sortant du récupérateur/condenseur qui la précède. Par contre, elle permet notamment à ce récupérateur/condenseur d'accroître son efficacité et de « récupérer » la totalité de l'énergie rejetée par le procédé thermique principal pour le compte d'« utilités » (ou circuit secondaire) pouvant ainsi travailler (condenser) à plus haute température (rendement de « cogénération » maximal).

Les schémas de pompes à vapeur d'eau présentés ci-après et mettant en œuvre des laveurs de gaz correspondent à l'une des technologies les plus usuelles. Une boucle d'eau assure les transferts de masse et de chaleur entre le flux sortant du récupérateur/condenseur (produits de combustion) et le flux entrant (air atmosphérique comburant). L'eau « froide » récoltée au bas du laveur/ évaporateur (L/Ev) à une température proche de l'air ambiant est introduite en partie haute du laveur/condenseur (L/Cd) pour refroidir les gaz de combustion et condenser la vapeur d'eau résiduelle. Récoltée chaude en partie basse de L/Cd, l'eau est introduite en partie haute de L/Ev pour préchauffer et humidifier l'air atmosphérique entrant. Quand les

deux laveurs sont superposés, il n'y a plus qu'une seule pompe de relevage sur la boucle d'eau. Globalement sur les trois échangeurs R/Cd (récupérateur/condenseur), L/Cd et L/Ev il y a un excédent de condensats évacués par trop-plein.



Parmi les constructeurs, on citera la Société *Seccacier* qui aura été le premier développeur de la pompe à vapeur d'eau, la Société *Equipotechnic**... Des variantes technologiques ont également été développées en Suède, Canada, USA.

Environ 500 MW étaient installés en France, Europe et Canada en 2000.

* Pour cette Société, la technologie a été celle d'un échangeur à paroi (tubes de fumées) pour laquelle les condensats sont recyclés par pulvérisation dans l'air entrant pour son humidification...

La combustion humide

Avec la pompe à vapeur d'eau la combustion se développe avec un ballast de vapeur d'eau recyclée associée à l'air comburant. Nous en avons vu l'intérêt énergétique et nous en verrons plus loin l'intérêt écologique...

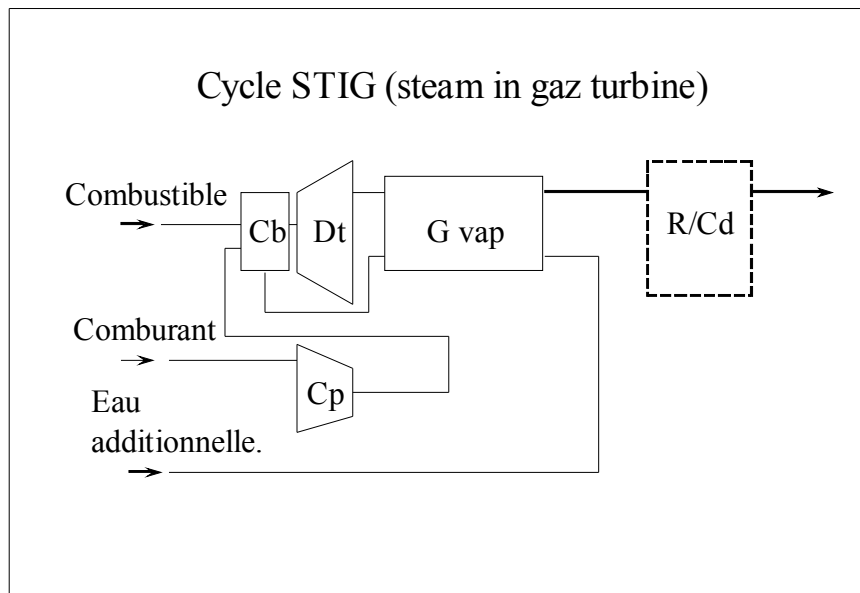
Toujours est-il que le concept de pompe à vapeur d'eau permet d'envisager sa mise en place partout où il y a combustion. Et effectivement nous avons cherché à optimiser cette mise en œuvre dans les turbines à gaz, les moteurs alternatifs, les séchoirs, les incinérateurs ...et de nombreux brevets ont été déposés pour le concept et ses applications à partir de 1978.

Mais le travail effectué à propos de la pompe à vapeur d'eau, notamment dans le cas de son application aux turbines à gaz terrestres devait nous amener à pousser un cran plus loin nos réflexions...Et, au final nous avons qualifié de *combustion humide*, toutes les combustions associant l'eau au combustible et au comburant au niveau de la chambre de combustion, que

l'eau soit introduite à l'état liquide ou vapeur, séparément ou associée au comburant et/ou au combustible...

Deux cas de *combustion humide* en turbine à gaz terrestres...

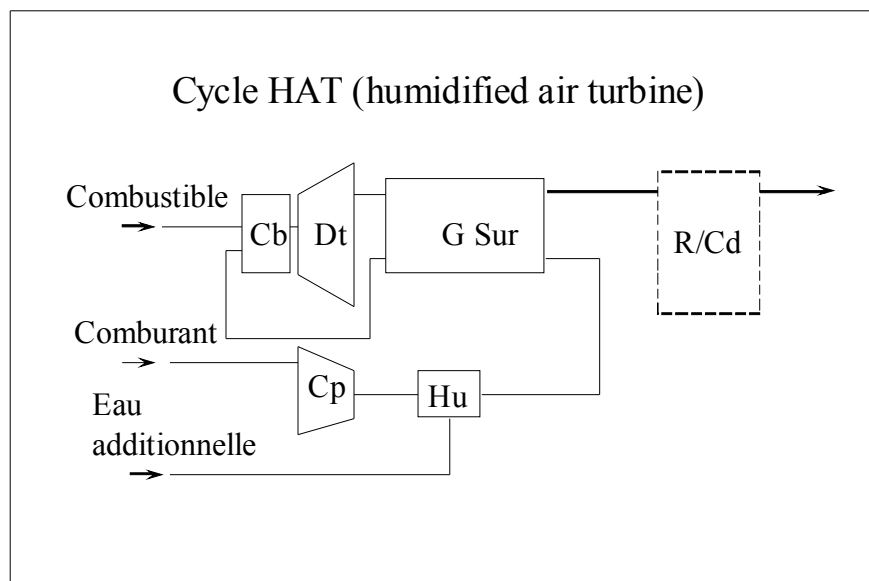
Ici (cycle STIG), l'eau additionnelle est mise en pression à l'état liquide puis, préchauffée, vaporisée, surchauffée par le générateur de vapeur placé sur les gaz détendus et est introduite en phase vapeur surchauffée dans la chambre de combustion. Comparé à un cycle de Joule traditionnel, le rendement est accru (par exemple de 35% si la température et la pression en Cb sont respectivement 1000°C et 10 bars).



avec : Cb chambre de combustion ; Cp compresseur d'air ; Dt turbine de détente ; Gvap générateur de vapeur ; R/Cd récupérateur condenseur (éventuel)

Les Sociétés *Allison, Antonov, General Electric, Kawasaki* ont développé ce cycle.

Là (cycle HAT), l'eau additionnelle est mise en pression à l'état liquide puis introduite dans l'air sortant du compresseur jusqu'à saturation, l'air humide est surchauffé par le générateur surchauffeur placé sur les gaz détendus. Comparé à un cycle de Joule traditionnel, le rendement est accru (par exemple de 55% si la température et la pression en Cb sont respectivement 1000°C et 10 bars).



avec : Cb chambre de combustion ; Cp compresseur d'air ; Dt turbine de détente ; Gsur générateur surchauffeur d'air humide ; Hu humidificateur d'air ; R/Cd récupérateur condenseur (éventuel)

Les Sociétés *Pratt Whitney*, *Volvo* ont développé ce cycle.

Dans les deux cas, l'optimisation des cycles suppose une forte consommation d'eau...et aboutit souvent à la mise en place d'un récupérateur/condenseur. Alors, une pompe à vapeur d'eau pourra compléter le montage et permettre au récupérateur/condenseur de condenser à plus haute température pour ainsi valoriser cette chaleur sur de plus nombreux sites. Et l'ensemble des condensats alors recyclés, évite l'utilisation d'eau additionnelle externe.

Le cas des moteurs alternatifs...

Dans le cas des moteurs alternatifs, la mise en place de la pompe à vapeur d'eau induit une perte de puissance nominale (consécutif au recyclage du ballast de vapeur d'eau et au préchauffage concomitant de l'air introduit dans les cylindres), jugée inacceptable ...dans les années 90. Pour ces machines, on a alors préféré l'injection directe d'eau ou l'association de

l'eau au carburant pour bénéficier des avantages environnementaux d'une combustion humide...

Mais aujourd'hui le contexte technique et économique est différent et, par exemple, évoquant le cas de moteur alternatif exploité comme « cogénérateur » de travail et...d'eau chaude, on soulignera que la mise en œuvre d'une combustion humide fondée sur la mise en place d'une pompe à vapeur d'eau permet d'optimiser les performances énergétiques et écologiques du système cogénérateur!

L'intérêt environnemental de la combustion humide

La présence d'eau améliore la combustion des combustibles « difficiles ». On pourra évoquer l'utilisation dans les moteurs alternatifs des mélanges eau/carburant du type « *aquazole* » (gas-oil+eau) ou « *orimulsion* » (bitume + eau)...

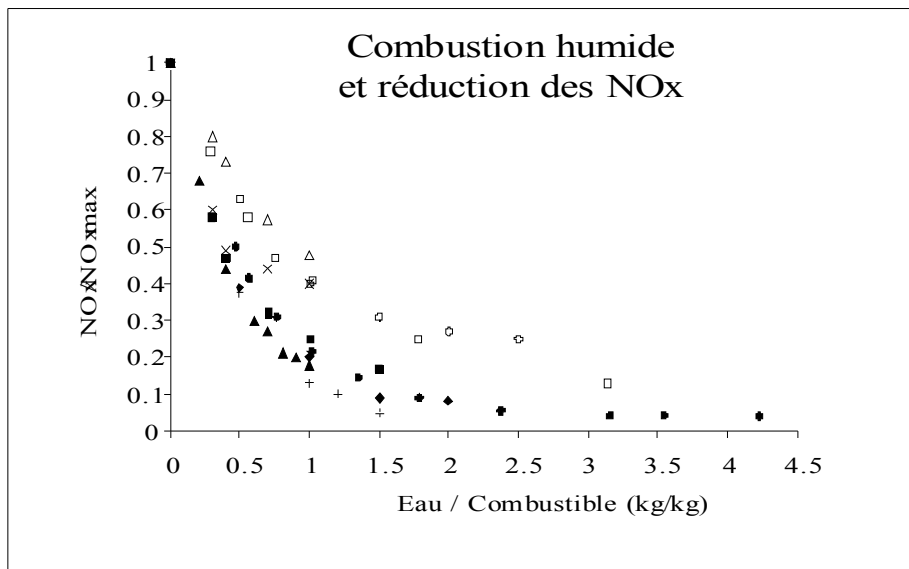
Dans le cas des cycles Diesel à injection directe, on a observé des réductions allant jusqu'à 70% pour les oxydes d'azote, 50% pour les CO et particules : meilleure pulvérisation du gas-oil, modification de la « chaîne » des réactions de combustion expliquent ces résultats.

Si on part d'une machine ayant une mauvaise combustion, donc un mauvais rendement, on peut même assister à une amélioration significative de ce dernier grâce à un ajout d'eau (quelle qu'en soit la forme)!

Dans le cas de combustible réputés « propres », comme peuvent l'être les gaz naturels de réseaux, la réduction de la formation des oxydes d'azote est essentiellement due à une température adiabatique de combustion diminuée par la présence du ballast thermique que constitue l'eau qu'implique la *combustion humide*. Et la pompe à vapeur d'eau a prouvé son intérêt écologique dans le cas de chaudières utilisant le gaz naturel (forte réduction des NOx pouvant aller jusqu'à la division par le facteur 10).

Bien entendu, la présence d'eau n'affecte pas directement la production de CO₂...C'est le gain de rendement de la combustion qui induit une réduction des émissions via la réduction de la consommation d'hydrocarbures...

La figure qui suit rassemble les résultats issus de divers sites ou expériences. Elle compare, pour une même machine, la production de NOx issue de combustion humide à celle issue d'une combustion avec l'air atmosphérique. On retiendra ici que la mise en place de pompe à vapeur d'eau permet d'atteindre une diminution des NOx dans un rapport de 10 à 1 (résultat obtenu avec de l'air saturé à 62°C).



...et les autres combustibles/carburants ?

Si les caractéristiques du gaz naturel ont été le point de départ du développement des générateurs à condensation (milieu des années 70) puis celui du concept de la pompe à vapeur d'eau (milieu des années 80), aujourd'hui il faut dire que d'autres combustibles ou carburants peuvent tirer les mêmes bénéfices (voire plus grands bénéfices) de la combustion humide et/ou du cycle « pompe à vapeur d'eau », qu'il s'agisse du bois avec son humidité résiduelle ...et toujours sa teneur en atome hydrogène et la possible contrainte du lavage des fumées avant rejet (la moitié de la réalisation de la pompe à vapeur d'eau est ainsi imposée!), qu'il s'agisse de combustible biomasse en général ou de tout autre agro carburant nécessairement constitué partiellement d'hydrogène...

Fait le 10 juillet 2008
Rémi Guillet.

Parmi les plus récentes publications de l'auteur, les lecteurs intéressés pourront consulter :

- sur le site « HPC01 » le texte de la communication « Combustion par voie humide et cogénération : développements et perspectives » (HPC01 : « Heat Power and Cooling », Conférence tenue à Paris en 2001)
- la thèse de Doctorat présentée à l'Université H. Poincaré de Nancy en 2002 sous le titre « La combustion par voie humide et ses performances » (s'adresser à ANRT Grenoble qui diffuse les thèses)
- le livre* « Du diagramme hygrométrique de combustion aux pompes à vapeur d'eau : un nouveau regard sur la combustion et ses applications énergétiques » (ed. Elsevier 1998)
- le livre* « Wet way combustion : energy efficiency/environmental protection » (ed. Elsevier 2000)

*L'éditeur n'assurant plus la diffusion de cette collection, on pourra s'adresser à l'auteur par mél adressé à « guilletremi@yahoo.fr ».