Notions de combustion, de brûleurs et de fours à gaz pour les céramistes.

Didier Descamps http://didierdescamps.fr

22 juin 2025

Ce petit document est à l'usage des céramistes qui veulent cuire leur production au gaz, ce n'est pas une somme universitaire mais un résumé des notions pratiques et utiles aux potiers.

Ce document est, comme toute chose en ce bas monde, perfectible. L'auteur appréciera toutes les critiques constructives qui lui permettront de l'améliorer. Ces critiques peuvent porter sur tous les aspects, sur la forme (fautes de frappe, d'orthographe, de typographie, ...) comme sur le fond (tel concept reste flou, tel

chapitre manque, ou devrait être placé avant tel autre, je connais une formulation plus simple ou plus jolie, tel ouvrage doit absolument être cité, ...). Et si vous êtes disponible pour écrire une partie qui vous semble manquer ou ré-écrire une partie que vous trouvez maladroite, dénoncez vous ! Ce document pourrait devenir une œuvre collective.

On trouvera à http://didierdescamps.fr/combustion/combustion.pdf la version la plus récente de ce papier.

1 Pourquoi cuire au gaz ? 3

2 Petit résumé « pour les nuls » 4

3 Un tout petit peu de chimie. 5
3.1 Une combustion, qu'est-ce ? . . . 5
3.2 Composition des gaz combustibles. . . . 5
3.3 Les différents types de combustion . . . 6
3.3.1 Combustion stœchiométrique ou « neutre ». . . . 6
3.3.2 Combustion « oxydante ». . . . 7
3.3.3 Combustion « réductrice ». . . . 7
3.3.4 Combustion incomplète . . . 8
3.3.5 Les diagrammes de combustion . . . 8
3.3.6 Laquelle chauffe le mieux ? . . . 9
3.3.7 PCI et PCS. . . . 10
3.3.8 Four électrique. . . . 12

4 Gaz couramment utilisés en céramique. 12
4.1 Propane. . . . 12
4.2 Gaz naturels. . . . 13
4.3 Et le butane ? ou pourquoi les bouteilles « gèlent » . . . 14

5 Brûleurs. 15
5.1 Brûleurs à air induit. . . . 16
5.2 Brûleurs à air soufflé. . . . 17
5.2.1 Mélange air – gaz . . . 17
5.2.2 Brûleurs Jet. . . . 18
5.3 Mesure et contrôle du débit de gaz . . . 18
5.3.1 Injecteurs. . . . 18
5.3.2 Débitmètres. . . . 19
5.4 Préchauffage de l'air.(À FAIRE) . . . 22
5.5 Sécurité et détection de flamme. . . . 22

6 Bilan thermique global simplifié d'un four. 22
6.1 Répartition des puissances. . . . 22
6.2 Phase à gradient constant . . . 23

6.3 Phase à puissance constante 24
6.4 Code 25
6.5 À faire 25

7 Évacuation des fumées et tirage. 25
7.1 Les deux problèmes. 25
7.2 Hypothèses simplificatrices. 26
7.3 Pression dans la chambre et cheminée de tirage. 26
7.3.1 Principe du calcul. 26
7.3.2 Code de calcul. 27
7.4 Évacuation des fumées. 28
7.4.1 Principe du calcul. 28
7.4.2 Code. 28

8 Conclusion 28

9 annexes 29
9.1 Maintenir ou éteindre un feu. 29
9.2 Comportement des gaz. 29
9.2.1 Gaz parfait. 29
9.2.2 Volume « normal ». 30
9.3 Calcul du débit dans un injecteur. 30
9.3.1 Calcul 30
9.3.2 Détails mathématiques. 32
9.3.3 Code. 32
9.4 Caractéristiques des fumées. 32
9.4.1 Pouvoirs comburivore et fumigène. 33
9.4.2 Enthalpie emportée par les fumées. 33

1 Pourquoi cuire au gaz ?

Dans le domaine de la cuisson de céramiques en grès et en porcelaine à haute température, le gaz permet d'obtenir des couleurs et des textures beaucoup plus variées que l'électricité (par manque d'expérience, je ne parlerai pas ici de cuisson au bois ou aux combustibles liquides comme le fioul). On peut aussi, dans certaines conditions, réaliser des cuissons beaucoup plus rapides.

Depuis que les humains ont inventé la céramique et jusqu'à une époque récente, le bois était le seul combustible disponible. Et on s'ingéniait à limiter ses inconvénients, par exemple en cuisant dans des cazettes ou dans des fours à moufles. Le gaz a presque tous les avantages du bois sans ses difficultés ni ses désagréments, je suis sûr que nos ancètres en auraient révé.

Un four à gaz raisonnablement utilisé est sans entretient et presque éternel, il n'y aura jamais de résistances à changer.

Le gaz a aussi ses inconvénients : La cuisson n'est pas nécessairement plus économique [1]. Et comme elle est difficilement automatisable, elle constitue un travail (au moins une surveillance) pour le céramiste, il n'est pas question de tapoter quelques boutons et d'aller se coucher.

Le gaz n'est pas dangereux ! à condition de connaître les principes de base de la combustion et de la construction des fours, une sécurité correcte est facile à assurer. Beaucoup pensent que le gaz est dangereux à cause des risques d'explosion, spectaculaires mais fort rares chez les potiers, alors qu'un four électrique, à la porté de tous, mais mal isolé peut électrocuter en silence sans faire la une des journaux. Les problèmes électriques sont beaucoup plus souvent à l'origine d'incendies que le gaz.

2 Petit résumé « pour les nuls »

— Dans l'ensemble de ce document il faut comprendre "gaz combustible" quand on lit "gaz", bien que l'air, l'oxygène qu'il contient et bien d'autres corps non combustibles soient aussi gazeux ;
— une combustion, dans le cadre de ce document, c'est tout simplement une flamme ;
— les fours des potiers sont des fours intermitents, on les charge à froid, on monte puis on redescend la température mais les objets ne se déplacent pas. À l'inserse les industriels de la brique utilisent des fours continus ou "tunels", où les pièces se déplacent dans des zones à température fixes dans le temps mais différentes dans l'espace. Ces fours tunels sont beaucoup plus économiques.
— contrairement à une rumeur persistante, le gaz naturel (dit souvent, et à tord, "de ville") convient parfaitement à la cuisson de céramiques à haute température. Mais les potiers ruraux n'ont souvent pas d'autre choix que le propane plus coûteux et plus dangereux ;
— Deux principaux types de brûleurs sont utilisés en céramique, ceux "à air induit" et, plus rarement, ceux "à air soufflé" qui nécessitent un ventilateur mais qui ont beaucoup d'avantages ;
— la combustion n'est possible que si l'air et le gaz sont mélangés dans des proportions convenables et précises ;
— pour régler la vitesse de montée de la température dans un four, on joue sur la puissance thermique. Celle ci est proportionnelle au débit de gaz, lui même fonction de la pression de gaz. On agit donc principalement sur un robinet ou sur un mano-détendeur ;
— en début de cuisson on a besoin d'une très faible puissance pour éviter une montée trop rapide de la température. Cette puissance va peu à peu être augmentée pour respecter la *courbe* prévue, puis elle atteint un maximum et le four monte alors "comme il peut" jusqu'à la température maximale

1. L'énergie consommée par une cuisson au gaz est approximativement le double de celle d'une cuisson électrique, et le prix du kW.h électrique est approximativement le double de celui du gaz naturel, d'où des coûts assez proches. Par contre, le propane est plus cher.

visée. Une qualité principale d'un brûleur est donc d'avoir une puissance minimale très petite et une puissance maximale la plus grande possible.

3 Un tout petit peu de chimie.

3.1 Une combustion, qu'est-ce ?

Pour le potier, une combustion est une flamme, une réaction exothermique (c'est à dire produisant de la chaleur) rapide dans un mélange de combustible et d'air contenant de l'oxygène.

Cette *réaction en chaîne* doit être initialisée par une « énergie d'activation » apportée par une étincelle ou un briquet. Cette énergie crée dans le mélange combustible-oxygène une zone où la température est suffisante pour que la réaction débute et se propage.

La réaction se propage à une certaine vitesse, dite *vitesse de déflagration*[2], en général inférieure à 1 m/s. Cette vitesse limitée a des conséquences sur la conception des brûleurs.

Elle se propage tant que certaines conditions sont réunies, et en particulier une fourniture d'oxygène et de combustible dans un rapport convenable. Pour résumer[3],

Combustible + Comburant (O_2) + Énergie d'activation → Produits + Chaleur

La quantité de chaleur produite est bien précise, on l'appelle le « Pouvoir Calorifique Inférieur[4] » ou PCI. Le PCI des gaz naturels. est compris entre 40 et 51 MJ/kg, celui du propane est aux environs de 46,1 MJ/kg et 47,7 pour le butane[5] (pour mémoire, 1 kWh=3,6 MJ).

Pour obtenir –involontairement en général– une explosion, il faut une condition supplémentaire, le confinement[6]. Une galerie de mine de charbon ou le four d'un potier imprudent avec sa porte bien fermée sont de bons exemples de confinement. Pour le potier il est facile de démarrer porte ouverte et après avoir ventilé. C'est plus compliqué pour le mineur !

3.2 Composition des gaz combustibles.

La plupart des combustibles gazeux ou liquides courants sont des « alcanes », c'est à dire des hydrocarbures saturés de formule générale $C_nH_{2(n+1)}$. Ce sont donc différentes sortes de pétrole.

2. Précisions de vocabulaire : La combustion ordinaire, celle du briquet ou de la gazinière, est une déflagration ; et la combustion à la « vitesse du son » est une explosion ou détonation. La vitesse de déflagration est plutôt une célérité.

3. Les pompiers le savent bien, voir 9.1

4. Existe aussi le pouvoir calorifique supérieur ou PCS. Voir page 10.

5. Et portant le butane n'est presque jamais utilisé par les potiers, mais c'est à cause de sa faible tension de vapeur. voir 4.3.

6. écrit en 2016, relu avec amusement en 2020.

Par exemple les gaz naturels sont essentiellement composés de méthane CH_4, le propane a pour formule C_3H_8, le fioul est un mélange de chaînes plus longues, de $C_{12}H_{26}$ à $C_{16}H_{34}$, etc.

À cause de leur prix élevé, les hydrocarbures non saturés, comme par exemple l'acétylène, sont réservés à des applications particulières (soudure, etc.) et le potier ne les utilise pas dans son four.

Les gaz « commerciaux » ne sont pas des gaz purs et contiennent beaucoup d'espèces chimiques différentes : le propane de début et de fin de bouteille n'ont pas la même composition, les gaz naturels du nord et du sud de la France sont différents.

3.3 Les différents types de combustion

Comme dit plus haut, pour obtenir une combustion il faut du combustible (ici du gaz) et du comburant (ici de l'air, ou plus précisément l'oxygène qu'il contient). On peut régler un brûleur pour mélanger un débit de gaz à un débit d'air dans un rapport variable, mais ce rapport a certaines limites.

Les réactions chimiques, et la combustion en est une, respectent des règles de proportions strictes. Si les réactifs (oxygène et combustible pour nous) ne sont pas introduits selon les proportions adéquates, seule une partie du réactif présent en trop grande quantité réagira. Il restera donc une quantité du réactif en excès qui n'a pas réagi. Prenons l'exemple d'un gaz qui, du fait de sa composition, demande 10 volumes d'air par volume de gaz, et un brûleur qui débite 1 m^3/h de gaz. Si le débit d'air est de 10 m^3/h, on obtient une combustion « neutre ». S'il est de 11 m^3/h, elle est « oxydante » et s'il est de 9, elle est « réductrice ». S'il est de 1 ou de 100 la combustion est impossible, les proportions réelles ne pouvant pas être trop différentes de 10.

le mot « neutre » est entre guillemets car c'est un modèle. Les mots « oxydante » et « réductrice » sont également entre guillemets car on s'éloignera peu du rapport neutre, contrairement à ce qui se pratique en métallurgie.

3.3.1 Combustion stœchiométrique ou « neutre ».

Une réaction chimique stœchiométrique est une réaction théorique où il y a exactement les bonnes proportions de réactifs pour que la réaction soit complète.

Dans notre cas de combustion d'un alcane dans l'oxygène pur, elle s'écrit

$$C_nH_{2(n+1)} + \frac{3n+1}{2}O_2 \quad \rightarrow \quad nCO_2 + (n+1)H_2O$$

et donc, pour un combustible donné, il faut une quantité bien précise d'oxygène pour obtenir une combustion neutre, sans excès ni défaut d'oxygène.

Prenons l'exemple du méthane, pour lequel il faut exactement deux moles[7] de O_2 par mole de CH_4 :

$$CH_4 + 2O_2 \quad \rightarrow \quad 1CO_2 + 2H_2O$$

7. Une mole est un paquet, un nombre précis d'atomes ou de molécules. Ce nombre est très grand : une mole de fer pèse 55,84 grammes et contient $6{,}022 \cdot 10^{23}$ atomes de fer (6 suivi de 23 chiffres), c'est le nombre d'Avogadro.

c'est à dire deux volumes d'oxygène par volume de méthane, puisqu'on peut pour ces deux gaz utiliser le modèle du « gaz parfait »[8].

Évidement, le comburant courant n'est pas l'oxygène pur mais l'air atmosphérique. Celui-ci contient, pour simplifier, 21% d'oxygène, 78% d'azote N_2 et 1% de gaz divers. Ces proportions sont en volumes ou en moles, et non pas en masses. L'azote et ces gaz divers ne participent pas à la réaction, ils restent spectateurs.

Comme le besoin en oxygène est de 2 pour 1 méthane, le besoin en air est de 2/0,21 pour 1, soit 9,52 environ. De fait, le « pouvoir comburivore » ou « air stœchiométrique » des gaz nat. est compris entre 8,9 et 9,7 m^3/m^3 selon leur type.

Le propane est un gaz liquéfiable et, dans les conditions courantes d'utilisation, il ne peut pas être considéré comme parfait. On préfère donc raisonner en masse. Tout calculs faits, l'air stœchiométrique du propane est environ 15,6 kg/kg

Comme cette combustion est complète tout en générant la quantité minimale de fumées, c'est la plus économique. Sauf effets particuliers recherchés, on essayera donc de ne pas trop s'en écarter.

On définit le **taux d'aération** d'une flamme comme le rapport entre l'air réel et l'air stœchiométrique. Ce taux est par définition égal à 1 ou 100% pour la combustion neutre.

Si on veut y regarder d'assez près, une combustion réelle n'est jamais tout à fait neutre ni tout à fait totale, la combustion stœchiométrique est un modèle, un idéal...

3.3.2 Combustion « oxydante ».

Également dénommée « en excès d'air », les motoristes l'appellent « en mélange pauvre ». C'est la combustion où la quantité d'air est plus grande que celle de la combustion neutre. En conséquence il y a dans l'atmosphère du four de l'oxygène résiduel qui n'a pas participé à la réaction, qui n'a pas trouvé dans la flamme l'âme-sœur combustible. C'est la combustion obligatoire pour une cuisson de dégourdi[9], elle permet de débarrasser la terre de ses impuretés organiques en les oxydant. Pour une cuisson finale à haute température elle reproduira une cuisson à l'électricité.

Pour économiser le combustible, il vaut mieux un excès d'air faible. Je n'ai jamais dépassé un taux d'aération de 105%, sauf en tout début de cuisson pour parfaire le séchage en douceur.

3.3.3 Combustion « réductrice ».

Dite également « en défaut d'air » ou « de mélange riche ». C'est tout l'intérêt de la cuisson au gaz que de pouvoir obtenir dans l'enceinte du four une atmosphère réductrice !

8. Dans les mêmes conditions de pression et de température, une mole de gaz occupera le même volume qu'une mole de n'importe quel autre gaz. Voir 9.2.1.

9. souvent appelée cuisson de "biscuit", je trouve cette dénomination étrange voire stupide, maintenant que je sais compter jusqu'à deux.

L'absence d'oxygène et la présence de monoxyde de carbone CO et d'hydrogène H_2 dans le four permettent d'obtenir une gamme de couleurs très différente de celle de la cuisson oxydante, en particulier avec les oxydes de fer et de cuivre.

Ici encore il vaut mieux un réglage proche du neutre pour économiser le gaz. J'obtiens des bons résultats en passant en réduction vers 950°C avec un taux constant de 95% jusqu'à la fin (1280°C).

La transition oxydation/réduction s'observe bien à la sortie du four. En réduction CO et H_2 y trouvent l'oxygène de l'air extérieur et une flamme peu éclairante se forme, cette flamme n'existe pas si l'atmosphère est oxydante.

Le monoxyde de carbone CO est un gaz inodore et très toxique ! mais comme il disparaît dans cette flamme, le potier n'est pas en danger pour autant. Malgré cela, une aération correcte du local reste une précaution élémentaire. Diverses autres méthodes de réduction à basse température (enfumage, etc.) peuvent représenter un réel danger, mais nous sortons du domaine du grès et de la porcelaine et je n'en parlerai pas par manque d'expérience.

Ne parlez pas de réduction avec un chauffagiste, vous prendriez le risque de vous fâcher ! le défaut d'air dans une chaudière est pour lui un grave défaut dû à un mauvais réglage à éviter absolument, il aura du mal à admettre que c'est ce que vous voulez vraiment.

3.3.4 Combustion incomplète

On peut parfois trouver simultanément de l'oxygène et du monoxyde de carbone dans l'enceinte du four, et cela qu'on soit en excès ou en défaut d'air. C'est le signe d'un mauvais réglage d'un ou plusieurs brûleurs. C'est une réaction qui n'est pas allée jusqu'au bout, elle a un mauvais rendement et elle est polluante, à éviter !

3.3.5 Les diagrammes de combustion

Des tables et des diagrammes sont publiés pour chacun des principaux gaz combustibles. On voit dans la figure 1 [10] la composition des fumées « sèches » d'un gaz naturel en fonction du taux d'aération. On voit qu'il suffit, si on dispose d'un analyseur de gaz, de mesurer la teneur d'un gaz pour se situer dans le diagramme, connaitre la teneur des autres gaz et le taux d'aération. Ça sera, par exemple O_2 en oxydation et CO en réduction.

En pratique on se réfère au diagramme des fumées « sèches » car l'échantillon de gaz est refroidi avant analyse et par conséquent débarassé de la majorité de sa vapeur d'eau. On peut, si on en a besoin, trouver la composition réelle de l'atmosphère du four, vapeur d'eau comprise, en se reportant au diagramme « humide » au même taux d'aération.

Si, comme moi, on utilise un brûleur à air soufflé, alors on mesure les débits d'air et de gaz et on connaît directement le taux d'aération sans avoir besoin d'un analyseur.

10. les figures 1 à 3 sont extraites de « Combustibles Gazeux et Principes de la Combustion, GAZ de FRANCE, direction de la recherche ».

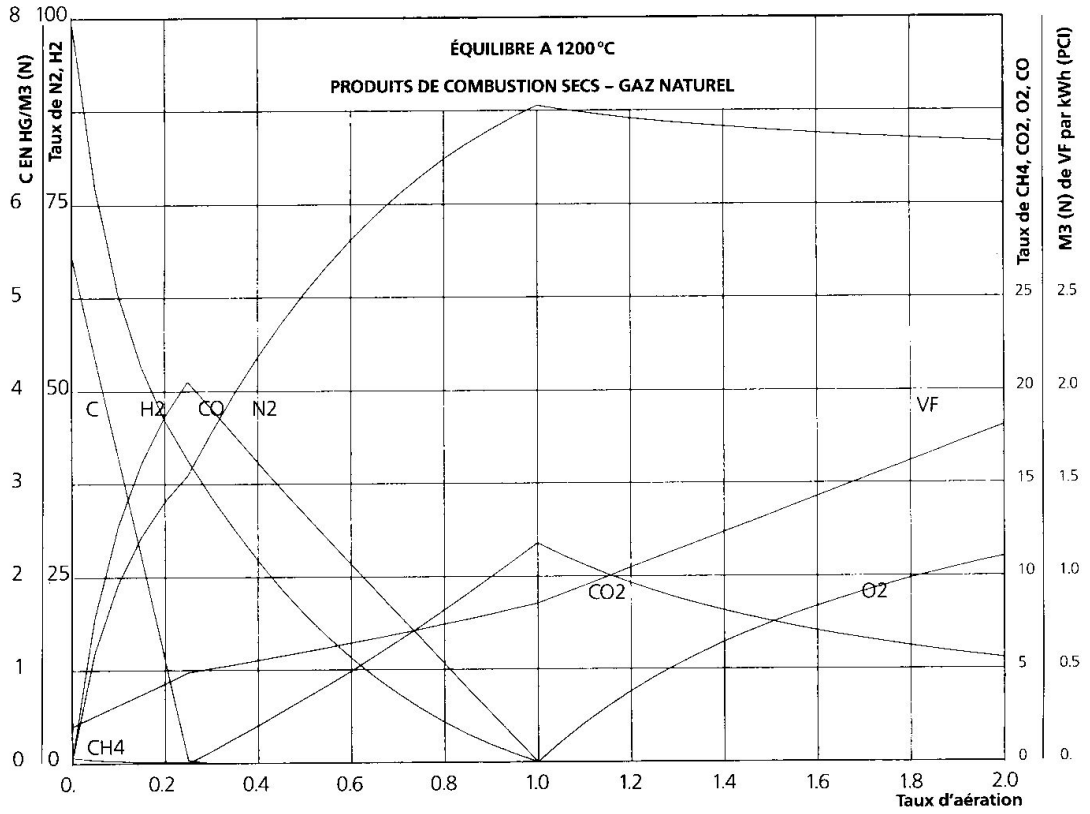

FIGURE 1 – diagramme d'équilibre sec d'un gaz naturel.

3.3.6 Laquelle chauffe le mieux ?

Les thermiciens définissent la **température adiabatique de flamme** comme la température qu'atteindraient les produits de la combustion s'il récupéraient toute l'énergie thermique produite. C'est donc un maximum théorique dont on peut regarder l'évolution en fonction du taux d'aération.

Pour un taux de 100% ou plus et en supposant la combustion complète, l'énergie produite est égale au PCI et elle est donc constante. À mesure que le taux augmente cette énergie se répartit dans une masse de gaz de plus en plus grande et la température adiabatique diminue.

Pour un taux inférieur à 100% la combustion n'est plus complète et l'énergie réelle produite diminue en même temps que lui, donc la température adiabatique devrait elle aussi décroître. Mais la masse des gaz profitant de cette énergie diminue également, ce qui contribue à l'augmentation de la température. Ces deux effets sont antagonistes et le calcul montre que, quand le taux diminue, la température commence à augmenter avant de diminuer rapidement. Une légère réduction serait le réglage optimal s'il était possible, ce qui n'est évidemment pas toujours le cas.

La figure 3 résume ces considérations et donne de plus cette température pour différents préchauffages de l'air en entrée de brûleur, si vous envisagez le pré-

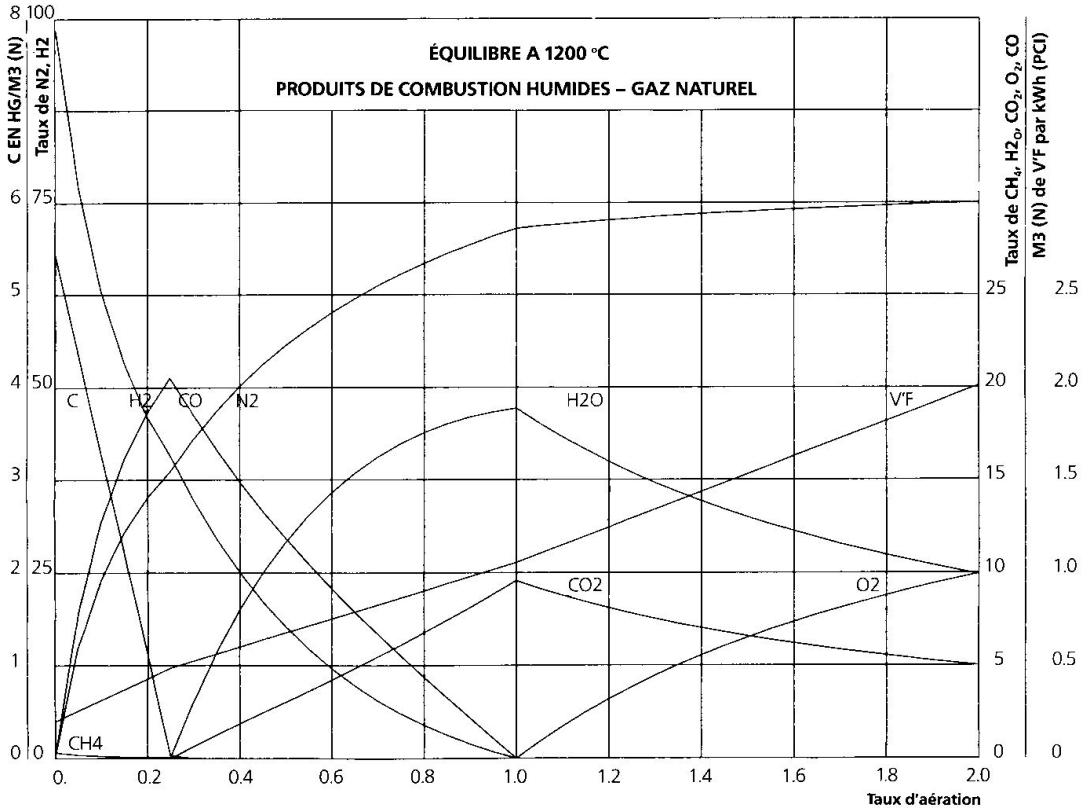

FIGURE 2 – diagramme d'équilibre humide d'un gaz naturel.

chauffage par récupération de chaleur à la cheminée [11].

3.3.7 PCI et PCS.

Ce paragraphe est à l'intention des quadricapilotectomistes [12] et n'est pas nécessaire à la compréhension du reste de ce papier. Les autres retiendront que tout combustible est doté de deux pouvoirs calorifiques différents : Le pouvoir calorifique supérieur (PCS) est mis en avant par les fournisseurs parce qu'il est plus flatteur que le pouvoir calorifique inférieur (PCI). C'est le PCS qui est facturé alors que seul le PCI peut être approché dans un four de céramique. L'écart entre les deux dépend du combustible mais il est proche de 9%.

Chaleur latente de changement de phase [13]**.** L'eau, comme presque tous les corps purs, peut être trouvée sous trois états ou « phases » : solide, liquide ou vapeur-gaz. C'est le passage entre liquide et vapeur qui nous intéresse ici, sans oublier que le même phénomène existe lors du passage entre solide et liquide

11. voir en page 22
12. Ils aiment couper les cheveux en quatre et trouveront des rappels de thermodynamique ici : http://didierdescamps.free.fr/thermo.pdf.
13. Il faudrait parler « d'enthalpie de changement d'état », j'utilise consciemment un vocabulaire suranné.

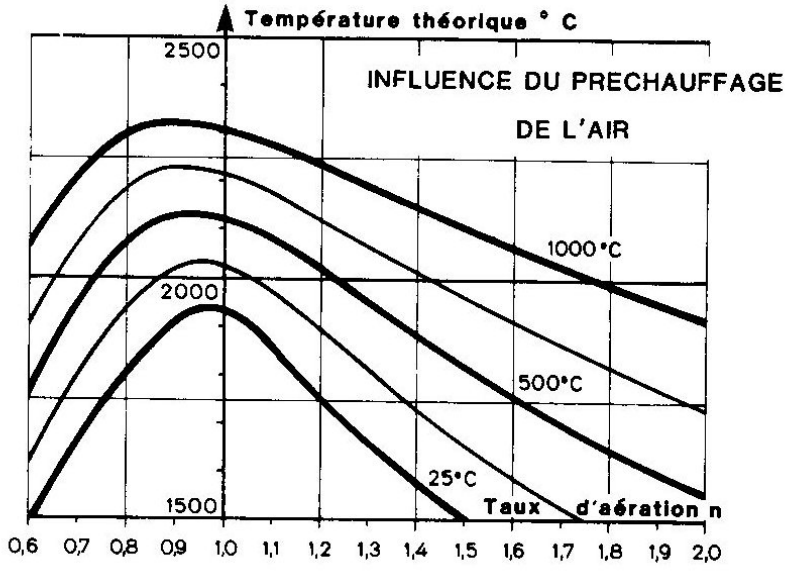

FIGURE 3 – Température adiabatique d'un gaz naturel en fonction du taux d'aération.

(voire directement entre solide et vapeur en cas de sublimation ou de givrage). Pour faire passer une masse d'eau de liquide à une certaine température à vapeur à la même température, il faut apporter une énergie thermique appelée « chaleur latente ». Lors du passage inverse cette énergie est restituée.

Imaginons qu'on veuille obtenir de l'eau distilée : On met de l'eau froide dans un évaporateur (une cocotte minute). On chauffe et la température de l'eau augmente, il y a un apport de chaleur sensible. Arrivée à 100°C l'eau se met à bouillir, change de phase et il faut continuer à chauffer pour transformer toute la masse en vapeur ; c'est alors de la chaleur latente. La vapeur retourne ensuite à l'état liquide dans un condenseur (un serpentin refroidi par une circulation d'eau) en restituant la somme de ces deux chaleurs latente et sensible à l'eau de refroidissement.

Ordres de grandeur : pour faire passer de l'eau liquide de 20 à 100°C il faut 334 kJ/kg, et 2225 kJ/kg pour la vaporiser. La chaleur latente est ici 6,7 fois plus importante que la chaleur sensible.

Les deux pouvoirs. On a vu que les produits d'une combustion de gaz (les « fumées ») sont très majoritairement composés de dioxyde de carbone CO_2 et d'eau H_2O. Au sortir de la flamme cette eau est vapeur. Si on chauffe un corps à basse température –comme dans une chaudière à condensation–, ce corps récupère la chaleur sensible de la flamme *plus* la chaleur latente de l'eau qui se condense. Dans ces conditions la puissance maximale théorique qui pourrait être récupérée est le PCS.

Dans un four céramique l'essentiel se passe à plus que 100°C, la vapeur qui ne peut se condenser part par la cheminée et sa chaleur latente est perdue. La

puissance théorique maximale qui pourrait être récupérée est alors le PCI.

La norme NF EN ISO 15112 définit le pouvoir calorifique inférieur (PCI) d'un gaz comme :

> « la quantité d'énergie libérée sous forme de chaleur par la combustion complète dans l'air d'une quantité spécifiée de gaz, de telle manière que la pression p à laquelle se produit la réaction demeure constante, et que tous les produits de combustion soient ramenés à la même température T que les réactifs, tous les produits se trouvant à l'état gazeux »

3.3.8 Four électrique.

On lit parfois que la cuisson dans un four électrique est neutre, mais je pense qu'elle est en réalité oxydante. Au vu des résultats obtenus mais aussi par « logique » : un four n'est jamais étanche au gaz (et heureusement, s'il l'était, selon les lois des gaz, la montée en température s'accompagnerait d'une montée en pression, jusqu'à l'explosion.). Il y a donc un renouvellement, faible mais continu, de l'air dans l'enceinte et l'apport d'oxygène est bien supérieur à ce que consomment les quelques traces de matières combustibles en présence comme sont les carbonates de l'émail par exemple. Il y a donc bien de l'oxygène dans le four.

Certains constructeurs équipent leurs fours électriques de dispositifs permettant une atmosphère réductrice (introduction de gaz, de bois, etc.) mais oublient parfois de préciser que ces cuissons en réduction racourcissent fortement la durée de vie des résistances chauffantes.

4 Gaz couramment utilisés en céramique.

Les gaz sont des pétroles et leurs prix fluctuent avec les marchés.

La table en page 13 rassemble des données concernant les combustibles les plus courants.

4.1 Propane.

Les céramistes cuisant au gaz sont souvent installés en campagne, là où le gaz naturel n'est pas distribué, il n'ont donc pas d'autre choix de gaz que le propane.

Le propane est liquéfiable aux températures ordinaires sous pression, il est stocké à l'état liquide dans un réservoir à l'extérieur des bâtiments. Il peut être stocké dans une citerne fixe remplie par camion, c'est la solution à envisager s'il y a d'autres utilisations du gaz (chauffage, etc.) ou si le four est grand et très consommateur. Il peut aussi être contenu dans une ou plusieurs bouteilles consignées qu'on échange vides contre pleines dans un commerce ou une station service. Les bouteilles de 35 kg sont préférables à celles de 13 kg puisqu'elles permettent de diminuer la fréquence des manipulations ainsi que le gaspillage [14].

La pression dans le réservoir est de plusieurs bars, on peut alimenter les brûleurs sous forte pression, typiquement 1,5 bar.

14. Il restera toujours un peu de gaz dans la bouteille, voir 4.3

combustible		P.C.I		P.C.S		air théorique
		$MJ \cdot kg^{-1}$	$MJ \cdot m^{-3}(n)$	$MJ \cdot kg^{-1}$	$MJ \cdot m^{-3}(n)$	en volumes
gaz naturels	Lacq	49,6	36,6	55,1	40,6	9,7
	mer du nord	45,4	37,1	50,3	41,1	9,8
	Russie	47,8	35,8	53,2	39,9	9,5
	Groningue	40,2	33,3	44,6	37,0	8,9
gaz de pétrole	propane commercial	46,1	91,4	50,0	99,0	23,5
	butane commercial	47,7	118,7	49,4	128,4	30,7
gaz de charbon		31,3	17,7	35,2	19,9	4,3
fiouls		39,6 à 41,9		43,5 à 44,8		
charbons		32,4 à 37,1				
bois		11,9 à 18,0				

TABLE 1 – quelques caractéristiques de combustibles courants.

Attention, le propane gazeux est plus lourd que l'air et s'accumule facilement dans un point bas en cas de fuite, d'où une possibilité de confinement et d'explosion.

Ordres de grandeur : 1 kg de propane fournit environ 46,1 MJ ou 12,8 $kW \cdot h$ puisque 1 $kW \cdot h$= 3,6 MJ.

4.2 Gaz naturels.

Le méthane, principal constituant des gaz naturels, n'est pas liquéfiable à température ambiante. On ne peut donc pas le stocker et il doit être délivré par un réseau.

Le gaz naturel, s'il est disponible, a de gros avantages :

— il est plus léger que l'air, sa vitesse de déflagration est plus faible que celle du propane, il n'y a pas de stock, tout cela contribue à la sécurité ;

— pas de changements de bouteilles, de remplissage de citerne, de manipulations pénibles ;

— le prix, surtout si le compteur, la chaudière et la gazinière existent déjà.

Mais il a un inconvénient : avant compteur le gaz est détendu entre 20 et 28 hPa effectifs [15], cette très basse pression est parfois difficilement compatible avec des brûleurs initialement conçus pour le propane. Pour contourner cette difficulté,

15. hPa ou hecto Pascal, on disait autrefois millibar. Effectif signifie en plus de la pression atmosphérique.

— on peut recomprimer le gaz, ce qui ne peut se faire en sécurité qu'avec des machines coûteuses.
— on peut aussi négocier une plus forte pression avec le distributeur, la pression avant compteur étant souvent de 4 bars. On pourra alors utiliser les fours et brûleurs propane sans transformation, en ne modifiant que la pression.
— on peut aussi utiliser ou concevoir des brûleurs adaptés à cette basse pression.

Cette dernière solution est la plus simple, c'est celle que j'ai personnellement choisie pour mon dernier four, résolument urbain.

Deux types de gaz naturels se rencontrent en France. Le gaz B (comme Bas), contient beaucoup d'azote et a donc un PCI faible de 40,2 MJ/kg environ. Il est distribué dans le nord. Le gaz H (comme Haut) est composé de méthane presque pur et a donc un PCI plus grand, de 49,6 MJ/kg environ. Il est distribué dans le reste de la France.

Le vrai « gaz de ville » ou gaz de cokerie n'est plus distribué au grand public depuis des dizaines d'années. Ce sous-produit de la distillation du charbon était trop dangereux car il contenait du monoxyde de carbone très toxique et de l'hydrogène facilement détonant. À ne pas confondre avec les gaz naturels !

Ordres de grandeur : $1\,\mathrm{m}^3$ de gaz H fournit environ 37 MJ c'est à dire $10\,\mathrm{kW}\cdot\mathrm{h}$.

4.3 Et le butane ? ou pourquoi les bouteilles « gèlent »

C'est une façon de parler, le butane lui même ne gèle jamais vraiment !

Le butane est très proche du propane, il a quasiment les mêmes pouvoirs calorifiques. Pourquoi n'est-il presque jamais utilisé pour la cuisson des céramiques ? tous simplement à cause de sa faible *tension de vapeur*.

Dans notre bouteille de gaz liquéfié il y a du liquide en bas et de la vapeur au dessus, tout comme l'eau dans une cocotte-minute. La pression –ou tension– dans la bouteille dépend du gaz (elle est beaucoup plus grande pour le propane que pour le butane) et elle augmente avec la température [16].

On voit sur la figure 4 [17] qu'à 0°C la pression du butane est aux environs de la pression atmosphérique (1 bar environ) et que rien ne peut sortir de la bouteille, même pleine. Et pour fournir 0,9 bar effectif notre butane doit être à 17°C minimum.

Or, quand une quantité de gaz à l'état vapeur est consommée, une quantité équivalente se vaporise et le niveau de la surface libre diminue. Le butane *bout* dans son récipient. Et pour faire bouillir un liquide il faut lui apporter de la chaleur, appelée *chaleur latente de vaporisation* [18]. En cuisine c'est le feu sous la casserole qui apporte cette énergie, mais dans le cas du butane, cette chaleur est prélevée dans le liquide qui se refroidit et voit donc sa température et sa pression baisser. Si la bouteille n'est pas suffisamment réchauffée par l'extérieur, par

16. dans la cocotte minute l'eau sous pression bout à 115°C et les aliments cuisent plus vite.
17. figure empruntée à https://www.cfbp.fr/lenergie-gpl/caracteristiques/
18. Voir 3.3.7

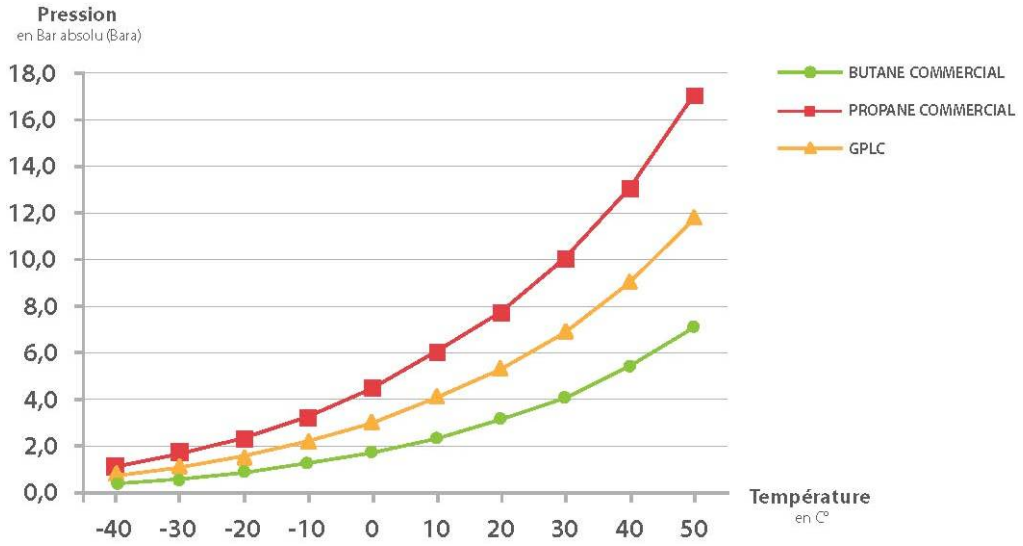

FIGURE 4 – pression /température

convection naturelle le plus souvent, la température de la vapeur chute et avec elle la pression, et rapidement le débit de butane devient insuffisant.

Le même phénomène existe avec le propane, mais il faut descendre à -42°C pour que la pression descende sous 1 bar. Il y a donc une bonne marge, la bouteille peut se couvrir du givre de l'humidité atmosphérique bien avant qu'on ait de souci avec la pression.

Je garde pourtant un souvenir ému d'une cuisson d'hiver que j'ai du finir en arrosant d'eau froide la citerne de propane ; mais j'avoue que mon premier four était un monstre de consommation !

Le butane est largement utilisé dans l'industrie grâce au chauffage des citernes et au prélèvement en phase liquide, mais ces méthodes ne sont pas applicables dans des conditions artisanales.

Si vous n'avez vraiment pas d'autre choix que le butane, vous pouvez envisager un dispositif pour que le fond des bouteilles de gaz trempent dans de l'eau maintenue tiède. Je n'ai pas essayé, n'en ayant jamais eu besoin.

5 Brûleurs.

Les brûleurs des fours des potiers se rangent schématiquement en deux catégories :

— les brûleurs *à air induit*, où le gaz entraîne l'air ; comme un brûleur de gazinière il n'ont pas besoin de ventilateur ni d'électricité.

— les brûleurs *à air soufflé* dans lequel l'air est, comme le gaz, fourni sous pression. C'est le cas des brûleurs *jet* qui produisent en sortie une flamme à très grande vitesse.

5.1 Brûleurs à air induit.

Dans un brûleur à air induit le gaz sous pression passe par un injecteur. À la sortie de celui-ci le gaz forme un jet qui communique son *débit de quantité de mouvement*[19] à l'air qui l'environne, et l'entraîne dans un tube coaxial à l'injecteur. Cet air est appelé *air primaire*. Le débit d'air primaire est contrôlé par la surface de l'entrée qu'on peut plus ou moins obstruer par un dispositif comme une vis, une molette, ...

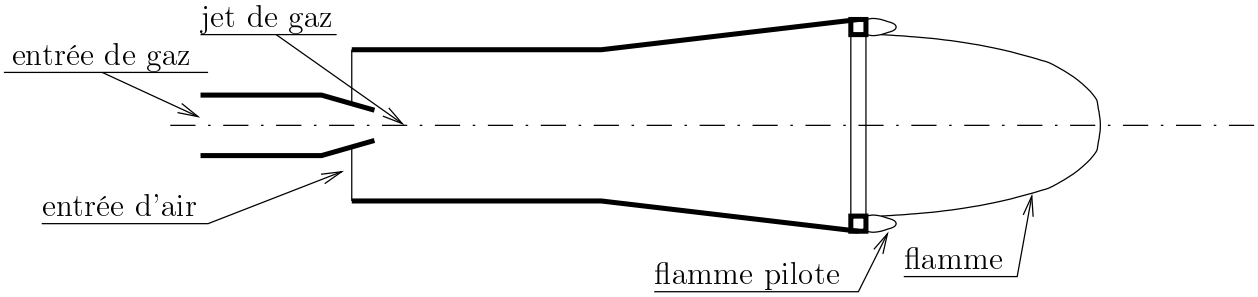

FIGURE 5 – brûleur à air induit.

Cette force d'entraînement de l'air est proportionnelle au débit de gaz (donc à la puissance thermique) et à la vitesse du jet de gaz. Elle est donc d'autant plus grande que l'injecteur est petit et la pression de gaz est grande. Ce type de brûleur est donc mieux adapté au propane qu'au gaz naturel sous basse pression ; mais ce dernier convient parfaitement dans la majorité des cas.

En sortie de brûleur le mélange formé dans le tube doit être à plus grande vitesse que la déflagration, sinon il y aurait risque que la flamme remonte à l'injecteur. Et la flamme doit être « accrochée » par un dispositif qui maintient localement une vitesse faible, sinon il y a risque que la flamme soit soufflée et s'éteigne comme la bougie du gâteau. Deux dispositifs sont courants :

— une série de trous assez petits créant des « flammes pilotes » autour de l'écoulement principal[20] (figure 6). De l'air supplémentaire pourra entrer dans le four autour du brûleur, appelé air secondaire ;
— un ouvreau conique en béton réfractaire inclus dans la maçonnerie du four (figure 7). La surface du cône est pourvue d'aspérités qui favorisent l'accroche de la flamme.

Dans les deux cas, le contrôle de l'oxydo-réduction se fait en actionnant un registre en sortie de four, à la cheminée : on fait varier la pression à l'intérieur du four et donc la quantité d'air secondaire ou primaire entrante participant à la combustion.

avantages : aucun besoin d'électricité pour entraîner un ventilateur, facile à réaliser soi même ;

19. C'est une force exprimée en newtons.
20. Si vous lavez les brûleurs de votre gazinière et ne les séchez pas parfaitement, vous obstruez les minuscules trous des flammes pilotes et la flamme refuse de s'accrocher.

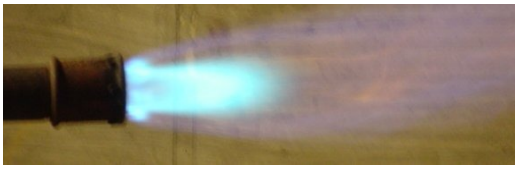

FIGURE 6 – flammes pilotes.

FIGURE 7 – ouvreau conique.

inconvénients : pour obtenir une température à peu près homogène dans le four, il est préférable de répartir la puissance sur plusieurs brûleurs et il n'est alors pas facile de les régler pour que le taux d'aération soit lui aussi égal en tout point du four. Ces brûleurs sont sensibles aux conditions météo, et au vent si le four est en extérieur.

5.2 Brûleurs à air soufflé.

Comme leur nom l'indique, ces brûleurs sont alimentés en gaz et en air sous pression. L'air est fourni par un ventilateur, la combustion a lieu dans un ouvreau. Les avantages sont nombreux :

— on peut finement régler le taux d'aération avec deux robinets et deux débitmètres, un sur chaque fluide[21] ;
— ils ne sont pas sensibles aux conditions météo ;
— on peut envisager un préchauffage de l'air pour économiser le gaz (voir 5.4).

Les « soufflantes à canal latéral » sont particulièrement adaptées à l'alimentation en air des brûleurs. Elles ont l'inconvénient d'être assez bruyantes, j'ai résolu le problème en mettant la mienne à la cave sous le four et je ne l'entends plus.

Elles sont à entraînement direct (sans courroies) et le plus souvent motorisées en triphasé, tout ça les rend fiables et très peu sujettes aux pannes. Et pas besoin d'un abonnement tri pour les faire fonctionner, le triphasé peut être fourni par un variateur alimenté en monophasé. Le variateur a aussi l'avantage d'économiser l'électricité et le bruit : plutôt que d'agir sur un robinet d'air, on fait varier la vitesse de la soufflante qui tourne alors le plus souvent à vitesse réduite.

5.2.1 Mélange air – gaz

On rencontre deux façons de mélanger le gaz et l'air comburant :

mélange au nez : les deux fluides se mélangent dans l'ouvreau. Avec cette méthode le préchauffage de l'air est possible. De plus une combustion à

21. Comme sous la douche où on mélange l'eau brûlante et l'eau glacée pour obtenir la température souhaitée (le taux d'aération) et le débit (la puissance).

faible puissance et très oxydante peut être obtenue, un « sèche cheveux » qui facilite les touts débuts de cuisson.

prémélange : le mélange air-gaz est effectué dans un mélangeur puis amené au brûleur par une conduite unique. Plusieurs brûleurs peuvent ainsi être alimentés par le même mélangeur et la conduite du four en est simplifiée, avec la certitude d'un four en atmosphère homogène et d'une combustion complète. Pour d'évidentes raisons de sécurité, la vitesse du mélange doit toujours être supérieure à la vitesse de déflagration.

5.2.2 Brûleurs Jet.

Ce sont des cas particuliers de brûleurs à air soufflé, où l'orifice de l'ouvreau se rétrécit en sortie et les gaz brûlés sortent à très grande vitesse, de l'ordre de 100 m/s. Cette vitesse provoque dans l'ensemble du four un brassage intense des gaz et un échange thermique renforcé avec le chargement : la convection forcée.

On peut ainsi effectuer sans casse des cuissons rapides et économiques, et obtenir une température homogène dans l'ensemble du four même avec un seul brûleur. Le brûleur jet est le complément idéal de la fibre, on peut réaliser une économie de gaz de 30% environ comparativement au four à air induit.

Dans le document http://didierdescamps.fr/four/four.pdf j'explique la conception et la fabrication de mon brûleur jet et de mon four actuel, qui fonctionne au gaz naturel B avec un abonnement domestique classique à 28 hPa. J'ai eu recours à une astuce pour pouvoir obtenir une grande vitesse de sortie malgré une aussi basse pression de gaz : c'est l'air sous pression qui communique son débit de quantité de mouvement au gaz, à l'inverse du brûleur à air induit.

5.3 Mesure et contrôle du débit de gaz

On a vu que la puissance thermique et le débit de gaz son liés par un coefficient, le *Pouvoir calorifique* ou PCI. C'est en contrôlant le débit de gaz que le potier impose à son four l'accroissement désiré de la température en fonction du temps, sa « courbe de cuisson ».

Deux cas de figure se rencontrent :

— le gaz se détend dans un injecteur, le débit est fonction de la géométrie et du diamètre de l'injecteur, et de la pression en amont de celui ci. C'est le cas des brûleurs à air induit.

— il n'y a pas d'injecteur et les débits d'air et de gaz sont évalués par des débitmètres placés sur les conduites. C'est le plus souvent le cas des brûleurs à air soufflé.

Dans les deux cas c'est en changeant la pression qu'on fait varier le débit.

5.3.1 Injecteurs.

Le débit de gaz passant dans un injecteur –donc la puissance thermique– est fonction de différents paramètres, et principalement de son diamètre, de sa géo-

métrie qui détermine un débit spécifique, et de la pression effective[22] d'alimentation en gaz.

Le calcul du débit de gaz passant dans un injecteur est détaillé en 9.3. Le résultat de ce calcul se trouve en figure 8 (les échelles sont logarithmiques). Cette figure indique directement la puissance thermique en fonction de la pression effective du gaz pour un injecteur de 1 mm^2 et un débit spécifique de 1. Pour effectuer ces calculs on suppose que les conditions atmosphériques sont 1 bar et 15°C, mais ce sont des facteurs peu sensibles.

Débit spécifique : La figure 9 représente une tuyère parfaitement profilée au sortir de laquelle le jet de gaz est au diamètre de l'injecteur. Le débit est maximal et le *débit spécifique* ou *facteur de débit* est égal à 1. La figure 10 représente un injecteur avec une arête vive en amont, ce qu'on obtient en perçant une tôle mince par exemple. Le jet est de plus petit diamètre et le débit est également plus faible. Le facteur de débit est ici égal à 0,60.

Pour les injecteurs du commerce, récupérés sur des gazinières par exemple, on peut considérer que le facteur de débit est égal à 1, l'erreur commise étant négligeable.

Exemple : un brûleur fonctionne au propane à 1,5 bar, le diamètre de l'injecteur est de 1 mm et son facteur de débit est de 1.

— la surface de l'injecteur est 0,785 mm^2 la puissance est de $31{,}45 \times 0{,}785 = 24{,}7$ kW.
— on veut obtenir la même puissance en gaz naturel H sans changer l'injecteur, il faut donc une pression de 2,62 bar.
— la pression maxi de gaz nat. est 0,1 bar. Pour obtenir la même puissance il faut donc un injecteur de diamètre 2,33 mm pour un facteur de débit de 1, ou 3,02 si le facteur de débit est de 0,6. Arrondir au diamètre disponible le plus proche.

Choix du couple diamètre-pression : Pour obtenir une même puissance thermique, on a le choix d'utiliser un injecteur de petit diamètre alimenté sous une pression importante, ou au contraire un gros diamètre et une pression faible. Ce deuxième choix a un inconvénient, la capacité d'entraînement d'air primaire diminue avec la pression. Il a aussi un avantage important, le niveau sonore diminue également.

5.3.2 Débitmètres.

Les fournisseurs de matériel industriel proposent un grand nombre de solutions, plus coûteuses les unes que les autres. Heureusement, il est très facile de bricoler soi même des débitmètres suffisamment précis pour conduire un four de potier.

Tout accident de parcours d'un fluide dans une conduite engendre une perte

22. perssion effective = pression absolue - pression atmosphérique

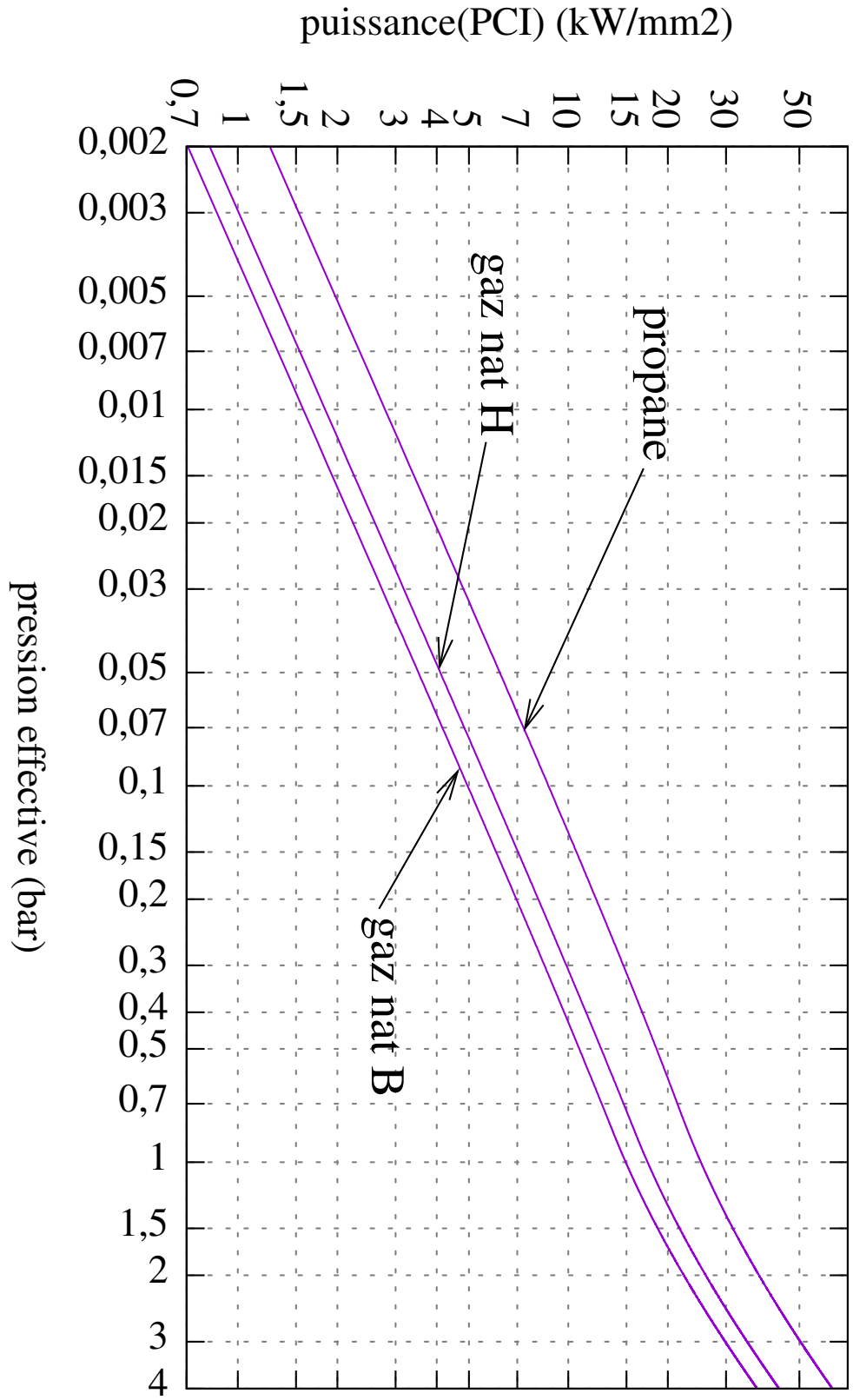

FIGURE 8 – Puissance fonction de la pression pour 1 mm^2

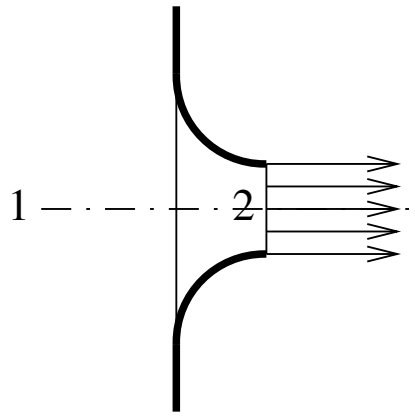

FIGURE 9 – tuyère.

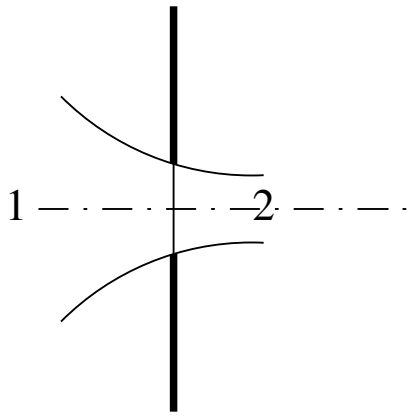

FIGURE 10 – diaphragme.

de charge (ici, une chute de pression) proportionnelle au carré du débit[23]. Un accident peut être un coude, une variation de section ou n'importe quoi d'autre ; et notamment un *robinet partiellement fermé*.

Sur chaque fluide, il suffit d'insérer en aval du robinet de réglage (les "vannes" à boisseau sphérique sont commodes et bon marché, il faut les choisir NF Gaz) un deuxième robinet muni de deux prises de pression, une en amont et l'autre en aval. Ces deux prises sont reliées à un manomètre différentiel qui, au plus simple, peut être un simple tube en U en plastique transparent contenant de l'eau colorée[24]. Ce deuxième robinet est installé à distance du premier (une dizaine de diamètres) pour qu'ils n'interfèrent pas, et il est partiellement fermé pour que la hauteur de la colonne d'eau donne une image du débit.

Peu importe le réglage précis de ce robinet (j'ai réglé celui du gaz à 150 mm pour le débit maximal) mais il est très commode de régler les deux, gaz et air, pour obtenir une combustion neutre quand leurs indications sont identiques, on a ainsi un visuel immédiat non seulement de la puissance mais également du taux d'aération. Ces réglages se font précisément lors d'une première cuisson d'essai à haute température[25] : au delà de 1000°C, l'apparition ou la disparition de la flamme en sortie du four est un indicateur fin du passage par la combustion neutre. Ces réglages étant faits, on retire la manœuvre des robinets pour éviter un déréglage malencontreux.

Détails et photo en figure 2 de http://didierdescamps.fr/four/four.pdf

23. Les mécaniciens des fluides pourraient déplorer que je ne prenne pas en compte ni γ ni Re. C'est vrai, mais les effets de la compressibilité et de la viscosité sont ici tout à fait négligeables.

24. L'eau peut être colorée avec une goutte de fluorescéine qui a de plus l'avantage d'être antiseptique. Personnellement j'ai craqué pour deux manomètres numériques.

25. Je simule le chargement avec des plaques d'enfournement et des briques réfractaires.

5.4 Préchauffage de l'air.(À FAIRE)

5.5 Sécurité et détection de flamme.

Si le (ou un des) brûleur s'éteint sans qu'on s'en aperçoive, une accumulation de gaz peut se produire dans le four, d'où un risque d'explosion. On pourrait donc se sentir rassuré si un dispositif surveille en permanence la présence de la flamme, et agit sur une électrovanne qui coupe rapidement le gaz en cas d'extinction.

J'ai personnellement choisi de m'en passer. Ces dispositifs sont coûteux, ne dispensent pas d'une surveillance et ne servent que peu de temps : rapidement l'ouvreau est porté à une température telle que le ré-allumage est immédiat si le gaz a été momentanément coupé. De plus un brûleur qui s'éteint, ça s'entend ; et ça ne s'éteint pas si c'est bien réglé ! je me contente d'un déclencheur à manque de tension et d'une électrovanne en cas de coupure électrique.

Mais si vous recevez du public, votre assureur ou une commission de sécurité vous imposeront peut-être un dispositif de détection de flamme. Quelque soit son type, il maintient ouverte une électrovanne tant que la flamme est présente. Il est souvent compris dans un système qui assure un cycle de pré-ventilation, d'allumage puis la surveillance.

Électrodes d'ionisation. Une flamme est un milieu instable et complexe où se trouvent des radicaux libres et des ions. Ceux-ci rendent ce milieu conducteur de l'électricité. Deux électrodes (qui peuvent également assurer l'allumage) permettent de vérifier cette conductivité.

Cellule UV Une flamme émet de la lumière visible, mais rayonne surtout dans l'ultra-violet. Une cellule optique détecte ce rayonnement indépendant de la lumière ambiante.

Plus chère que l'ionisation, la cellule UV peut plus facilement s'intégrer à un brûleur existant sans trop de modifications de celui-ci. Les systèmes à thermocouple ne sont pas toujours efficaces, le délai entre l'extinction et la coupure peut être excessif, et leur durée de vie est faible.

6 Bilan thermique global simplifié d'un four.

Établir le bilan global d'une cuisson dans un four intermittent permet d'estimer la puissance thermique à installer. Il permet également de constater que seule une très petite partie de la dépense énergétique profite aux pièces que nous cuisons, ce qui explique pourquoi les fours continus ont la faveur de l'industrie.

6.1 Répartition des puissances.

Soit Pg [W] la puissance thermique fournie par le ou les brûleurs. Cette puissance se divise en trois autres :
Pf est la puissance emportée par les fumées chaudes sortant par la cheminée ;
Pp est celle qui s'échappe par les parois du four ;

et Pc est la puissance utile acquise par le chargement, c'est à dire les céramiques à cuire et le matériel d'enfournement.

Si on considère ces quatre puissances en valeurs absolues, on a

$$Pg = Pf + Pp + Pc \tag{1}$$

Pg est proportionnelle au débit du gaz q_g [kg/s] et au pouvoir calorifique inférieur massique PCI [J/kg] de celui-ci.

$$Pg = q_g \times PCI$$

Pf dépend du débit q_f [kg/s] des fumées et des enthalpies h aux températures instantanée du four T et ambiante T_a.

$$Pf = q_f\big(h(T) - h(T_a)\big) = F q_g\big(h(T) - h(T_a)\big)$$

avec $F = q_f/q_g$ [kg/kg] le pouvoir fumigène humide massique du combustible. Les enthalpies sont estimées par $h(T) = AT + BT^2/2 + CT^3/3$ (voir 9.4).

Pc est fonction de la masse m du chargement, de c sa chaleur massique moyenne, et de $T' = \mathrm{d}T/\mathrm{d}t$ [°C/s] sa vitesse de montée en température

$$Pc = mc\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t}$$

On supposera c constante, c=900 Jkg^{-1}K^{-1}.

Pp dépend de e l'épaisseur de la paroi, de S sa surface totale, de k [W m^{-1}K^{-1}] la conductivité du matériau, et des températures T et T_a

$$Pp = \frac{kS}{e}(T - T_a) = H(T - T_a)$$

avec $H = kS/e$ [W/K] la conductance globale de l'enceinte.
Cette évaluation de Pp est –pour l'instant– très simplifiée : les résistances de convection intérieure et extérieure sont négligées, un seul matériau dont la conductivité ne varie pas avec la température est envisagé, les parois sont supposées planes et les coins sont négligés. De plus ce calcul de conductance est *stationnaire*[26] (à chaque instant on considère un palier de durée infinie à la température T constante, comme si le four montait *infiniment lentement* en température). Cette simplification entraîne une surestimation pessimiste de la conductance.

6.2 Phase à gradient constant

En début de cuisson la puissance nécessaire Pg est faible, et on l'adapte de façon à obtenir un accroissement de température T' constant. De (1) on tire

$$q_g = \frac{P_p + P_c}{F\big(h(T) - h(T_a)\big) - PCI} \tag{2}$$

26. Voir http://didierdescamps.fr/four/conduc-insta.pdf pour des notions de calcul instationnaire.

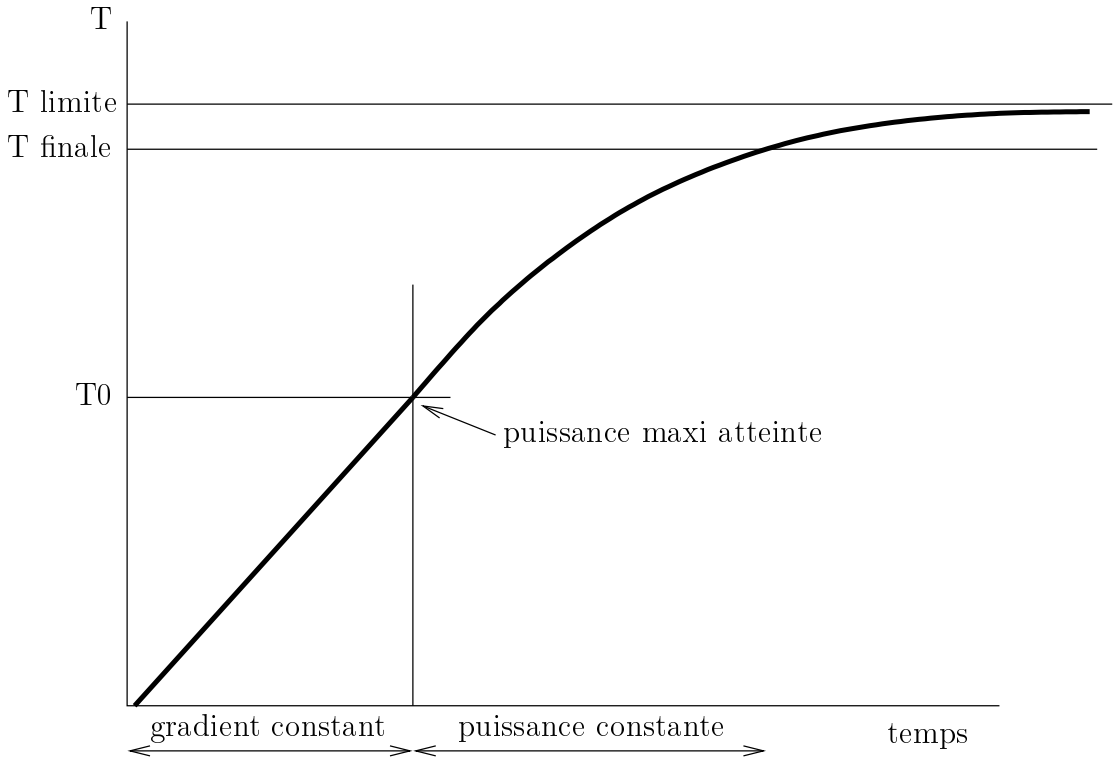

FIGURE 11 – les deux phases d'une cuisson.

6.3 Phase à puissance constante

Pendant la phase à gradient constant il arrive très fréquemment que la puissance Pg maximale soit atteinte à une température T_0 inférieure à la température finale. La figure (11 illustre la situation. La cuisson continue alors à puissance constante. De (1) on tire

$$T' = \frac{P_g - P_f - Pc}{mc} \tag{3}$$

qui serait une équation différentielle du 1er ordre, dont la solution serait

$$T = \frac{B}{A} - De^{-Ct} \tag{4}$$

en posant

$$A = \frac{Fc_p q_g}{mc + H} \quad ; \quad B = \frac{PCIq_g}{mc + H} \quad ; \quad D = \frac{B}{A} - T_o \quad \text{et} \quad C = \frac{T'_o}{D}$$

si les fumées étaient un gaz parfait avec une chaleur massique constante.

Comme ça n'est pas le cas, je suis incapable de trouver une solution exacte, et même de savoir si une telle solution peut exister. D'où le code suivant pour une résolution numérique.

6.4 Code

Le code Python3 [27] que voici applique les relations précédentes.
« http://didierdescamps.fr/combustion/four-global.py »

Si on suppose que le combustible est du propane, la puissance maxi de 12 kW, la température maxi de 1300°C, la température ambiante de 20°C, une épaisseur de fibre de 75 mm, une surface totale de 3 m^2, une charge de 80 kg et une vitesse de chauffe de 250°C/h dans des conditions stœchiométriques, on tape dans une console « python3 four-global.py 20 1300 20 2 125 250 »

On constate alors que la puissance maxi est atteinte vers 950°C, que la durée totale est de 346 min et que la consommation de propane est de 4,16 kg. Ce qui paraît optimiste, un facteur de sécurité de 1,5 au moins est à prévoir sur la puissance. On constate également que sur la fin 60% de la puissance part avec les fumées !

6.5 À faire

— changement de combustible, gaz naturel par exemple (le plus simple) ;
— combustion en excès d'air (facile) ou en défaut (demande réflexion) ;
— conduction instationnaire 3D.
Pas simple, mais j'ai mis un début de réflexion dans
« http://didierdescamps.fr/combustion/conduc_insta.pdf ».

7 Évacuation des fumées et tirage.

7.1 Les deux problèmes.

la figure 12 schématise un four à gaz. Deux conduites différentes doivent être dimensionnées, la cheminée de tirage et la conduite d'évacuation des gaz émis par le four.

Tirage. Si le four est équipé de brûleurs à air induit, la cheminée de tirage doit être de section suffisante pour que la pression au bas de la chambre soit inférieure à la pression atmosphérique, permettant ainsi l'entrée d'air secondaire autour des brûleurs ; un registre permet alors de gérer cette dépression et par conséquent l'atmosphère oxydo-réductrice dans la chambre.

S'il s'agit de brûleurs à air soufflé il n'y a pas besoin de régler cette pression, l'alimentation en air et en gaz gère à elle seule le taux d'aération. Mais il est agréable d'obtenir une légère dépression pour -par exemple- éviter de se brûler en jetant un œil par un regard.

Évacuation des gaz. Par ailleurs, sauf si le four est à extérieur ou dans un local aéré et de volume énorme, il faut sortir les fumées du local en sécurité par une conduite d'évacuation.

27. Python est un logiciel libre et gratuit, installable sur tout ordinateur.

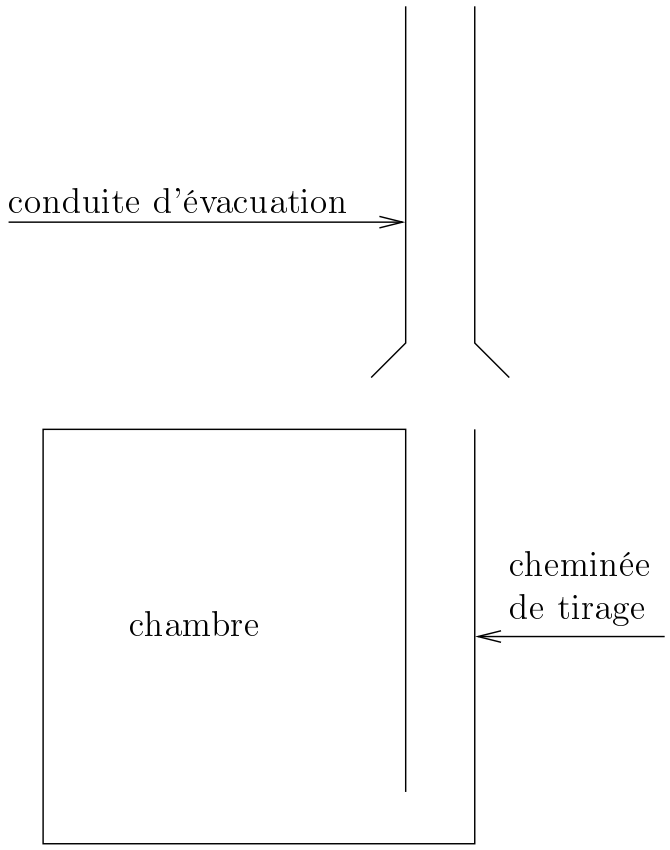

FIGURE 12 – schéma d'un four à gaz

7.2 Hypothèses simplificatrices.

Il s'agit ici de fournir des dimensions sans grande précision en effectuant des calculs simples et « au pire », on majorera ensuite les résultats des calculs en appliquant des « coefficients de sécurité ».

On considère les gaz à haute température comme des gaz thermodynamiquement parfaits et visqueux, mais il est difficile d'obtenir des données précises sur leur comportement, notamment leur viscosité.

Ces calculs se font dans des conditions stœchiométriques. Cela se justifie par le fait qu'en pratique on ne s'éloigne jamais fortement de ces conditions en fin de cuisson (chez moi, le taux d'aération est toujours compris entre 95% et 105%).

Ils doivent être effectués à la puissance et à la température maximales, et en considérant que les écoulements sont adiabatiques (sans échange de chaleur). Cela pour se placer dans les conditions les plus défavorables.

7.3 Pression dans la chambre et cheminée de tirage.

7.3.1 Principe du calcul.

Les gaz brûlés –ou fumées– sortent par le bas de la chambre dans la cheminée à la température t régnant dans le four. Du fait de leur température élevée, leur

masse volumique ρ_f (ou "densité", pour simplifier) est plus faible que ρ_a, celle de l'air froid du local. Il s'en suit une aspiration ou « dépression motrice »

$$p_{mot} = (\rho_a - \rho_f)gh$$

où

- ρ_a est la masse volumique de l'air ambiant ;
- ρ_f est celle des fumées à la température t du four ;
- g est l'accélération de la pesanteur, soit 9,81 m,s^{-2} sur notre bonne vieille planète[28] ;
- h est la hauteur de la conduite.

Dès qu'il y a un écoulement, il y a un frottement, donc une perte de charge. Elle s'exprime comme

$$p_{ch} = \lambda \frac{h}{d} \rho_f \frac{v^2}{2}$$

avec

- λ est le facteur de pertes dépendant de Re le nombre de Reynolds. Re est estimé à 5500, d'où un écoulement *laminaire* avec $\lambda \approx 0{,}04$;
- v est la vitesse moyenne des fumées dans la cheminée.
- d est le diamètre *hydraulique* de la cheminée.

Pour mettre la chambre en dépression, il faut que la dépression motrice soit plus grande que la perte de charge. Un calcul direct du diamètre tel que $p_{mot} = p_{ch}$ donne

$$d^5 = \lambda \rho_f \frac{q_f^2}{2} pmot \tag{5}$$

Il faudra donc choisir un diamètre hydraulique plus grand que cette valeur critique. À noter que cette valeur est indépendante de h.

7.3.2 Code de calcul.

Le calcul étant direct, une bête feuille de calcul suffit. Récupérez le fichier "chem.ods" ici : http://didierdescamps.fr/combustion/chem.ods et modifiez les cases C3 à C5 à votre convenance. Avec les valeurs par défaut le résultat sera 77 mm, donc un minimum de 80 mm conviendra.

Remarque 1 : Si on envisage deux cheminées (ou plus) en parallèle, il ne faut pas choisir la même surface de section qu'avec une cheminée unique (la perte de charge augmente avec la surface latérale) mais faire le calcul avec une puissance divisée par deux (ou plus).

Remarque 2 : Le diamètre hydraulique est défini par $d_h = 4S/P$ avec S la surface de la conduite et P son périmètre.

28. Si vous êtes sélénite il faudra tenir compte d'une accélération plus faible, mais c'est surtout l'importation d'O_2 qui risque de vous coûter cher.

Si la conduite est circulaire, alors $d_h = d$; si elle est carrée, alors $d_h = a$ avec a le côté du carré ; si elle est rectangulaire de section $a \times b$, alors $d_h = 2ab/(a+b)$. Wikipedia vous en dira plus.

7.4 Évacuation des fumées.

7.4.1 Principe du calcul.

On trouve ici les mêmes phénomènes de dépression motrice et de perte de charge rencontrés dans la cheminée. Mais deux aspects diffèrent :

1. les fumées issues du four vont se mélanger avec une quantité importante d'air frais, et c'est la température de ce mélange qui doit être compatible avec le matériau de la conduite ;
2. les deux extrémités de la conduite sont soumises à la même pression atmosphérique, et par conséquent $p_{mot} = p_{ch}$.

On comprend intuitivement que la quantité d'air frais sera d'autant plus grande, et donc la température obtenue plus basse, que le diamètre est important. Il s'agit donc de déterminer le diamètre minimal garantissant une température acceptable.

Remarque : ici aussi Re est petit et l'écoulement est laminaire. Les filets fluides ne se mélangent pas facilement entre eux, et la périphérie en contact avec la conduite est plus froide que le centre[29]. On fait donc –et heureusement– un calcul pessimiste.

7.4.2 Code.

Le petit code Python3 suivant réalise ce calcul pour une section circulaire.

La résolution directe des équations étant impossible, le code utilise une méthode de dichotomie en faisant varier le débit d'air jusqu'à ce que $p_{mot} \approx p_{ch}$. La température du mélange est alors retournée.

Utilisation : Le code peut être récupéré ici : http://didierdescamps.fr/combustion/evac.py puis on tapote par exemple « python3 evac.py 50 1300 20 » pour 50 kW de puissance maxi (PCI), 1300 ℃ et 20 ℃ de température ambiante. On entre ensuite le diamètre envisagé, 180 par exemple, et on obtient en retour la température moyenne obtenue, 183,4°C en l'occurence, compatible avec une simple conduite en aluminium.

8 Conclusion

J'ai fait le choix de privilégier la lisibilité à la rigueur, tout cela est donc un peu rapide et survolé, je ne suis pas rentré dans les détails. Sentez vous libres de m'interpeller pour me demander de préciser quelque chose, pour me signaler un oubli, une erreur, une fote d'ortografe, etc.

29. j'ai observé sur mon four que la température de la conduite augmente avec l'altitude. Le mélange progressif des filets fluides explique ce paradoxe.

9 annexes

9.1 Maintenir ou éteindre un feu.

Plusieurs conditions sont nécessaires pour qu'une combustion se maintienne, et il « suffit » d'en supprimer une pour qu'elle cesse. Il y a donc autant de méthodes pour éteindre un incendie ; inversement le potier s'efforcera de maintenir toutes ces conditions dans son four jusqu'à la fin de la cuisson !

Adoptons momentanément le point de vue du pompier :

carburant : c'est la méthode la plus difficile, cependant on va s'efforcer de couper toute source de carburant en fermant la vanne de gaz au trottoir, en vidant la réserve de bois, etc.

comburant : on prive la flamme d'oxygène avec du sable, une couverture...

énergie d'activation : on arrose ! en se vaporisant, l'eau prélève sa chaleur latente et refroidit l'environnement (tout comme le propane dans sa bouteille). Si la température descend sous la limite d'auto-inflammation, la combustion cesse.

vitesse de déflagration : en soufflant rituellement vos bougies, vous imposez à la flamme une vitesse d'écoulement supérieure à la vitesse de déflagration, elle « décroche » et s'éteint. C'est la méthode dite du « salaire de la peur[30] ».

9.2 Comportement des gaz.

9.2.1 Gaz parfait.

Un gaz parfait (GP) est un gaz qui obéit à la loi

$$p/\rho = rT \tag{6}$$

avec p la pression absolue en Pa, ρ la masse volumique en kg/m^3, r une constante propre au gaz considéré[31] et T la température absolue, en kelvins.

r est la différence des chaleurs massiques, $r = c_p - c_v$; et vaut 288 J/(kg K) pour l'air, 450 à 520 pour les gaz naturels et 189 pour le propane. Le rapport des chaleurs massiques $\gamma = c_p/c_v$ est également une constante, égale à 1,4 pour l'air, 1,3 pour le gaz naturel et 1,14 pour le propane.

Le modèle GP n'est qu'un *modèle*, aucun gaz n'est strictement parfait si on y regarde d'assez près, mais c'est un modèle bien pratique qui permet de très bonnes approximations par des calculs simples.

L'oxygène, l'air et les gaz naturels sont très proches du modèle GP. Les calculs sont des simples règles de trois, et les proportions molaires sont également des proportions volumiques.

Le propane et le butane, utilisés dans des conditions trop proches de leur vaporisation, ne sont pas des gaz mais des vapeurs. Ils n'obéissent pas à la loi des GP,

30. Le film avec Charles Vanel, Yves Montand, quelques camions de nitroglycérine, etc.
31. $r = R/M$ avec R=8,315 J.Mol^{-1}K^{-1} et M la masse molaire

il faut avoir recours à des tables de données si on veut connaître précisément leurs caractéristiques, comme par exemple leur masse volumique en fonction de la température et de la pression. À cause de sa simplicité, le modèle GP peut cependant leur être appliqué au prix d'une erreur souvent négligeable.

9.2.2 Volume « normal ».

Les gaz et les vapeurs sont des fluides compressibles, un volume peut contenir n'importe quelle quantité de matière selon sa pression et sa température. Plutôt que de parler en masse, ce qui serait bien trop simple, on aime faire compliqué en exprimant les volumes et les débits en mètres cubes « normaux »

Un volume normal, exprimé en m^3(n), est le volume qu'occuperait une masse de gaz si elle était ramenée à 0°C et 101325 Pa, soit un peu plus qu'un bar. C'est donc une masse déguisée en volume.

Par exemple, 1 m^3 d'air à 50°C et 2 bars effectifs est la même masse que 2,502 m^3(n).

Cet état normal (273 K, 101325 Pa) est complètement arbitraire et les anglo-américains utilisent une norme légèrement différente.

9.3 Calcul du débit dans un injecteur.

9.3.1 Calcul

Il faut distinguer deux régimes d'écoulement dans un injecteur en fonction de la pression du gaz. L'écoulement est subsonique si la pression d'alimentation est inférieure à une certaine pression critique, ou sonique si elle est supérieure.

Dans un injecteur la pression chute, et par conséquent la température et la célérité des ondes (ou « vitesse du son ») également, alors que la vitesse augmente. Si la vitesse devient égale à la célérité, elle ne peut plus augmenter, il y a un « blocage sonique ».

Cette pression critique est aux environs de 0,91 bar effectif pour l'air, 0,85 pour le gaz naturel et 0,75 pour le propane.

Au delà de cette pression se forme une onde de choc stationnaire en sortie d'injecteur, reconnaissable à son bruit caractéristique. La figure 13 résume la situation.

régime subsonique : En entrée d'injecteur le gaz est à la pression absolue d'alimentation p et à la température ambiante T_a, et en sortie il est à la pression atmosphérique p_a. Entre les deux l'entropie se conserve, ce qui permet de calculer la température T en sortie, évidement plus basse qu'en entrée, avec

$$T = T_a \left(\frac{p_a}{p}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \tag{7}$$

La conservation de l'enthalpie totale permet de déterminer la vitesse en sortie,

$$v = \sqrt{2c_p(T_a - T)} \tag{8}$$

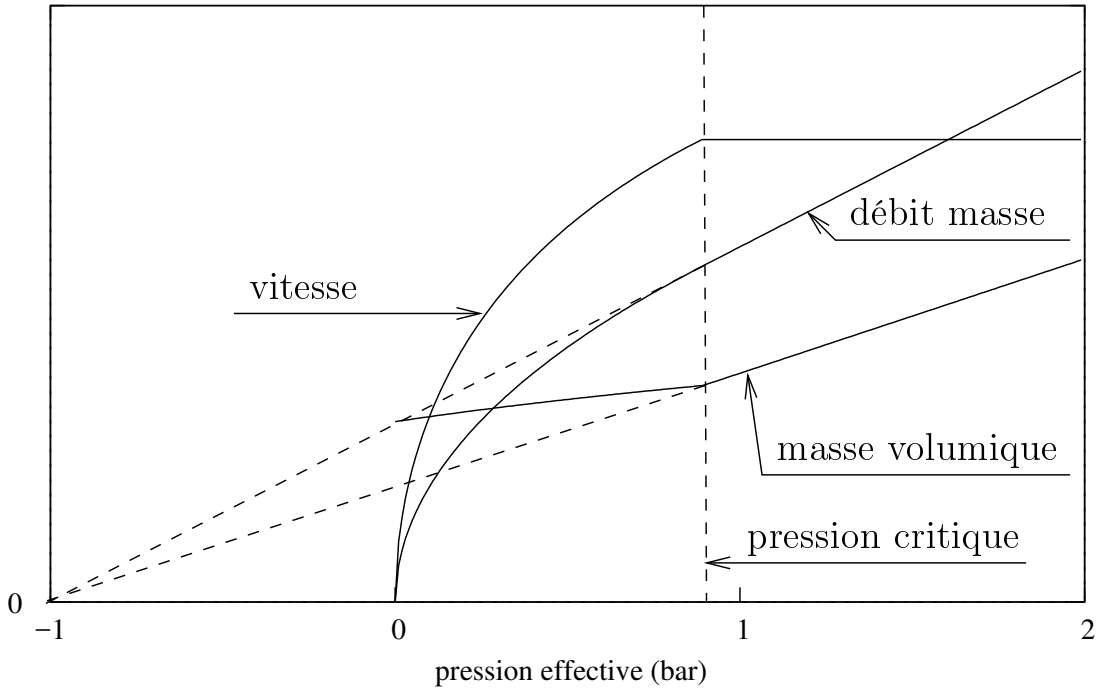

FIGURE 13 – Les deux régimes d'écoulement.

La loi d'état des GP donne la masse volumique en sortie,

$$\rho = p_a / rT \tag{9}$$

D'où le débit masse,

$$q_m = \rho v S \tag{10}$$

Il suffit enfin de multiplier ce débit par le pouvoir calorifique massique –et le facteur de débit éventuel– pour obtenir la puissance thermique.

transition : Quand on augmente la pression p, alors T diminue. La célérité c, qu'on peut calculer avec $c = \sqrt{\gamma r T}$, diminue également alors que v augmente. Quand $v = c$ la pression critique d'alimentation p_{cr} est atteinte :

$$p_{cr} = p_a \left(\frac{\gamma + 1}{2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \tag{11}$$

régime sonique : On évalue les conditions de sortie *avant le choc*.

T devient une constante,

$$T = \frac{2T_a}{\gamma + 1} \tag{12}$$

et v également,

$$v = \sqrt{2c_p(T_a - T)} \tag{13}$$

Par contre la pression de sortie p_s n'est plus égale a la pression atmosphérique car il y a un brusque saut de pression dans le choc sonique qui suit,

elle est proportionnelle à la pression *absolue* d'alimentation p,

$$p_s = p\left(\frac{T}{T_a}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \tag{14}$$

la masse volumique avant le choc augmente elle aussi proportionnellement à p_s, et donc à p,

$$\rho = p_s/rT \tag{15}$$

et le débit en masse de même, $q_m = \rho v S$

Remarques :

— un écoulement supersonique ne peut pas se produire dans un simple convergent comme un injecteur ;

— aux basses pressions (jusqu'à 0,1 bar effectif environ), le calcul subsonique est en très bon accord avec le théorème de Bernoulli ;

— le propane n'étant pas un gaz mais une vapeur, ces calculs basés sur le modèle du gaz parfait sont approximatifs.

9.3.2 Détails mathématiques.

Justification de l'équation (11) :

$$v^2 = 2c_p(T_a - T) = \gamma r T \quad \text{avec} \quad T = T_a(p_c/p_a)^{1-\gamma/\gamma} = AT_a$$

$$c_p = \frac{\gamma r}{\gamma - 1} \quad \text{donc} \quad A = \frac{2}{\gamma+1}$$

$$\text{et} \quad \frac{p_c}{p_a} = \left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{\gamma/\gamma-1}$$

Justification de l'équation (12) :

$$T_c/T_a = \left(\frac{p_c}{p_a}\right)^{\gamma-1/\gamma} = \left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

9.3.3 Code.

Vous trouverez ici « http://didierdescamps.fr/combustion/puissance.py » un programme de calcul de la puissance thermique en fonction de la pression d'alimentation, écrit en python3 dans un environnement LinuX, mais qui devrait tourner quel que soit votre système et votre machine.

9.4 Caractéristiques des fumées.

Traitons l'exemple du propane, vous transposerez facilement à d'autres gaz combustibles.

9.4.1 Pouvoirs comburivore et fumigène.

La combustion stœchiométrique du propane et de l'oxygène s'écrit

$$C_3H_8 + 5O_2 \quad \rightarrow \quad 3CO_2 + 4H_2O$$

Une mole de C_3H_8 a une masse de $3 \times 12 + 8 \times 1 = 44$ gr et 5 moles de dioxygène font 160 gr, le pouvoir comburivore massique en oxygène du propane est donc $160/44 = 3{,}6364$.

L'air contient –pour simplifier– en volume 21% d'oxygène et 79% d'azote, soit $(21 \times 32)/(21 \times 32 + 79 \times 28) = 0{,}233$ d'oxygène en masse. Le pouvoir comburivore massique en air est $160/(44 \times 0{,}233) = 15{,}606$

Le pouvoir fumigène massique est donc $15{,}606 + 1 = 16{,}606$.

9.4.2 Enthalpie emportée par les fumées.

Suivant le même raisonnement on trouve que, dans des conditions stœchiométriques, une mole de propane engendre une fumée composée de trois espèces, 3 moles de CO_2, 4 moles de H_2O et 18,81 moles de N_2 de masses molaires M_i respectives 44, 18 et 28.

Il est très difficile de trouver des données sur les grandeurs thermodynamiques de ces espèces dans le domaine de température qui nous intéresse[32], c'est à dire jusqu'à 1300°C. http://www.edu.upmc.fr/chimie/lc101-202-301/communs/public/capcalo.pdf propose pour chaque espèce i une approximation de sa chaleur molaire à trois coefficients,

$$c_p = a_i + b_i T + c_i T^2$$

avec T en kelvins.

En tenant compte des masses molaires M_i et des proportions molaires n_i, viennent pour ce mélange les coefficients A, B et C permettant d'évaluer sa chaleur massique,

$$X \sum n_i = \sum \frac{x_i n_i}{M_i}$$

avec $X = A = 1063{,}43\ \mathrm{Jkg^{-1}K^{-1}}$; $B = 0{,}25771\ \mathrm{Jkg^{-1}K^{-2}}$ et $C = 8{,}8500.10^{-6}\ \mathrm{Jkg^{-1}K^{-3}}$

À une constante près, on a finalement

$$h(T) = AT + \frac{B}{2}T^2 + \frac{C}{3}T^3$$

32. si vous en trouvez, dénoncez les moi !