

## Etablissement de diagrammes d'Ostwald pour l'étude des combustions

### A – Combustion « neutre »

Pour obtenir la combustion totale et complète d'un combustible, il faut, théoriquement, que le dioxygène soit en quantité « stœchiométrique » ( ni en excès ni en défaut ). On parle, alors, de « combustion neutre » ou de combustion théorique.

#### 1°) Composition de l'air sec :

Les principaux constituants sont indiqués ci-dessous :

Diazote	Dioxygène	Argon	Dioxyde de carbone
78,09 %	20,95 %	0,93 %	0,03 %

Nous considérerons, par la suite, que l'air est constitué de « gaz inertes » (79 %) et de dioxygène (21 %).

#### 2°) Notations :

Tous les volumes sont mesurés dans les « **C**onditions **N**ormales de **T**empérature et de **P**ression » ( C.N.T.P. ). Les volumes pourront être exprimés, alors, en  $\text{m}^3(\text{n})$  (mètre-cube normal).

*Rappel* : Le volume molaire, dans les C.N.T.P. se calcule grâce à l'équation d'état d'un gaz parfait.

$$V_m = \frac{R T_0}{p_0} \quad \text{avec } T_0 \cong 273 \text{ K} ; \quad p_0 \cong 1013 \times 10^2 \text{ Pa} \quad V_m \cong 22,4 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$$

#### • Cas des combustibles gazeux :

La composition est, le plus souvent, donnée en volume. La composition en volume s'apparente à la composition en mole (on suppose les gaz parfaits).

$V_a$  : volume d'air « stœchiométrique », en  $\text{m}^3(\text{n})$  par  $\text{m}^3(\text{n})$  de combustible (pour un combustible gazeux). C'est le *pouvoir comburivore* du combustible.

$V_f$  : volume de « fumées » sèches, en  $\text{m}^3(\text{n})$  par  $\text{m}^3(\text{n})$  de combustible (pour un combustible gazeux). C'est le *pouvoir fumigène* du combustible.

$V_{f,h}$  : volume de « fumées » humides, en  $\text{m}^3(\text{n})$  par  $\text{m}^3(\text{n})$  de combustible. L'eau (sous forme de vapeur) est alors comptabilisée dans le volume de « fumées ».

#### • Cas d'un combustible solide ou liquide :

La composition du combustible est, le plus souvent, fournie en masse.

$V_a$  : volume d'air « stœchiométrique », en  $\text{m}^3(\text{n})$  par kg de combustible.

$V_f$  : volume de « fumées » sèches, en  $\text{m}^3(\text{n})$  par kg de combustible. C'est le *pouvoir fumigène* du combustible.

*Remarque* : Ordinairement, une fumée est un ensemble de particules solides en suspension dans un gaz. Ici, le mot « fumées » désigne l'ensemble des gaz restant après combustion.

### 3°) Exemple du gaz de Lacq :

Composition, en volume, du gaz de Lacq :

CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	N <sub>2</sub>
99,7 %	2,1 %	0,2 %	0,1 %	0,3 %

Du point de vue de la combustion, on peut considérer que le mélange d'hydrocarbures est équivalent à un hydrocarbure de formule C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> avec :

$$x = \sum_{\text{constituants}} \text{nombre d'atomes de carbone du constituant} \times \text{fraction volumique du constituant dans le mélange}$$

$$y = \sum_{\text{constituants}} \text{nombre d'atomes d'hydrogène du constituant} \times \text{fraction volumique du constituant dans le mélange}$$

Le gaz de Lacq est alors équivalent au mélange gazeux suivant, pour l'étude de la combustion :

C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>	N <sub>2</sub>
99,7 %	0,3 %

$$x = \frac{97,3}{100} \times 1 + \frac{2,1}{100} \times 2 + \frac{0,2}{100} \times 3 + \frac{0,1}{100} \times 4 \quad \text{et} \quad y = \frac{97,3}{100} \times 4 + \frac{2,1}{100} \times 6 + \frac{0,2}{100} \times 8 + \frac{0,1}{100} \times 10$$

$$\text{soit : } x = 1,205 \text{ et } y = 4,044$$

La combustion complète de cet hydrocarbure fictif (annexe) donne :



La combustion neutre de 1 mole de combustible, occupant le volume V<sub>m</sub> dans les C.N.T.P., (et

contenant, par conséquent,  $\frac{99,7}{100} \times 1$  mol d'hydrocarbure de formule C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>) exige l'apport d'un

volume de dioxygène égal à :  $\frac{99,7}{100} V_m \left(x + \frac{y}{4}\right)$  ce qui correspond à un volume d'air égal à :

$$\frac{99,7}{100} V_m \left(x + \frac{y}{4}\right) \times \frac{100}{21}$$

Le rapport V<sub>a</sub> s'écrit, alors :  $V_a = \frac{99,7}{21} \left(x + \frac{y}{4}\right)$

Le volume de « fumées » sèches est égal à la somme des volumes de dioxyde de carbone et du volume des gaz « inertes ». Dans l'exemple choisi, il ne faudra pas oublier le diazote contenu dans le combustible (on raisonne toujours sur une mole de combustible).

- Volume de dioxyde de carbone formé :  $\frac{99,7}{100} V_m \times x$
- Volume de gaz inertes apporté par l'air :  $\frac{99,7}{100} V_m \left(x + \frac{y}{4}\right) \times \frac{100}{21} \times \frac{79}{100}$
- Volume de gaz inerte apporté par le combustible :  $\frac{3}{100} V_m$

Le rapport V<sub>f</sub> s'écrit, alors :  $V_f = \frac{99,7}{100} \left[ \left(x + \frac{y}{4}\right) \times \frac{79}{21} + x \right] + \frac{0,3}{100}$

Applications numériques : V<sub>a</sub> ≅ 9,69 et V<sub>f</sub> = 8,68

#### 4°) Cas d'un fioul :

Composition, en masse, d'un fioul :

Elément	C	H	O	S
Pourcentage	85,4 %	12,6 %	0,4 %	1,6 %

Une masse  $m = 1$  kg de combustible renferme :

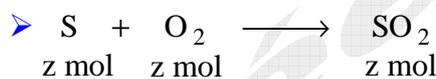
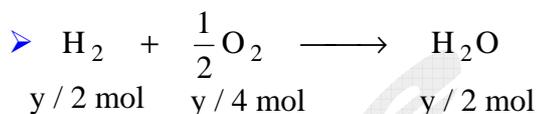
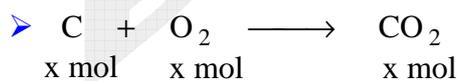
▪ Une masse  $m_C$  de carbone :  $m_C = \frac{85,4}{100} m$  ce qui correspond à  $x$  mol :  $x \text{ mol} = \frac{m}{M(C)} \times \frac{85,4}{100}$ .

▪ Une masse  $m_H$  d'hydrogène :  $m_H = \frac{12,6}{100} m$  ce qui correspond à  $y$  mol d'atomes d'hydrogène :  $y \text{ mol} = \frac{m}{M(H)} \times \frac{12,6}{100}$  et, donc, à  $\frac{y}{2}$  mol de dihydrogène.

▪ Une masse  $m_O$  d'oxygène :  $m_O = \frac{0,4}{100} m$  ce qui correspond à  $t$  mol d'atomes d'oxygène et, par conséquent, à  $\frac{t}{2}$  mol de dioxygène :  $\frac{t}{2} \text{ mol} = \frac{m}{M(O_2)} \times \frac{0,4}{100}$ .

▪ Une masse  $m_S$  de soufre :  $m_S = \frac{1,6}{100} m$  ce qui correspond à  $z$  mol :  $z \text{ mol} = \frac{m}{M(S)} \times \frac{1,6}{100}$ .

Les équations de combustion des constituants de ce combustible sont résumées ci-dessous :



La combustion complète et totale de la masse  $m$  de combustible doit, théoriquement, faire intervenir :  $(x + \frac{y}{2} + z)$  mol de dioxygène ce qui correspond au volume :  $(x + \frac{y}{4} + z) V_m$

Mais une partie du dioxygène nécessaire est apporté par le combustible lui-même, de sorte que l'on a, en définitive, un volume de dioxygène égal à :  $(x + \frac{y}{4} + z - \frac{t}{2}) V_m$

Le volume d'air nécessaire par kg de combustible s'écrit, alors :  $V_a = (x + \frac{y}{4} + z - \frac{t}{2}) V_m \times \frac{100}{21}$

$$\text{soit : } V_a = \left( \frac{85,4}{100} \times \frac{1}{M(C)} + \frac{12,6}{100} \times \frac{1}{M(H_2)} \times \frac{1}{2} + \frac{1,6}{100} \times \frac{1}{M(S)} - \frac{0,4}{100} \times \frac{1}{M(O_2)} \right) V_m \times \frac{100}{21}$$

Le volume de « fumées sèches » est alors égal à :

$$V_f = (x + \frac{y}{2} + z) V_m + \frac{79}{100} \times V_a$$

*Applications numériques :*

$$V_a \cong 11,0 \text{ m}^3 (\text{n}) / \text{kg} , V_f \cong 10,3 \text{ m}^3 (\text{n}) / \text{kg} ; V_{\text{CO}_2 + \text{SO}_2} \cong 1,6 \text{ m}^3 (\text{n}) / \text{kg}$$

## B - Étude d'une combustion réelle

### 1°) Introduction :

Dans une combustion réelle, la réaction peut ne pas être totale ni complète. Elle peut, en outre, se faire avec un excès ou un défaut d'air (par rapport à la combustion « neutre »)

Soit  $V'_a$  le volume d'air effectivement fourni et  $V_a$  le volume théoriquement nécessaire pour la combustion « neutre ».

On pose :

$$e = \frac{V'_a - V_a}{V_a}$$

**Remarque 1 :** La combustion se fait avec un excès d'air si  $e > 0$  (on parle de combustion « oxydante »)

Dans ce cas, même si la combustion est complète, on retrouvera, dans les fumées, de l'air inutilisé de sorte que la teneur en dioxyde de carbone des fumées sera plus faible que dans la combustion « neutre ».

Si la combustion n'est pas complète, le taux de monoxyde de carbone viendra encore diminuer le taux de dioxyde de carbone.

**Remarque 2 :** La combustion se fait avec un défaut d'air si  $e < 0$  (on parle de combustion « réductrice »)

Dans ce cas, encore, la teneur en dioxyde de carbone des fumées sera plus faible que dans la combustion « neutre ». Ces fumées peuvent même contenir du dioxygène !...

**Remarque 3 :** C'est la combustion complète stœchiométrique qui est susceptible de fournir le taux de dioxyde de carbone le plus élevé, dans les fumées.

**Remarque :** On définit aussi le taux d'aération  $n$  :  $n = \frac{V'_a}{V_a} = e + 1$

L'analyse des fumées consiste, alors, à déterminer les teneurs en :

- Dioxyde de carbone et dioxyde de soufre ( $\gamma_{\text{CO}_2 + \text{SO}_2}$ )

**Remarque :** on ajoute les deux teneurs ; l'erreur commise est négligeable, en général.

- Dioxygène ( $\gamma_{\text{O}_2}$ )
- Monoxyde de carbone ( $\gamma_{\text{CO}}$ )

Pour alléger les notations, nous désignons  $\gamma_{\text{CO}_2 + \text{SO}_2}$  par  $\gamma'$ .

Le taux maximal de dioxyde de carbone sera désigné par  $\gamma'_{\text{max}}$ .

On suppose, évidemment que les volumes  $V_a$  et  $V_f$  sont connus (ce qui suppose, en fait, que la composition « neutre » du combustible soit elle-même connue).

Le volume de fumées sèches effectivement obtenu est noté  $V'_f$ .

On admet que l'on n'obtient ni carbone ni oxydes d'azote.

## 2°) Cas d'une combustion complète avec excès d'air :

Puisque la combustion est complète, nous n'avons pas de monoxyde de carbone.

De façon générale, « l'excès » d'air vaut :  $e V_a$

Et le volume  $V'_f$  s'écrit :  $V_f + e V_a$

Le taux de dioxygène, dans les fumées, s'écrit :  $\gamma_{O_2} = \frac{V_{O_2}}{V'_f}$ .

Le volume  $V_{O_2}$  représente le volume de dioxygène en excès soit environ 21 % du volume d'air en excès.

On note donc :  $\gamma_{O_2} = \frac{0,208 e V_a}{V_f + e V_a}$

On constate, alors que :  $e = \frac{V_f}{V_a} \frac{\gamma_{O_2}}{(0,208 - \gamma_{O_2})}$

Si on utilise la teneur en dioxyde de carbone et en dioxyde de soufre, on a :  $\gamma' = \frac{V_{CO_2+SO_2}}{V_f + e V_a}$  et, on en

tire :  $e = \frac{1}{V_a} \left[ \frac{V_{CO_2+SO_2}}{\gamma'} - V_f \right]$

**Conclusion** : La connaissance de la composition du combustible permet de déterminer les grandeurs  $V_a$  et  $V_f$ . L'analyse des fumées permet de mesurer le taux de dioxyde de carbone  $\gamma_{O_2}$ . On peut, alors, en déduire  $e$ .

## 3°) Cas d'une combustion avec défaut d'air :

Dans ce cas, la combustion ne peut être complète !

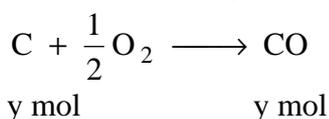
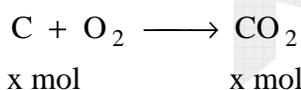
La nature des fumées varie avec l'importance du défaut d'air. Si le défaut d'air n'est pas trop important, on a un mélange de monoxyde de carbone, de dioxyde de soufre, de vapeur d'eau, de diazote...

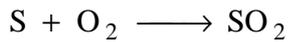
### C – Etablissement d'un diagramme d'Ostwald

Nous admettons, conformément aux observations expérimentales que l'hydrogène, les hydrocarbures et le soufre sont totalement oxydés. Par contre, seule une partie du carbone se retrouve sous forme de dioxyde de carbone car il y a formation de monoxyde de carbone.

Les fumées sèches contiennent, alors, un mélange de dioxyde de carbone, de monoxyde de carbone, de dioxyde de soufre, du dioxygène et du diazote. On admet qu'il n'y a pas de carbone formé et qu'il n'y a aucun oxyde d'azote, dans les fumées.

Les équations de combustion sont les suivantes :





a mol                      a mol

□ Taux de dioxyde de carbone et de dioxyde de soufre

Le taux maximal de dioxyde de carbone et de dioxyde de soufre est noté  $\gamma'_{\max}$  ; il serait obtenu pour un taux de monoxyde de carbone nul.

$$\gamma'_{\max} = \frac{V_{(CO_2 + SO_2)\max}}{V_f} \text{ avec } V_{(CO_2 + SO_2)\max} = (x + y + a) V_m$$

Dans ce cas, le volume de dioxygène qui serait consommé s'écrirait :  $(x + y + a) V_m$

Dans le cas d'une combustion incomplète, le taux de dioxyde de carbone et de soufre devient :

$$\gamma' = \frac{(x + a) V_m}{V'_f} \text{ soit : } \gamma' = \frac{V_f \gamma'_{\max} - V_{CO}}{V'_f}$$

puisque le volume de monoxyde de carbone obtenu s'écrit :  $V_{CO} = y V_m$

Le volume de dioxygène effectivement consommé s'écrit :  $(x + \frac{y}{2} + a) V_m$ .

Le volume de dioxygène non consommé du fait de la réaction de formation de monoxyde de carbone se retrouve dans les fumées.

Le volume de fumées sèches  $V'_f$  s'écrit, par conséquent :  $V'_f = V_f + e V_a + \frac{y}{2} V_m$

$$V'_f = V_f + e V_a + \frac{V_{CO}}{2}$$

□ Taux de dioxygène

Le dioxygène que l'on trouve, dans les fumées provient :

- D'une part, de l'excès d'air  $e V_a$
- D'autre part, du dioxygène non utilisé (voir ci-dessus)

$$V_{O_2} = 0,21 e V_a + \frac{V_{CO}}{2}$$

Le taux de dioxygène, dans les fumées, s'écrit :  $\gamma_{O_2} = \frac{0,21 e V_a + \frac{V_{CO}}{2}}{V_f + e V_a + \frac{V_{CO}}{2}}$

On obtient , par conséquent, les trois expressions suivantes :

$$\gamma_{O_2} = \frac{0,21 e V_a + \frac{V_{CO}}{2}}{V_f + e V_a + \frac{V_{CO}}{2}}$$

Relation ( A )

$$\gamma' = \frac{V_f \gamma'_{\max} - V_{CO}}{V_f + e V_a + \frac{V_{CO}}{2}}$$

Relation ( B )

$$\gamma_{CO} = \frac{V_{CO}}{V_f + e V_a + \frac{V_{CO}}{2}}$$

Relation ( C )

## Taux de dioxyde de carbone et de dioxyde de soufre

On élimine  $e$  entre les relations A et B ; on obtient :

$$\gamma' = -f(e) \gamma_{O_2} + g(e) \quad \text{relation 1}$$

$$\text{avec : } f(e) = \frac{(\gamma'_{\max} + 2) V_f + 2e V_a}{V_f + 0,79 e V_a} \quad \text{et} \quad g(e) = \frac{\gamma'_{\max} V_f + 0,42 e V_a}{V_f + 0,79 e V_a}$$

La relation 1, dans la représentation orthonormée de  $\gamma' = f(\gamma_{O_2})$ , nous donne une famille de droites ( $\Delta$ ), chaque droite correspondant à un  $e$  particulier.

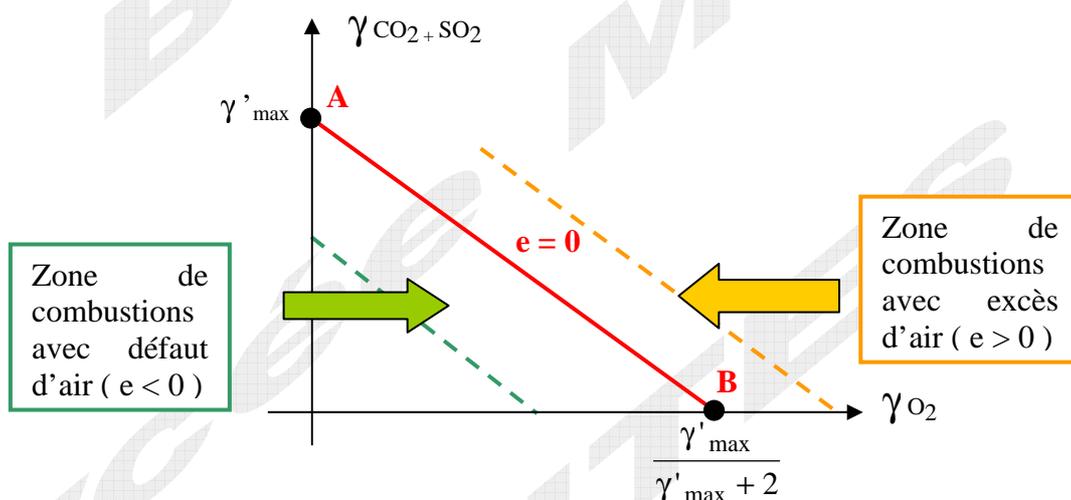
Cas particulier de la combustion « neutre » :

$$e = 0 \quad f(e=0) = \gamma'_{\max} + 2 \quad \text{et} \quad g(e=0) = \gamma'_{\max}$$

On en déduit, aussitôt, l'ordonnée à l'origine soit  $g(e=0) = \gamma'_{\max}$  et l'abscisse correspondant à

$$\gamma' = 0 \quad \text{soit : } \frac{\gamma'_{\max}}{\gamma'_{\max} + 2}.$$

La portion de droite **AB** partage le plan en deux zones.



Expérimentalement, on constate que les droites ( $\Delta$ ) sont pratiquement parallèles à la droite AB, dans la zone utilisable du diagramme (deux de ces droites sont tracées, en pointillés, sur le diagramme précédent).

### Intervention du taux de monoxyde de carbone

Éliminons  $e$  et  $V_{CO}$  entre les relations A, B et C de façon à obtenir une relation entre les trois taux.

Les calculs aboutissent aux relations suivantes :

$$\gamma' = -\frac{\gamma'_{\max}}{0,21} \gamma_{O_2} + \gamma_{CO} \left( \frac{\gamma'_{\max}}{2} \times \frac{79}{21} - 1 \right) + \gamma'_{\max}$$

A chaque valeur de  $\gamma_{CO}$  correspond une droite de pente égale à  $-\frac{\gamma'_{\max}}{0,21}$ .

On obtient une famille de droite (D) toutes parallèles entre elles (représentées en bleu sur le diagramme ci-dessous).

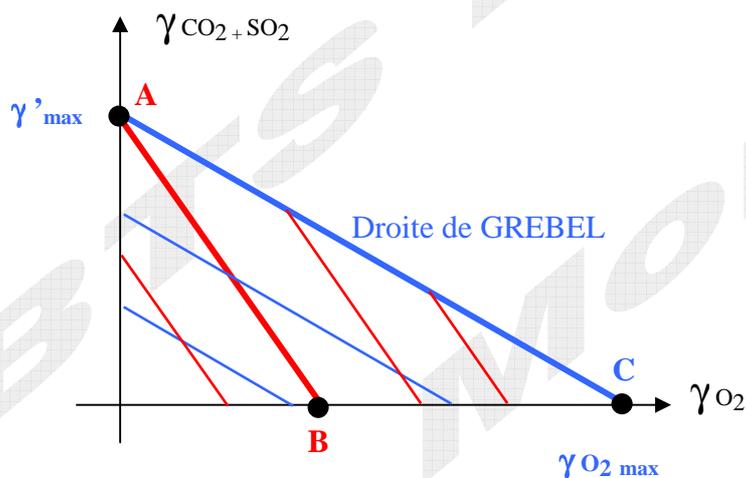
Cas particulier de la combustion oxydante complète ( pas de monoxyde de carbone) :

L'équation de cette droite particulière (droite de GREBEL) s'écrit :

$$\gamma' = -\frac{\gamma'_{\max}}{0,21} \gamma_{O_2} + \gamma'_{\max}$$

Cette droite passe par le point A (voir le diagramme) et par le point C correspondant au taux maximal de dioxygène dans les fumées (ce taux est, bien entendu, limité au taux du dioxygène dans l'air !).

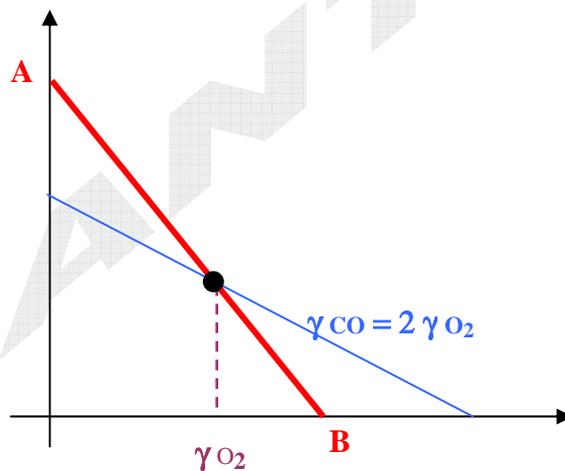
Si la combustion n'est pas complète, le taux de dioxygène dans les fumées ne peut que décroître. On limite donc notre diagramme d'Ostwald aux portions de droite situées sous la droite de GREBEL.



**Remarque 1 :** Il faudrait faire intervenir la limite inférieure d'inflammabilité sur ce diagramme.

**Remarque 2 :** En posant  $e = 0$  dans les relations A et C, on obtient :  $\gamma_{CO} = 2 \gamma_{O_2}$

On en déduit que les droites qui coupent le segment AB correspondent à des taux en monoxyde de carbone double du taux en dioxygène que l'on peut lire pour l'abscisse du point de rencontre. Comme toutes les droites (D) sont parallèles entre elles, cette remarque permet de tracer plus rapidement cette famille (D).



On peut, alors, tracer, les diagrammes d'Ostwald pour le gaz de Lacq et pour le fuel dont l'étude a été commencée.

### 1°) Diagramme d'Ostwald pour le fuel étudié :

a) Calculs de f(e) et g(e) :

$$V_f = 10,3 \text{ m}^3 (\text{n}) / \text{kg de combustible}$$

$$V_a = 11,0 \text{ m}^3 (\text{n}) / \text{kg de combustible}$$

$$V_{\text{CO}_2 + \text{SO}_2} \cong 1,6 \text{ m}^3 (\text{n}) / \text{kg} \text{ donc : } \gamma'_{\text{max}} \cong 15,6 \%$$

#### Quelques valeurs

e	- 30 %	- 20 %	- 10 %	0 %	+ 10 %	+ 20 %	+ 30 %	+ 40 %
$\gamma'$ ( en % )	2,9	7,9	12,1	15,6	18,5	21,0	23,1	25,0
$\gamma_{\text{O}_2}$ ( en % )	1,4	3,8	5,7	7,2	8,4	9,5	10,4	11,1
e	+ 50 %	+ 60 %	+ 70 %	+ 80 %	+ 90 %	+ 100 %	+ 1000 %	+ 2000 %
$\gamma'$ ( en % )	26,7	28,1	29,5	30,7	31,7	32,7	49,0	50,9
$\gamma_{\text{O}_2}$ ( en % )	11,8	12,3	12,8	13,3	13,7	14,1	19,7	20,3

#### b) Intervention du taux de monoxyde de carbone :

Le tableau qui suit récapitule les ordonnées à l'origine et les abscisses à l'origine relatives aux droites (D) parallèles à la droite de **GREBEL**.

\*Ordonnées à l'origine ( $\gamma'^*$ ) obtenues pour  $\gamma_{\text{O}_2} = 0$  :  $\gamma'^* = \gamma_{\text{CO}} \left( \frac{\gamma'_{\text{max}}}{2} \times \frac{79}{21} - 1 \right) + \gamma'_{\text{max}}$

\*Abscisses à l'origine ( $\gamma_{\text{O}_2}^*$ ) obtenues pour  $\gamma' = 0$  :  $\gamma_{\text{O}_2}^* = \gamma'^* \times \frac{0,21}{\gamma'_{\text{max}}}$

$\gamma_{\text{CO}}$	0 %	2 %	4 %	6 %	8 %	10 %	12 %	14 %	16 %	18 %
$\gamma'^*$	15,6	14,1	12,7	11,3	9,9	8,5	7,1	5,7	4,3	2,8
$\gamma_{\text{O}_2}^*$	20,9	19,0	17,1	15,2	13,3	11,4	9,5	7,6	5,7	3,8

### 2°) Diagramme d'Ostwald pour le gaz de Lacq :

a) Calculs de f(e) et g(e) :

$$V_a = 9,7 \text{ m}^3 (\text{n}) / \text{m}^3 (\text{n}) \text{ de combustible}$$

$$V_f = 8,7 \text{ m}^3 (\text{n}) / \text{kg de combustible}$$

$$V_{\text{CO}_2 + \text{SO}_2} \cong 1,0 \text{ m}^3 (\text{n}) / \text{kg} \text{ donc : } \gamma'_{\text{max}} \cong 11,8 \%$$

e	- 20 %	- 10 %	0 %	+ 10 %	+ 20 %	+ 30 %	+ 40 %	+ 50 %
$\gamma'$ ( en % )	3,0	7,8	11,8	15,1	18,0	20,4	22,5	24,4
$\gamma_{\text{O}_2}$ ( en % )	1,5	3,8	5,6	7,0	8,3	9,3	10,1	10,9
e	+ 60 %	+ 70 %	+ 80 %	+ 90 %	+ 100 %	+ 1000 %	+ 2000 %	$\infty$
$\gamma'$ ( en % )	26,1	27,5	28,8	30,0	31,1	48,8	50,8	
$\gamma_{\text{O}_2}$ ( en % )	11,5	12,1	12,6	13,1	13,5	19,6	20,3	20,9

## b) Intervention du taux de monoxyde de carbone :

Le tableau qui suit récapitule les ordonnées à l'origine et les abscisses à l'origine relatives aux droites (D) parallèles à la droite de GREBEL.

\*Ordonnées à l'origine ( $\gamma'^*$ ) obtenues pour  $\gamma_{O_2} = 0$  :  $\gamma'^* = \gamma_{CO} \left( \frac{\gamma'_{max}}{2} \times \frac{79}{21} - 1 \right) + \gamma'_{max}$

\*Abscisses à l'origine ( $\gamma_{O_2}^*$ ) obtenues pour  $\gamma' = 0$  :  $\gamma_{O_2}^* = \gamma'^* \times \frac{0,21}{\gamma'_{max}}$

$\gamma_{CO}$	0 %	2 %	4 %	6 %	8 %	10 %	12 %	14 %
$\gamma'^*$	11,8	10,2	8,7	7,1	5,6	4,0	2,5	0,9
$\gamma_{O_2}^*$	20,9	18,2	15,4	12,7	9,9	7,1	4,4	1,6

**Remarque** sur les limites d'inflammabilité du gaz de Lacq :

La combustion ne peut s'amorcer et se propager que pour une teneur en gaz de Lacq, dans le mélange initial, comprise entre  $L_I = 5,2 \%$  et  $L_S = 14,0 \%$

$L_I = 5,2 \%$  : limite inférieure d'inflammabilité

$L_S = 14,0 \%$  : limite supérieure d'inflammabilité

Ces limites varient avec la température et la pression. Les valeurs qui précèdent concernent le mélange gaz de Lacq + air, dans les C.N.T.P.

On calcule l'excès d'air correspondant à ces deux situations.

On raisonne toujours sur une mole de gaz de Lacq.

- $L_I = \frac{1 \text{ mol}}{1 \text{ mol} + e V_a + V_a}$  ; on en déduit :  $e \cong 91 \%$
- $L_S = \frac{1 \text{ mol}}{1 \text{ mol} + e V_a + V_a}$  ; on en déduit :  $e \cong -37 \%$

Le diagramme d'Ostwald s'établit, pour le méthane, comme celui concernant le fuel en tenant compte, toutefois des limites d'inflammabilité.

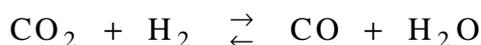
Ce diagramme présente moins d'intérêt car la combustion du gaz de Lacq s'étudie souvent à haute température.

Or, à haute température, il y a un équilibre qui s'établit entre la vapeur d'eau et le monoxyde de carbone. Le diagramme résultant est donc sensiblement modifié par rapport au diagramme d'Ostwald ; c'est le diagramme de Biard.

Nous nous contenterons de fournir le diagramme de Biard relatif au gaz de Lacq et de vérifier la position d'un point de ce diagramme afin de mieux comprendre son utilisation.

### 3°) Étude succincte du diagramme de Biard concernant le gaz de Lacq :

A haute température, l'équilibre suivant existe :



La constante de cet équilibre est notée **K** Elle ne dépend **que** de la température !

A la température  $T = 1473 \text{ K}$  ( $1200^\circ\text{C}$ ), la constante de cet équilibre vaut  $K(1200^\circ\text{C}) = 2,674$

On a donc : 
$$\frac{p_{\text{CO}} \times p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{H}_2} \times p_{\text{CO}_2}} \cong 2,674$$

Les pressions partielles ( $p_{\text{CO}}, p_{\text{CO}_2}, \dots$ ) des constituants gazeux sont proportionnelles aux quantités

de gaz de sorte que l'on peut écrire : 
$$\frac{\gamma_{\text{CO}} \times \gamma_{\text{H}_2\text{O}}}{\gamma_{\text{H}_2} \times \gamma_{\text{CO}_2}} \cong 2,674$$

Auparavant, nous avons assimilé le gaz de Lacq à un mélange comportant :

- un hydrocarbure de formule  $\text{C}_x \text{H}_y$  : 99,7 % ( $x = 1,025$ ) ( $y = 4,044$ )
- du diazote : 0,3 %

On raisonne toujours avec une mole de combustible. On choisit un défaut d'air de 30 %. On admet, de plus qu'il n'y a pas de dioxygène dans les fumées.

Les fumées contiennent :

- du monoxyde de carbone : a moles
- du dioxyde de carbone : b moles
- de la vapeur d'eau : c moles
- du dihydrogène : d moles

Remarque : On suppose, comme précédemment, que l'on n'a pas de carbone et on néglige les oxydes d'azote.

Compte tenu des notations utilisées, on écrit : 
$$\frac{a \times d}{b \times c} \cong 2,674$$

On dispose, en plus, des équations de conservation :

- conservation du carbone :  $a + b = \frac{99,7}{100} x$
- conservation de l'hydrogène :  $c + d = \frac{y}{2} \times \frac{99,7}{100}$
- conservation de l'oxygène :  $a + 2b + d = \frac{70}{100} (2x + \frac{y}{2}) \frac{99,7}{100}$

On a, alors, quatre relations indépendantes et quatre inconnues !

La résolution de ce système d'équations fournit la composition molaire des fumées :

$\text{CO}_2$ : 0,45 mol	$\text{CO}$ : 0,58 mol	$\text{H}_2\text{O}$ : 1,37 mol	$\text{H}_2$ : 0,65 mol	$\text{N}_2$ : 0,003 mol
--------------------------	------------------------	---------------------------------	-------------------------	--------------------------

A laquelle, il faut ajouter les quantités de gaz « inertes » apporté par l'air soit :

$$n_{\text{O}_2} = \frac{99,7}{100} (x + \frac{y}{4}) \frac{70}{100} \quad \text{donc : } n_{\text{inertes}} = \frac{79}{21} \times \frac{99,7}{100} (x + \frac{y}{4}) \frac{70}{100}$$

puis :  $V'_f \cong 7,03 \text{ m}^3 (n) / \text{m}^3 (n) \text{ de combustible}$

On en déduit :

➤ le taux de dioxyde de carbone dans les fumées soit :  $\gamma' = 6,4 \%$

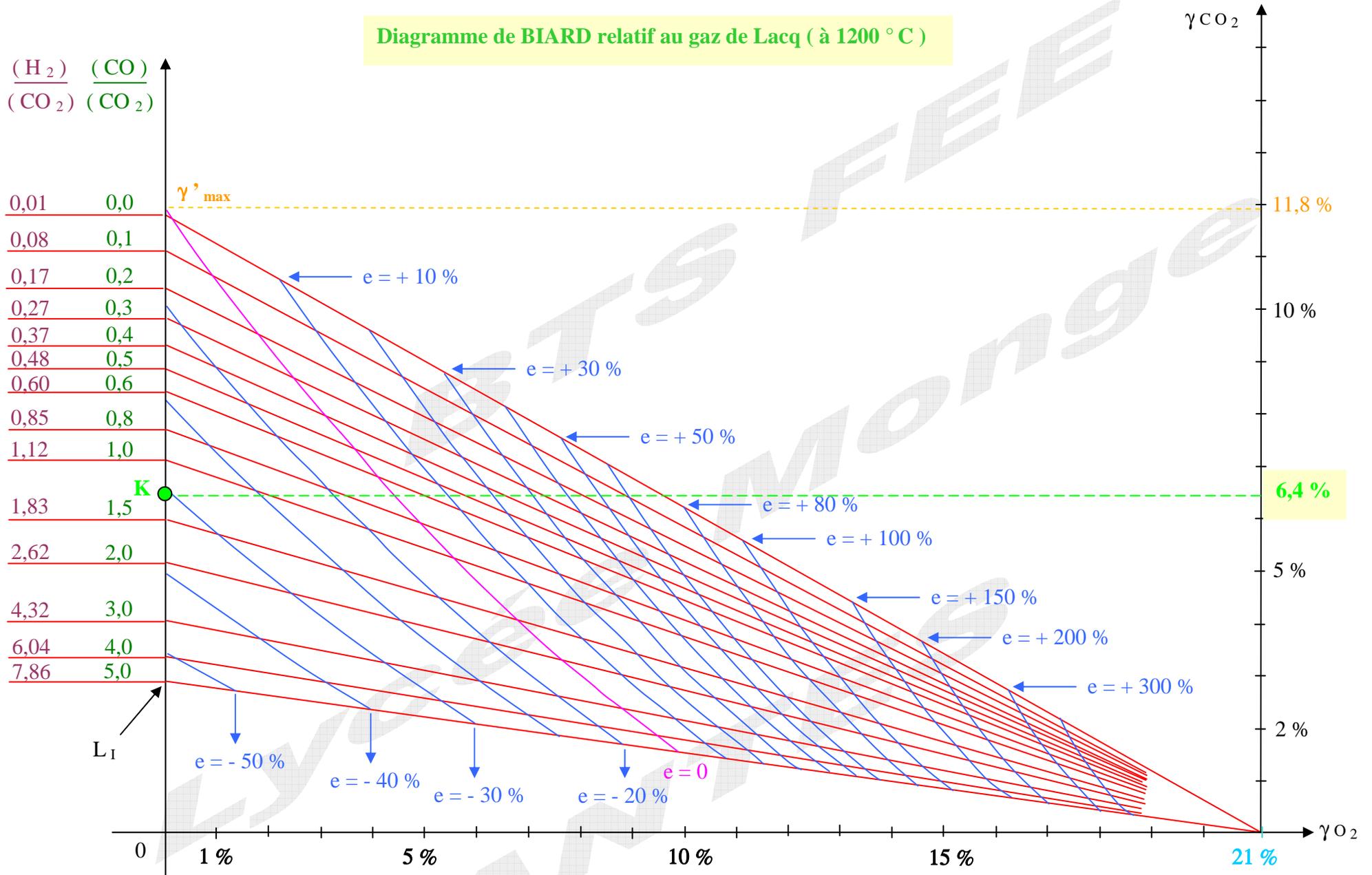
➤ le rapport  $\frac{(CO)}{(CO_2)} \cong 1,26$

➤ le rapport  $\frac{(H_2)}{(CO_2)} \cong 1,43$

Le taux de dioxygène étant nul (hypothèse), nous cherchons, sur l'axe des ordonnées le point correspondant à notre calcul ; c'est le point K.

BTS FVEE  
LYCÉE MONGE  
NANTES

Diagramme de BIARD relatif au gaz de Lacq (à 1200 °C)



# Diagramme d'Ostwald d'un fuel de composition massique :

C : 85,4 %    O : 0,4 %    H : 12,6 %    S : 1,6 %

