

Utilisation de combustibles alternatifs et de matières premières alternatives dans des fours à ciment modernes



Josef Waltisberg

dipl.Ing. ETH

Eichhaldenweg 23

CH-5113 Holderbank / Switzerland

josef@waltisberg.com



Combustibles alternatifs et matières alternatives

Combustibles alternatifs et matières premières alternatives (AFR) ou Combustibles secondaires et matières secondaires (VDZ *)

= Déchets

- **Avis général:**

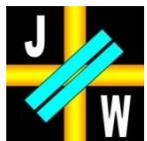
Les déchets (aussi appelés détritux, ordures) sont des matériaux inutiles. Litière désigne les déchets éliminés de manière appropriée.

- **Industrie du ciment:**

Les apports à la production de clinker proviennent de flux de déchets qui apportent de l'énergie et des matières premières.

→ **Combustibles alternatifs et matières premières alternatives** (AFR = Alternative Fuels and Raw Materials)

*) Verein Deutscher Zementwerke; Association des cimenteries allemandes

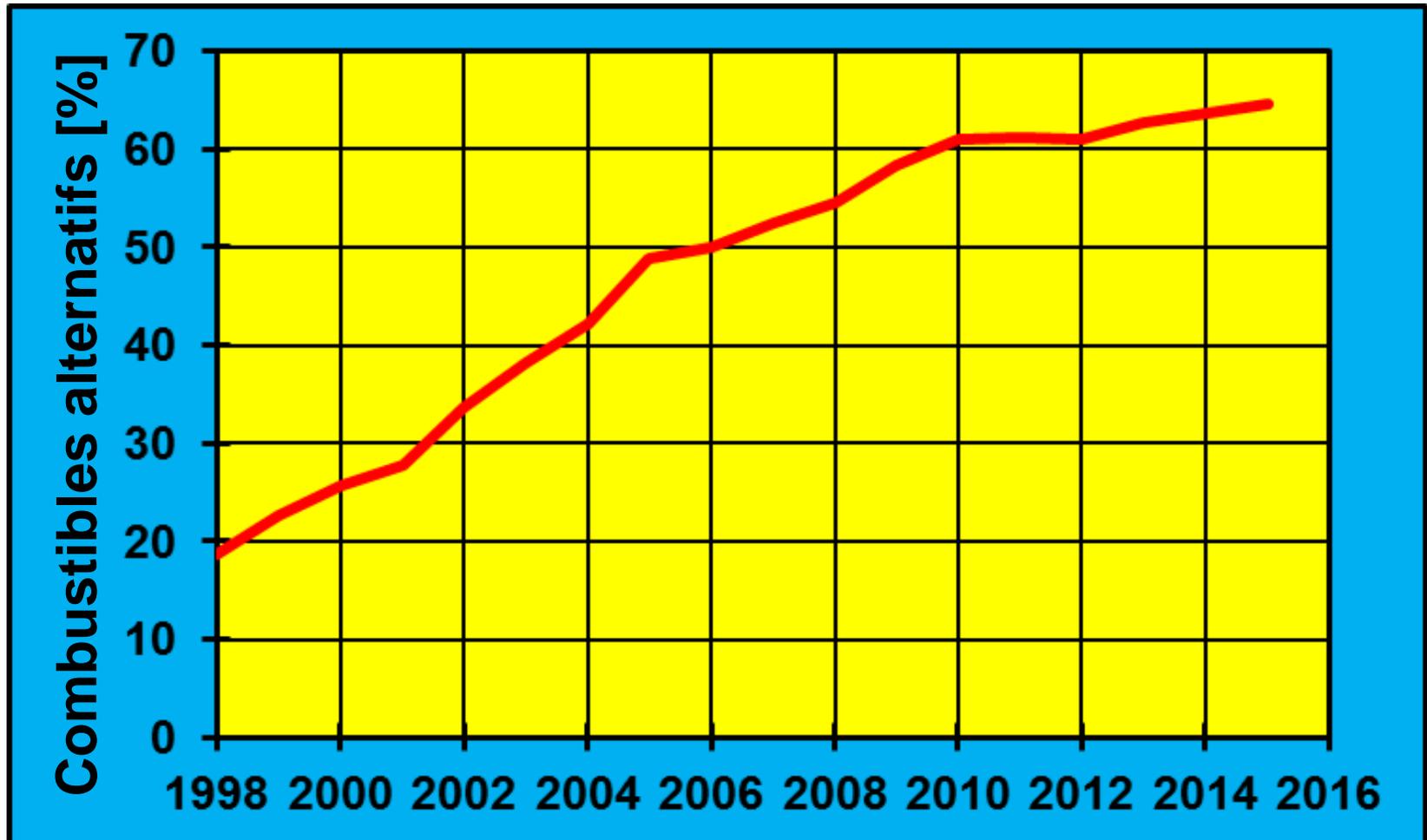


1

Les combustibles alternatifs et les matières premières alternatives dans l'industrie allemande du ciment



Augmentation de l'utilisation de combustibles alternatifs dans les usines allemandes

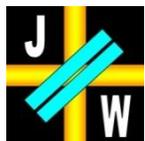


Augmentation de l'utilisation de combustibles alternatifs dans les usines allemandes

Combustible (millions de GJ/a)	2015	2014	2013	2012	2011	2010	2009	2008	2007	2006
Charbon	8.1	8.9	7.8	9.8	10.0	9.0	10.3	13.9	13.9	11.4
Lignite	18.7	19.5	19.7	22.3	23.7	20.7	20.0	23.1	25.2	27.6
Petcoke	3.4	4.1	3.2	3.2	2.1	3.3	4.4	4.9	5.6	4.4
Fiouil lourd	0.3	0.2	0.2	0.3	0.4	0.6	1.1	0.9	2.1	1.9
Mazout EL (huile légère)	0.7	0.7	1.2	0.7	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2
Gaz naturel	0.4	0.5	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1	0.3	0.1	0.3
Autres combustibles fossils	0.3	0.0	1.4	0.1	0.1	0.4	0.6	0.4	0.3	0.3
TOTAL DES COMBUSTIBLE FOSSILS	31.9	33.9	33.8	36.6	36.7	34.4	36.7	43.7	47.3	46.0
TOTAL ALTERNATIF	58.2	58.8	56.6	57.3	57.7	53.7	51.5	52.1	52.2	46.1
TOTAL	90.1	92.5	90.4	93.9	94.4	88.1	88.2	95.8	99.5	92.1

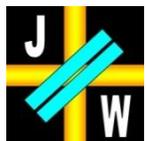
Combustible Alternative [%]	64.6	63.6	62.6	61.0	61.1	61.0	58.4	54.4	52.5	50.1
------------------------------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------

Clinker 1000 [t/a]	23'355	23'771	23'127	24'581	24'775	22'996	23'232	24'366	26'992	24'921
Spec. Chaleur [MJ/kg Cli]	3.86	3.89	3.91	3.82	3.81	3.83	3.80	3.93	3.69	3.70



Combustibles alternatifs en Allemagne

Combustibles alternatifs en Allemagne (CV = valeur calorifique moyenne)	1000 [t/a] 2014	1000 [t/a] 2015	CV [MJ/kg] 2015
Pneus	286	221	28
Huile usée	66	24	31
Fractions de déchets industriels et commerciaux			
- pâtes, papier et carton	63	93	4
- Plastiques	665	664	22
- Autres	1'138	1'127	21
Farine de viande et d'os et graisse animale	151	149	18
Fractions mixtes de déchets municipaux	308	317	16
Déchets de bois	3	0	13
Solvants	96	145	24
Les boues d'épuration	348/382	382	3
D'autres comme la boue d'huile, les résidus de distillation organiques	60	65	11



Matières premières alternatives en Allemagne

Seulement 2 à 3% [%]
remplacement
des matières premières
«naturelles»

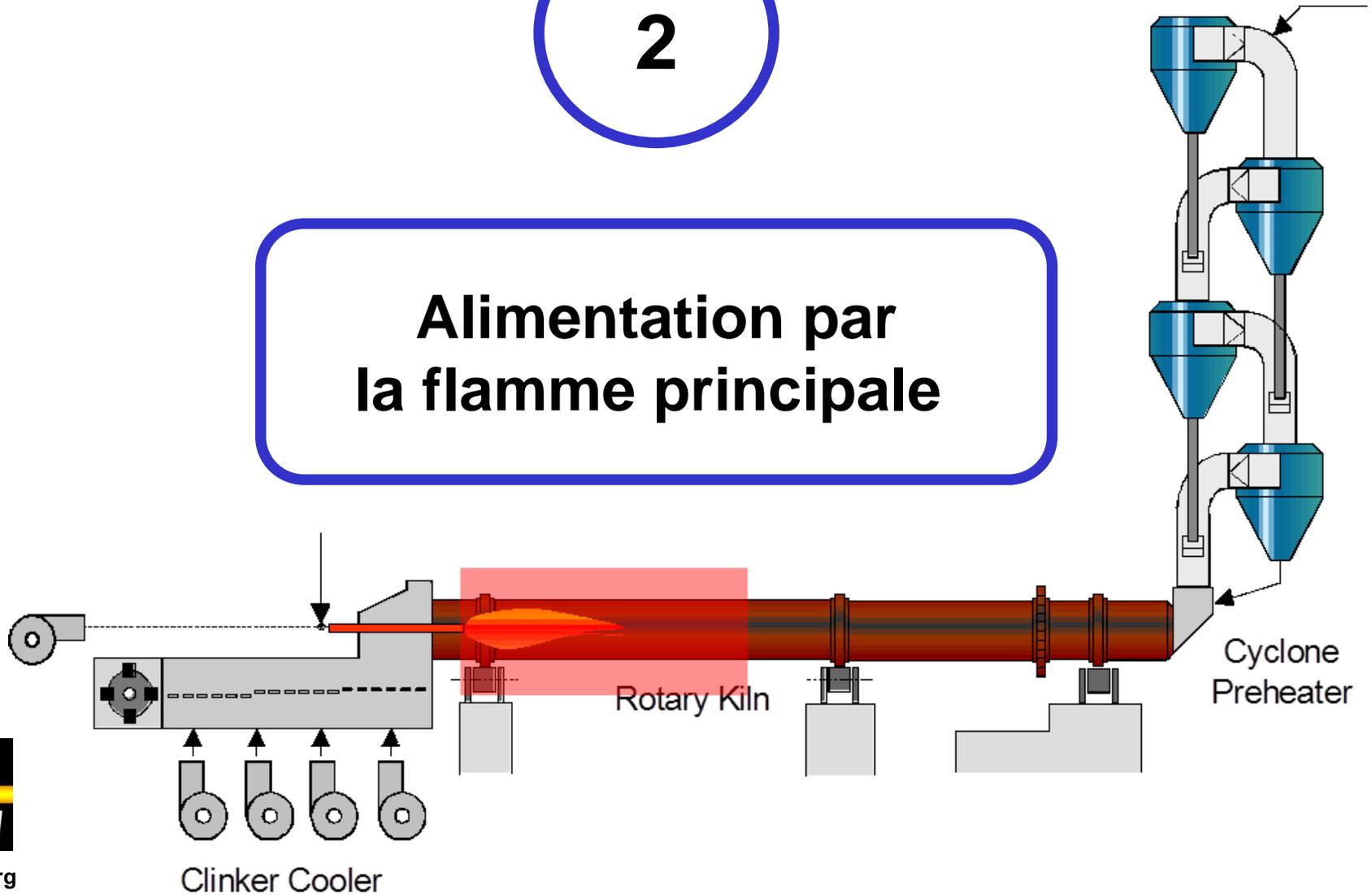
Liste incomplète
Non pris en compte est le
gypse pour la production de
ciment

Matière premières alternatives en Allemagne	1000 [t/a] 2014	1000 [t/a] 2015
Groupe Ca - Boues de chaux de l'eau potable et traitement des eaux usées - Chaux hydratée - Granulés de béton moussé - Fluorure de calcium	75	81
Groupe Si - sable de fonderie usagé	174	178
Groupe Fe - Pyrite rôtie - Mélanges d'oxyde de fer / de cendres volantes - La poussière des aciéries -	103	95
Groupe Si-Al-Fe - Cendres volantes - Huiles de schiste - Trass - Autres (Résidus de papier, cendres provenant de l'incinération processus, résidus minéraux, sols contaminés par le pétrole)	313 118 131 46	341 113 32 58



2

Alimentation par la flamme principale

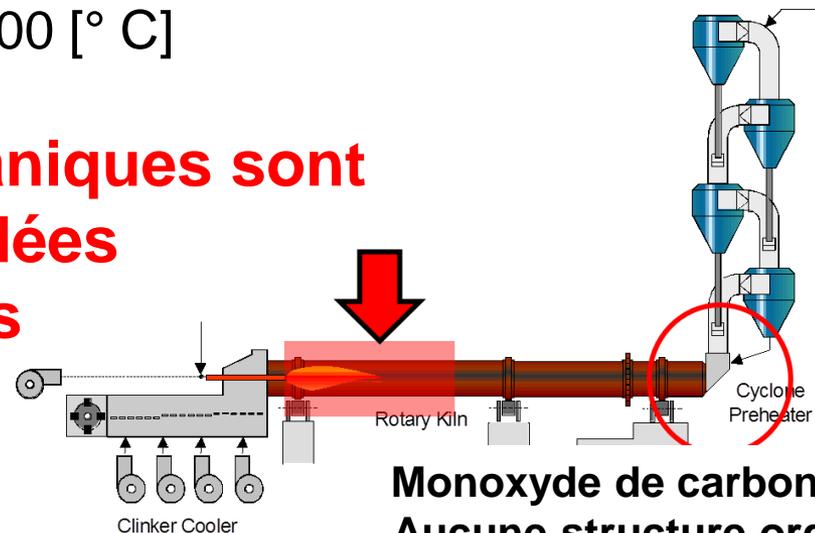


Combustion dans la flamme principale

- En raison de la qualité du clinker, le processus de combustion dans la zone de la flamme (ou zone de cuisson) doit être effectué avec un excès d'air
- Température de flamme maximale: ~ 2000 [° C]
→ Combustibles de faible ou moyenne valeur calorifique réduisent la température de flamme
- La température du gaz dans la section du four rotatif est au moins 6 à 8 [sec] au-dessus de 1200 [° C]

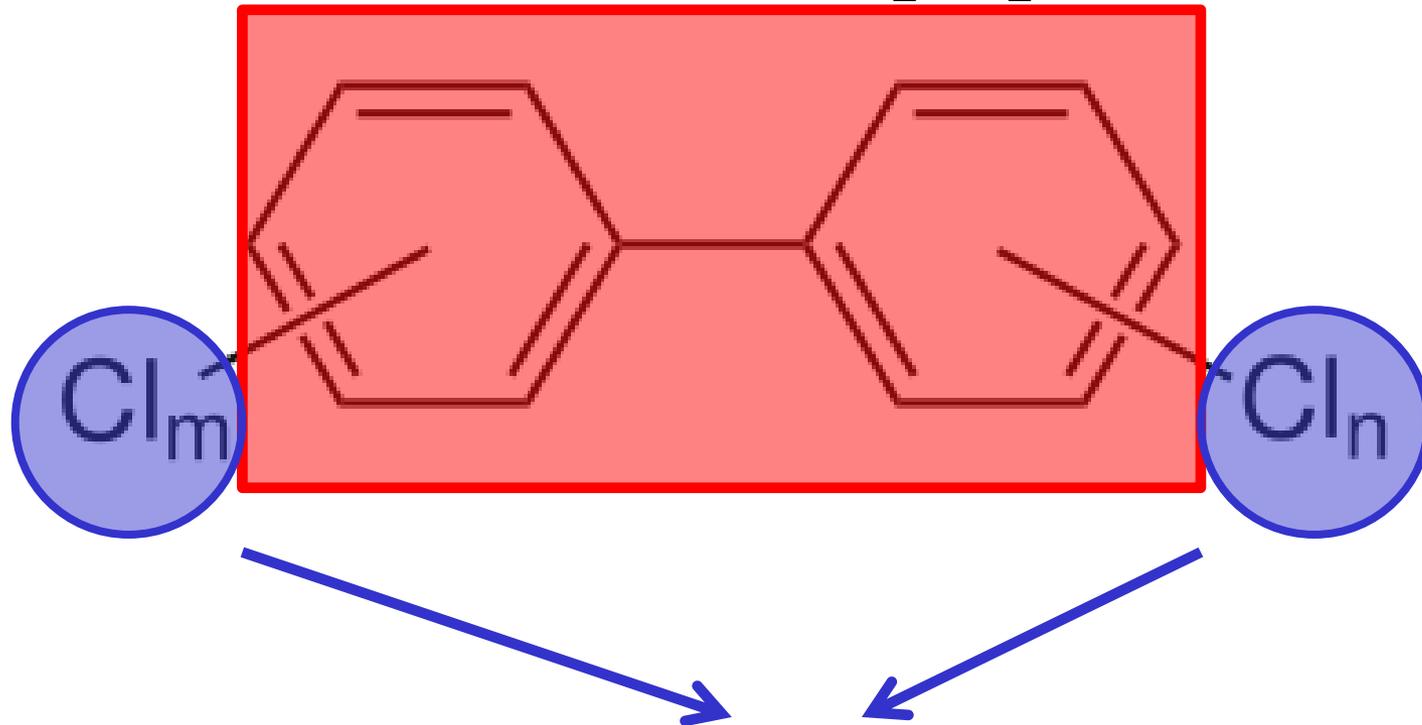
→ Les structures organiques sont complètement oxydées

→ Structures chlorées
Cl entre dans le cycle du chlore



Combustion de PCB dans la flamme principale

Oxydation en CO_2 , H_2O

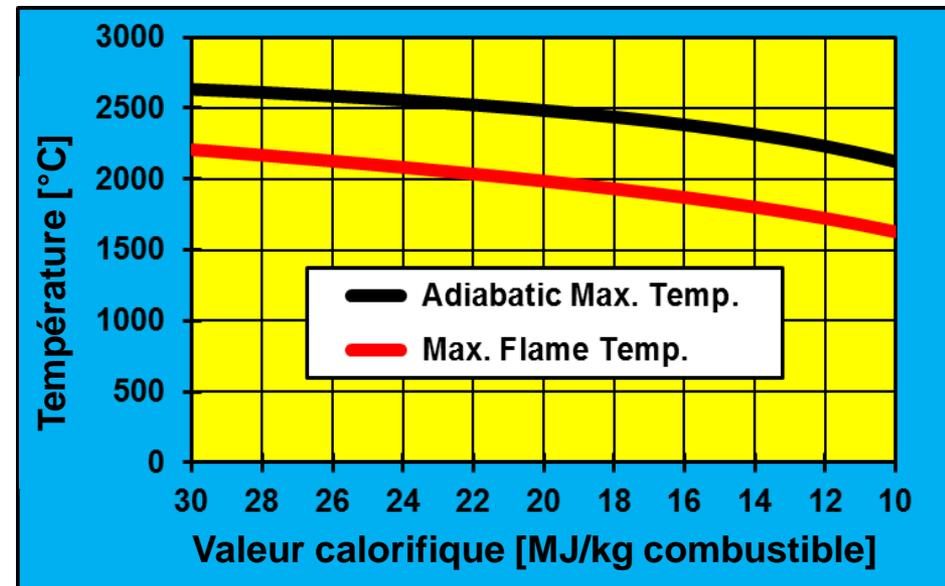


Entre dans l'atmosphère gazeuse de la partie rotative
Conséquences voir présentation «Eléments volatils
(Cl, S, Alkalis) dans les systèmes de fours à ciment»

Température de la flamme

- Combustibles à moyenne ou faible valeur calorifique (VC) réduisent la température de la flamme et influence supplémentaire des cendres et de l'eau
- Figure montre un calcul théorique pour des combustibles solides
Noir: adiabatique température maximale = température atteinte dans une flamme sans dissipation de chaleur
Rouge: température maximale estimée réelle de la flamme

- **Conséquence:**
Alimentation avec de combustible de qualité moyenne ou faible est limitée



Moyenne:

$23 \text{ [MJ/kg]} \geq \text{VC} \geq 16 \text{ [MJ/kg]}$

Faible: $\text{VC} < 16 \text{ [MJ/kg]}$

Combustibles alternatifs solides (AF)

La quantité de combustibles alternatifs solides (AF) brûlés par la flamme principale dépend de:

- Type de brûleur (taille des tuyaux AF, canal d'air primaire, diamètre global du brûleur, ...)

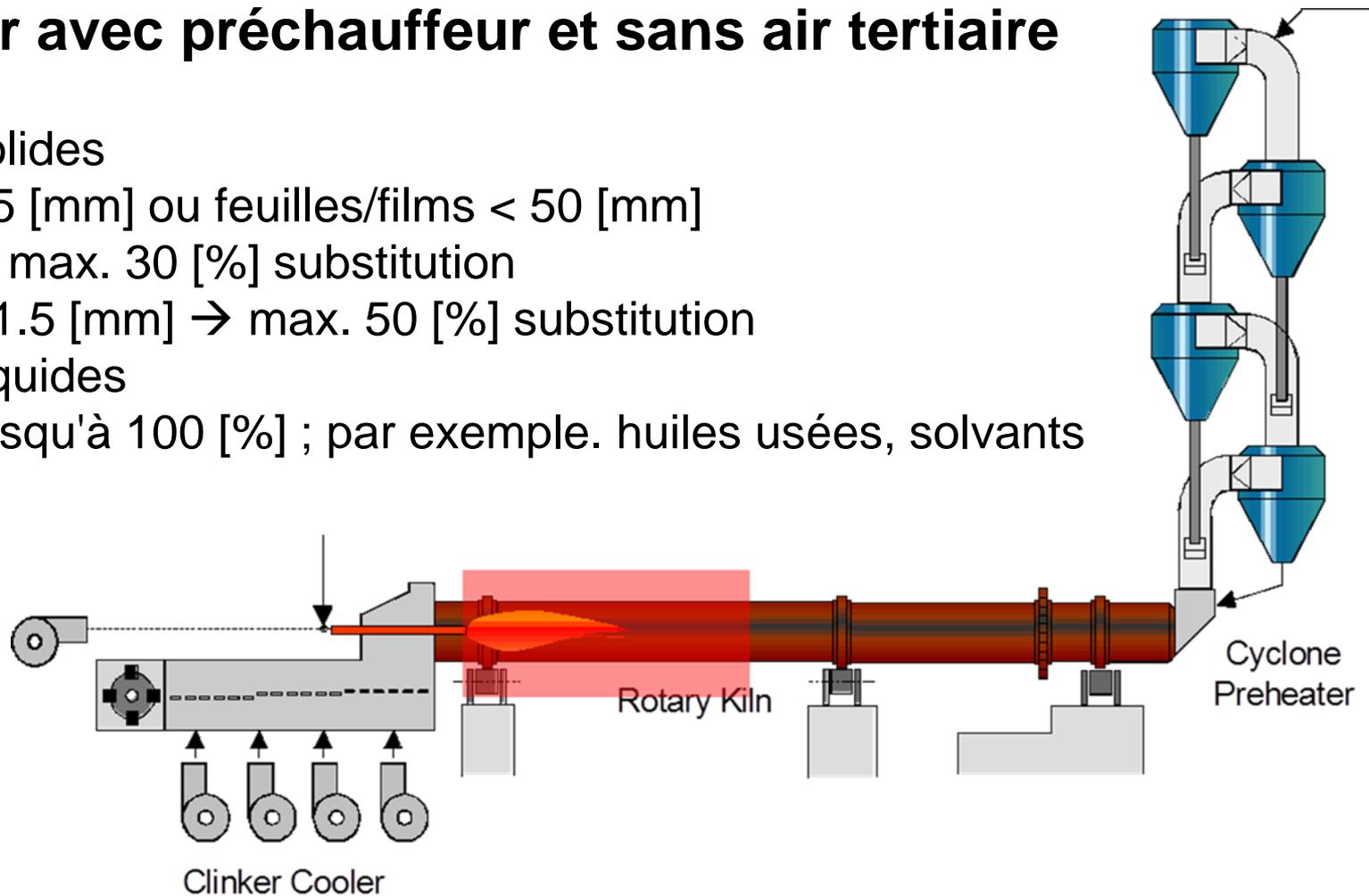


- Type de solide AF
Des particules grossières ou une quantité de combustible, qui est trop grande, peuvent brûler en partie sur le lit de clinker et créerait une mauvaise qualité de clinker («clinker brun»)
- Remarque: Les pesticides et les fongicides sous forme solide peuvent devenir problématiques si le brûleur n'a pas de canal séparé pour les combustibles solides alternatifs.

Taux de substitution

Four avec préchauffeur et sans air tertiaire

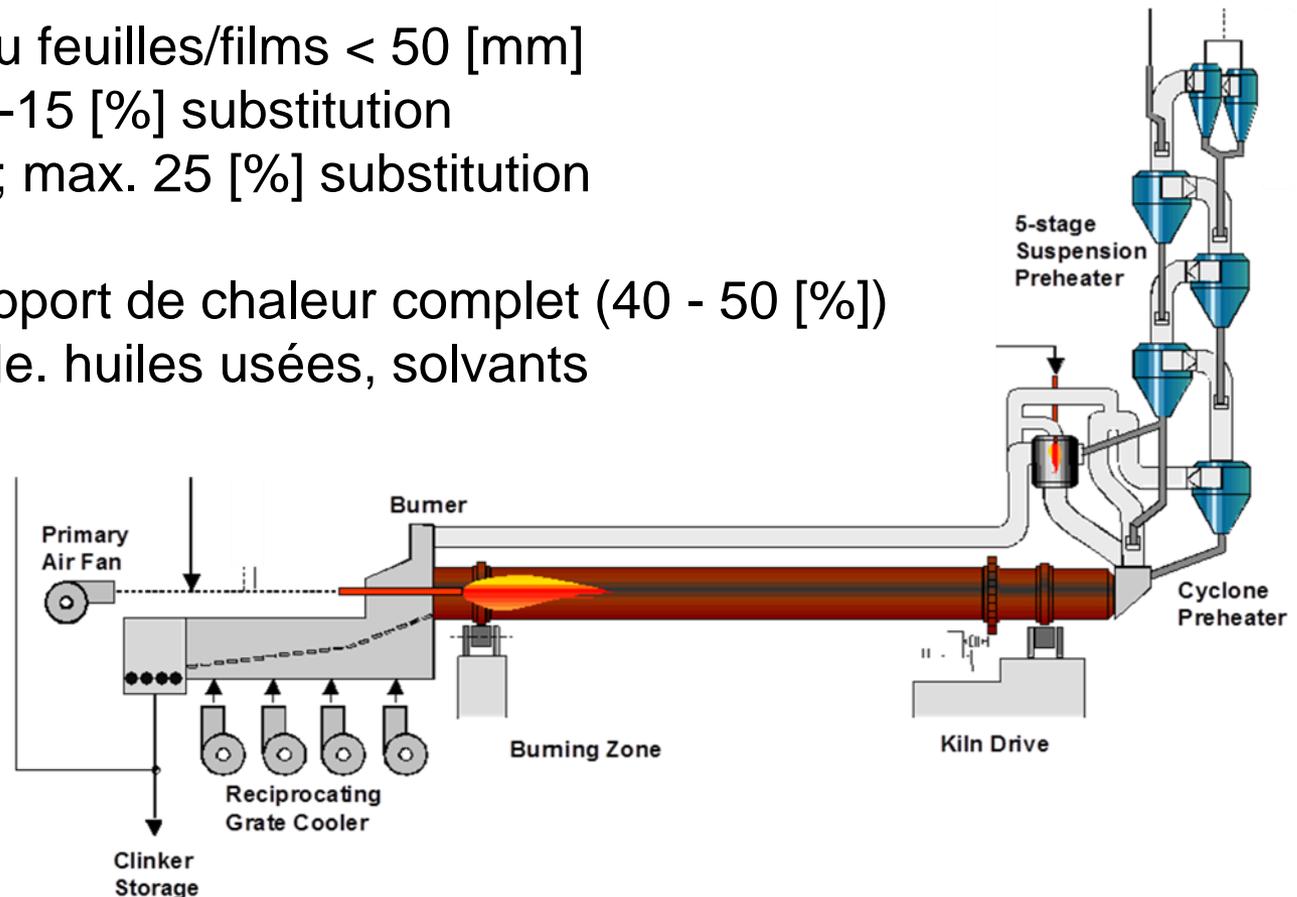
- Solides
< 5 [mm] ou feuilles/films < 50 [mm]
→ max. 30 [%] substitution
< 1.5 [mm] → max. 50 [%] substitution
- Liquides
Jusqu'à 100 [%] ; par exemple. huiles usées, solvants



Taux de substitution

Four avec préchauffeur et avec air tertiaire (environ 40 - 60 [%] de combustion secondaire)

- Solides
< 5 [mm] ou feuilles/films < 50 [mm]
→ max. 10-15 [%] substitution
< 1.5 [mm]; max. 25 [%] substitution
- Liquide:
Jusqu'à l'apport de chaleur complet (40 - 50 [%])
par exemple. huiles usées, solvants

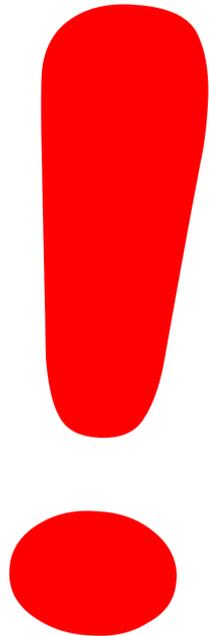


Combustibles alternatifs avec composés critiques

Composés critiques seulement à la flamme principale

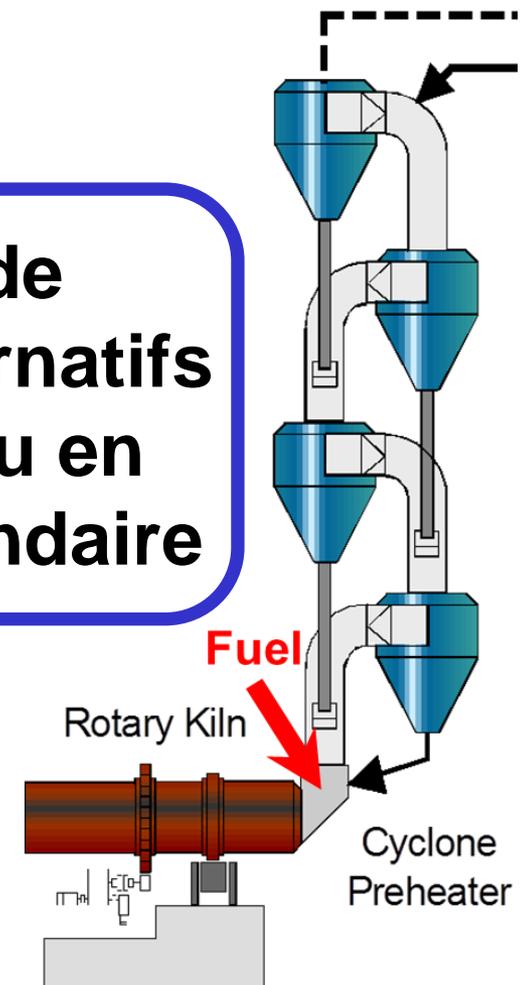
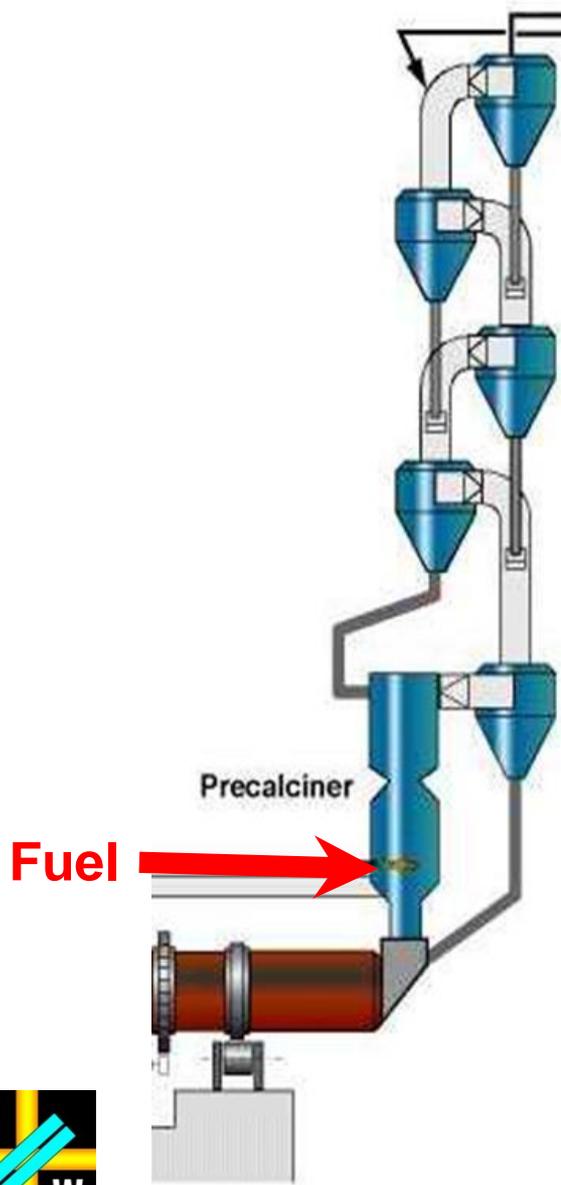
Les combustibles alternatifs avec des composés organiques critiques *) ne doivent être alimentés que par la flamme principale car la température élevée de la flamme et le long temps de rétention permettent une oxydation complète de ces substances.

*) Composés critique = biphényle, précurseur des dioxines (par exemple phénol, benzènes chlorés, ...), pesticides, fongicides, substances de l'industrie chimique, ...



3

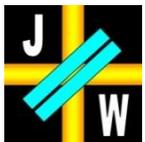
Alimentation de combustibles alternatifs en calcinateur ou en combustion secondaire



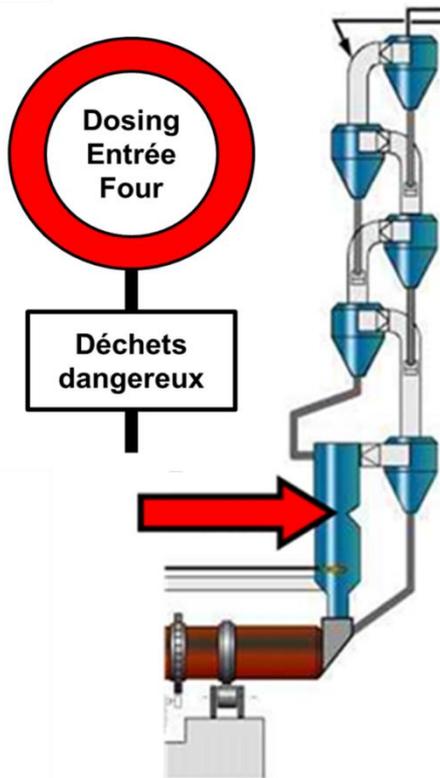
Règlement sur l'utilisation de déchets

Directive 2000/76/CE du parlement européen et du conseil du 4 décembre 2000 sur l'incinération des déchets

- Les installations de coïncinération sont conçues, équipées, construites et exploitées de manière à ce que, même dans les conditions les plus défavorables, les gaz résultant de la coïncinération de déchets soient portés, d'une façon contrôlée et homogène à une température de **850 [°C] pendant deux secondes.**
- **Problème à satisfaire à cette exigence avec les mises à la cuisson secondaire.**
Avec les calcinateurs, cette exigence peut (en grande partie) être respecter.



Règlement: déchets dangereux

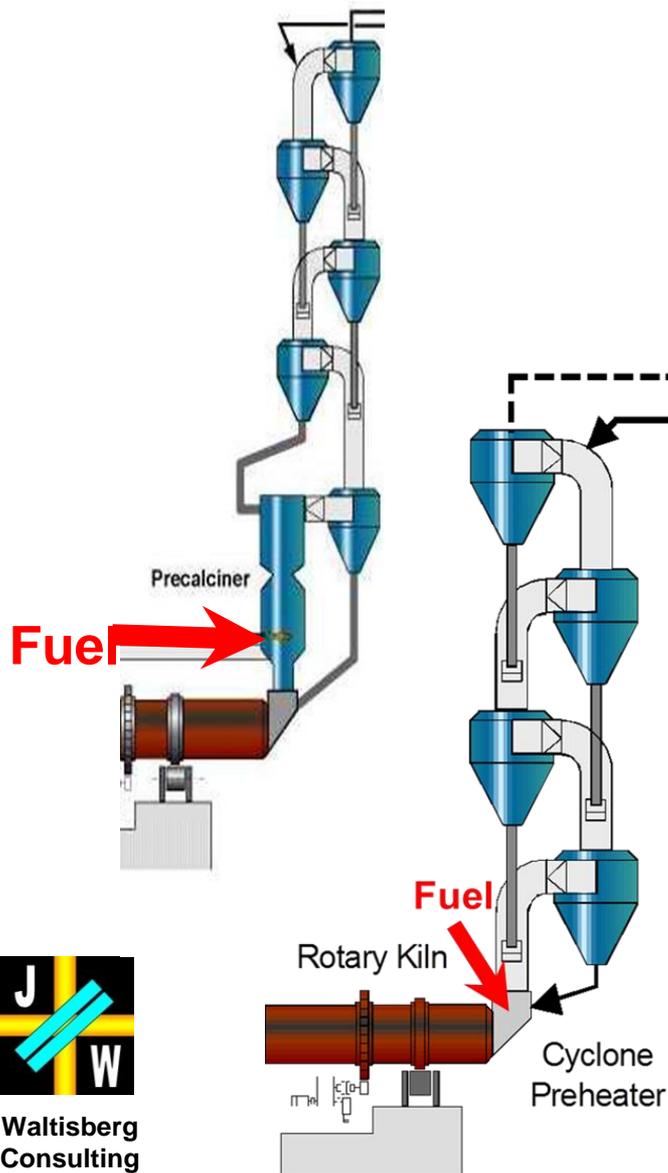


- Si les déchets dangereux ayant une teneur de plus de 1 [%] des substances organiques halogénés, surexprimés comme chlore, sont co-incinérés, la température doit être amenée à **1'100 [°C]**.
- En général dans les cuissons secondaires ainsi que dans les calcinateurs ce condition ne peut pas être satisfait .

Conséquence:

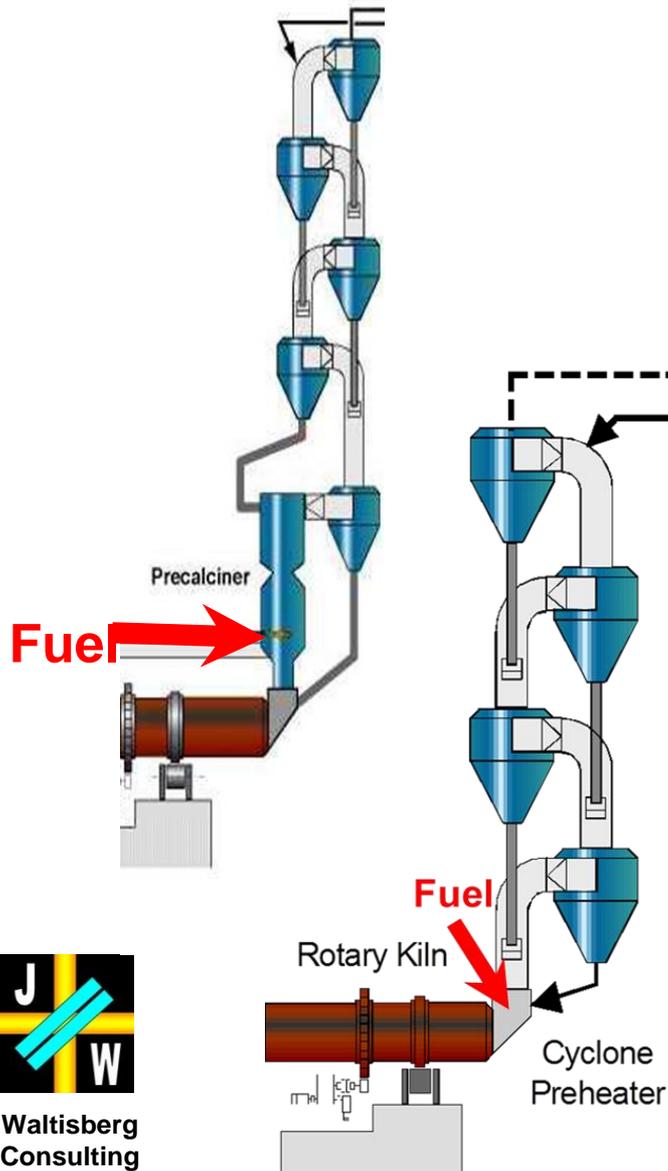
«Pas de déchets dangereux en arrière du four!»

Calcinateur ou combustion secondaire



- Pendant le chauffage, les matières premières naturelles expulsent dans la gamme de 200 et environ 600 [° C] de composés organiques volatils (COV), BETX (benzène, éthylbenzène, toluène, xylène), ... La composition des composés émis peut varier normalement entre «négligeable» et 80 [mgC/m³]
- Ces émissions sont superposées par les émissions provenant de la combustion secondaire (calcinateur ou cuisson secondaire).

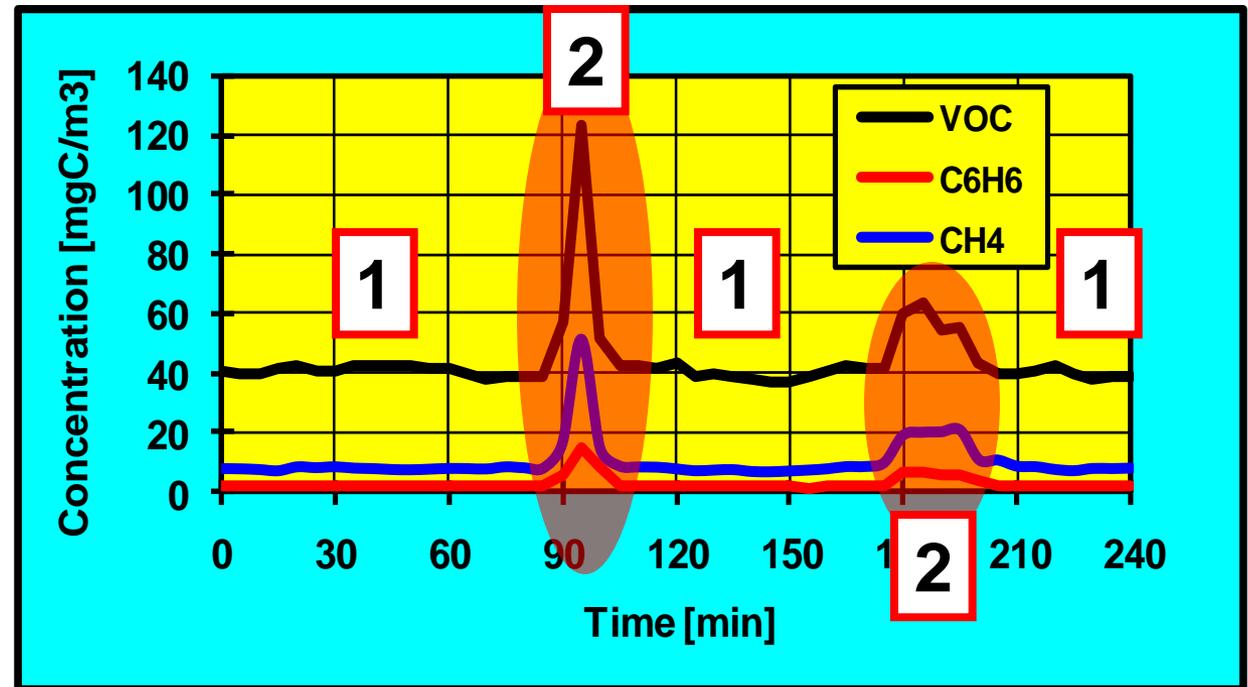
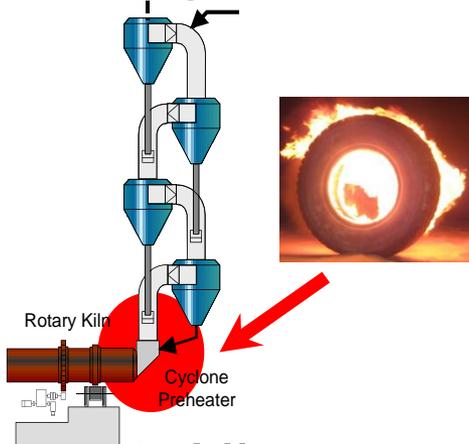
Calcinateur ou combustion secondaire



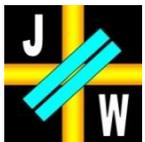
- Avec alimentation «normale» -> aucune ou faible influence sur l'émission organique
- **Danger:**
Combustible excès et / ou insuffisance de la distribution d'air
Émissions de CO et d'émissions organiques provenant de la cuisson secondaire ou du calcinateur (chambre de calcination)
- «Suralimentation» est souvent le problème
- Émission clé: **CO**

a.) Test d'excès de pneu (combustion secondaire)

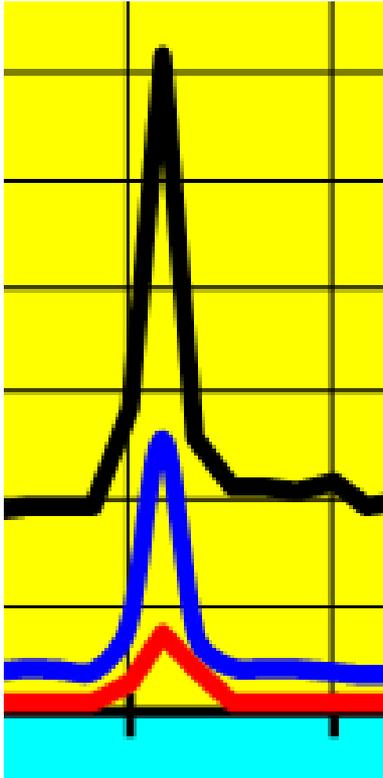
Excès de combustible
«produit» avec
des pneus



- 1: Niveau normal de COV; Typique: «composition de farine crue» → 32 [%] CH₄, 28 [%] C₂H_x, 31 [%] C₃H_x, 5 [%] C₆H₆, and others
- 2: Augmentation de certains composés, en particulier le méthane (CH₄) et le benzène and benzene (C₆H₆)



a.) Test d'excès de pneu (cuisson secondaire)



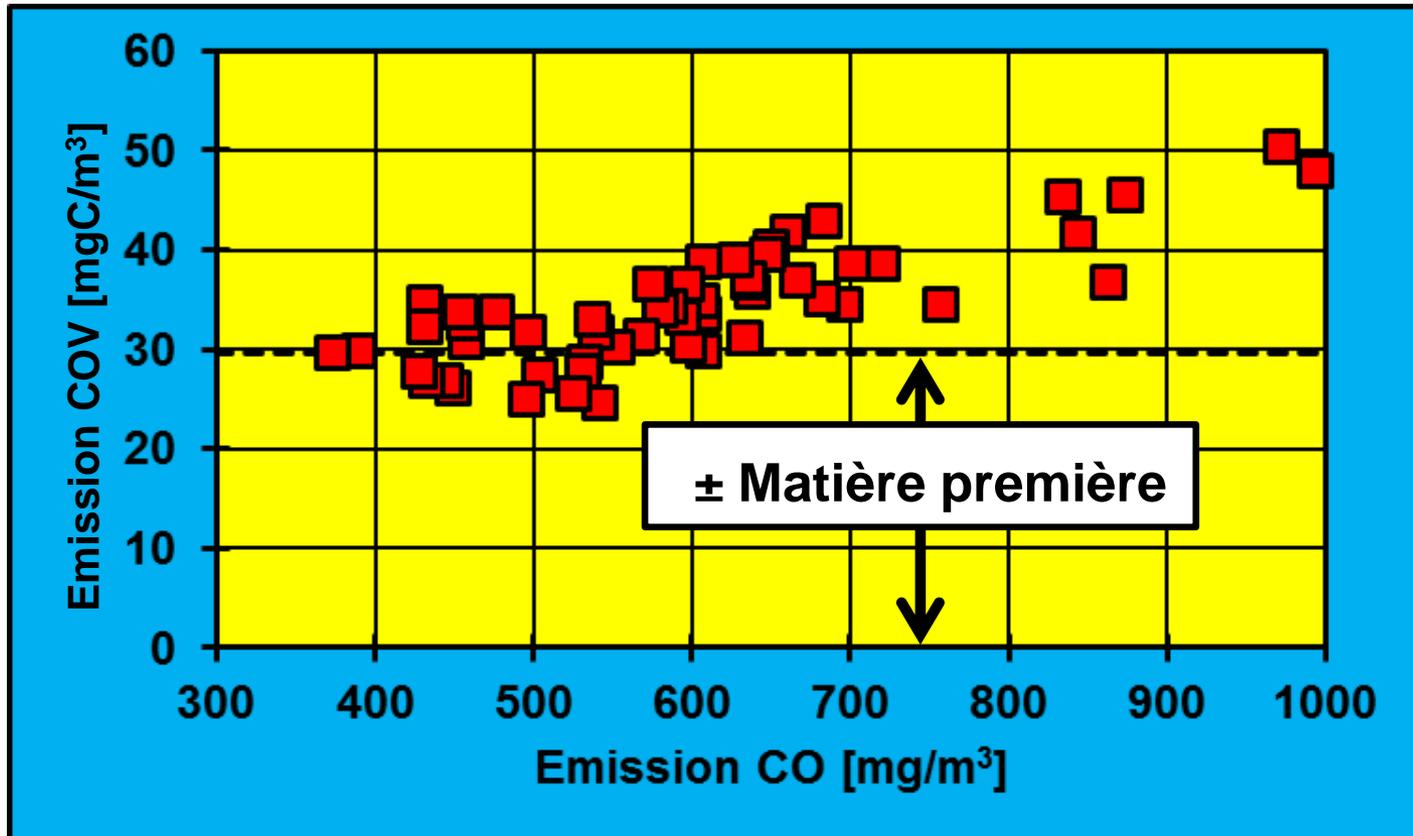
Augmentation de COV produite par l'excès de combustible (pneus)

Méthane	CH ₄	50 - 60
Composées C ₂	C ₂ H _x	10 - 20
Composées C ₃	C ₃ H _x	< 5
Composées C ₄	C ₄ H _x	< 2
Benzène	C ₆ H ₆	15 - 25
Aromates		< 5

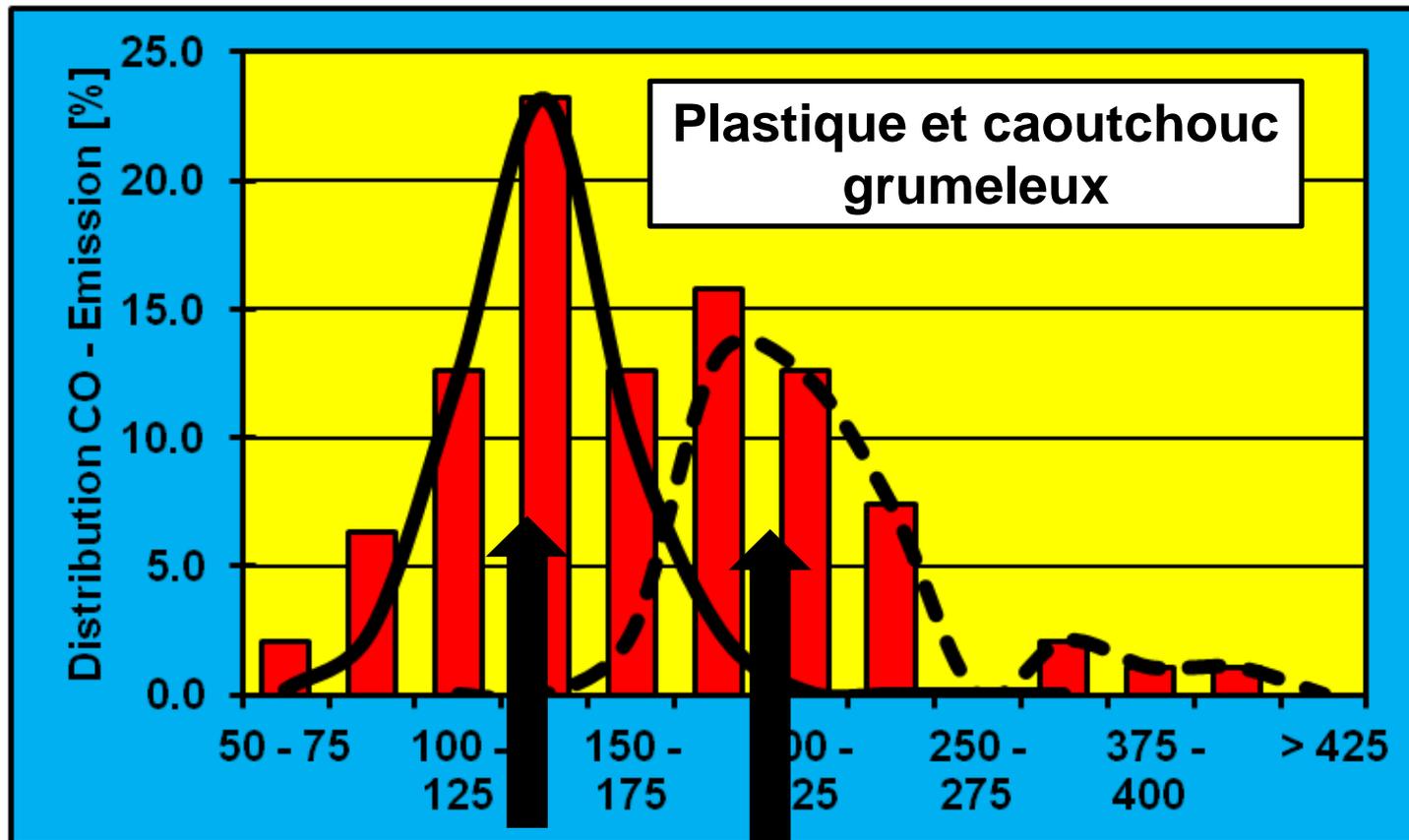
b.) Calcinateur - Corrélation entre COV et CO

Influence de Calcinateur:

Charbon avec des fractions mixtes de déchets municipaux, carton, etc.



c.) Calcinateur avec zone de réduction



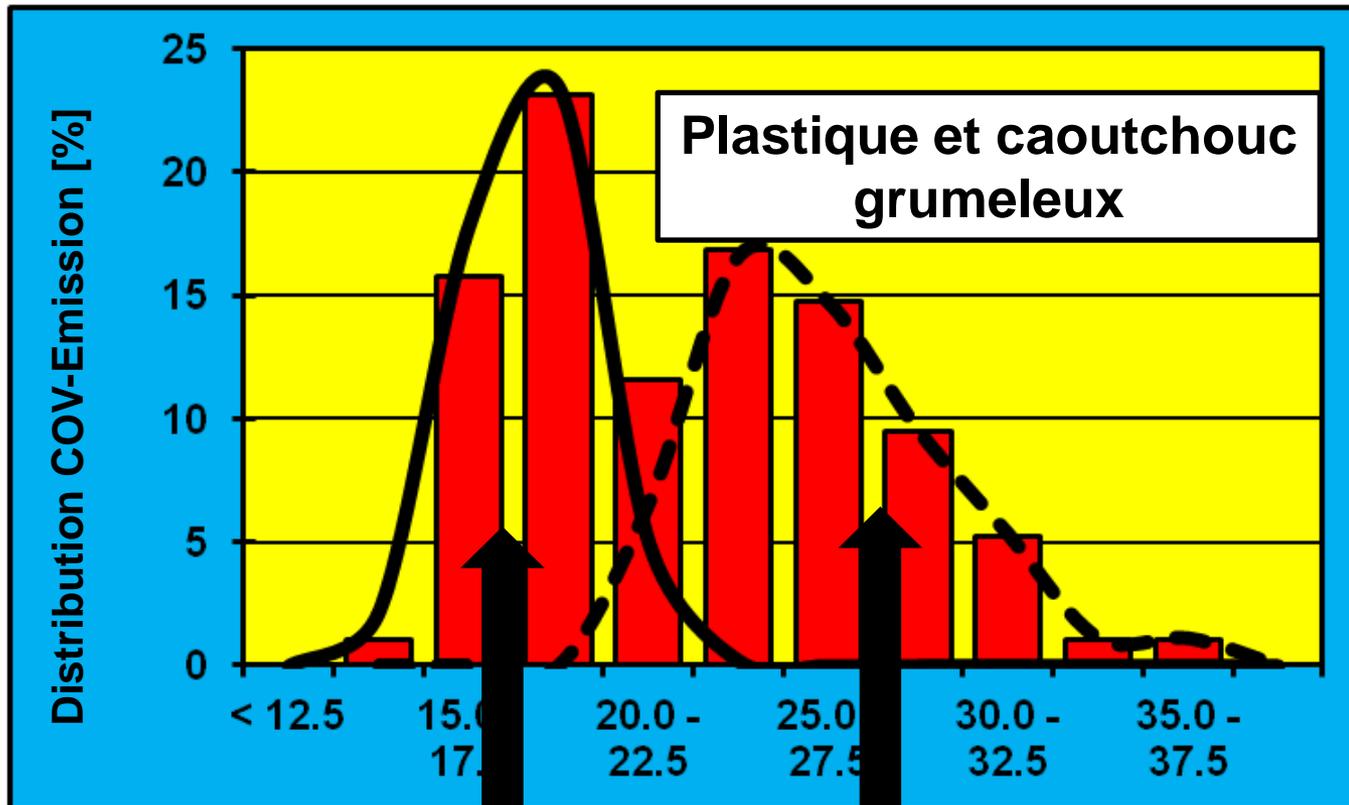
CO de la matière première
Moyenne ~ 130 [mg/m³]

Calcinateur:

Moyenne ~ (230 – 130) [mg/m³]



c.) Calcinateur avec zone de réduction



COV de la matière première
Moyenne ~ 18 [mgC/m³]

Calcinateur:

Moyenne ~ (26 - 18) [mgC/m³]



Résumé: Calcinateur / Combustion secondaire

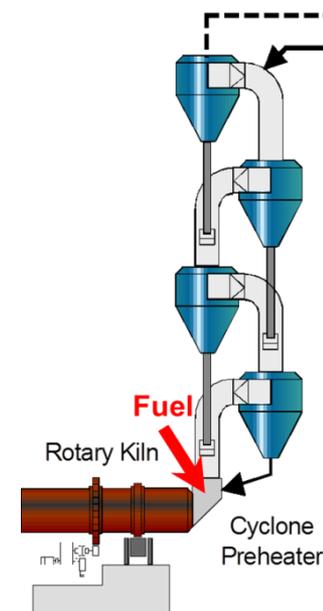
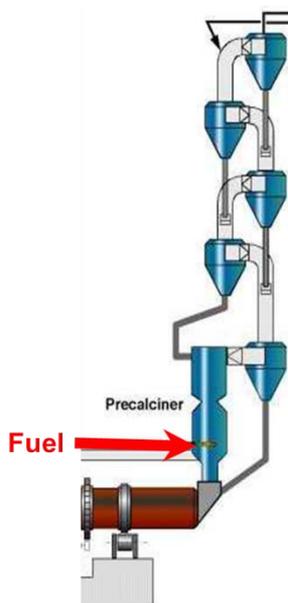
Problème principal: Conditions réductrice → Émissions de monoxyde de carbone et de composés organiques

Motifs: «Suralimentation» (surtout les cuisson secondaire); atmosphère réductrice locale (par exemple, autour de combustibles volumineux); mauvaise répartition de l'air dans les chambres de calcination; atmosphère partiellement réductrice, etc..

Les fortes émissions de monoxyde de carbone et de composés organiques doivent être évitées par des mesures appropriées

Souvent, cette combustion n'est pas assez contrôlée.

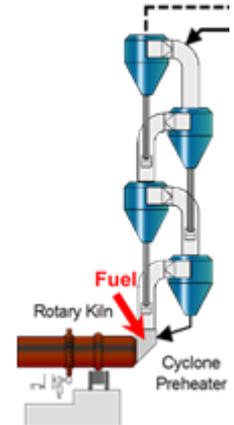
Résultat: Augmentation des émissions de CO, de composés organiques et de dioxyde de soufre (volatilisation du soufre).



Substitution des combustibles conventionnels

Four avec préchauffeur sans air tertiaire

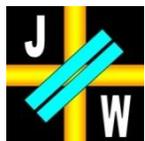
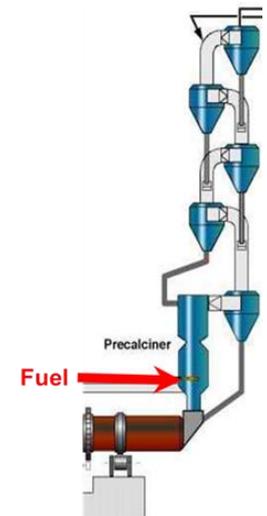
- Combustion secondaire
 - ▶ Solides
Morceaux (par exemple des pneus); max. 15 [%] de substitution
< 50 [mm]; max. 20 [%] substitution
 - ▶ Liquides: 20 - 25 [%]



Four avec préchauffage et air tertiaire

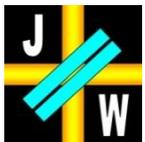
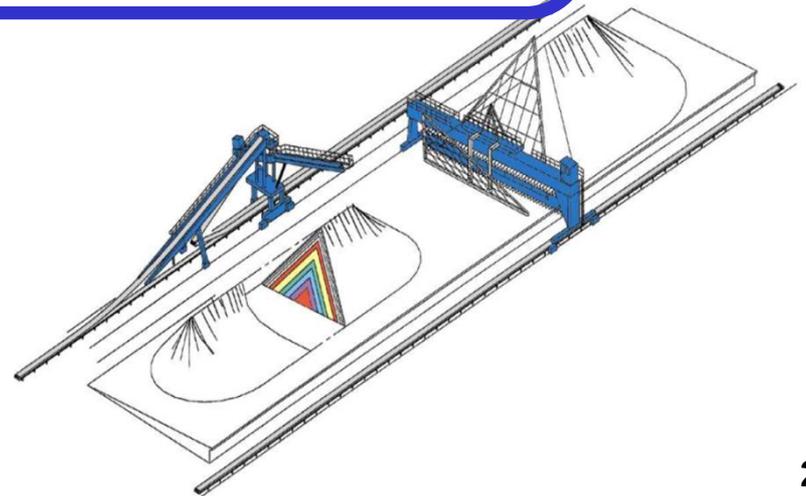
(environ 40-60 [%] de l'air total par air tertiaire)

- Cuisson Chambre de precalcination
 - ▶ Solides:
Morceaux (par exemple des pneus); max. 10 [%] de substitution
< 50 [mm], max. 30 [%] substitution
 - ▶ Liquides: Jusqu'à l'apport de la chaleur totale (40 - 60 [%])

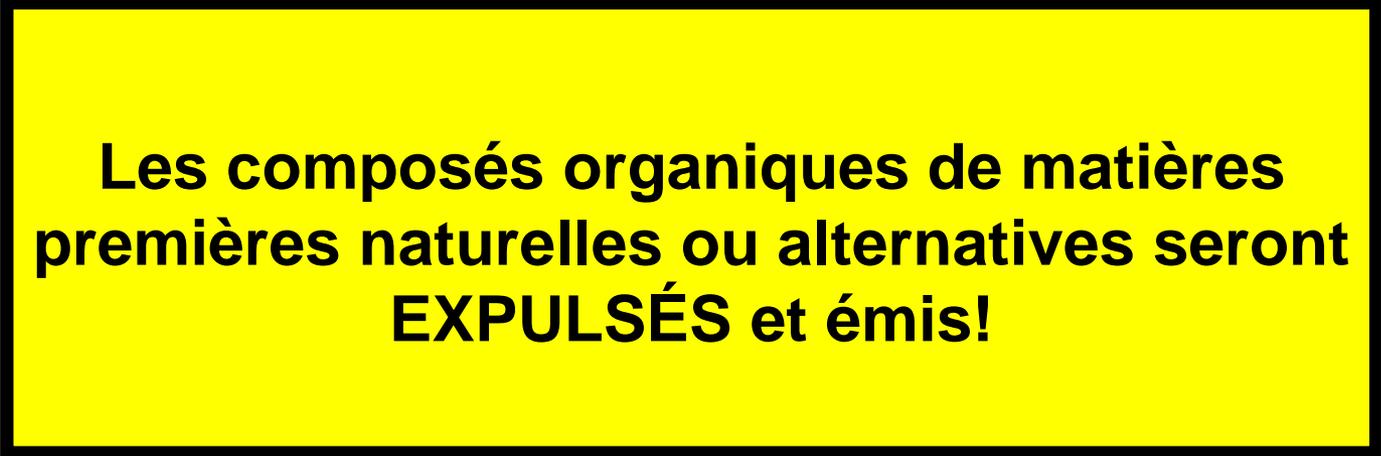
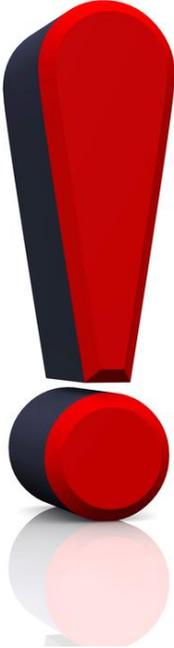


4

**Alimentation de composants de
matières premières alternatifs au
mélange de matières premières**



Expulsion et pas de combustion



Les composés organiques de matières premières naturelles ou alternatives seront **EXPULSÉS et émis!**

La matière première est probablement le point de l'alimentation d'un four avec les plus grands risques. Généralement, cette alimentation est trop peu contrôlée.

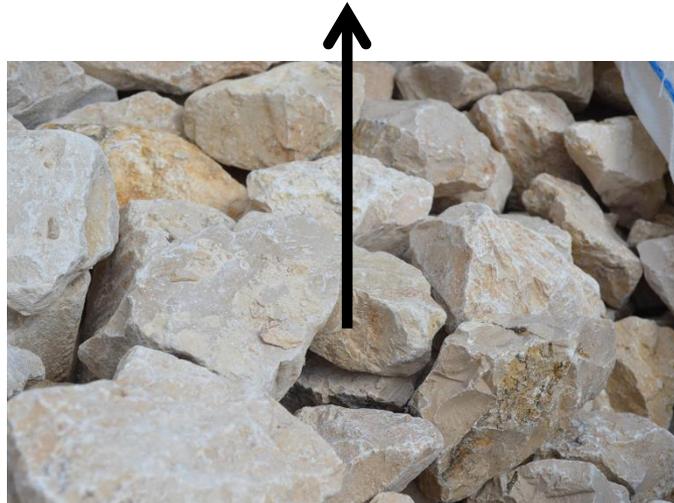
«C'est juste un camion sur 10'000 tonnes de matières premières !»



4.1

Composés organiques expulsés de matières premières

COV, Benzène, etc.



Formation de composés organiques

1983

- **Assertion n° 1:**

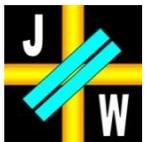
«La principale source d'émission de composés organiques volatils est la matière première!»

- **Assertion° 2:**

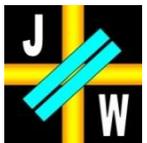
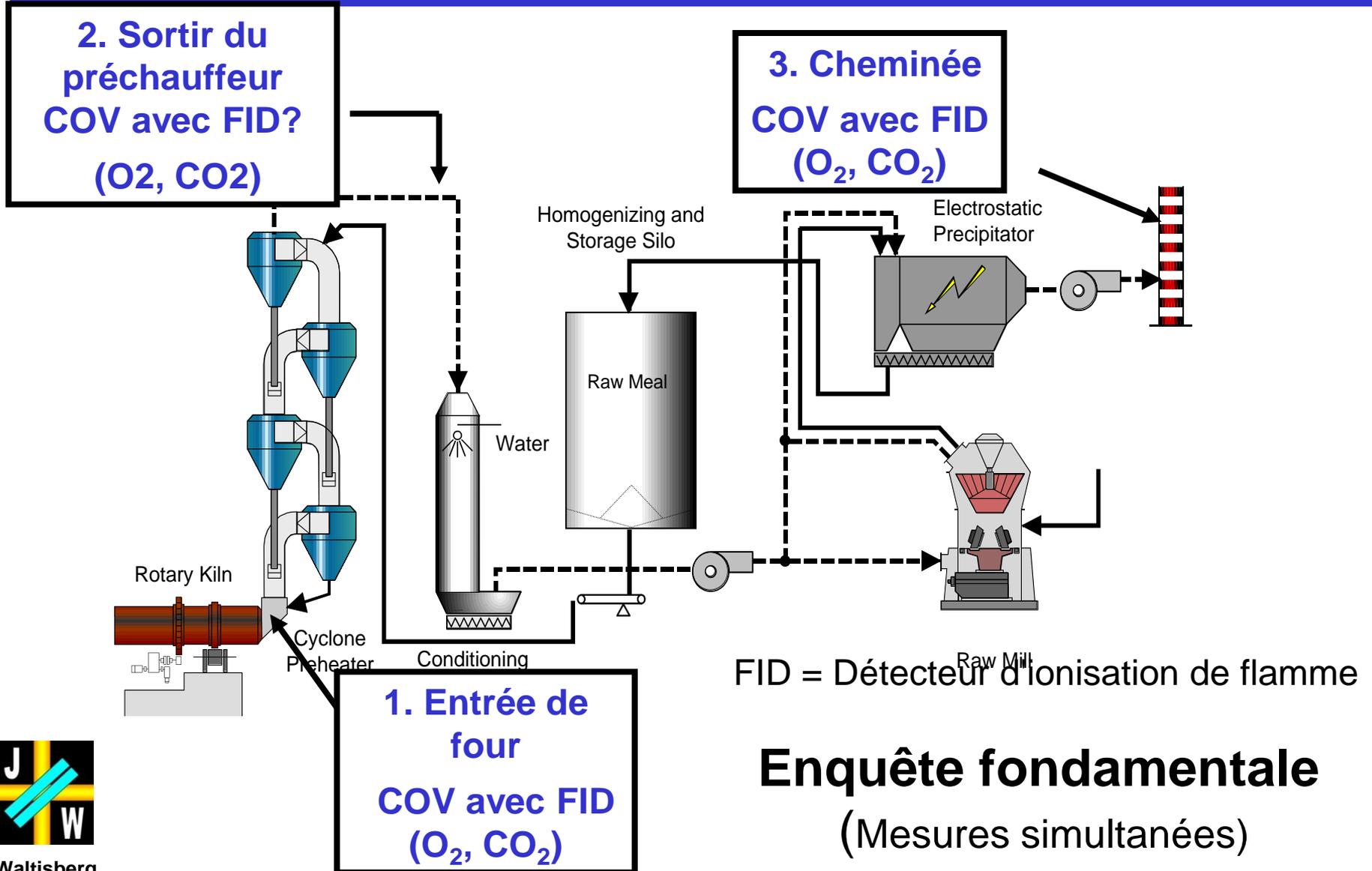
«L'un des composés expulsés des composants naturels des matières premières (calcaire, marne, schiste, ...) est le benzène!»

- **Recherche fondamentale sur la formation de composés organiques dans un four à ciment**

- ▶ Four préchauffeur à quatre étages
- ▶ Aucune cuisson secondaire
- ▶ Aucun combustible alternatif
- ▶ Aucune autre matière première alternative



Formation de composés organique



Formation de composés organique

1. Entrée de four

Concentration en dessous de la limite de détection de l'instrument

<1 [mgC/m³]

2. Sortie du Préchauffeur

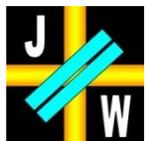
29 [mgC/m³] pendant marche directe (moulin arrêté)

29 [mgC/m³] pendant marche composée (moulin en marche)

3. Cheminée

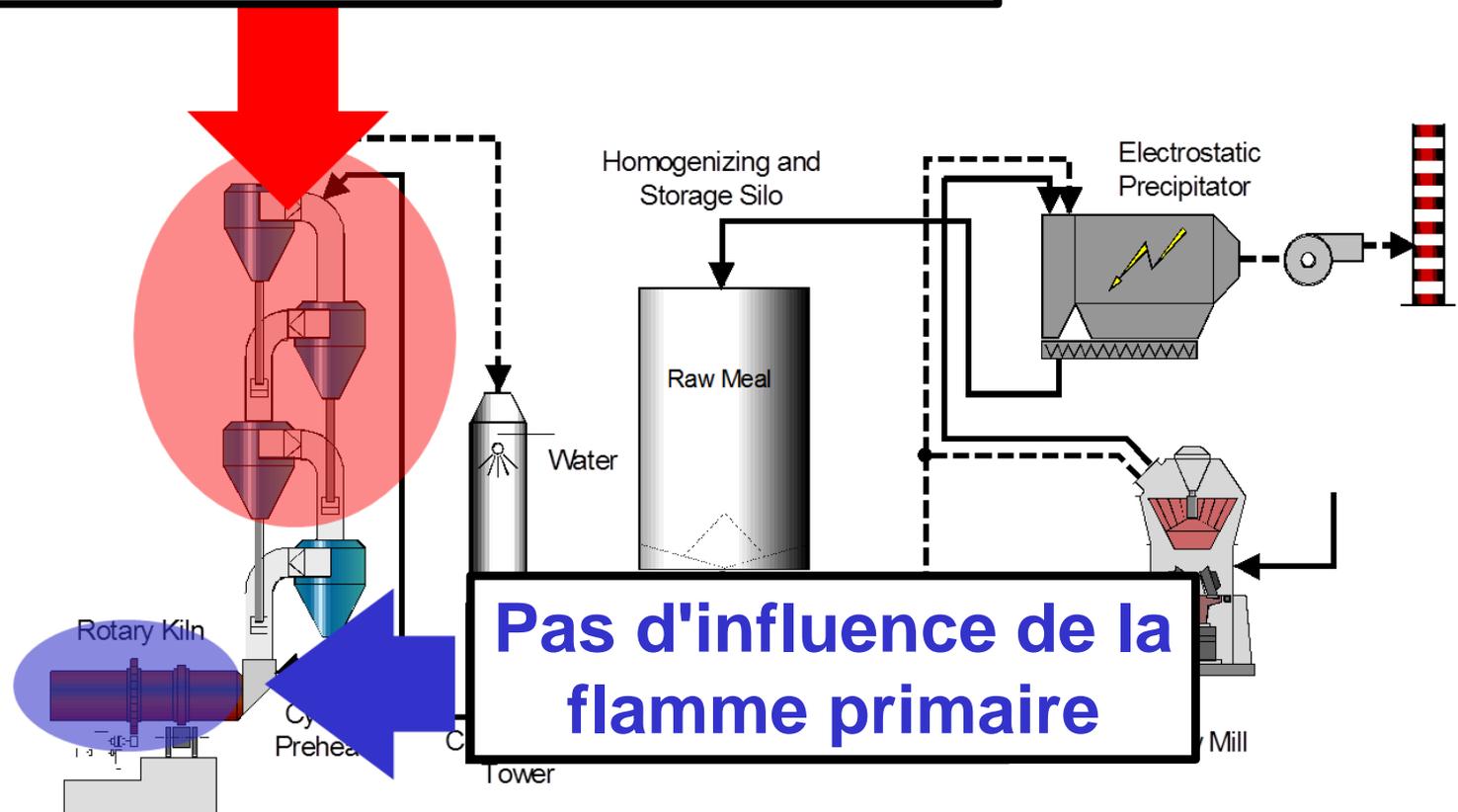
29 [mgC/m³] marche directe

27 [mgC/m³] marche composée



Formation de composés organique

Production de composés organiques volatiles (COV)



**Pas d'influence de la
flamme primaire**

Formation du benzène également vérifié!

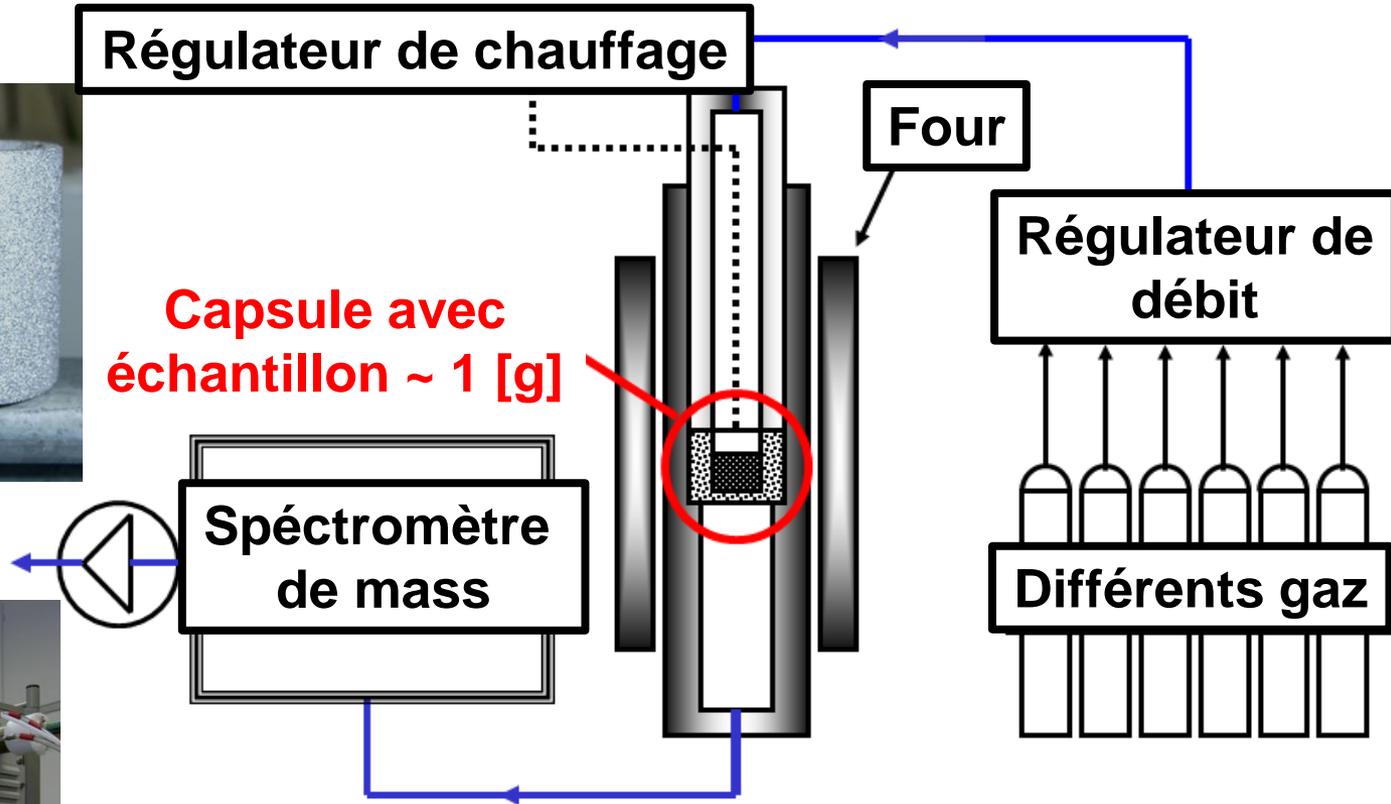


4.2

Test d'expulsion



Équipement de test d'expulsion



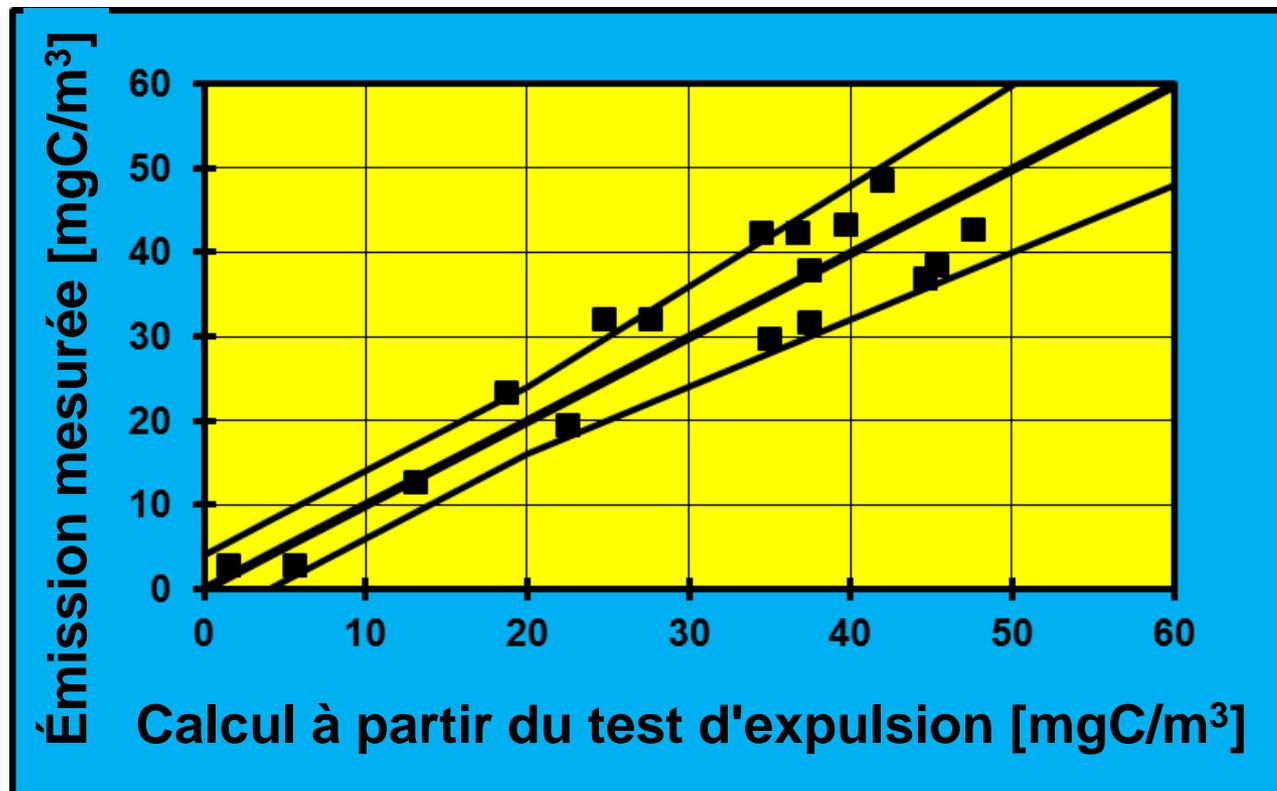
Jusqu'en 2010, environ 1 500 échantillons ont été étudiés avec cet équipement de test



Test d'expulsion contre Mesure des plantes

Expulsion Test \leftrightarrow Emission

- Emission: Détecteur d'ionisation de flamme validé et contrôlé
- Échantillon de farine: Extraction de farine brute pendant la mesure des émissions; Echantillon composite de 4 à 8 [h]
- Corrélation ± 20 [%]



4.3

Expériences avec des matières premières «naturelles» et alternatives

«Naturel» = Calcaire, schiste, marne, ..



COV de matières premières «naturelles»

- Pendant le chauffage, les matières premières naturelles expulsent dans la gamme de 200 et environ 600 [° C] de composés organiques volatils (COV), BETX (benzène, éthylbenzène, toluène, xylène), ...
- La composition des composés émis peut varier normalement entre «négligeable» et 80 [mgC/m³]

- Composition typique

Méthane: 15 - 35 [%]; moyenne de 20 [%]

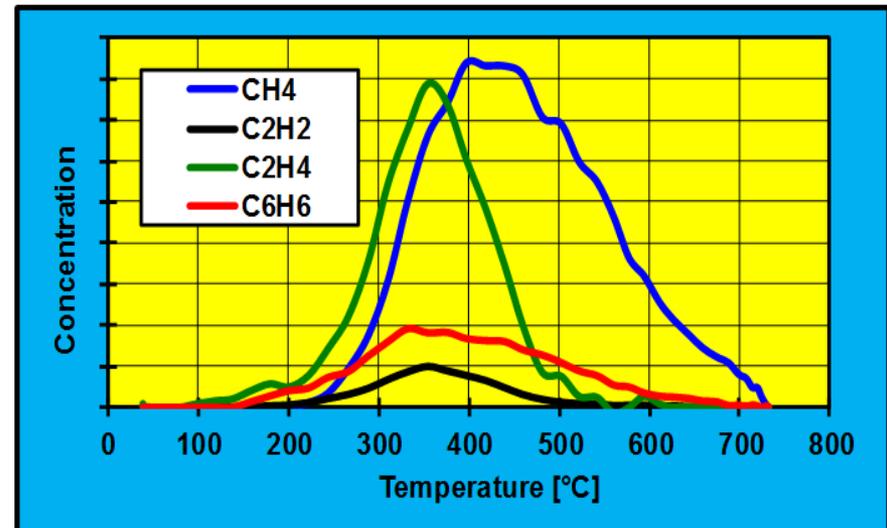
C₂ composés: 25 - 35 [%]; moyenne de 30 [%]

C₃ composés: 25 - 35 [%]; moyenne de 30 [%]

Benzène: 1 - 8 [%]

BETX: 1 - 12 [%]

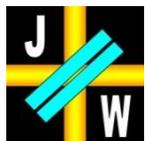
Les hydrocarbures aromatiques polycycliques: Seules des traces de naphthalène



COV de matières premières « alternatives »

De nombreux matériaux critiques trouvées !!!

- En général, l'expulsion a eu lieu à des températures plus basses (évaporation de la matière première), la plupart du temps bien au-dessous de 600 [° C]
- Une sélection incomplète:
 - ▶ Essuyage des déchets (route): BETX
 - ▶ Fer composante corrective: mono- et di-chlorobenzène
 - ▶ Sable de fonderie: (non chloré) furane
 - ▶ La chaux hydratée (déchets): teneurs élevées en BETX
 - ▶ Cendre volante: partie du carbone pur, de benzène partiellement chloré et des structures de phénol
 - ▶ Terre contaminés: tout à fait différent principalement du pétrole et / ou structures essence structures (chlorés) souvent très critique
 - ▶ Matériel de l'industrie chimique: Légèrement BETX, HAP, PCB, etc.
 - ▶ Garniture en pot usée: composés de cyanure



4.4

RÉSUMÉ
Matière première



Matière première

Matières premières «naturelles»

- Expulsion de structures aliphatiques et BETX
- En général, aucune substance critique

Matières premières «alternatives»

- Les matières premières alternatives (composants) peuvent contenir des substances critiques
- Formation / Expulsion de COV, HAP, PCB, PCDD / PCDF est possible
- Aucune règle généralement applicable ne peut être donnée
 - ▶ La valeur du COT (Carbone Organique Total) n'est pas une mesure permettant de juger des matières premières alternatives
 - ▶ Le test d'expulsion (ou un test similaire) peut détecter la présence de substances critiques dans la plupart des cas.

