

ÉTUDE DE LA COMBUSTION DE PRODUITS ORGANIQUES AROMATIQUES CHLORÉS LE CAS DU MONOCHLOROENZÈNE

Gilles Rouzet, Dominique Schwartz, Roger Gadiou, Lucien Delfosse

Laboratoire de gestion des risques et environnement

Le chlorobenzène est utilisé en grande quantité dans l'industrie chimique, l'élimination de ce type de déchet industriel par incinération doit être menée avec précaution car cette molécule peut conduire à la formation de nombreux hydrocarbures aromatiques chlorés, parmi lesquels on trouve les dioxines et dibenzofuranes particulièrement nocifs. Afin de mieux comprendre les mécanismes qui conduisent à la formation de ces molécules, une étude de la pyrolyse et de la combustion du chlorobenzène a été réalisée. Les différents produits formés ont été identifiés et quantifiés en fonction de la température et de la quantité d'oxygène présente dans les milieux gazeux. Les résultats montrent que la décomposition thermique est très dépendante des conditions de combustion, 80 % du chlore se retrouve sous la forme de HCl, le reste étant principalement inclus dans le carbone solide. De nombreux hydrocarbures sont formés, le benzène, l'acétylène, le méthane et les oxydes de carbone représentent la plus grande part du bilan carbone. Les expériences en milieu riche ont montré qu'il y avait formation de composés à deux cycles : biphényles et naphthalènes chlorés ou non. Dans certaines conditions, une formation importante de phénol et de chlorophénol a été observée même en présence d'une quantité stoechiométrique d'oxygène.

Chlorobenzene is widely used in chemical processes, and the elimination of this sort of industrial waste by incineration must be carefully done because this chemical species can lead to the formation of a great number of chlorinated aromatic hydrocarbons. Among these molecules dioxines and dibenzofurans are highly toxic. In order to increase our knowledge of the mechanisms which lead to the formation of these species, a study of the pyrolysis and the combustion of chlorobenzene was done. The different reaction products were identified and quantified, and the influence of temperature and oxygen concentration was investigated. The results show that thermal decomposition is highly dependent upon combustion conditions, 80 % of the initial chlorine is present as HCl, the remaining fraction is mainly present in solid carbon. A great number of hydrocarbons is formed, benzene, acetylene and methane represent the main part of the carbon mass balance. Experiments performed in rich conditions showed that two cycle aromatic hydrocarbons were formed : biphenyles or naphthalenes chlorinated or not. In some cases, a substantial amount of phenol and chlorophenol was formed even in stoichiometric conditions.

INTRODUCTION

Les produits organiques chlorés sont fabriqués et utilisés en grande quantité dans un nombre important d'industries chimiques. Ces chlorocarbones sont utilisés comme solvant ou comme monomères ; par exemple le trichloroéthylène et le chlorure de vinyle qui conduisent au PVC, aux espèces aromatiques polychlorées et aux pesticides. L'incinération semble être une solution d'avenir pour l'élimination de tels déchets. Parmi ceux-ci, les composés aromatiques chlorés (chlorobenzène, chlorophénols et polychlorobiphényles) présentent un intérêt particulier. Qu'ils soient directement les composés à éliminer ou qu'ils proviennent de condensations au cours de la pyrolyse ou l'incinération de molécules plus petites, ces produits sont intrinsèquement nocifs voire toxiques et sont des précurseurs de composés plus dange-

reux tels que les dioxines et les furanes. Leur élimination par traitement thermique doit donc faire l'objet de soins tout particulier.

Une bonne connaissance du comportement de ces espèces exposées à la chaleur est donc nécessaire dans le but d'optimiser l'efficacité de leur destruction et la formation des produits de réaction. De nombreuses études ont eu pour sujet la décomposition d'hydrocarbures aromatiques chlorés, Sethuraman et coll. ^[1], et Dellinger et coll. ^[2] ont par exemple présenté une étude cinétique de l'oxydation du chlorobenzène. La plupart de ces études se sont cependant faites en présence d'un donneur d'hydrogène (Ritter et coll. ^[3]), ce qui modifie fortement les vitesses de décomposition du chlorobenzène ainsi que la nature des produits formés. D'autres travaux se sont limités à la quantification des espèces principales ^[1].

L'objectif de ce travail était d'étudier la pyrolyse et la combustion du chlorobenzène dans des conditions proches de celles rencontrées dans un four industriel : temps de séjour de l'ordre de la seconde, et température allant jusqu'à plus de 1400 K. Au-delà de l'analyse cinétique de la décomposition du chlorobenzène et de la formation des espèces majoritaires, une attention particulière a été accordée aux espèces de plus fort poids moléculaire telles que les biphényles, les naphthalènes ou les phénols, chlorés ou non. Même s'ils sont formés en plus faible quantité, ces composés interviennent en effet dans les mécanismes de formation des dioxines et furanes.

DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

La réalisation de cette étude a nécessité la mise au point d'un nouveau dispositif expérimental. Un pousse-seringue régule l'alimentation en chlorobenzène d'un système d'évaporation. Un flux gazeux d'azote/oxygène, d'un débit global de 70 NL/h et d'une fraction molaire en oxygène variant de 0 à 1 % par rapport à la stoechiométrie, se charge donc de manière régulière et continue, les concentrations en chlorobenzène utilisées dans cette étude étaient égales à 0,1 et 0,59 % en mole. Pour améliorer l'homogénéité du mélange, le flux gazeux traverse un volume mort constitué par un ballon en Pyrex. Le mélange gazeux ainsi réalisé est envoyé dans un réacteur tubulaire en quartz d'une longueur totale de 1 mètre et un diamètre interne de 15 millimètres. Les températures d'étude, déterminées au moyen d'un thermocouple K lors des mesures des profils thermiques, varient entre 915 et 1405 kelvins. Les débits utilisés couplés aux températures explorées induisent des temps de séjour en zone chaude variant entre en 1,1 et 1,7 seconde. Le schéma du dispositif est présenté en figure 1. Les prélèvements gazeux sont effectués grâce à un dispositif de prélèvement équipé d'un septum en sortie du réacteur. En même temps, des barbotages dans une solution de soude permettent de piéger le chlorure d'hydrogène dégagé.

Le travail d'analyse a été réalisé essentiellement à l'aide de

trois méthodes. La principale est la chromatographie en phase gazeuse, utilisée avec un détecteur à ionisation de flamme (FID), un détecteur catharométrique (TCD) ou un couplage avec un spectromètre de masse. Pour le dosage des espèces chlorées les plus lourdes à l'aide du FID, nous avons utilisé une colonne capillaire avec une phase stationnaire du type Ohio Valley OV 624, de 30 mètres de long et de 0,32 mm de diamètre interne. Pour le dosage de l'hydrogène, la colonne est du type Molsieve 5A de 20 mètres de long. Pour la séparation des hydrocarbures légers, nous avons équipé le chromatographe d'une colonne de type GS-Q mégabore de 30 mètres de long et de 0,54 mm de diamètre interne. On a également eu recours à la colorimétrie pour le dosage des chlorures et à la spectroscopie infrarouge pour le dosage des oxydes de carbone. L'eau n'a pas été quantifiée pour ces différentes manipulations.

RÉSULTATS

La combustion a été étudiée en présence de la quantité d'oxygène nécessaire au dixième de stoechiométrie, à la demi-stoechiométrie et à la stoechiométrie. Les principaux produits de la pyrolyse et de la combustion du chlorobenzène ont été mis en évidence par GC/MS. L'injection de standards analytiques a permis la confirmation de ces résultats et la quantification des produits considérés. Les principales espèces ainsi identifiées et quantifiées sont le benzène, le naphthalène, l'acétylbenzène, le biphényle, les différents chlorobiphényles, les différents dichlorobiphényles, le phénol et le chlorophénol. Les dégagements de chlorure d'hydrogène, de dihydrogène et d'oxydes de carbone ont eux aussi été suivis. On remarque une présence importante de résidus carbonés dans les conditions opératoires les plus pauvres en oxygène. Une liste des produits est présentée tableau 1.

Espèces majoritaires

Les évolutions des concentrations des espèces majoritaires sont présentées en figure 2. Les quantités présentées sont

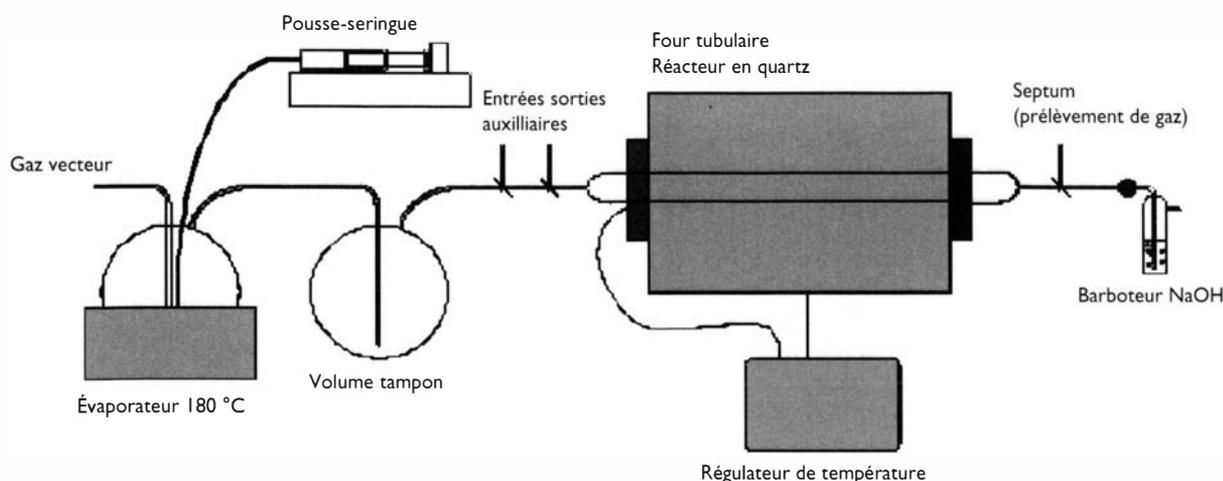


Figure 1 : Dispositif expérimental

Tableau I : Liste des espèces identifiées et quantifiées

Espèce		Détection/Quantification	Quantité relative
Hydrogène	H ₂	GC - TCD	majoritaire
Acide Chlorhydrique	HCl	Colorimétrie	majoritaire
Méthane	CH ₄	GC - FID	< 1 %
Acétylène	C ₂ H ₂	GC - FID	majoritaire
Ethylène	C ₂ H ₄	GC - FID	traces
Cyclopentadiène	C ₅ H ₆	GC - MS/GC - FID	traces
Benzène	C ₆ H ₆	GC - MS/GC - FID	majoritaire
Phénol	C ₆ H ₅ OH	GC - MS/GC - FID	traces
Chlorophénol	C ₆ H ₄ (OH) Cl	GC - MS/GC - FID	traces
Chlorobenzène	C ₆ H ₅ Cl	GC - MS/GC - FID	
Acétylbenzène	C ₆ H ₅ -C ₂ H	GC - MS/GC - FID	< 0.5 %
Dichlorobenzène	C ₆ H ₄ Cl ₂	GC - MS/GC - FID	traces
Biphényle	C ₆ H ₅ -C ₆ H ₅	GC - MS/GC - FID	< 0.5 %
Ortho-chlorobiphényle	C ₆ H ₅ -C ₆ H ₄ Cl	GC - MS/GC - FID	< 0.5 %
Méta-chlorobiphényle	C ₆ H ₅ -C ₆ H ₄ Cl	GC - MS/GC - FID	< 0.5 %
Para-chlorobiphényle	C ₆ H ₅ -C ₆ H ₄ Cl	GC - MS/GC - FID	< 0.5 %
Dichlorobiphényles	C ₆ H ₅ Cl-C ₆ H ₄ Cl	GC - MS/GC - FID	< 5 %
Naphtalène	C ₁₀ H ₈	GC - MS/GC - FID	< 0.5 %
Chloronaphtalène	C ₁₀ H ₇ Cl	GC - MS/GC - FID	traces
Acénaphthylène	C ₁₂ H ₈	GC - MS/GC - FID	< 0.5 %

les rendements molaires de ces molécules par rapport à la quantité de carbone, de chlore, ou d'hydrogène injecté dans le réacteur, ces données sont présentées en fonction du facteur d'air *fa*. Pour des conditions allant de la pyrolyse à la demi-stoechiométrie de combustion, on constate une forte influence de la teneur en oxygène sur la décomposition du chlorobenzène avec un abaissement de 200 kelvins de la température de disparition du produit. En revanche, lorsque la teneur en oxygène augmente, cet effet de température diminue pour se limiter à 20 kelvins entre les conditions de demi-stoechiométrie et les conditions de facteur d'air égales à 2. Les études préliminaires effectuées par Sethuraman et coll. ⁽¹⁾ sont en

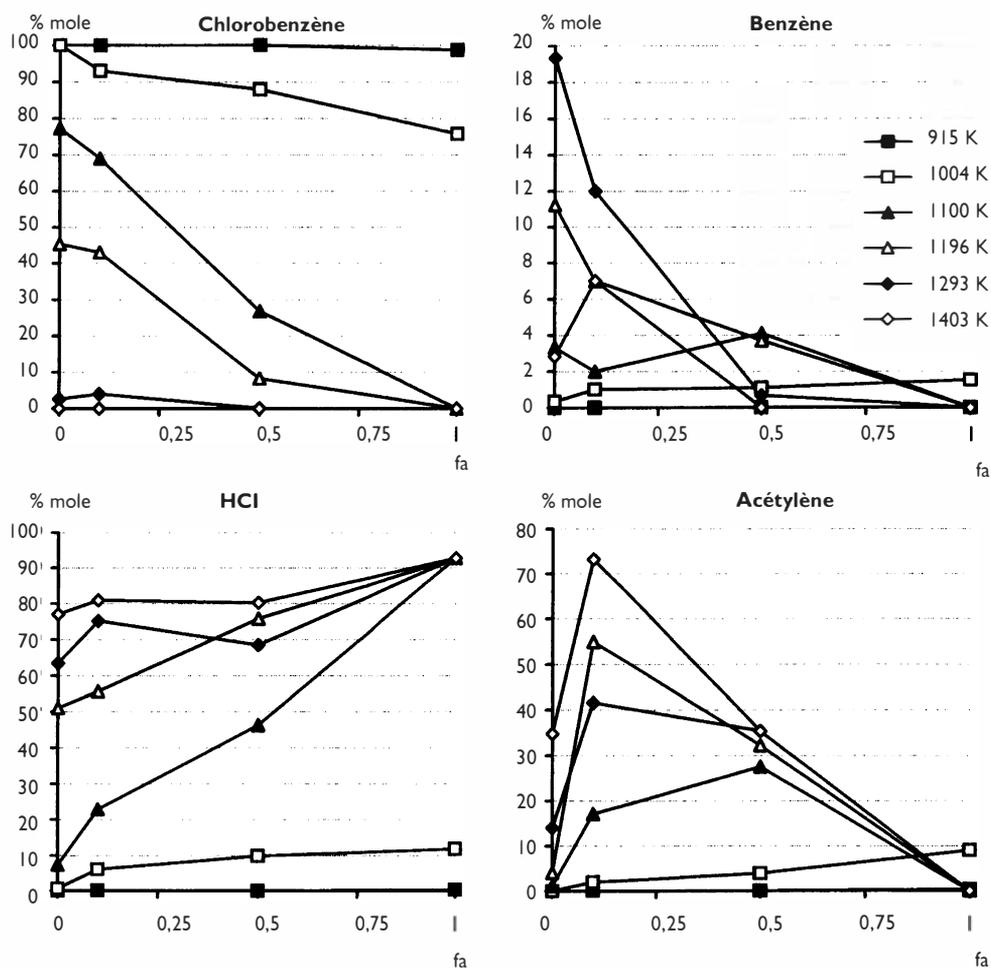


Figure 2 : Espèces majoritaires : rendement molaire en fonction de la fraction d'oxygène par rapport à la stoechiométrie

bon accord avec nos résultats. En revanche, pour Dellinger et coll. [2] et pour Ritter et coll. [3] la combustion du chlorobenzène dans l'air débute à plus basse température. Dans le premier cas, les temps de séjours et les teneurs en oxygène utilisés sont plus élevés que dans nos expériences, dans le second cas, les auteurs utilisent un donneur d'hydrogène qui favorise une dégradation radicalaire de notre composé. On constate pour la combustion comme pour la pyrolyse, une très forte adéquation entre la disparition de chlorobenzène et l'apparition de chlorure d'hydrogène. Les très hauts taux de transformation du chlore organique en chlorure d'hydrogène observés dans nos expériences sont confirmés par Sethuraman et coll. [1] qui constatent que le chlorure d'hydrogène représente jusqu'à 90 % du chlorobenzène disparu à haute température, il faut cependant noter que la valeur présentée dans cette étude ne provenait pas d'un dosage direct mais d'un bilan chlore sur les espèces analysées.

Les courbes de concentration du benzène en fonction de la température présentent un maximum quelle que soit la teneur en oxygène utilisée. On constate toutefois que les concentrations maximales atteintes chutent avec l'augmen-

tation de teneur en oxygène et que ces maxima se déplacent vers des températures plus faibles. Les résultats de Sethuraman et coll. [1] vont dans le sens de nos résultats. D'autres travaux ont été réalisés dans des conditions très différentes. Cicek et coll. [4] ont utilisé une flamme de chlorobenzène qui pouvait être enrichie en méthane. La teneur en benzène maximale observée était de 0,15 % et cette espèce n'a pas été détectée en l'absence de méthane. Mulder et coll. [5] ont constaté la formation de benzène lors de leurs expériences mais celles-ci ne sont pas comparables car une grande quantité de cyclohexadiène avait été ajoutée au chlorobenzène. Ceci conduit à la formation de radicaux phényles par une réaction d'arrachement d'un atome d'hydrogène par l'oxygène, et par conséquent augmente la quantité de benzène formé. L'acétylène est un composé important de la cassure de cycles benzéniques. Cette espèce est observée par de nombreux auteurs au nombre desquels on retrouve Kiefer et coll. [6], Ritter et coll. [7], Sethuraman et coll. [1]. Le comportement de l'acétylène avec l'augmentation de l'oxygène est assez difficile à interpréter. Sethuraman et coll. [1] ont observé des quantités d'acétylène de l'ordre de 10 % du chlorobenzène initial. Pour Cicek et coll. [4], les teneurs en

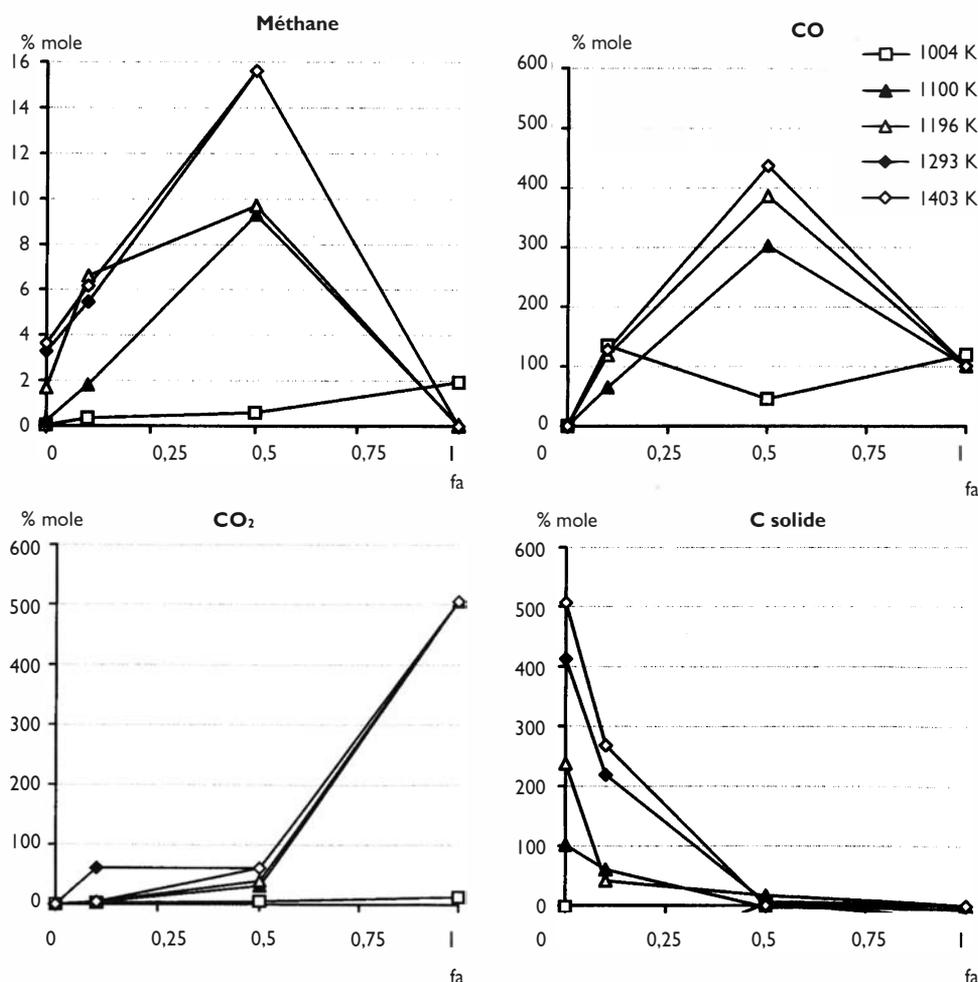


Figure 3 : Espèces majoritaires : rendement molaire en fonction de la fraction d'oxygène par rapport à la stoechiométrie

acétylène maximales étaient de 3 % et 5 % en fonction du taux d'enrichissement en méthane, les auteurs ne donnaient pas de valeurs pour la flamme de chlorobenzène seul. Toutes ces valeurs sont inférieures à celles mesurées lors de nos propres expériences.

On observe une augmentation des concentrations en méthane en fonction de la teneur en oxygène jusqu'à la stoechiométrie (figure 3). L'analogie entre les profils de concentration en CO et en méthane tend à valider le chemin réactionnel aboutissant au méthane par hydrogénolyse du CO proposé par Ritter et coll.^[3]. Le dernier point de la série réalisé sous condition stoechiométrique d'oxygène, qui voit une importante disparition du méthane, confirme cette hypothèse car ce point correspond à une diminution brutale du monoxyde de carbone. Cependant, Sethuraman privilégiait le mécanisme de formation de méthane à partir d'acétylène, l'énergie de la liaison CO est en effet égale à 257 kcal/mole, ce qui rend sa cassure peu probable. Comme pour l'acétylène, les concentrations en méthane mesurées sont plus importantes que celles de Sethuraman et coll.^[1]. Sur la figure 3, nous constatons des évolutions assez régulières du monoxyde de carbone en fonction de la température à

l'exception du dernier point de la série réalisée à la stoechiométrie. Pour ce point particulier, le CO s'oxyde en CO₂. Ce phénomène peut vraisemblablement être expliqué par l'élévation de la température d'environ 200 kelvins du milieu en raison de l'apparition d'un point d'allumage. Cette élévation de température favorise alors la conversion en CO₂ sans toutefois atteindre des valeurs pour lesquelles le monoxyde de carbone reprend un rôle important. Pour les oxydes de carbone, nos observations expérimentales correspondent avec celles de Sethuraman et coll.^[1]. Les résidus solides représentent une part importante du bilan carbone lorsque les teneurs en oxygène initiales sont inférieures à la demi-stoechiométrie. Lorsque cette valeur est dépassée, les résidus carbonés disparaissent. Les valeurs négatives obtenues dans ce graphe sont liées au mode d'obtention des quantités de résidus, qui sont le complément à 100 % de l'ensemble des produits mesurés. On peut toutefois noter que cette hypothèse a été vérifiée pour la pyrolyse à haute température en donnant de très bons résultats.

Espèces minoritaires

Les évolutions des concentrations des espèces minoritaires

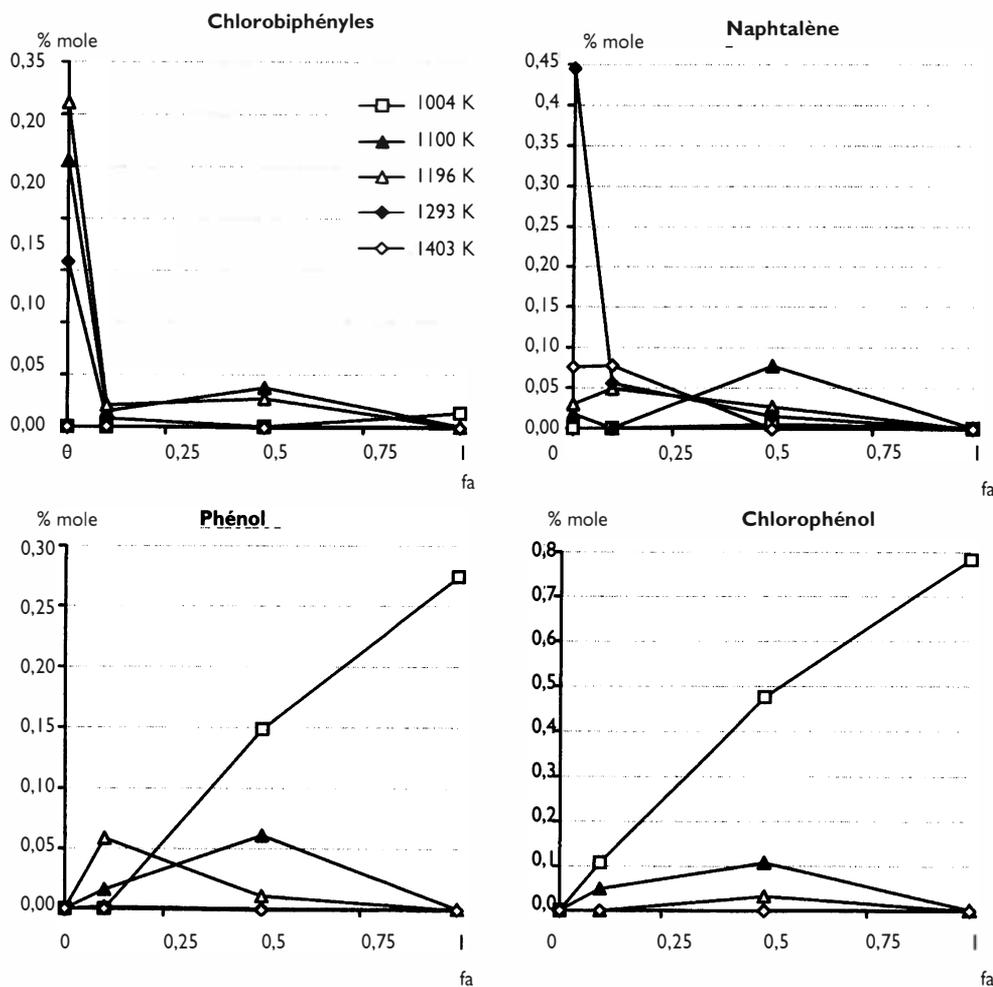


Figure 4 : Espèces minoritaires : rendement molaire (%) en fonction de la fraction d'oxygène par rapport à la stoechiométrie

sont présentées en figure 4. Les produits minoritaires observés au cours de notre étude sont le phénylacétylène, le biphényle, les trois isomères de position du monochlorobiphényle, le naphthalène, le chloronaphthalène, l'acénaphthylène, le phénol et le chlorophénol. La formation de ces produits minoritaires lors de l'oxydation du chlorobenzène a été très peu étudiée. Comme pour les produits majoritaires, on constate une importante évolution des concentrations de la plupart des espèces minoritaires avec la température et l'augmentation de la teneur en oxygène.

Le biphényle ainsi que les différents isomères du chlorobiphényle ont été quantifiés. Les concentrations mesurées et les tendances en fonction de la température et de la concentration en oxygène étaient proches de celles observées pour le chlorobiphényle. Les biphényles, chlorés ou non sont des espèces chimiques importantes car ils interviennent dans les mécanismes de formation de dibenzofuranes. Young et coll.^[8] ont ainsi proposé un mécanisme d'oxydation du o, o'-dichlorobiphényle pour conduire à la formation de 4-chlorodibenzofurane. Ritter et coll.^[3, 9], Kluwe et coll.^[10] observent l'apparition de biphényles qu'ils soient ou non chlorés, en présence de faibles quantités d'oxygène. Nous observons dans nos propres expériences une diminution très sensible des concentrations de ces espèces en présence de quantités même très faibles d'oxygène. Sethuraman et coll.^[11] n'ont pas dosé les biarènes. En partant de polychlorobenzènes, Young et coll.^[8, 11], Kluwe et coll.^[10], constatent que l'augmentation de la teneur en oxygène est un frein à l'apparition des biarènes. Kluwe et coll.^[10] considèrent également l'augmentation du temps de séjour comme une limitation importante. Le comportement des espèces issues d'additions de chaînes aliphatiques sur le cycle benzénique est sensiblement différent. Le naphthalène apparaît toujours lors de dégradations thermiques de produits aromatiques chlorés en présence d'oxygène^[1, 4, 10, 11, 12]. On observe pour le phénylacétylène et le naphthalène une augmentation des concentrations de ces espèces avec l'introduction de quantités d'oxygène inférieures à la stoechiométrie dans le milieu réactionnel. Cette observation est confirmée par Young et coll.^[11] et Kluwe et coll.^[10]; l'oxygène devient très rapidement un frein à la production de naphthalène.

De même que les biphényles, le phénol et le chlorophénol sont des intermédiaires importants dans les mécanismes de formation des dioxines^[13, 14]. Mulder et coll.^[5, 15], Cicek et coll.^[4], Van Dell et coll.^[16] notent l'apparition de phénols et chlorophénols lors de l'incinération de produits chlorés. Kluwe et coll.^[10] ont observé que la formation de polychlorophénols ne se produit que pour des excès moyens d'oxygène, aux températures les plus faibles de leurs expérimentations et pour des temps de séjour assez courts. Les résultats présentés dans la figure 4 montrent que la quantité de phénols formés augmente avec la teneur en oxygène. Des expériences supplémentaires ont montré qu'un large excès d'oxygène conduit à une destruction de ces molécules. Nous constatons aussi qu'une température élevée permet d'éliminer les phénols, le maximum de concen-

tration étant observé autour de 1000 K.

Ces conditions étant remplies, on note une proportionnalité directe entre les quantités de phénols et chlorophénols produits et les teneurs en oxygène initiales. Nous remarquons toutefois, comme Young et coll.^[11], que l'augmentation de l'oxygène au-dessus de quantité stoechiométrique est un obstacle à la formation des (poly) chlorophénols.

CONCLUSION

Une étude physico-chimique de la combustion du chlorobenzène a été réalisée dans un réacteur dynamique à écoulement piston. Le dosage des composés issus de ce phénomène a été réalisé par différentes techniques analytiques au nombre desquelles figurent les spectroscopies UV-visible et infrarouge et la chromatographie en phase gazeuse. Au cours de l'oxydation partielle du chlorobenzène, les produits majoritairement formés sont le chlorure d'hydrogène, le dioxyde de carbone, le monoxyde de carbone, le benzène, l'acétylène, le méthane, le dihydrogène et l'eau.

Les courbes représentant l'évolution du chlorobenzène sur toute la plage de température admettent toujours un point d'inflexion. Celui-ci se déplace vers les températures les plus faibles avec l'augmentation d'oxygène dans le milieu. Comme pour la pyrolyse, l'apparition du chlorure d'hydrogène est toujours étroitement liée à la disparition du chlorobenzène. L'augmentation de l'oxygène fait diminuer les maxima des courbes de concentration du benzène et les déplacent vers les températures plus basses. Des teneurs inférieures à la stoechiométrie en oxygène ont tendance à favoriser la production d'acétylène et de méthane dans le système alors que lorsqu'on atteint la stoechiométrie, ces espèces diminuent fortement. Le même type d'observations se fait sur le monoxyde de carbone. Quant au dioxyde de carbone, il ne prend une place véritablement importante que pour la stoechiométrie en oxygène et une température de 1100 K. On estime possible que le mélange gazeux s'enflamme dans notre réacteur dans ces conditions et que de ce fait, la température de 1100 K soit largement dépassée. Les résidus solides diminuent eux aussi très fortement avec l'augmentation d'oxygène. L'eau devient un produit majoritaire mais nos équipements ne nous permettent pas de la doser. Toutefois, un point de mesure a pu être réalisé qui confirme que cette espèce contient bien l'hydrogène déficitaire au bilan dans ces conditions.

Pour les espèces minoritaires, on observe le phénylacétylène, des biphényles chlorés ou non, des naphthalènes, chlorés ou non et l'acénaphthylène, le phénol et les chlorophénols. Pour les espèces non oxygénées, on constate une diminution des maxima des courbes avec l'utilisation d'oxygène. Pour le phénol et le chlorophénol en revanche, on a une augmentation des maxima avec la teneur en oxygène jusqu'à la stoechiométrie à partir de laquelle toutes les espèces minoritaires diminuent très fortement. Cette augmentation des chlorophénols jusqu'à la stoechiométrie doit attirer spécialement l'attention à cause des potentialités de formation des dioxines

DÉCHETS

SCIENCES & TECHNIQUES

APPEL À PUBLICATIONS

Nous souhaitons publier dans cette revue et nous espérons pouvoir ouvrir nos colonnes à tous les travaux relatifs aux différents aspects du problème des déchets :

- Collecte, tri, préparation, transfert, stockage,
- Valorisation énergétique : énergie, matière première, matériaux, agriculture,
- Analyse et caractérisation, tests de comportement, nomenclature, classification,
- Traitements thermiques,
- Traitements biologiques,
- Traitements chimiques et physico-chimiques,
- Stabilisation-solidification : procédés et comportement à long terme,
- Déchets, sol et sous-sol,
- Procédés propres,
- Déchets-santé,
- Droit et législation.

Présentation des articles

- 5 Pages incluant textes, figures et références soit l'équivalent de 15 000 signes au maximum.
- Les textes originaux doivent être expédiés sur disquette 3,5 pouces (Mac ou PC) accompagnés d'une version papier en 3 exemplaires pour le comité de lecture dont une version originale comportant tableaux, figures, ou photographies éventuels. Les fichiers de tableaux ou de figures existants doivent être joints sur la disquette avec originaux papier.
- Le nom du logiciel utilisé doit être spécifié.
- L'article doit impérativement comporter les éléments suivants si possible dans cet ordre :
 - titre,
 - nom, qualité et coordonnées de l'auteur,
 - résumé de 50 mots en français et en anglais,
 - introduction,
 - matériels et méthodes,
 - résultats,
 - discussion,
 - conclusion,
 - références.

Nous publions également les résumés de thèses qui nous sont envoyés ainsi que les résumés de mémoires de DEA ou de DESS lorsqu'ils sont accessibles, sur demande, aux lecteurs.

Envoi des articles

Alain Navarro, Laboratoire d'analyses environnementales des procédés et systèmes industriels (Laepsi) - Insa bâtiment 404 - 20, avenue Albert Einstein - 69621 Villeurbanne cedex - Tél. : 04 72 43 84 30 - Fax : 04 72 43 87 17. Secrétariat : Norma Renard (Tél. : 04 72 43 87 72 - Fax : 04 72 43 80 84)

par voie hétérogène sur les cendres volantes^[17], et par voie homogène^[18].

Gilles Rouzet, Dominique Schwartz, Roger Gadiou, Lucien Delfosse

Laboratoire de gestion des risques et environnement - 25, rue de Chemnitz - 68200 Mulhouse

Bibliographie

- [1] S. Sethuraman, S.M. Senkan et D. Gutman ; *Combustion Science and Technology*, 1992,82,13.
- [2] B. Dellinger, D. Hall, W. Rubey, J. Torres et R. Carnes ; *Hazardous Waste*, 65, 1984, 65-78.
- [3] E. Ritter et W. Bozzelli ; *Hazardous Waste and Hazardous Materials*, 7 (1), 1990, 103.
- [4] B. Cicek et S.M. Senkan ; *Combustion Science and Technology*, 91, 1993, 53.
- [5] P. Mulder et R. Louw ; *Journal of the Chemical Society Perkin translation II*, 1985, 1135.
- [6] J.E. Kiefer, S.A. Kapsa, M.Z. Al-Alami et K.A. Budach ; *Combustion and Flame*, 51, 1983, 79.
- [7] E.R. Ritter, J.W. Bozzelli et A.M. Dean ; *Journal of Physical Chemistry*, 94, 1990, 2493-2504
- [8] C.M. Young et K.J. Voorhees ; *Chemosphere*, 23 (8-10), 1991, 1265-1277.
- [9] E. Ritter et W. Bozzelli ; *Combustion Science and Technology*, 74, 1990, 117-135.
- [10] M. Kluwe, H. Kaimann, K.E. Lorber et H. Meier zu Köcker ; *Chemosphere*, 23 (8-10), 1991, 1465-1471.
- [11] C. M. Young et K. J. Voorhees ; *Preprinted papers American Chemical Society, Division of Fuel and Chemistry*, 34 (1), 280-287.
- [12] J.H. Kiefer, L.J. Mizerka, M.R. Patel et H.C. Wel ; *Journal of Physical Chemistry*, 89, 1985, 2013- 2019.
- [13] V. M. Schaub et W. Tsang, *Chlorinated dioxins and dibenzofurans in the total environment II*, W. Ketth, C. Rappe and G. Choudhary (Ed.), *Butterworth Publishers*, 1985, 469- 487.
- [14] G. Trouvé et L. Delfosse, *Déchets Sciences & Techniques*, 11, 1998, 17-25
- [15] P. Mulder et R. Louw, *J. Chem. Soc., Perkin Trans. II*, 1986, 1541.
- [16] R.D. Van Dell, N.H. Mahle et E.M. Hixson ; *Combustion Science and Technology*, 101 (1- 6), 1994, 261.
- [17] E. R. Altwickler et M. S. Milligan, *Chemosphere*, 27 (1-3), 1993 , 301-307.
- [18] S. S. Sidhu, L. Maqsud, B. Dellinger et G. Mascolo, *Combustion and Flame*, 100, 1995,11- 20.