

Institut Français  
du Pétrole

recherches  
et  
témoignages

P. TRAMBOUZE  
J.P. WAUQUIER

*Le développement  
des procédés  
de raffinage  
et de pétrochimie*

ÉDITIONS TECHNIP

# TABLE DES MATIÈRES

PRÉFACE . . . . .	III
AVANT-PROPOS . . . . .	VII

## *INTRODUCTION*

### **I LA NATURE DE L'ACTIVITÉ DE DÉVELOPPEMENT**

<b>I.1. LA DÉFINITION DE L'ACTIVITÉ DE DÉVELOPPEMENT . . . . .</b>	<b>3</b>
<b>I.2. IMPORTANCE DE L'ACTIVITÉ DE DÉVELOPPEMENT . . . . .</b>	<b>4</b>
<b>I.3. STRATÉGIE D'UNE ENTREPRISE EN MATIÈRE DE DÉVELOPPEMENT . . . . .</b>	<b>6</b>
<b>I.3.1. Les critères économiques et politiques du choix des programmes de développement . . . . .</b>	<b>6</b>
<b>I.3.2. Le champ d'activité de l'entreprise en tant que facteur d'incitation à engager un programme de développement . . . . .</b>	<b>7</b>
<b>I.3.3. La formation du personnel en charge du programme de développement . . . . .</b>	<b>8</b>



## PREMIÈRE PARTIE

*CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES  
RELATIVES A L'ACTIVITÉ  
DE DÉVELOPPEMENT DE PROCÉDÉS*

## **II PRINCIPES DIRECTEURS DE L'ACTIVITÉ DE DÉVELOPPEMENT**

<b>II.1.</b>	<b>L'IDÉE DE DÉPART. SON ORIGINE. SON EXAMEN.</b>	13
<b>II.1.1.</b>	<b>Estimation économique préliminaire et étude de marché.</b>	16
<b>II.1.2.</b>	<b>Examen des problèmes de propriété industrielle</b>	17
<b>II.1.3.</b>	<b>Les données du laboratoire.</b>	17
<b>II.2.</b>	<b>LA DÉCISION D'ENGAGER UN PROGRAMME MINEUR DE DÉVELOPPEMENT.</b>	19
<b>II.3.</b>	<b>LA DÉCISION DE DÉVELOPPER UN PROCÉDÉ</b>	26
<b>II.4.</b>	<b>LE DÉVELOPPEMENT.</b>	27
<b>II.4.1.</b>	<b>Établissement et réalisation du programme d'expérimentation.</b>	27
II.4.1.1.	Expérimentation complémentaire en laboratoire . . .	27
II.4.1.2.	Les études en « unités pilotes » . . . . .	28
	<i>A. Le coût de l'étape pilote . . . . .</i>	29
	<i>B. Conception et construction de l'unité pilote. . .</i>	36
	<i>C. Expérimentation en pilote . . . . .</i>	37
II.4.1.3.	Études d'extrapolation . . . . .	40
<b>II.4.2.</b>	<b>Le dépouillement et l'exploitation des résultats.</b>	42

<b>II.5.</b>	<b>LA RÉALISATION INDUSTRIELLE . . . . .</b>	<b>45</b>
<b>II.5.1.</b>	<b>Le démarrage des installations . . . . .</b>	<b>46</b>
<b>II.5.2.</b>	<b>Le service après-vente . . . . .</b>	<b>46</b>
<b>II.5.3.</b>	<b>Amélioration du procédé . . . . .</b>	<b>46</b>
<b>III</b>	<b>LES DISCIPLINES CONCOURANT AU DÉVELOPPEMENT DES PROCÉDÉS</b>	
<b>III.1.</b>	<b>LE GÉNIE CHIMIQUE . . . . .</b>	<b>50</b>
<b>III.1.1.</b>	<b>Les définitions du génie chimique . . . . .</b>	<b>50</b>
<b>III.1.2.</b>	<b>Les sources du « génie chimique » . . . . .</b>	<b>52</b>
<b>III.1.3.</b>	<b>Les moyens d'étude du génie chimique . . . . .</b>	<b>56</b>
III.1.3.1.	L'analyse dimensionnelle . . . . .	56
A.	<i>Définition et usages . . . . .</i>	56
B.	<i>L'acquis dans le domaine . . . . .</i>	57
C.	<i>Description de la méthode d'analyse dimensionnelle . . . . .</i>	58
D.	<i>Forme des expressions déduites de l'analyse dimensionnelle . . . . .</i>	61
E.	<i>Utilisation des nombres sans dimensions pour l'extrapolation . . . . .</i>	65
III.1.3.2.	Les modèles . . . . .	69
A.	<i>Définition et usages . . . . .</i>	69
B.	<i>Différents types de modèles . . . . .</i>	71
<b>III.2.</b>	<b>L'ANALYSE CHIMIQUE . . . . .</b>	<b>80</b>
<b>III.2.1.</b>	<b>Importance de l'analyse chimique dans le développement . . . . .</b>	<b>80</b>
<b>III.2.2.</b>	<b>Objectifs de l'activité d'analyse et de contrôle . . . . .</b>	<b>81</b>
<b>III.2.3.</b>	<b>Les moyens mis en œuvre . . . . .</b>	<b>83</b>
<b>III.2.4.</b>	<b>Automatisation des équipements d'analyse en laboratoire . . . . .</b>	<b>84</b>
<b>III.2.5.</b>	<b>Intégration de certains appareils d'analyse dans les unités pilotes . . . . .</b>	<b>86</b>

<b>III.3</b>	<b>TECHNOLOGIE. INSTRUMENTATION. SÉCURITÉ</b>	87
<b>III.3.1.</b>	<b>Fiabilité</b>	87
<b>III.3.2.</b>	<b>Standardisation</b>	88
<b>III.3.3.</b>	<b>Simplicité de conduite</b>	89
<b>III.3.4.</b>	<b>Sécurité</b>	91
<b>III.4.</b>	<b>LES MATHÉMATIQUES APPLIQUÉES</b>	93
<b>III.4.1.</b>	<b>Le domaine d'intervention des mathématiques appliquées</b>	93
<b>III.4.2.</b>	<b>La formulation des modèles mathématiques</b>	94
III.4.2.1.	Analyse des résultats expérimentaux	94
	A. <i>Procédure d'analyse</i>	94
	B. <i>La part des statistiques dans l'analyse des résultats expérimentaux</i>	97
III.4.2.2.	Les plans d'expériences	98
	A. <i>Le cas des modèles formels</i>	99
	B. <i>Le cas des modèles fondamentaux</i>	107
<b>III.4.3.</b>	<b>L'exploitation des modèles mathématiques</b>	111

## DEUXIÈME PARTIE

### EXEMPLES DE DÉVELOPPEMENTS DE PROCÉDÉS

## IV DIMÉRISATION ET CODIMÉRISATION DES OLÉFINES (PROCÉDÉ DIMERSOL)

<b>IV.1.</b>	<b>IDÉE DE DÉPART</b>	125
<b>IV.1.1.</b>	<b>Présentation de l'idée</b>	125
<b>IV.1.2.</b>	<b>Place de l'idée dans le domaine d'intervention de l'IFP</b>	126

## Table des matières

<b>IV.2.</b>	<b>EXAMEN PRÉLIMINAIRE DE L'IDÉE.</b>	126
<b>IV.2.1.</b>	<b>Conjoncture économique favorable.</b>	126
IV.2.1.1.	Disponibilité des charges	126
IV.2.1.2.	Application « essence »	127
IV.2.1.3.	Application « Oxo ».	127
IV.2.2.	Propriété industrielle	127
<b>IV.2.3.</b>	<b>Présentation de la réaction : bilan des connaissances.</b>	128
IV.2.3.1.	Influence de la nature des constituants du système catalytique	129
IV.2.3.2.	Nature des produits obtenus	130
IV.2.3.3.	Influence du rapport $C_3/C_4$ sur la sélectivité en heptènes	131
<b>IV.3.</b>	<b>ÉTUDE PRÉLIMINAIRE DE DÉVELOPPEMENT</b>	131
<b>IV.3.1.</b>	<b>Étude de la cinétique formelle de la réaction.</b>	131
<b>IV.3.2.</b>	<b>Mise en œuvre du système catalytique.</b>	133
IV.3.2.1.	Température de formation du complexe.	133
IV.3.2.2.	Influence de l'eau contenue dans les charges	135
IV.3.2.3.	En résumé	135
<b>IV.3.3.</b>	<b>Qualité des produits obtenus</b>	135
IV.3.3.1.	Application « essence »	135
IV.3.3.2.	Application « Oxo ».	138
<b>IV.4.</b>	<b>BILAN A L'ISSUE DE L'ÉTUDE PRÉLIMINAIRE DE DÉVELOPPEMENT.</b>	139
<b>IV.4.1.</b>	<b>Choix du type de réacteur.</b>	139
IV.4.1.1.	Production d'heptènes.	139
IV.4.1.2.	Production d'essence	142
<b>IV.4.2.</b>	<b>Évaluation économique</b>	142
IV.4.2.1.	Application « essence »	142
IV.4.2.2.	Application « Oxo ».	143
<b>IV.4.3.</b>	<b>Description des schémas de procédé.</b>	145
IV.4.3.1.	Dimersol essence.	145
IV.4.3.2.	Dimersol heptènes	145
<b>IV.4.4.</b>	<b>Conclusion</b>	147

<b>IV.5.</b>	<b>ÉTUDE DE DÉVELOPPEMENT.</b>	147
<b>IV.5.1.</b>	<b>Étude complémentaire de laboratoire.</b>	147
IV.5.1.1.	Destruction du catalyseur	147
IV.5.1.2.	Travaux analytiques.	148
<b>IV.5.2.</b>	<b>Conception du pilote</b>	148
IV.5.2.1.	Objectifs de l'expérimentation	148
IV.5.2.2.	Programme de l'expérimentation	149
<b>IV.5.3.</b>	<b>Description de l'unité pilote</b>	150
IV.5.3.1.	Entrée réacteur	150
IV.5.3.2.	Section réaction	151
IV.5.3.3.	Section stabilisation	151
IV.5.3.4.	Section destruction-lavage	151
<b>IV.5.4.</b>	<b>Résultats « Dimersol essence »</b>	152
IV.5.4.1.	Établissement d'un bilan massique.	152
IV.5.4.2.	Cinétique de la réaction.	154
IV.5.4.3.	Autres résultats obtenus.	155
<b>IV.5.5.</b>	<b>Résultats « Dimersol heptènes »</b>	155
IV.5.5.1.	Établissement d'un bilan massique.	155
IV.5.5.2.	Résultats obtenus	156
<b>IV.5.6.</b>	<b>Conclusions de l'étude de développement</b>	156

## **V LUTTE CONTRE LA POLLUTION : LE TRAITEMENT DES EFFLUENTS SOUFRÉS**

<b>V.1.</b>	<b>IDÉE DE DÉPART</b>	157
<b>V.2.</b>	<b>EXAMEN PRÉLIMINAIRE DE L'IDÉE</b>	158
<b>V.2.1.</b>	<b>Conjoncture économique et politique.</b>	158
<b>V.2.2.</b>	<b>Examen de propriété industrielle.</b>	159
<b>V.2.3.</b>	<b>Étude fondamentale en laboratoire.</b>	159
<b>V.3.</b>	<b>ÉTUDE DE PRÉDÉVELOPPEMENT.</b>	161
<b>V.3.1.</b>	<b>Influence du transfert de masse.</b>	161



<b>V.3.2.</b>	<b>Application de la théorie du transfert.</b> . . . . .	165
<b>V.4.</b>	<b>BILAN A L'ISSUE DU PRÉDÉVELOPPEMENT.</b>	169
<b>V.5.</b>	<b>ÉTUDE DE DÉVELOPPEMENT.</b> . . . . .	170
<b>V.5.1.</b>	<b>Élargissement du modèle</b> . . . . .	170
<b>V.5.2.</b>	<b>Études en unité pilote.</b> . . . . .	173
V.5.2.1.	Conception de l'unité pilote . . . . .	173
V.5.2.2.	Interprétation des résultats. . . . .	175
	A. <i>Vérification définitive du modèle.</i> . . . . .	175
	B. <i>Résultats des expériences de longue durée</i> . . . . .	177
<b>V.5.3.</b>	<b>Essais d'extrapolation. Choix du réacteur industriel.</b> . . . . .	178
<b>V.6.</b>	<b>CONSTRUCTION DE L'UNITÉ.</b> . . . . .	180
<b>V.7.</b>	<b>INTERVENTION DES SERVICES DE DÉVELOPPEMENT SUR LES UNITÉS INDUSTRIELLES.</b>	182
	A. <i>Les eaux résiduaires</i> . . . . .	182
	B. <i>Les fumées de centrales</i> . . . . .	184
<b>VI</b>	<b>FABRICATION D'HUILES PAR HYDRORAFFINAGE</b>	
<b>VI.1.</b>	<b>IDÉE DE DÉPART</b> . . . . .	185
<b>VI.2.</b>	<b>EXAMEN PRÉLIMINAIRE DE L'IDÉE</b> . . . . .	188
<b>VI.2.1.</b>	<b>Conjoncture économique.</b> . . . . .	188
<b>VI.2.2.</b>	<b>Examen de la propriété industrielle.</b> . . . . .	190
<b>VI.2.3.</b>	<b>Bilan des connaissances.</b> . . . . .	190
<b>VI.3.</b>	<b>ÉTUDE DE PRÉDÉVELOPPEMENT.</b> . . . . .	191
<b>VI.4.</b>	<b>DÉCISION DE DÉVELOPPER LE PROCÉDÉ</b> . . . . .	191
<b>VI.5.</b>	<b>ÉTUDE DE DÉVELOPPEMENT.</b> . . . . .	192



<b>VI.5.1.</b>	<b>Conception du pilote</b> . . . . .	192
<b>VI.5.2.</b>	<b>Adaptation des pilotes à la mise au point du procédé</b> . . . . .	194
<b>VI.5.3.</b>	<b>Expérimentation.</b> . . . . .	195
VI.5.3.1.	Expérimentation en pilote . . . . .	195
	<i>A. Nature de la charge.</i> . . . . .	195
	<i>B. Conditions opératoires.</i> . . . . .	196
VI.5.3.2.	Incidence sur autres opérations . . . . .	197
VI.5.3.3.	Exploitation des résultats . . . . .	197
<b>VI.6.</b>	<b>EXAMEN DE L'ENSEMBLE DES RÉSULTATS.</b>	201
<b>VI.6.1.</b>	<b>Données pour le dessin et le calcul d'une unité industrielle.</b> . . . . .	201
<b>VI.6.2.</b>	<b>Commercialisation du procédé.</b> . . . . .	205
<b>VI.7.</b>	<b>CONCLUSION</b> . . . . .	206
<b>VII</b>	<b>PROCÉDÉ D'OXYDATION DU CYCLOHEXANE</b>	
<b>VII.1.</b>	<b>IDÉE DE DÉPART</b> . . . . .	207
<b>VII.2.</b>	<b>EXAMEN PRÉLIMINAIRE DE L'IDÉE</b> . . . . .	207
<b>VII.2.1.</b>	<b>Conjoncture économique.</b> . . . . .	207
<b>VII.2.2.</b>	<b>Examen de propriété industrielle.</b> . . . . .	208
<b>VII.2.3.</b>	<b>Étude fondamentale.</b> . . . . .	208
<b>VII.3.</b>	<b>ÉTUDE DE PRÉDÉVELOPPEMENT.</b> . . . . .	213
	<i>A. Influence du temps de séjour sur la sélectivité.</i> . . . . .	213
	<i>B. Influence de la teneur en oxygène dans le gaz injecté dans le réacteur.</i> . . . . .	214
	<i>C. Influence de la quantité d'acide borique mis en œuvre.</i> . . . . .	214
	<i>D. Étude de la variation de la sélectivité en fonction de la conversion.</i> . . . . .	216
	<i>E. Rapport cyclohexanol/cyclohexanone</i> . . . . .	216

## Table des matières

<b>VII.4.</b>	<b>BILAN A L'ISSUE DE L'ÉTUDE DE PRÉ-DÉVELOPPEMENT . . . . .</b>	<b>216</b>
<b>VII.5.</b>	<b>ÉTUDE DE DÉVELOPPEMENT . . . . .</b>	<b>216</b>
<b>VII.5.1.</b>	<b>Études complémentaires en laboratoire . . . . .</b>	<b>221</b>
<b>VII.5.2.</b>	<b>Études en unité pilote . . . . .</b>	<b>223</b>
VII.5.2.1.	Conception et construction du pilote . . . . .	223
VII.5.2.2.	Expérimentation pilote . . . . .	224
<b>VII.5.3.</b>	<b>Études d'extrapolation . . . . .</b>	<b>229</b>
<b>VII.6.</b>	<b>EXAMEN DE L'ENSEMBLE DES RÉSULTATS</b>	<b>231</b>
	<i>A. Établissement du livre de procédé . . . . .</i>	<i>232</i>
	<i>B. Protection des résultats . . . . .</i>	<i>233</i>
<b>VII.7.</b>	<b>INTERVENTION DU SERVICE DE DÉVELOPPEMENT SUR LES UNITÉS INDUSTRIELLES .</b>	<b>233</b>

## CONCLUSION

<b>VIII</b>	<b>REMARQUES FINALES . . . . .</b>	<b>237</b>
-------------	------------------------------------	------------

	<i>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES . . . . .</i>	<i>241</i>
--	--	------------