



UCL Université catholique de Louvain - Mons

MONS

Etude de la faisabilité économique d'un procédé de valorisation de flux styréniques recyclés

Promoteur :

Jean Sébastien TANCREZ

Mémoire présenté par :

Thierry PIETERAERENS

En vue de l'obtention du diplôme
de Master en sciences de gestion

Année académique 2012-2013

Ce document contient des informations confidentielles de Total. Aucune partie de ce document ne peut être publiée, copiée, utilisée ou distribuée d'aucune manière sans l'accord explicite et écrit de Total Research & Technology Feluy.

PRÉAMBULE

Ce document contient des informations confidentielles et stratégiques. Aucune partie de ce document ne peut être publiée, copiée, utilisée ou distribuée d'aucune manière sans l'accord explicite et écrit de Total Research & Technology Feluy.

REMERCIEMENTS

Je remercie l'ensemble des personnes qui m'ont aidé au cours de ce travail, tant au point de vue professionnel que personnel. Et plus particulièrement;

Monsieur Jean Sébastien Tancrez, promoteur pour ce travail de fin d'étude, pour sa patience et ses conseils tout au long de ce travail.

Monsieur Michel Duc, initiateur de ce projet, pour les informations fournies nécessaires à la construction de ce travail.

Un remerciement spécial à 'Léti' pour sa patience et ses nombreuses lectures. Et non, je ne suis pas responsable de la naissance d'éventuels cheveux blancs !

RÉSUMÉ

Dans les pays industrialisés, le recyclage des matières plastiques fait débat, la consommation ne cesse de croître, et les solutions de revalorisation de cette matière 'déchet' suscitent davantage d'intérêt dans une société à l'écologie grandissante.

Total, acteur dans le domaine des matériaux plastiques, s'implique de manière active dans la fin de vie des plastiques qu'il produit et étudie un projet d'implantation d'une unité de recyclage chimique. Le domaine ciblé est spécifique et concerne le polystyrène qui figure parmi de nombreux matériaux que produit le groupe. En quelques mots, grâce à une technologie développée par Total, le but est de revaloriser une matière plastique déchet en la transformant en une nouvelle matière, le styrène, qui sera à son tour retransformé en un nouveau plastique, le polystyrène.

Au travers de ce travail, l'aspect économique de ce projet de taille industrielle est étudié. Dans un environnement financier complexe et risqué, la problématique de l'évaluation des investissements est devenue une préoccupation majeure au vu des risques du marché et des sommes affectées. Ainsi, une mauvaise évaluation d'un projet peut entraver la concrétisation et la mise en œuvre d'autres plans envisagés. En conséquence, les investisseurs sont de plus en plus amenés à se questionner sur leur estimation, sur les critères de décision utilisés mais également sur les modèles utilisés dans les études de financement des projets.

Par une première analyse, nous avons abordé la faisabilité économique du projet par des méthodes traditionnelles d'évaluation d'investissements tels que les analyses de coûts et des flux financiers pour 15 années d'amortissement. Ces études ont permis la détermination d'une valeur actuelle nette de 14.5 millions d'euros et un taux de rentabilité de plus 12%.

En supplément à ces méthodes, nous avons apporté une démarche d'évaluation multifactorielle afin de vérifier la robustesse financière du projet.

Les théories de la valeur actuelle nette et du taux de rentabilité ont été complétées par des analyses de sensibilité face à des paramètres influençant la rentabilité financière.

En effet, l'évaluation financière de tout projet exige de scruter l'avenir et de détecter tous les paramètres pour lesquels des changements dans les hypothèses de valeurs sont déterminants vis-à-vis du rendement de celui-ci. Pour ce projet, les paramètres choisis sont l'investissement, le prix des matières premières et le prix du produit fini, tous les trois variés à 20% autour de leur valeur nominale. Cette analyse a été réalisée selon 2 approches complémentaires.

La première approche consiste, grâce à la méthode OFAT (one function at a time), à faire varier un seul paramètre à la fois afin d'observer l'influence de ce paramètre sur le système. Parmi ceux-ci, le prix du produit fini s'est avéré être le facteur le plus influent sur la stabilité économique.

La deuxième approche, basée sur la simulation Monte Carlo, a permis de considérer les interactions possibles entre tous les paramètres influents afin d'étudier la solidité économique du projet, qui s'est confirmé être rentable dans près de 80% des cas.

Projet issu de la pétrochimie, la dernière partie de ce travail a pris en compte l'influence de la volatilité du prix du baril de pétrole sur l'ensemble des variables du projet. La simulation de Monte Carlo a permis, en fonction de la conjoncture offerte par le marché, de montrer qu'une hausse du prix du baril de pétrole accroît la rentabilité économique du projet.

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION	10
1.1 CONTEXTE	10
1.2. PRÉSENTATION ACTIVITÉ DU GROUPE	12
1.2.1. <i>Total</i>	12
1.2.2. <i>Total refining & chemicals</i>	12
1.2.3. <i>Total Research and Technology Feluy</i>	12
1.3. DES HYDROCARBURES AUX POLYMÈRES	13
1.4. UN POLYMÈRE: LE POLYSTYRÈNE	14
1.5. DÉVELOPPEMENT DU CONTEXTE - PLAN DE L'ÉTUDE	17
2. CONCEPTS THÉORIQUES	20
2.1. ETUDES DES COÛTS	20
2.1.1. <i>Types de coûts</i>	20
2.1.2. <i>Charges directes et indirectes</i>	21
2.1.3. <i>Coût fixe / coût variable</i>	21
2.2. VALEUR DU TEMPS	22
2.2.1. <i>Capitalisation d'un flux - Valeur future</i>	22
2.2.2. <i>Actualisation d'un flux - Valeur actuelle</i>	22
2.3. RENTABILITÉ D'UN PROJET	22
2.3.1. <i>La valeur actuelle nette</i>	23
2.3.2. <i>Indice de profitabilité</i>	25
2.3.3. <i>Taux de rentabilité interne</i>	25
2.3.4. <i>Délai de récupération des capitaux investis (DRCI)</i>	26
2.3.5. <i>Conclusion: quel outil choisir dans notre cas ?</i>	26
2.4. TRI ET VAN: LIMITATIONS	27
2.5. ANALYSE DE SENSIBILITÉ	29
2.5.1. <i>Limite de l'analyse de sensibilité</i>	32
3. PREMIER AXE: ETUDE COMPARATIVE DE PROCÉDÉS	33
3.1. CONTEXTE	33
3.2. PREMIÈRE UNITÉ: PROCÉDÉ DE PYROLYSE	34
3.3. DEUXIÈME UNITÉ: PROCÉDÉ DE CRAQUAGE THERMIQUE-CATALYTIQUE	36
3.4. TROISIÈME UNITÉ: PROCÉDÉ D'HYDROGÉNATION	39
3.5. CONCLUSION INTERMÉDIAIRE ET DISCUSSION	41
3.5.1. <i>Conclusion</i>	41
3.5.2. <i>Discussion</i>	42
4. DEUXIÈME AXE: ETUDE DU PROJET	43
4.1. RAPPEL DU CONTEXTE	43
4.2. ETUDE ÉCONOMIQUE DE LA TECHNOLOGIE DE RÉFÉRENCE	46

4.3. INVESTISSEMENT POUR LA TECHNOLOGIE DE RÉFÉRENCE	46
4.4. ÉTUDE DES COÛTS	47
4.4.1. <i>Coûts fixes</i>	47
4.4.2. <i>Coûts variables</i>	47
4.5. FLUX TOTAUX D'EXPLOITATION	50
5. TROISIÈME AXE: ANALYSE DE SENSIBILITÉ	58
5.1. CONTEXTE	58
5.2. MÉTHODE OFAT	59
5.3. MÉTHODE MONTE CARLO.....	64
5.3.1. <i>Détermination des scénarii probables</i>	64
5.3.2. <i>Simulation Monte Carlo</i>	66
6. SENSIBILITÉ DU PROJET EN FONCTION DU PRIX DU BARIL DE PÉTROLE....	74
6.1. CONTEXTE	74
6.2. VARIATION DU PRIX DU BARIL DE PÉTROLE.	75
6.2.1. DÉTERMINATION DES SCÉNARII ÉCONOMIQUES PROBABLES	75
6.2.2. SIMULATION MONTE CARLO.....	77
7. ÉTUDE DES TECHNOLOGIES 1, 2 ET 3.	82
7.1. TECHNOLOGIE 1	83
7.2. TECHNOLOGIE 2	83
7.3. TECHNOLOGIE 3	84
7.4. DISCUSSION AUTOUR DES TECHNOLOGIES ENVISAGEABLES	84
8. DISCUSSION ET PRISE DE RECUL.....	87
9. CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	89
9.1. CONCLUSION.....	89
9.2. PERSPECTIVES	91
10. TABLEAU DES ABRÉVIATIONS.	93
11. BIBLIOGRAPHIE	94
12. ANNEXES	96
12.1. FLUX D'EXPLOITATION POUR LA TECHNOLOGIE 1	97
12.2. FLUX D'EXPLOITATION POUR LA TECHNOLOGIE 2	98
12.3. FLUX D'EXPLOITATION POUR LA TECHNOLOGIE 3	99

TABLE DES FIGURES

Figure 1: Chemin de production des hydrocarbures aux polymères	13
Figure 2: Applications du polystyrène	14
Figure 3: Fabrication de PS -EPS -ABS, limitations d'un système ouvert.....	15
Figure 4: Situation géographique Gonfreville - Carling	18
Figure 5: Méthode du direct costing	21
Figure 6: VAN en fonction du taux d'actualisation pour 2 projets	28
Figure 7: Schéma bloc commun à chaque technologie	44
Figure 8: Evolution de la VAN.....	62
Figure 9: Evolution du TRI	63
Figure 10: Relation linéaire entre les paramètres influents.....	68
Figure 11: Cash flows et VAN dans les cas pessimiste, attendu et optimiste.....	69
Figure 12: Distribution normale des paramètres.....	70
Figure 13: Distribution triangulaire de la variable taxe	71
Figure 14: Distribution des cash-flows.....	72
Figure 15: Probabilité cumulée des cash flows.....	72
Figure 16: VAN et TRI en fonction du prix du baril de pétrole.....	75
Figure 17: Volatilité du prix du baril de pétrole.....	74
Figure 18: Comparaison VAN pour les cas pessimiste et optimiste	76
Figure 19: Evolution de la VAN et des CF en fonction du prix du baril de pétrole	78
Figure 20: Fréquence et probabilité en fonction des cash-flows.....	80
Figure 21: Probabilité cumulée des cash flows.....	80
Figure 22: VAN et TRI des 4 technologies.....	85

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1: Comparaison des recettes de 2 projets à investissements égaux	27
Tableau 2: Comparaison des VAN et TRI de 2 projets à investissements égaux	27
Tableau 3: Coûts fixes pyrolyse.....	34
Tableau 4: Coûts variables pyrolyse.....	35
Tableau 5: Coûts de production.....	35
Tableau 6: Coûts fixes unité de craquage	36
Tableau 7: Coûts variables unité craquage.	37
Tableau 8: Coût de production unité de craquage.....	38

Tableau 9 : Coûts fixes unité d'hydrogénation.....	39
Tableau 10: Coûts variables unité d'hydrogénation.....	39
Tableau 11: Coûts de production unité d'hydrogénation	40
Tableau 12: Comparaison des coûts de production	41
Tableau 13: Investissement pour la technologie de référence.....	46
Tableau 14: Coûts fixes.....	47
Tableau 15: Coûts variables.....	47
Tableau 16: Chiffre annuel	49
Tableau 17: Hypothèses au calcul des flux d'exploitation.....	50
Tableau 18: Ensemble des coûts	51
Tableau 19: Flux d'exploitation pour la technologie de référence.....	52
Tableau 20: Coûts variables par tonne de styrène produit	53
Tableau 21: VAN et TRI pour la technologie de référence	59
Tableau 22: Sensibilité du styrène.....	60
Tableau 23: Sensibilité du capex.....	61
Tableau 24: Sensibilité de la matière première.....	61
Tableau 25: Récapitulatif des variations de VAN et TRI.....	62
Tableau 26: Scénarii probables	65
Tableau 27: Cash flows pour les scénarii étudiés.....	67
Tableau 28: Total des cash flows et VAN pour les différents scénarii	69
Tableau 29: Base de la simulation Monte Carlo	71
Tableau 30: Variation VAN et TRI pour le scénario attendu	74
Tableau 31: VAN et TRI en fonction du prix du baril pour le scénario optimiste	76
Tableau 32: VAN et TRI en fonction du prix du baril pour le scénario pessimiste	76
Tableau 33: Sommes des cash flows et VAN pour les trois scénarii	78
Tableau 34: Valeurs des paramètres utilisés pour la simulation.....	79
Tableau 35: Résumé des coûts pour la technologie 1.....	83
Tableau 36: Résumé des coûts pour la technologie 2.....	83
Tableau 37: Résumé des coûts pour la technologie 3.....	84
Tableau 38: VAN et TRI pour l'ensemble des technologies.....	84
Tableau 39: VAN et TRI pour l'ensemble des technologies et cas	85

1. INTRODUCTION

1.1 CONTEXTE

Dans les pays industrialisés, le recyclage des matières plastiques fait débat, la consommation ne cesse de croître, et les solutions de revalorisation de cette matière 'déchet' suscitent davantage d'intérêt dans une société à l'écologie grandissante.

En effet, les activités de collecte et de revalorisation sont en expansion et chaque grande variété de plastique est devenue cible du recyclage. De nouvelles méthodes sont sans cesse introduites pour identifier et séparer ces déchets afin de les revaloriser en nouveau matériau.

Jusqu'il y a peu, les déchets plastiques étaient pour la plupart enfouis ou incinérés. Certains déchets étaient également utilisés dans la fabrication de l'acier comme source d'hydrogène et de monoxyde de carbone. Cependant, les déchets plastiques constituent un large stock d'hydrocarbures qui peuvent, en tant que matière première, être transformés en de nouveaux polymères.

Les plastiques sont présents dans la vie de tous les jours et permettent d'économiser des quantités importantes de CO₂ par rapport à l'utilisation de matériaux alternatifs [1]. Un bon exemple est l'allègement des voitures par le remplacement de matériaux métalliques par des matériaux plastiques de performance équivalente. Toutefois, malgré des avantages indéniables, les grandes quantités de plastique en usage présentent un enjeu important au niveau de la gestion de leur fin de vie. Les plastiques peuvent être incinérés, recyclés chimiquement ou recyclés mécaniquement, par triage. Pour cette dernière option, le produit obtenu, souvent dégradé et susceptible de contenir des contaminants, ne peut être réutilisé pour les mêmes applications que des plastiques vierges.

La Commission Européenne a défini, à travers un programme cadre, des objectifs de collecte et retraitement des plastiques qui imposent un taux de valorisation minimum et évolutif pour les années à venir ; le but ultime étant d'éviter la mise en décharge [2].

Total, acteur dans le domaine des matériaux polymères, s'implique de manière active dans la fin de vie des plastiques qu'il produit. Total étudie notamment un projet de recyclage chimique du polystyrène. Le but est de revaloriser une matière plastique déchet et la transformer en matière première, le styrène, base à la création d'un nouveau plastique, le polystyrène.

Ce travail a pour but de mettre en exergue l'étude de faisabilité économique d'un tel projet, pouvant éventuellement conduire à une mise à l'échelle industrielle. L'objet de la présente étude se portera uniquement sur le côté faisabilité économique de la mise en place de l'installation, par une approche académique des données industrielles.

Dans un contexte financier complexe et risqué, la problématique de l'évaluation des projets d'investissement devient de plus en plus exigeante au vu des risques et sommes affectées. Basé sur le développement d'une technologie, ce travail abordera la rentabilité économique du projet par des méthodes d'évaluation d'investissements tels que les analyses de coûts, la valeur actuelle nette et le taux de rentabilité. En complémentarité à ces méthodes 'traditionnelles', le projet sera soumis à une étude de sensibilité vis-à-vis de plusieurs facteurs pertinents dans la rentabilité de celui-ci. Dans un premier temps, chaque facteur influant sur le projet sera étudié indépendamment (méthode OFAT: one function at a time). Ensuite, la simulation de Monte Carlo, qui considère toutes les combinaisons possibles pour les facteurs déterminants, permettra d'analyser la robustesse économique du projet.

Etroitement lié au domaine de la pétrochimie, le travail abordera également la sensibilité économique du projet face aux fluctuations du prix du pétrole.

Il est à préciser que la position du produit final sur le marché ainsi que les décisions futures ne seront pas débattues dans ce travail et laissée libre arbitre à la société Total.

1.2. PRÉSENTATION ACTIVITÉ DU GROUPE

1.2.1. TOTAL

Le groupe Total, né d'une fusion entre Total, Petrofina et Elf, est un acteur majeur de l'énergie et l'un des plus grands groupes pétroliers du Monde. Fort de sa cinquième place mondiale, il est implanté dans plus de 130 pays et compte 96 400 collaborateurs. Le groupe s'appuie sur une solide expérience de plus de 80 ans dans les domaines du pétrole et du gaz. Les activités de Total se divisent en 3 grands secteurs [3] :

- L'amont regroupe l'exploration, l'exploitation et la production d'hydrocarbures.
- L'aval se dédie au trading, à la distribution ainsi qu'au transport maritime.
- La chimie du groupe Total comprend les activités de chimie de base telles que la pétrochimie, le raffinage et les fertilisants, ainsi que la chimie de spécialités (caoutchoucs, adhésifs, métallisation,...).

1.2.2. TOTAL REFINING & CHEMICALS

Total Refining & Chemicals occupe plus de 50000 personnes dans le monde. L'outil est composé de 21 sites de production pétrochimiques, 11 vapocraqueurs, 13 raffineries et plus de 150 sites industriels dédiés à la chimie de base (oléfines, aromatiques), de spécialités (le polyéthylène, le polypropylène, le polystyrène et plus récemment, le polylactide) et de fertilisants.

1.2.3. TOTAL RESEARCH AND TECHNOLOGY FELUY

Le groupe Total compte trois centres de recherche situés à Feluy (Belgique), La Porte (Etats-Unis) et Lacq/Mont (France). Le centre de Feluy est le plus grand des trois et compte environ 450 personnes. Les activités du centre de recherche se focalisent principalement sur l'amélioration des produits et la mise au point de produits innovants.

1.3. DES HYDROCARBURES AUX POLYMÈRES

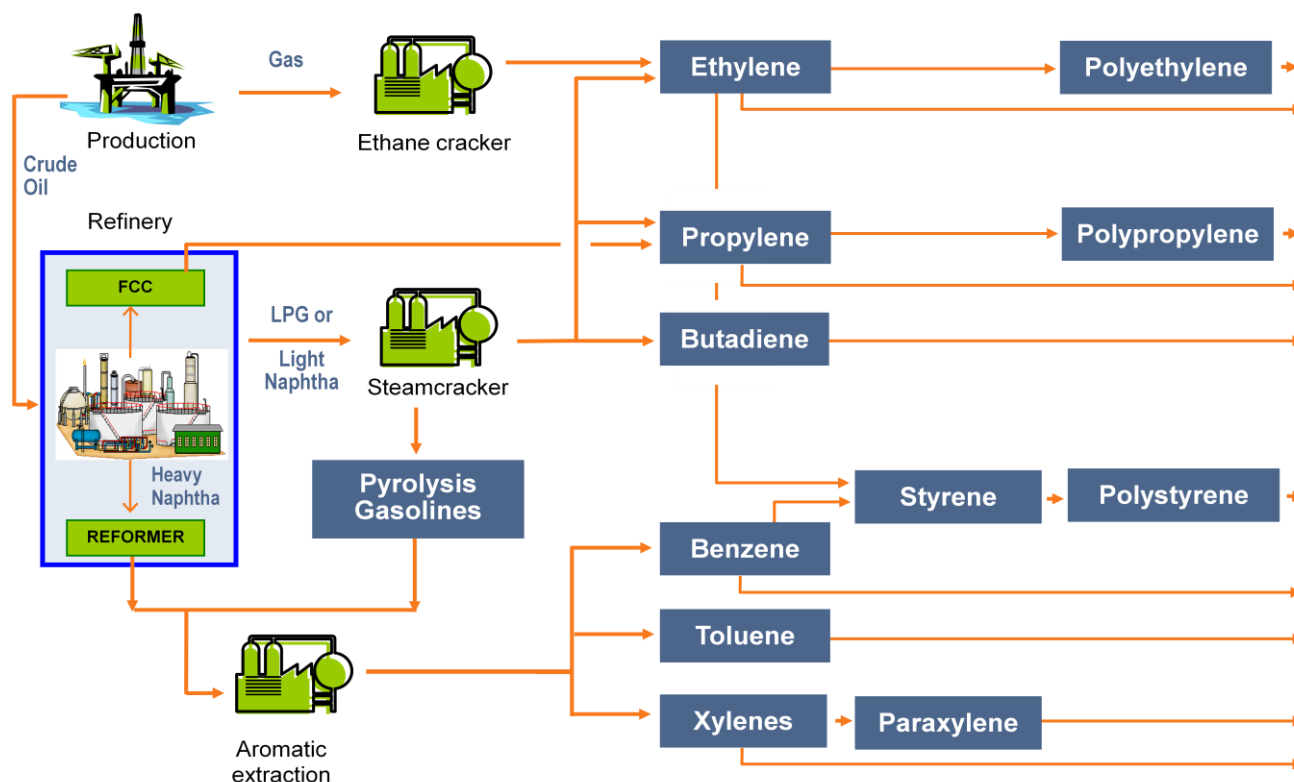


FIGURE 1: CHEMIN DE PRODUCTION DES HYDROCARBONES AUX POLYMERES [4]

La pétrochimie est la chimie des dérivés du pétrole, principalement le naphta et le gaz naturel issus du raffinage du pétrole. Dans les usines pétrochimiques, souvent associées aux raffineries, le naphta est traité dans un vapocraqueur chauffé à très haute température (800°C).

Ensuite, intervient la division en hydrocarbures plus légers que l'on nomme les « grands intermédiaires ». Ceux-ci sont oléfiniques ou aromatiques. Parmi les oléfines, dominent des molécules à 2 carbones (l'éthylène), 3 carbones (propylène), ou 4 carbones (butène et butadiène). Pour les aromatiques, il s'agit du benzène, du toluène et du xylène.

Le produit final, la matière plastique, est finalement obtenue par polymérisation: réaction chimique qui permet de créer un enchainement répétitif de petites molécules formant ainsi de grandes chaînes moléculaires appelées polymères. Ces polymères se présentent le plus souvent sous forme de granulés ou de poudres.

Ainsi, avant de devenir un objet plastique, ils devront suivre tout un parcours de transformations. Ce parcours leur donnera une forme, une couleur et des propriétés précises, suivant l'usage que l'on veut en faire. Ils seront mélangés, chauffés, fondus, additivés, mis en forme selon de multiples procédés (extrusion, thermoformage, injection-moulage...) puis refroidis. Au final, ils ressortiront sous diverses formes (tube, plaque,...), suivant la technique de transformation appliquée [4].

1.4. UN POLYMÈRE: LE POLYSTYRÈNE

Issu de la chimie de l'éthylène et du benzène, Total produit du polystyrène utilisé dans plusieurs secteurs tels que [3] :

L'emballage, y compris l'alimentaire : pot de yaourt, film de protection, barquette, ...

Les applications électriques, électroniques : boîtier TV, intérieur de frigo, ...

Les feuilles de plastique : panneau de douche, carte de visite,...

Application médicale : boîte de pétri, seringue, ...

Isolation : polystyrène expansé utilisé pour l'isolation thermique des bâtiments

Divers : ustensiles de cuisine, boîtier cd, rasoir. cintre. ...



FIGURE 2: APPLICATIONS DU POLYSTYRÈNE

Malgré de nombreuses applications et un marché bien développé, l'après vie de ces produits reste aujourd'hui un sujet délicat à traiter. En effet, l'industrie du polystyrène apparaît comme un système ouvert dont les problématiques se situent aux entrées et sorties du système [5] (voir figure 3).

- Aux entrées : compte tenu de la difficulté d'approvisionnement en matières premières, l'éthylène et le benzène proviennent des raffineries et craqueurs nécessaires à l'obtention du styrène, future matière première pour la production de PS, d'EPS et d'ABS.
- Aux sorties : le système est ouvert de par l'absence de recyclage des déchets que le système génère.

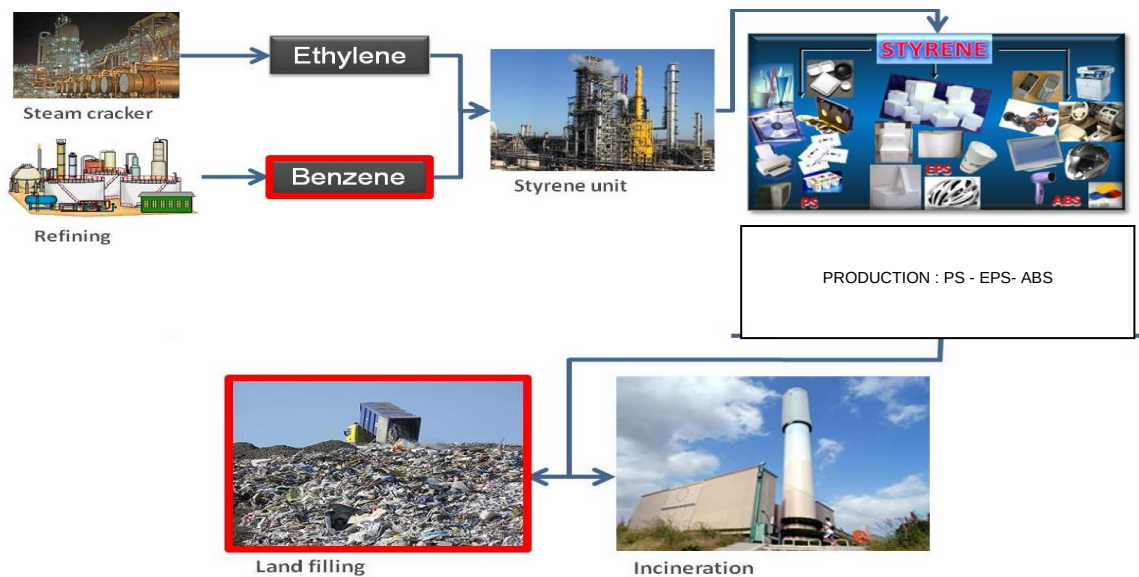


FIGURE 3: FABRICATION DE PS -EPS - ABS, LIMITATIONS D'UN SYSTÈME OUVERT

Le recyclage des déchets plastiques styréniques (PS) est à l'heure actuelle encore marginal. Seulement 45.5% des déchets issus de l'industrie styrénique sont collectés en Europe. Parmi ceux-ci, 44% sont incinérés, la majeure partie, 53.5%, est mise en décharge et 1% est exportée. Uniquement 1.5% des déchets plastiques styréniques sont recyclés mécaniquement pour répondre à la demande des entreprises transformant ces déchets en articles plastiques bas de gamme tels que par exemple des bancs publics, des pots de fleurs, des plateaux de fruits, ...

La situation est similaire en Amérique avec uniquement 2% de polystyrène recyclé mécaniquement, tandis que 98% de ces déchets sont mis en décharge [2]. Cette situation dans laquelle prévaut la mise en décharge plutôt qu'une valorisation du déchet

en fin de vie génère des préoccupations concernant l'accumulation de déchets de polystyrène dans la nature.

Cette situation motive l'industrie du plastique à envisager l'élimination progressive du matériau polystyrène, en particulier dans les produits d'emballage, ce qui représente 40% de la demande pour l'Europe, 60% en Amérique du Nord et son remplacement par des matériaux dont les cycles de recyclage sont efficaces (par exemple le polyéthylène, le polypropylène, carton, verre ...). Globalement, le taux moyen de croissance annuelle de la demande en polystyrène utilisé dans les applications d'emballage est resté stable au cours des 15 dernières années, alors que la croissance des plastiques recyclés est montée en flèche (+250%) sur la même période [5].

Au cours de la même période, une directive européenne a été mise en place pour inciter à la collecte et au traitement des déchets de l'industrie.

Tout producteur ou tout détenteur de déchets doit procéder lui-même à leur traitement ou doit le sous-traiter à un négociant, établissement ou entreprise. Les États membres peuvent coopérer, si nécessaire, pour parvenir à l'établissement d'un réseau d'installations d'élimination des déchets. Ce réseau devra permettre l'indépendance de l'Union européenne en matière de traitement des déchets [2].

Dans cette optique, Total a développé le concept LOOPS. L'idée est de concevoir une unité capable de recycler du polystyrène et ainsi palier, en partie, grâce à une 'boucle', au problème de système ouvert que représente la fabrication du polystyrène.

En effet, la valorisation du plastique par recyclage, recueilli principalement par des méthodes mécaniques (tri manuel, soit à l'aide de machine, soit par action humaine), est développée grâce à sa simplicité, au coût modéré du plastique déchet et au respect de l'environnement. Cependant, la matière plastique provenant d'un recyclage mécanique peut être partiellement dégradée (couleur, résistance mécanique) et contenir des contaminants (autres plastiques, métaux...), et ne peut être réutilisée au même titre que du plastique vierge, notamment pour la fabrication d'emballages susceptibles d'entrer en contact avec des aliments [4].

Quant à l'incinération, elle peut générer des effluents secondaires pouvant présenter des risques sanitaires et n'aboutit qu'à une valorisation limitée des déchets plastiques [1].

L'avantage du recyclage chimique est la possibilité de récupérer des « briques élémentaires » (monomère styrène) de pureté commerciale, pouvant être réutilisées pour la production de polystyrène, sans limitation d'application [4]. Mais seules quelques entreprises se risquent dans ce domaine où le procédé est toujours en développement. De plus, les conditions techniques et économiques ont été, jusqu'à présent, peu favorables à l'entrée en phase industrielle de ce type de procédé.

1.5. DÉVELOPPEMENT DU CONTEXTE - PLAN DE L'ÉTUDE

Dans un premier temps, Total travaille activement à la réalisation d'une unité pilote capable de transformer les déchets de polystyrène afin de les revaloriser. Par cette installation, Total met en avant sa connaissance et la faisabilité technique d'un tel procédé. Le monomère de styrène produit doit être d'excellente qualité afin de pouvoir le polymériser à nouveau et de reformer de nouveaux produits pour lesquels les contraintes de qualité sont très poussées. La réussite d'un tel projet, véritable 'vitrine technologique', justifiera le développement à échelle industrielle du concept.

Subséquemment, au delà de l'échelle pilote et afin prouver le caractère durable et respectueux de l'environnement de ses produits, Total nourrit le projet d'une installation de taille industrielle, idéalement située dans le bassin industriel de Carling (France).

Le choix de ce site est justifié par le fait que Total possède une unité de polymérisation de styrène implantée dans le bassin industriel de Carling, dotée de trois lignes de production. La capacité de cette unité est de plus de 200000 tonnes par an de polystyrène. Figurant parmi les trois plus grosses unités de production du groupe, cette installation souffre pourtant d'un handicap majeur: en 2009, Total arrête les activités de l'unité produisant du styrène, matière première de l'unité polystyrène. Située au milieu des terres, l'unité de Carling est désormais approvisionnée par train et camion, en provenance d'une usine de production de styrène située à Gonfreville (France, voir figure 4).



FIGURE 4: SITUATION GÉOGRAPHIQUE GONFREVILLE - CARLING (SOURCE : WWW.GOOGLE.COM)

Près de 700 km séparent la source de matière première de l'usine de son lieu de transformation. Le choix d'implantation du projet à côté du site de Carling se justifie par la méthode d'approvisionnement de l'usine. Actuellement, l'approvisionnement en matière première par train ou camion implique des frais logistiques conséquents. L'installation d'une unité de recyclage produisant du styrène, alimentant directement l'usine de transformation, permettrait de faire chuter les frais de transport mais également l'impact environnemental (diminution des rejets de CO₂) d'une telle logistique.

L'usine de Carling consomme près de 160000 tonnes de styrène (matière première principale) par an. En 2012, l'approvisionnement entre le site de Gonfreville et le site de Carling a nécessité l'affrètement de 110 wagons. Les coûts se divisent autour de 3 axes : le coût moyen de transport, le coût de location des wagons et le coût logistique propre au site (gestion des wagons vides et pleins). Au total, cela représente un supplément de 26.5 euros¹ par tonne de produit sorti de l'unité de Carling.

¹ Coût logistique global, estimation 2012. Donnée confidentielle propriété de Total.

Afin de développer l'étude de faisabilité économique, nous allons passer en revue plusieurs technologies techniques. Pour plus de facilité, nous développerons et détaillerons complètement l'étude à partir d'une seule technologie. Les autres seront uniquement interprétées au niveau des résultats.

Le travail se présente en trois axes:

Le premier axe a pour objectif de comparer les différentes solutions potentielles en combinant des notions techniques et économiques et in fine de justifier le choix d'un procédé technologique. La solution technique la plus intéressante économiquement, assurant un rendement élevé avec un coût de production minimum sera sélectionnée et utilisée comme base dans la suite du travail.

Le deuxième axe aborde l'évaluation comptable complète de l'installation industrielle. Nous déterminerons les cash flows pour les 15 années à venir, ainsi que la valeur actuelle nette et le taux de rentabilité de l'installation sur toute la durée de vie économique du projet².

Le troisième axe concerne une étude de sensibilité économique vis-à-vis de plusieurs paramètres pertinents, tels que le capex (investissement initial), le prix de la matière première (déchets polystyrène), le prix du produit fini (le styrène), tous à -20% et +20% de leur estimation. En découleront des scénarii économiques qui, pris d'abord indépendamment, ensuite dans leur globalité, permettront d'évaluer la robustesse économique de l'outil en fonction des variations possibles du marché. Cette étude de sensibilité prendra également en compte les fluctuations du prix du pétrole, dont la volatilité importante a une incidence directe sur un projet pétrochimique tel que celui étudié.

² L'évaluation de la durée de vie du projet est délicate. Généralement, la durée de vie économique d'un projet couvre la durée d'amortissement fiscal (durée fixée en fonction des pays). Bien souvent, la vie économique d'un projet excède la durée de l'amortissement.

2. CONCEPTS THÉORIQUES

Comme présenté, l'objectif de ce travail est de démontrer la faisabilité économique d'un projet de revalorisation de déchets styréniques.

Deux concepts dépendants sont traités par cette étude. Le premier concerne une étude complète des coûts et charges. Ces coûts, décrits dans la suite de ce travail, nous permettent de mettre en exergue les moyens nécessaires à l'élaboration du projet. Le deuxième concept concerne la rentabilité du projet sur l'ensemble de la vie économique de l'installation.

2.1. ETUDES DES COÛTS

2.1.1. TYPES DE COÛTS

Il existe différents types de coûts [5]. Un coût au sens général du terme est un regroupement de charges qui peuvent correspondre :

- à une fonction de l'entreprise : production, distribution, ...
- à un moyen d'exploitation : bureau, machine ou poste de travail.
- à une activité d'exploitation : famille de produits (marchandises, biens fabriqués, services rendus), produit individualisé, ou stade d'élaboration d'un produit (étude, achat, production, distribution, ...).

En ce qui concerne les coûts des produits d'entreprises de production ou de transformation, on distingue en particulier [5]:

- les coûts de production, représentant tout ce qu'ont coûté les produits semi-ouvrés ou finis, ou les services créés par l'entreprise, c'est-à-dire le coût des matières, fournitures et services consommés et des autres coûts engagés par l'entreprise au cours des opérations de production, jusqu'au stade qui précède immédiatement leur stockage éventuel et/ou leur vente.
- les coûts de revient des produits vendus qui, outre le coût des produits pris en stock, incluent une quote-part appropriée de charges "hors production", soit généralement des charges financières et des charges de recherche et développement, d'administration et de distribution.

On parle de calcul de coûts complets lorsque ces coûts calculés tiennent compte de toutes les charges supportées par l'entreprise, de coûts partiels lorsqu'on ne prend en compte dans le calcul qu'une partie de ces charges : soit les éléments directs, c'est-à-dire affectables sans ambiguïté aux produits (infrastructure, matériel,...), soit les éléments variables, c'est-à-dire variant proportionnellement avec les quantités produites ou vendues.

2.1.2. CHARGES DIRECTES ET INDIRECTES

Une charge est dite directe par rapport au coût du produit considéré si son affectation est possible sans calcul conventionnel, grâce à un moyen de mesure effectivement disponible (compteur, chronomètre, pointage, ...) [6].

Les charges indirectes sont les charges qui concernent plusieurs produits (et parfois même tous les produits) de l'entreprise et qui sont réparties (ou "imputées") entre ces produits à l'aide de clés de répartition [6].

2.1.3. COÛT FIXE / COÛT VARIABLE

Un coût fixe est indépendant des quantités produites. Un coût variable est proportionnel à la quantité de produits fabriqués [7].

Une méthode, appelée direct costing, consiste à écarter systématiquement les coûts fixes du calcul des coûts des produits et à les transférer globalement à la charge du résultat de la période (voir figure 5).

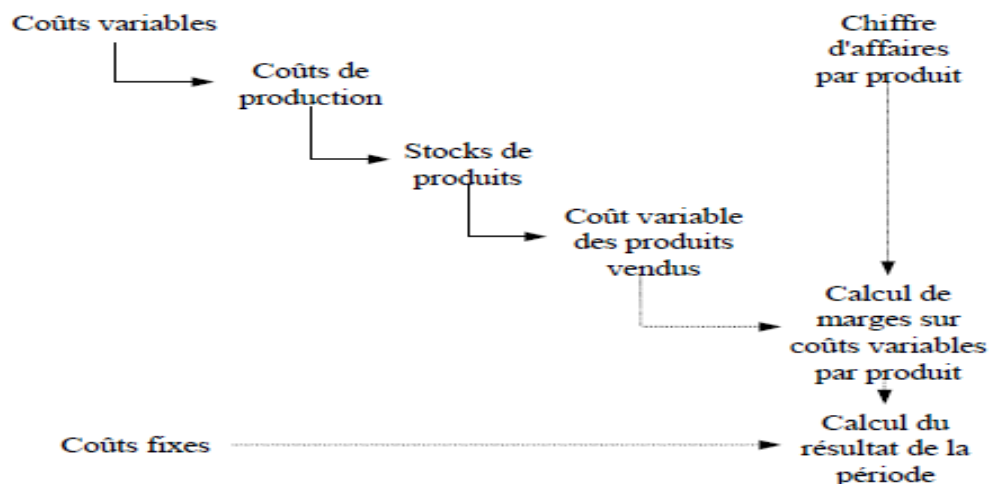


FIGURE 5: MÉTHODE DU DIRECT COSTING [5]

L'utilisation du direct costing aboutit en particulier à une présentation des résultats qui fait apparaître pour chaque produit une marge sur coût variable, appelée aussi en raccourci "marge variable", qui contribue à la couverture des frais fixes [7].

2.2. VALEUR DU TEMPS

2.2.1. CAPITALISATION D'UN FLUX - VALEUR FUTURE

Au taux i constant, la valeur future (VF) ou valeur acquise d'un montant X capitalisé au taux i durant n années est égale à:

$$VF = X \times (1 + i)^n$$

2.2.2. ACTUALISATION D'UN FLUX - VALEUR ACTUELLE

La valeur actuelle (VA) d'un montant X_n , capitalisé au taux i et versé dans n années est de:

$$VA = \frac{X_n}{(1 + i)^n}$$

Dans ce cas, i représente le taux d'inflation. Ces deux notions, l'actualisation et la capitalisation, sont indispensables dans l'étude des flux financiers d'une installation afin de comparer les sommes disponibles à des dates différentes et pouvoir rechercher des équivalences à une date commune (actuelle) [6].

2.3. RENTABILITÉ D'UN PROJET

Plusieurs moyens existent afin de justifier un intérêt d'investissement pour un projet. Chaque investissement est lié à la notion de rentabilité du projet. Un placement dans un projet va générer une série de flux financiers, ceux ci étant reliés à la notion de temps et de rendement du projet. Parmi ces moyens figurent [6, 8]:

- Le critère de la valeur actuelle nette (VAN);
- Le critère du taux interne de la rentabilité (TRI);
- Le critère du délai de récupération des capitaux investis (DRC) ;
- Le critère d'indice de profitabilité (IP).

2.3.1. LA VALEUR ACTUELLE NETTE

La théorie financière recommande d'investir si la valeur actuelle nette (VAN) d'un investissement est positive, en d'autres termes, si la valeur du projet aujourd'hui excède le montant requis de l'investissement [6].

Avant de déterminer la VAN, il est important de prendre en compte le coût d'opportunité du capital (COC) de projet. Celui-ci doit refléter à la fois la valeur temps de l'argent et le risque inhérent au projet. Le COC d'un projet est défini comme la rentabilité exigée sur le portefeuille des financements. Ce coût est utilisé pour actualiser les cash-flows des projets.

Le COC est un mélange des capitaux propres (taux de rentabilité attendu par les actionnaires = rapport capitaux propres / bénéfice de l'entreprise) et du coût de la dette (le taux d'intérêt = rapport montant des dettes / charges financières) [6].

Concrètement, le COC se calcule de la manière suivante:

$$COC = r_{actif} = r_{capitaux propres} \times \left(\frac{CP}{V}\right) + r_{dettes} \times \left(\frac{D}{V}\right)$$

Avec: 'r' = rendement ; 'CP' = capitaux propres; 'D' = dette; 'V' = volume total: capitaux propres + dettes

Ce calcul donne accès au rendement attendu pour le projet, rendement qui nous permettra d'actualiser les cash-flows futurs du projet.

Dès lors, si l'entreprise fait appel à des fonds extérieurs afin de financer le projet, nous devons nous tourner vers la notion du coût moyen pondéré du capital (CMPC). En effet, le principe du coût d'opportunité du capital (COC) ne fait pas apparaître la notion du taux d'imposition de l'entreprise.

Le CMPC fait intervenir la notion d'imposition et nous permet de corriger la rentabilité attendue du projet :

$$r_{actif} = r_{capitaux propres} \times \left(\frac{CP}{V}\right) + r_{dettes} \times (1 - \text{taux d'imposition}) \times \left(\frac{D}{V}\right)$$

Avec: 'r' = rendement ; 'CP' = capitaux propres; 'D' = dette; 'V' = volume total: capitaux propres + dettes

La formule du CMPC prend en compte la déductibilité fiscale des intérêts sur dette, ce qui diminue la rentabilité attendue du projet par rapport au COC, car le fait que l'entreprise ait généré des dettes permet de diminuer le capital sur lequel elle se trouve imposée fiscalement.

Ces notions nous amènent à calculer la VAN du projet. Pour effectuer ce calcul, il est primordial d'estimer les cash-flows (CF) générés par l'installation tout au long de sa vie économique, année par année. Ces flux financiers sont ensuite actualisés et additionnés afin de donner accès à la VAN de l'installation à la fin de sa vie économique.

$$VAN = CF_0 + \frac{CF_1}{(1 + r_{actif})^1} + \frac{CF_2}{(1 + r_{actif})^2} + \dots + \frac{CF_n}{(1 + r_{actif})^n}$$

Avec: 'n' = nombre d'années de vie économique du projet, 'r' = rendement

Si la VAN est positive, le projet est créateur de richesse. Une VAN négative est un critère de rejet du projet.

2.3.2. INDICE DE PROFITABILITÉ

La valeur de la VAN nous permet de calculer l'indice de profitabilité du projet (IP).

L'IP renseigne sur la richesse créée par chaque euro investi dans le projet.

$$IP = \frac{VAN}{\text{investissement initial}}$$

Le critère de rentabilité est que l'IP soit plus grand que 1, soit le surplus financier créé pour chaque euro investi [6].

2.3.3. TAUX DE RENTABILITÉ INTERNE

La majorité des décisions d'investissement financier se basent sur le calcul de la VAN d'un projet pour savoir si celui-ci doit être mis en place. Cependant, la VAN n'est pas le seul critère de décision utilisé pour justifier le lancement financier d'une installation [7]. Le taux de rentabilité interne du projet (TRI) est également pris en compte. Ces deux concepts sont assez proches et lorsqu'ils sont appliqués rigoureusement, donnent la même conclusion.

Le TRI est défini comme le taux d'actualisation qui annule la VAN, soit:

$$VAN = CF_0 + \frac{CF_1}{(1 + TRI)^1} + \frac{CF_2}{(1 + TRI)^2} + \dots + \frac{CF_n}{(1 + TRI)^n}$$

Avec: 'n' = nombre d'années de vie économique du projet

Ce taux de rendement interne est ensuite comparé au coût d'opportunité du capital. Le critère du TRI consiste à accepter un projet si le TRI est supérieur au COC.

Cependant, le critère du TRI présente plusieurs problèmes: il n'est pas toujours possible de le déterminer, ou il peut y avoir différents TRI identifiés (cash-flows positifs et négatifs). De plus, le TRI n'a pas de signification financière réelle; il s'agit du taux de rentabilité pour une création de richesse nulle (VAN=0).

2.3.4. DÉLAI DE RÉCUPÉRATION DES CAPITAUX INVESTIS (DRCI)

Le délai de récupération des capitaux investis correspond au délai au bout duquel les flux financiers générés remboursent l'investissement initial [8].

$$DRCI = \frac{\text{investissement initial}}{\text{cash flow annuel moyen}}$$

L'utilisation de ce critère de sélection est toutefois limitée par le fait qu'il est uniquement valable pour des projets dont la durée de vie est identique.

D'autres points négatifs sont également soulevés:

- Le DRCI se fixe sur une norme imposée par l'entreprise: celle-ci fixe un délai maximum de récupération par projet et exclut les projets excédant cette durée.
- Ce critère accorde une importance égale à tous les cash flows durant la période imposée par l'entreprise. Or, dans la vie économique d'un projet et d'autant plus si cette période imposée est petite (< 5 ans), des cashs flows importants peuvent apparaître au début de la période imposée, faussant le critère.

La simplicité du délai de récupération en fait un procédé commode pour évaluer les projets d'investissement à délai de récupération court. La vraie mesure de rentabilité d'un projet reste toutefois basée sur le critère de la VAN [6].

2.3.5. CONCLUSION: QUEL OUTIL CHOISIR DANS NOTRE CAS ?

Dans cette étude, le choix s'est porté sur les critères de la VAN et du TRI car ce sont deux méthodes complémentaires fiables pour la décision d'investissement dans un projet. La méthode de la valeur actuelle nette, complétée par le critère de l'indice de profitabilité donnent des résultats satisfaisants quant à la richesse créée par l'investissement [6].

Bien que lié à la stratégie de placement financier, la VAN et le TRI apportent ainsi de bons résultats quant à la décision de faisabilité économique.

Nous éliminons la notion de délai de récupération (DRCI), car non adaptée à des projets de longue durée tel que celui traité ici [8].

2.4. TRI/ VAN: LIMITATIONS

Le TRI est souvent reconnu comme un critère de sélection économique entre projets : si un choix doit être fait entre plusieurs projets définis par des investissements et des cash flows connus dans le temps, souvent, c'est le projet qui a le TRI le plus élevé qui est sélectionné. Or, en réalité, le TRI permet juste de savoir si les projets sont rentables sans prendre en compte le taux d'actualisation [6].

Dès lors, la VAN reste le critère de référence pour comparer des projets.

En guise d'illustration, examinons le cas d'une entreprise [9] qui peut choisir entre deux projets différents et nécessitant un investissement d'un même montant. Considérons que son taux d'actualisation est de 10 % (voir tableau 1).

TABLEAU 1: COMPARAISON DES RECETTES DE 2 PROJETS À INVESTISSEMENTS ÉGAUX [9]

	Projet A	Projet B
Investissement en année 1	20	20
Recettes en année 2	0	20
Recettes en année 3	30	6

L'analyse de ces deux projets au point de vue du TRI et de la VAN donne (voir tableau 2) :

TABLEAU 2: COMPARAISON DES VAN ET TRI DE 2 PROJETS À INVESTISSEMENTS ÉGAUX [9]

	Projet A	Projet B
TRI	22 %	24 %
VAN avec taux d'actualisation à 10 % (M€)	4.8	3.1

L'utilisation induite du TRI (choix du projet B qui a le TRI le plus élevé) implique donc un revenu actualisé de 3.1 millions d'euros, c'est-à-dire bien inférieur à ce que rapporte le projet A (VAN de 4.8 millions d'euros). Ceci est dû à un profil différent de la courbe de la VAN en fonction du taux d'actualisation utilisé : les courbes se croisent (voir figure 6).

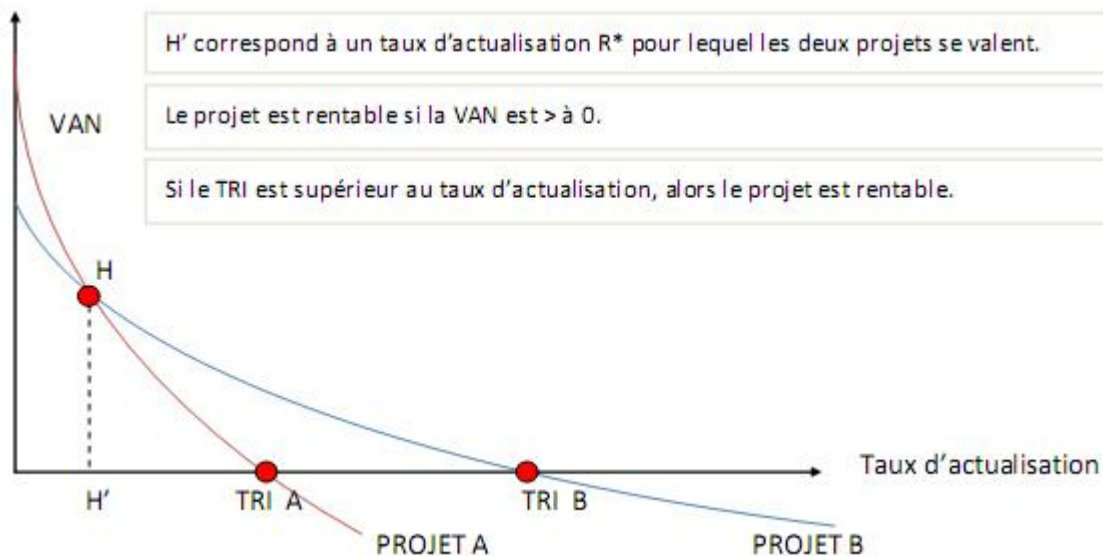


FIGURE 6: VAN EN FONCTION DU TAUX D'ACTUALISATION POUR 2 PROJETS [9]

Le TRI donne une information sur le taux de rentabilité de l'investissement, mais il ne prend pas en compte certains paramètres. Un projet dont le TRI est plus petit est parfois préférable à autre projet qui a un TRI plus grand. Ainsi, si un investissement a un TRI de 20 % avec retour sur investissement après 10 ans (c'est-à-dire un investissement de 1 au début de l'année 1 et un revenu de 6.19 millions d'euros à la fin de l'année 10), certains investisseurs trouveront que ce rendement est préférable à un investissement ayant un TRI de 25 %, mais avec un retour sur investissement l'année suivante (c'est-à-dire un investissement de 1 au début de l'année 1 et un revenu de 1.25 en fin d'année). En effet, dans le premier cas, l'argent donne un rendement sur 10 années, alors que dans le second cas, l'argent placé donne un rendement sur une seule année : il faut donc encore replacer cet argent durant les 9 années suivantes, et il n'est pas dit que les projets qui seront choisis pour ces 9 années auront une performance qui permettra à la fin un TRI moyen supérieur à 20 %. Toutefois, ce type de choix est lié à la stratégie de placement choisie par l'investisseur, et ne s'impose pas en soi.

En conclusion, l'utilisation du TRI peut influencer de façon très différente le choix des investissements, puisque cela suppose implicitement que le montant des rentrées nettes de fonds sur toute la durée du projet puisse être réinvesti à ce même taux de rendement interne. L'avantage du TRI est qu'il s'agit d'un indicateur intrinsèque d'un projet, au contraire de la VAN dont le calcul dépend d'un taux d'actualisation.

2.5. ANALYSE DE SENSIBILITÉ

Cette méthode est utilisée pour évaluer les projets d'investissement à la lumière des risques et de l'incertitude. Par ce processus, la robustesse d'un modèle économique est évaluée en examinant comment les résultats de l'analyse varient lorsque les valeurs des variables clés sont modifiées [10].

La détermination et l'évaluation des coûts et bénéfices de tout projet exigent de scruter l'avenir, car les estimations de valeurs actuelles et futures sont sujettes à l'incertitude. Une analyse de sensibilité basée sur les variables clés identifiées permet de détecter tout scénario potentiellement défavorable par rapport aux prévisions de rentabilité du projet (valeur actuelle, taux de rendement interne), dans le cas où la variable en question s'écarte substantiellement de la valeur choisie pour faire l'étude de rentabilité du projet.

A la base de cette démarche, les notions de taux de rendement interne et de valeur actuelle nette présupposent généralement que les entreprises gèrent leurs actifs de manière passive, en ignorant les possibilités de s'agrandir si le projet marche bien ou d'y mettre un terme si c'est un échec. Intervient alors la notion d'incertitude qui se traduit par l'analyse de sensibilité de variables clés afin de prévoir les effets de la variation de la sortie du système à la suite du changement de valeurs d'entrée.

Cette analyse comprend trois étapes [10] :

1. Identifier les principales sources probables d'incertitude pour le projet analysé, et pour chacune d'elles, établir un éventail plausible de valeurs pour les paramètres en cause. Les principales sources d'incertitude comprennent notamment:
 - Des facteurs naturels tels que la météorologie ;
 - Des facteurs techniques et des facteurs de productivité ;
 - Des facteurs économiques et financiers ;
 - Des facteurs humains liés à la disponibilité et au coût de la main-d'œuvre.

2. Effectuer une analyse de sensibilité pour le projet en utilisant diverses combinaisons d'hypothèses différentes concernant la valeur des variables associées aux principales sources d'incertitude. Pour ce faire, il est opportun d'analyser plus en détail les variables pour lesquelles des changements dans les hypothèses de valeurs sont déterminants vis-à-vis du rendement du projet. Les variables en question sont ainsi fixées à leur valeur pessimiste, attendue et optimiste.

A cette fin, plusieurs méthodes d'analyse de sensibilité existent, basées sur deux principes: le premier consiste à faire varier une seule variable à la fois et observer les effets sur le système [11] (méthode OFAT: one function at a time). Cette méthode permet d'effectuer facilement des comparaisons: les effets sur le système sont calculés par rapport à une référence. Le défaut majeur de cette méthode est qu'elle ne considère pas les interactions possibles entre les différentes variables d'entrée du système.

Le deuxième principe se base sur l'analyse factorielle. Il est plus lourd à mettre en œuvre car il est fonction du nombre de variables clés, mais il est plus pertinent. Parmi les méthodes existantes, citons la simulation de Monte Carlo, qui considère toutes les combinaisons possibles et permet d'analyser la totalité de distribution de probabilités des résultats du projet [12]. En pratique, après avoir modélisé le projet, spécifié les variables et leur valeur optimiste et pessimiste, la simulation va calculer les cash-flows résultant des valeurs se situant entre les extrêmes des variables. De ces calculs résultent les valeurs actuelles nettes et taux de rentabilité interne correspondant à ces variations. Ce principe est à privilégier car il considère les interactions entre différentes variables et l'impact de leurs effets [6].

3. Déterminer les moyens de modifier la conception du projet afin d'éliminer ou réduire les principales sources d'incertitude qui sont déterminantes vis-à-vis du résultat final du projet [10].

Cette analyse de sensibilité peut se faire en utilisant soit la valeur nette actualisée du projet, son taux de rentabilité interne ou encore les valeurs des cash flows. Il est intéressant dans une prise de décision quant à la réalisation d'un projet de savoir dans quelle mesure les valeurs des variables peuvent changer avant que la valeur du projet ne devienne inacceptable.

Dans cette optique intervient le seuil d'équilibre qui permet de déterminer jusqu'où les coûts peuvent augmenter, ou les bénéfices diminuer, avant que la valeur actuelle nette ne tombe en-dessous de zéro, ou que le taux de rentabilité interne ne tombe en-dessous du taux d'actualisation admis. De même, dans le cas d'un projet accusant une VAN négative ou un TRI inférieur au taux imposé (par l'entreprise), l'analyse permettra de savoir dans quelle mesure les coûts devraient diminuer, ou les bénéfices s'accroître, pour rendre le projet acceptable au regard des critères choisis par l'entreprise. Ce type d'analyse d'équilibre fournit une information utile entrant en considération pour la prise de décision au sujet d'un projet.

Les valeurs des variables qui rendent la VAN égale à zéro ou le TRI égal au taux d'actualisation accepté sont appelées valeurs critiques ou valeurs seuils. Ce sont les valeurs qui déterminent le seuil de rentabilité d'un projet, et peuvent faire passer d'une décision positive à un refus du projet.

2.5.1. LIMITE DE L'ANALYSE DE SENSIBILITÉ

Un inconvénient de l'analyse de sensibilité est qu'elle donne des résultats souvent ambigus, les notions de « pessimiste » et « optimiste » laissant place à des interprétations propres à chacun. De plus, ces interprétations subjectives s'avéreront peut être obsolètes dans quelques années au vu de la difficulté d'interpoler la volatilité des marchés économiques à long terme [6].

Une manière de minimiser ce problème est d'utiliser des techniques statistiques avec les données disponibles. Pour cela, nous pourrions consulter les experts et la littérature existante afin d'obtenir des estimations plausibles de valeurs des variables et de leur amplitude de variation potentielle dans des conditions changeantes. Effectuer des études de marché nous permettra également de justifier les valeurs des variables choisies.

S'il apparaît après analyse de sensibilité qu'une fluctuation plausible de variables critiques peut avoir une influence directe sur la prise de décision concernant un projet, les possibilités suivantes sont dès lors envisageables [6, 10] :

- Changer la conception du projet, c'est-à-dire l'améliorer
- Inclure des provisions pour imprévus
- Ajuster les critères de décision employés

Bien que ces outils prennent en compte toutes les variables inhérentes au projet, une part d'incertitude non maîtrisable subsiste, liée à des événements extérieurs tels qu'une crise internationale, un événement politique, un changement de loi et bien d'autres imprévus qui peuvent également mettre à mal la rentabilité d'un projet.

3. PREMIER AXE: ETUDE COMPARATIVE DE PROCÉDÉS

3.1. CONTEXTE

Pour rappel, Total nourrit le désir de développer une installation industrielle permettant la transformation de déchet polystyrène en monomère de styrène, base à la fabrication d'un nouveau matériau plastique. Dans cette optique, ce premier axe a pour but d'aborder d'un point de vue économique diverses solutions établies sur des procédés différents. Cette approche permettra de justifier le choix d'un procédé assurant un rendement et un coût de production en accord avec les attentes économique de Total.

L'étude s'est portée sur trois installations utilisant des procédés différents. Bien qu'il ne s'agisse pas du but premier de cette approche, en combinaison avec les avantages techniques, le rendement et les coûts de production, cette étude mettra en exergue la meilleure solution sur laquelle le projet industriel pourra se baser.

Pour ce faire, nous étudierons les coûts fixes et les coûts variables propres à chaque installation. De ces valeurs découlera ensuite une estimation des coûts de production de chaque unité.

Cette étude comparative se base sur l'article Process Economics Program Report 199B; 'plastics recycling to liquids' [13]. Dans cet article, trois types d'unités sont présentées: l'une utilise un procédé basé sur le craquage thermique, la deuxième le craquage catalytique et la dernière l'hydrogénation. Chacun de ces procédés œuvre pour la valorisation d'une charge de plastique déchet en un produit liquide exploitable pour la création de nouveaux matériaux.

Chaque unité permet le traitement de 50000 tonnes par an de déchet plastique. Le rendement des différentes unités varie en fonction du procédé utilisé.

Dans cette étude, nous faisons l'hypothèse que l'amortissement complet de l'installation est complet au bout de 4 années [13]. L'étude est basée sur une année de production, les coûts fixes seront amortis à hauteur de 25% dans nos estimations.

3.2. PREMIÈRE UNITÉ: PROCÉDÉ DE PYROLYSE

Note préliminaire: l'ensemble des valeurs présentées dans les tableaux sont exprimées en dollars. Le résultat est ensuite traduit en euro, au taux de change d'actualité en avril 2013 (1 dollar = 0.78 euros).

La première installation étudiée utilise un procédé de pyrolyse; décomposition thermique en l'absence d'air, ou en air appauvri en oxygène, qui produit des huiles et des gaz de pyrolyse traités par des procédés de pétrochimie.

Cette unité permet le traitement de 50000 tonnes par an de charge plastique déchet et produit 31900 tonnes de charge exploitable à nouveau [13].

Dans un premier temps, les coûts fixes de l'unité sont estimés (voir tableau 3). Ceux-ci sont détaillés en fonction de la section de traitement. Au total, les coûts fixes s'élèvent à 43.7 millions d'euros, représentant l'investissement de l'installation, distribués entre les équipements (réacteur, colonnes, échangeurs,...), l'installation (coût de construction et mise en service de l'unité) et installation des utilitaires (eau, gaz,...).

TABLEAU 3: COÛTS FIXES PYROLYSE

Coûts fixes (M\$)	
Equipement	7985
Installation	31224
Utilitaires	15308
Total (M\$)	54517

Ensuite, les coûts variables sont calculés sur base des matières premières, des sous-produits et de l'OSBL, c'est-à-dire les utilités nécessaires au fonctionnement de l'unité (voir tableau 4).

TABEAU 4: COÛTS VARIABLES PYROLYSE

		Coût variable pour 31900 tonnes/an (M\$)
Matière première	Chaux	119,56
	Soude caustique	1701,92
	Charge (déchet)	499,32
		Coût variable pour 31900 tonnes/an (M\$)
Sous produit	HCl	-281,31
		Coût variable pour 31900 tonnes/an (M\$)
Utilitaires	Eau refroidissement	42,2
	Eau procédé	70,33
	Vapeur	-91,43
	Electricité	1561,27
Total (M\$)		3621.86

Les coûts variables se chiffrent à un total de 2.9 millions d'euros. Le sous-produit HCl est également valorisable sur le marché et permet de faire chuter les coûts.

Les coûts fixes et variables fixés, il est dès lors possible d'élaborer les coûts de production de l'unité (voir tableau 5). Pour cette estimation, le retour sur investissement choisi pour les coûts fixes est de 25% / année.

TABEAU 5: COÛTS DE PRODUCTION

		Coût production pour 31900 tonnes/an (M\$)
Coûts totaux	Total charges variables	3621,86
	Main d'œuvre	2355,97
	Maintenance	1272,93
	Frais généraux du site + taxes	2974,85
	Dévalorisation 10%/an	5450,38
	Recherche	1497,97
	Retour sur investissement = 25%/an	13622,43
Coût (M\$)		30796,40

A ce stade, la littérature ne donne pas d'information sur le prix de revente du produit final, mais seulement des coûts de production. De ce fait, il n'est pas possible d'en déduire le gain potentiel ni de calculer le retour sur l'investissement.

Le coût total pour l'unité de pyrolyse s'élève donc à 24.7 millions d'euros pour 31900 tonnes produites. Rapporté à la quantité produite, le coût de production du produit est de 772 euros par tonne.

En termes techniques, le rendement de cette installation est de 64% (rapport entre la quantité de matière première utilisée, soit 50000 tonnes, et la quantité de produit fini récupéré, soit 31900 tonnes). Parmi les produits, 63.8% sont récupérés sous forme liquide (huile) et 12.4% sous forme de gaz, tous deux valorisable sur le marché.

3.3. DEUXIÈME UNITÉ: PROCÉDÉ DE CRAQUAGE THERMIQUE-CATALYTIQUE

Ce procédé est basé sur le principe du craquage thermique et catalytique; opération qui consiste à 'casser' une molécule complexe en éléments plus petits. Cette séparation peut s'effectuer grâce à la température ou avec l'aide d'un catalyseur. Des installations combinent les deux effets afin d'obtenir un meilleur rendement.

Cette unité permet le traitement de 50000 tonnes de charge plastique déchet par an et produit 23400 tonnes de charge exploitable à nouveau [13].

La même méthodologie est appliquée que pour le cas précédent, à savoir l'estimation des coûts fixes (voir tableau 6) puis des coûts variables (voir tableau 7), sur base des mêmes critères.

TABLEAU 6: COÛTS FIXES UNITÉ DE CRAQUAGE

Coûts fixes (M\$)	
Equipement	8039
Installation	23906
Utilitaires	12725
Total (M\$)	44670

Au total, le montant des coûts fixes est évalué à 35.7 millions d'euros. Dans cette estimation, le retour sur investissement pour les coûts fixes considéré est également de 25%/ année.

Pour les coûts variables, il faut compter au total 2.6 millions d'euros. Ici aussi, le sous-produit HCl permet de faire chuter les coûts. Sa production est proportionnelle à la quantité de charge traitée.

TABLEAU 7: COÛTS VARIABLES UNITÉ CRAQUAGE.

		Coût variable pour 23400 tonnes/an (M\$)
Matière première	Chaux	15,48
	Soude caustique	1697,25
	Charge (déchet)	711,92
	Catalyseur zéolite	15,48
		Coût variable pour 23400 tonnes/an (M\$)
Sous produit	HCl	-278,58
		Coût variable pour 23400 tonnes/an (M\$)
Utilitaires	Eau refroidissement	5,16
	Eau procédé	67,06
	Vapeur	-82,54
	Electricité	1119,46
Total (M\$)		3270,69

Ensuite, en prenant en compte les coûts fixes et les coûts variables, nous allons en déduire les coûts de production.

Nous obtenons pour les coûts de production (voir tableau 8).

TABLEAU 8: COÛT DE PRODUCTION UNITÉ DE CRAQUAGE

		Coût production pour 23400 tonnes/an (M\$)
Coûts totaux	Total charges variables	3270,69
	Main d'œuvre	2140,91
	Maintenance	1057,56
	Frais généraux du site + taxes	2605,20
	Dévalorisation 10%/an	4467,54
	Recherche	1501,22
	Retour sur investissement = 25%/an	11163,68
Coût total (M\$)		26206,79

Le coût de production total de l'unité de craquage, estimé à 20.9 millions d'euros, est inférieur à l'installation pyrolyse. Les coûts fixes moindres, répartis durant les 4 années d'amortissement viennent justifier en partie cette différence. Le retour sur investissement de 25%/ année justifie en partie cette différence. D'autre part, cette installation nécessite moins de main d'œuvre et de maintenance, ce qui permet également de diminuer le coût de production.

Cependant, en prenant en compte le rendement de l'installation de 46%, le coût de production d'une tonne revient à 895 euros par tonne soit 123 euros par tonne de plus que l'unité pyrolyse. Parmi les produits récupérés, 46.8% se présentent sous forme liquide (huile) et 16.2 % sous forme de gaz.

3.4. TROISIÈME UNITÉ: PROCÉDÉ D'HYDROGÉNATION

L'hydrogénation est une technologie chimique qui consiste en l'addition d'une molécule de dihydrogène (H_2). Cette réaction est employée pour saturer des composés comportant des doubles liaisons, tels que les produits aromatiques. Cette réaction nécessite aussi un catalyseur afin de diminuer la température nécessaire à la réaction.

L'unité basée sur ce principe permet le traitement de 50000 tonnes de charge plastique déchet par an et produit 1080 tonnes de charge exploitable à nouveau [13]. Malgré le rendement très faible de cette installation (2.2%), nous avons décidé de l'étudier pour son très faible coût de production.

Les coûts fixes cumulés au tableau 9 se chiffrent à 206.8 millions d'euros.

TABLEAU 9 : COÛTS FIXES UNITÉ D'HYDROGÉNATION

Coûts fixes (M\$)	
Equipement	6437
Installation	186370
Utilitaires	65706
Total (M\$)	258513

Tout comme pour les autres cas, le retour sur investissement choisi pour les coûts fixes est de 25%/ année.

Les coûts variables détaillés au tableau 10 représentent au total 3.7 millions d'euros. Ces frais variables plus élevés s'expliquent par le coût des matières premières important (coût de l'hydrogène) en comparaison des deux précédents procédés étudiés.

TABLEAU 10: COÛTS VARIABLES UNITÉ D'HYDROGÉNATION

		Coût variable pour 1080 tonnes/an (M\$)
Matière première	Charge colonne	15,48
	Hydrogène	1697,25
	Charge (déchet)	711,92
	hydrotraitement	15,48
	CAO	2440,12

		Coût variable pour 1080 tonnes/an (M\$)
Sous produit	HCl	-278,58
		Coût variable pour 1080 tonnes/an (M\$)
Utilitaires	Eau refroidissement	0,24
	Eau procédé	0
	Electricité	3,81
	Gaz naturel	2,86
	Vapeur	-1,9
Total (M\$)		4606,68

Les coûts de production correspondant à la technologie d'hydrogénation sont repris au tableau 11.

TABLEAU 11: COÛTS DE PRODUCTION UNITÉ D'HYDROGÉNATION

		Coût production pour 1080 tonnes/an (M\$)
Coûts totaux	Total charges variables	131,43
	Main d'œuvre	4,29
	Maintenance	4,29
	Frais généraux du site + taxes	7,86
	Dévalorisation 10%/an	23,10
	Recherche	0,00
	Retour sur investissement = 25%/an	57,62
Coût total (M\$)		228,58

Avec un coût de production total de 182864 euros, rapporté à une production de 1080 tonnes par an, le coût de production d'une tonne de matière revient à 169 euros, soit 4 à 5 fois moins que les deux autres technologies envisagées aux points précédents.

3.5. CONCLUSION INTERMÉDIAIRE ET DISCUSSION

3.5.1. CONCLUSION

Trois procédés ont été étudiés afin d'assurer la conversion d'une matière plastique déchet en un nouveau produit valorisable sur le marché.

- Pyrolyse
- Craquage thermique et catalytique
- Hydrogénation

D'un point de vue technique d'abord, les procédés de pyrolyse et d'hydrogénation se démarquent par leur simplicité et robustesse. Cependant, le rendement médiocre du procédé d'hydrogénation ne joue pas en sa faveur. Le procédé mixant le craquage thermique et catalytique, quant à lui, s'avère compliqué à mettre en œuvre. La technologie basée sur la pyrolyse semble donc la plus prometteuse d'un point de vue technique.

D'un point de vue financier, le coût de production par tonne de chaque technologie est comparé au tableau 12.

TABEAU 12: COMPARAISON DES COÛTS DE PRODUCTION

Procédé	Pyrolyse	Craquage	Hydrogénation
Coût production/ tonne (€)	772	895	169
Rendement (%)	64	47	2.2

Le procédé basé sur l'hydrogénation est le moins cher avec un coût de production à 169 euros par tonne. Le procédé de craquage est quant à lui le plus coûteux, pour un rendement mitigé.

D'un point de vue purement économique, le procédé d'hydrogénation est à mettre en avant, de par son faible coût de production. Cependant, il ne sera pas choisi pour diverses raisons techniques:

- Son faible rendement, nécessitant des équipements de taille trop importante afin d'obtenir un rendement exploitable au niveau économique.

- La difficulté d'approvisionnement et le danger lié à la manipulation d'hydrogène.

L'unité de pyrolyse est le procédé qui présente le meilleur rendement, il sera choisi pour ces avantages indéniables:

- Un procédé fiable et caractérisé par un coût de production modéré.
- La grande flexibilité du procédé permettant une large plage d'utilisation de l'unité [4].
- Le temps et le coût de maintenance moindre [4].

Cette unité est sans nul doute un choix intéressant pour le développement d'une unité industrielle.

3.5.2. DISCUSSION

Comme mentionné dans l'introduction de ce chapitre, le but de cette étude préliminaire était d'évaluer les coûts de production afin d'établir une base de données utilisable pour la suite de ce travail. Or, cette analyse préliminaire ne prend pas en compte la qualité des produits ni leurs valeurs sur le marché, sachant que ces données supplémentaires pourraient conduire à un choix d'installation différent.

En critique supplémentaire, nous pourrions souligner la validité des données utilisées. En effet, l'article utilisé comme base pour ce premier axe d'étude a été publié en 1996. Les valeurs présentées ne sont sans doute plus applicables aujourd'hui. Cependant, l'objectif n'était pas de fournir des données précises mais de fournir une tendance afin de promouvoir un procédé, dans ce cas: la pyrolyse, alliant avantages techniques, rendement et coûts de production les plus avantageux.

4. DEUXIÈME AXE: ÉTUDE DU PROJET

4.1. RAPPEL DU CONTEXTE

Avant de rentrer dans les détails de cette partie du travail portant sur l'analyse et la présentation des résultats, il est important de rappeler le cadre de cette étude.

Total, acteur dans le domaine des matériaux polymères, s'implique de manière active dans la fin de vie des plastiques qu'il produit. En effet, au delà de l'aspect réglementaire [2], l'après vie de tout produit créé fait partie des priorités de Total. Dans cette optique, Total étudie un projet de recyclage chimique du polystyrène (voir point 1.3). Le but est de revaloriser une matière plastique déchet et la transformer en matière première, le styrène, base pour la création à nouveau de plastique polystyrène.

Le point 3 a eu pour objectif de comparer 3 procédés. Parmi ceux-ci, Total a choisi celui de la pyrolyse. Autour de ce procédé, quatre technologies ont été étudiées par le groupe. Ces détails 'techniques' ne constituent pas le but de ce travail et figurent donc à titre indicatif dans la description de chaque technologie.

- Technologie de référence (0) : Composée d'un four alimenté au gaz naturel préchauffant les gaz de fluidisation. Cette technologie n'inclut pas de valorisation énergétique des sous produits.
- Technologie 1: Valorise l'ensemble des sous produits afin d'alimenter le four préchauffant les gaz de fluidisation utilisés dans le réacteur de pyrolyse.
- Technologie 2 : Option combinant l'utilisation d'un four alimenté au gaz naturel afin de préchauffer les gaz nécessaires à la pyrolyse. En parallèle, ce four permet d'obtenir de la vapeur valorisable dans le procédé.
- Technologie 3: Développement ultime, cette technologie englobe une valorisation totale des sous produits comme combustibles du four préchauffant les gaz nécessaires à la pyrolyse. En plus de ce point, cette technologie permet de produire de la vapeur basse pression utilisable dans le procédé mais également de la vapeur haute pression valorisable sur le site industriel jouxtant l'unité de recyclage (voir point 1.5).

Chacune de ces technologies comprend différents niveaux d'intégration énergétique avec valorisation partielle ou totale des sous produits du procédé. Un schéma bloc type s'applique pour chaque technologie (voir figure 7), sur base de la même quantité de matière première (± 30000 tonnes) et de la même quantité de produit en sortie (± 20000 tonnes). Seule la quantité de sous produit et d'énergie diffère d'une technologie à l'autre.

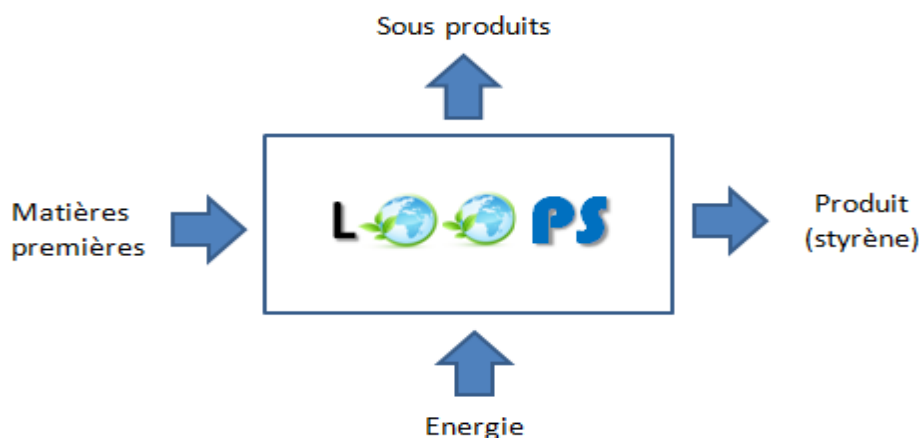


FIGURE 7: SCHÉMA BLOC COMMUN À CHAQUE TECHNOLOGIE

L'objectif est ici de déterminer la rentabilité financière du projet, basé sur un procédé de pyrolyse et utilisant une des technologies proposées ci dessus. Pour chacune de celles-ci, l'étude économique permettra, en fonction des coûts engendrés, de juger de la rentabilité de la technologie.

Nous focaliserons l'étude sur une seule de ces technologies; soit celle de référence (0). Les autres étant des améliorations, nous ne citerons que les conclusions qui en découlent. Pour cette technologie de référence, les coûts complets vont être étudiés. A partir de ceux-ci, nous allons développer les flux d'exploitations pour un amortissement du projet pendant 15 ans [14]. Ensuite, le projet sera évalué selon les critères du taux de rentabilité interne (TRI) et de la valeur actuelle nette (VAN). Le choix s'est porté sur ces critères car ce sont deux méthodes complémentaires pour la décision d'investissement dans un projet. La méthode de la valeur actuelle nette, complétée par le critère de l'indice de profitabilité, donnent des résultats satisfaisants quant à la richesse créée par l'investissement (voir point 2.3.5).

Cette évaluation sera complétée par une étude de sensibilité vis-à-vis de paramètres influents (voir point 2.5), le but étant de juger de la robustesse économique de l'investissement.

Dès lors, le projet va être soumis aux variations des paramètres suivants:

- prix du styrène: produit résultant de l'installation, sa variation influence directement la rentabilité du projet.
- capex de l'installation : l'investissement, fonction du type d'équipement installé dans l'unité.
- prix de la matière première (MP): principalement des déchets plastiques. Selon leur valeur de marché, leur prix modifie sensiblement la rentabilité du projet.

Ces paramètres ont été choisis car ils ont une influence majeure sur la rentabilité économique du projet (développé au point 5 de ce travail). Ces paramètres seront étudiés selon la méthode OFAT (One function at a time) qui consiste à faire varier une seule variable à la fois et observer les effets sur les indicateurs du TRI et de la VAN. Cette analyse sera complétée par la simulation de Monte Carlo qui, parmi l'éventail des valeurs possibles pour ces paramètres, considère toutes les combinaisons possibles et permet d'analyser la totalité de distribution de probabilités des cash flows sur la rentabilité du projet (voir point 2.5).

Ces deux études de sensibilité (OFAT et Monte Carlo) mettront en exergue les situations les plus intéressantes mais également les plus défavorables à l'exécution du projet.

Finalement, un dernier point sera consacré à une étude de sensibilité du projet face à l'évolution du prix du baril de pétrole. En effet, au delà des paramètres précités, le prix du pétrole est sans doute le paramètre le plus important dans le cadre de la viabilité d'une installation pétrochimique.

4.2. ETUDE ÉCONOMIQUE DE LA TECHNOLOGIE DE RÉFÉRENCE

La première partie de ce point traitera d'une étude complète des coûts. A partir de ceux-ci, nous allons établir les flux d'exploitation pour un amortissement du projet pendant 15 ans. De ces flux, la VAN et le TRI seront calculés, critères choisis afin de juger la rentabilité de l'investissement (voir point 2.3.5).

Il est à préciser que l'ensemble des valeurs présentées sont estimées sur base d'un prix du baril de pétrole fixé à 100 dollars.

Pour rappel, l'installation de l'unité de recyclage produisant du styrène (matière première du polystyrène) sera installée directement à côté de l'usine de transformation en polystyrène. Dans nos prévisions, le coût de logistique est donc considéré comme nul.

4.3. INVESTISSEMENT POUR LA TECHNOLOGIE DE RÉFÉRENCE

Dans un premier temps, nous allons exposer le coût total de l'unité (voir tableau 13). L'investissement (capex) est divisé entre d'une part l'inside battery limit (ISBL); ensemble d'équipements propres à l'unité tels que les réacteurs, les pompes,... D'autre part, l'outside battery limit (OSBL); ensemble d'équipements externes à l'unité et nécessaires au fonctionnement tels que l'eau, le gaz naturel,... A cela s'ajoutent d'autres coûts dédiés à l'achat de licence, brevets,...

TABLEAU 13: INVESTISSEMENT POUR LA TECHNOLOGIE DE RÉFÉRENCE

	M€
ISBL	25
OSBL	21
Autres coûts	12
Total	58

Le capital de 58 millions sera investi durant les deux premières années à hauteur de 80% la première année et 20 % l'année suivante.

4.4. ETUDE DES COÛTS

Cette étude distingue d'une part les coûts fixes et d'autre part les coûts variables. Il est à préciser que chaque coût explicité dans les tableaux suivants est rapporté à la tonne de produit fini.

4.4.1. COÛTS FIXES

Le tableau 14 ci-dessous reprend l'ensemble des coûts fixes; ceux-ci sont divisés entre le coût de la main d'œuvre et le coût opératoire (assurances, taxes environnementales,...).

TABLEAU 14: COÛTS FIXES

			Euros / tonne produite	Coûts annuels (M€)
Coûts fixes	COÛT OPÉRATOIRE (Main d'œuvre)	Main d'œuvre, y compris maintenance	124,99	1,8
	COÛT OPÉRATOIRE (site)	Assurances, taxes,...	35,95	0,69
		Environnement: taxe et traitement des déchets	23,96	0,46
	Total		184,9	2,96

Les coûts fixes s'élèvent à un total de près 3 millions d'euros.

4.4.2. COÛTS VARIABLES

Les coûts variables (voir tableau 15) sont divisés entre le coût de la matière première et le coût de l'énergie. Sont également inclus les sous produits car variables en fonction de la quantité produite.

TABLEAU 15: COÛTS VARIABLES

		Unités	Euros / tonne produite	Coûts annuels (M€)
Matière première	Déchets PS	tonne	557,73	10,78
	Additifs chimiques	tonne	7,65	0,15
	Total MP		565,38	10,93

Sous produit	Aromatiques lourds	tonne	187,92	3,63
	Aromatiques légers	tonne	35,73	0,69
		Total sous produit	223,65	4,32
			Euros / tonne produite	Coûts annuels (M€)
Total MP - Sous produits			341,73	6,61
Utilitaires et énergies			271,04	5,24
Total Coûts variables (MP- sous produits + utilitaires et énergies)			612,78	11,84

Pour les coûts variables, il faut compter près de 12 millions d'euros en prenant en compte une production annuelle de 19300 tonnes de produit.

Le coût de production total avoisine les 15 millions d'euros. A cela doit être ajoutée une dépréciation; 10% basé sur l'ISBL³ (25 millions d'euros), les autres coûts engagés (12 millions d'euros) et 5% basé sur l'OSBL³ (21 millions d'euros), ce qui donne:

$$\text{Coût de production total} = 15 \text{ M€} + ((10\% \times (25 + 12)\text{M€}) + (5\% \times 21\text{M€})) = \pm 19.5 \text{ M€}$$

Soit un montant final de près de 19.5 millions d'euros correspondant au coût de production de 19300 tonnes par an.

Rapporté à la quantité produite, le coût de production est estimé à 1012 euros/tonne de styrène produit. Signe de rentabilité, ce coût de production est légèrement supérieur à celui trouvé dans le cas de l'unité de pyrolyse existante étudiée, soit 772 euros/tonne (voir point 3.5). La raison de cette différence provient majoritairement de l'actualisation des données en 2012 contre 1996 pour l'étude exploratoire du chapitre 3.

³ Total Belgium SA, données internes

Un dernier point consiste à évaluer le gain annuel (voir tableau 16). Pour cette estimation, nous prenons un prix de vente du styrène produit fixé à 1250 euros/tonne⁴.

TABLEAU 16: CHIFFRE ANNUEL

	Quantité	Euros / tonne produite	Gain annuel (M€)
Produit	19300 tonnes	1250	24

Soit une production de 19300 tonnes permettant un gain annuel de 24 millions d'euros.

D'une part, à la suite de ce calcul de gain et sur base du prix de vente du styrène fixé à 1250 euros/tonne, il est possible d'évaluer la marge sur coût variable (MCV), qui équivaut à soustraire au prix de vente du styrène (1250 euros/tonne) les charges variables (±613 euros/tonne), soit:

$$MCV = 1250 \text{ euros} - 613 \text{ euros} = 637 \text{ euros}$$

Cette marge sur coût variable permet le calcul du seuil de rentabilité; c'est-à-dire la quantité minimum de styrène à produire afin de couvrir les frais fixes (3 millions d'euros):

$$\text{Seuil de rentabilité} = \frac{3 \text{ M€}}{637 \text{ euros/tonne}} = 4710 \text{ tonnes}$$

En d'autres termes, le seuil de rentabilité, ici de ± 4710 tonnes, est la quantité de matière qu'il faut produire pour permettre de rembourser les charges fixes.

D'autre part, le gain annuel (24 millions d'euros) soustrait au coût de production (19.5 millions d'euros) donne accès au résultat brut d'exploitation, soit:

$$\text{Résultat brut d'exploitation} = 24 \text{ M€} - 19.5 \text{ M€} = 4.5 \text{ M€}$$

⁴ Total Belgium SA, données internes

Après taxation, nous obtenons le résultat net d'exploitation qui se chiffre à $\pm 3,5$ millions d'euros. A partir de cette valeur, nous pouvons en tirer le retour sur le capital, rapport du résultat net (3.5 millions d'euros) et de l'investissement (58 millions d'euros):

$$\text{Retour sur investissement} = \left(\frac{3.5 \text{ M€}}{58 \text{ M€}} \right) \times 100 = 6 \%$$

Dans ce cas, le retour sur investissement est de $\pm 6\%$.

4.5. FLUX TOTAUX D'EXPLOITATION

L'établissement des flux d'exploitation nécessite d'émettre une série d'hypothèses⁵ [14,15] quant à l'évolution de l'environnement économique à venir (tableau 17) :

TABEAU 17: HYPOTHÈSES AU CALCUL DES FLUX D'EXPLOITATION

	Unités	
Prix du baril de pétrole	\$/baril	100
inflation OCDE	%/année	2,50%
Taux d'imposition	%	33%
Capitaux empruntés (%)	%	70%
Taux d'emprunt	%	6,50%
Réduction d'impôt	%	7,00%
Durée d'amortissement	année	15
Coût main d'œuvre	%	8,00%
Inflation sur les prix et coûts variables	%	2,20%
Inflation sur les prix des matières premières	%	0,90%

Nous allons étudier les flux d'exploitation pour une durée de 15 ans. Les valeurs obtenues au point 4.4 sont utilisées comme base pour nos calculs des flux d'exploitation.

⁵ Total Belgium SA, données internes

Ceci se résume par (voir tableau 18) :

- L'investissement de 58M€, comprenant l'ISBL, l'OSBL et les autres coûts nécessaires au démarrage de l'unité.
- Les coûts variables et fixes (voir tableau 18).

TABEAU 18: ENSEMBLE DES COÛTS

	Unités	Coûts annuels (M€)
MP (déchet PS)	€/t	558
MP (additifs)	€/t	8
Sous produit	€/t	-224
Utilitaires et énergies	€/t	271
Coût opératoire (main d'œuvre)	M€/année	1,8
Coût opératoire (site)	M€/année	1,2

Précisons que l'ensemble des valeurs qui vont être présentées dans le tableau de flux 19 sont actualisées selon la formule ci-dessous afin de tenir compte de l'inflation :

$$VA = \text{quantité produite} \times \frac{X_n}{(1+i)^n}$$

Pour illustrer, prenons le cas de la matière première pour l'année 2016. 'i' représente l'inflation sur le prix des matières premières, la quantité produit est de 19300 tonnes, 'Xn' est le coût de la matière première, soit 557.7 euros par tonne produite (voir tableau 15). 'n' est le nombre d'années. Ce qui donne :

$$VA = 19300 \times \frac{557.7}{(1 + 0.9\%)^{2016-2012}} = -11.2$$

Ce qui nous permet d'obtenir les flux d'exploitation (voir tableau 19).

TABEAU 19: FLUX D'EXPLOITATION POUR LA TECHNOLOGIE DE RÉFÉRENCE.

	Unités	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Capex	M€	0	0	0	-46	-12	0	0												
Capex %		0%	0%	0%	80%	20%	0%	0%												
Revenus	M€	0	0	0	0	26	26,6	27,2	27,8	28,5	29,1	29,7	30,4	31,1	31,8	32,5	33	34	34	35,5
Marge sur coût variable	M€	0	0	0	0	13,7	14,1	14,6	15,1	15,6	16	16	17	17,7	18,2	18,8	19	20	20,6	21,2
MP	M€	0	0	0	0	-11,2	-11,3	-11,4	-11,5	-11,6	-11,7	-11,8	-11,9	-12,1	-12,2	-12,3	-12,4	-12,5	-12,6	-12,7
MP (additifs)		0	0	0	0	4	4,7	4,8	4	5	5	5,2	5,3	5,4	5,6	5,7	5,8	6	6,1	6,2
Energie	M€	0	0	0	0	-5,7	-5,9	-6	-6,1	-6,3	-6,4	-6,5	-6,7	-6,8	-7	-7,1	-7,3	-7,5	-7,6	-7,8
Coûts fixes	M€	0	0	0	0	-3,3	-3,3	-3,4	-3,5	-3,6	-3,7	-3,8	-3,9	-4	-4	-4,2	-4,3	-4	-4,5	-4
Directs	M€	0	0	0	0	-2	-2	-2,1	-2,1	-2	-2	-2	-2,4	-2,4	-2,5	-2,5	-2,6	-2,7	-2,7	-2,8
Alloués	M€	0	0	0	0	-1,3	-1,3	-1,3	-1,4	-1,4	-1,4	-1,5	-1,5	-1,6	-1,6	-1,6	-1,7	-1,7	-1,8	-1,8
EBITDA	M€	0	0	0	0	10,4	10,8	11,2	11,6	12	12,4	12,8	13,2	13,7	14,1	14,6	15,1	15,6	16	16
Taxes	M€	0	0	0	1	-1,5	-1,5	-1,8	-2,1	-2,4	-2,7	-3	-3,1	-3,3	-3,4	-3,6	-3,7	-3,9	-4	-5,3
Dépréciation	M€	0	0	0	-3,1	-3,9	-3,9	-3,9	-3,9	-3,9	-3,9	-3,9	-3,9	-3,9	-3,9	-3,9	-3,9	-3,9	-3,9	-0,8
Intérêts financiers	M€	0	0	0	0	-2,1	-2	-1,9	-1,4	-0,9	-0,4	-0,1	0	0	0	0	0	0	0	0
Revenu imposable	M€	0	0	0	-3,1	4,5	4	5,4	6,3	7,2	8,1	8,9	9,4	9	10,3	10,7	11,2	11,7	12,2	15,8
Turnover main d'œuvre	M€	0	0	0	0	2,1	0	0	0	0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Cash-Flows	M€	0	0	0	-45,3	-4,7	9	9	9,4	9,5	9,6	9	10,1	10,4	10,7	11	11,3	11,6	11,9	11,2

Dans la suite, nous allons décrire l'ensemble des éléments intervenant dans ce tableau 19. L'investissement de 58 millions d'euros sera réparti durant les deux premières années : 80% de l'investissement (46 millions d'euros) est utilisé la première année et les 20% restants (12 millions d'euros) la deuxième année.

Les revenus sont basés sur une production stable de 19300 tonnes de styrène durant les 15 années d'amortissement, avec un prix du styrène fixé à ± 1250 euros la tonne.

Pour chaque flux de revenu, chaque valeur est calculée selon la formule:

$$\text{Revenu en } t_x = \text{prix du produit} \times \text{quantité produite} \times (1 + \text{inflation sur les prix})^{\text{année } t_{x+1} - \text{année } t_x}$$

Cette formule prend en compte l'inflation des prix⁶ et permet d'actualiser chaque flux de revenu à la période considérée. Cela donne dans le cas du revenu en l'année 2016 :

$$\text{Revenu en 2016} = 1250 \text{ euros} \times 19300 \text{ tonnes} \times (1 + 2.2\%)^{2016-2012} = 26 \text{ millions d'euros}$$

Deuxième partie; la marge sur coûts variables. Celle-ci se compose de la somme des éléments suivants (voir tableau 20) :

TABLEAU 20: COÛTS VARIABLES PAR TONNE DE STYRÈNE PRODUIT

	Unités	Coûts annuels (M€)
MP (déchet PS)	€/t	558
MP (additifs)	€/t	8
Utilitaires et énergies	€/t	271

⁶ Total Belgium SA, données internes

Le tout est multiplié par la quantité produite et ensuite soustrait au revenu, ce qui donne une marge sur coût variable (MCV), soit:

$$MCV = Revenus - MP(déchets et additifs) - Energie + Sous produits$$

Pour l'année 2016, nous obtenons:

$$MCV = 26 \text{ M€} - 11.2 \text{ M€} - 5.7 \text{ M€} + 4.6 \text{ M€} = 13.7 \text{ millions d'euros}$$

Il est à préciser que chaque coût variable intervenant dans le calcul de la marge sur coût variable a été actualisé en suivant le taux d'inflation sur le prix de la matière première selon la formule:

$$\text{Coût variable en } t_x = \text{coût} \times \text{quantité produite} \times (1 + \text{inflation sur les prix des MP})^{\text{année } t_{x+1} - \text{année } t_x}$$

Pour illustrer, prenons le cas de la matière première pour l'année 2016. 'i', représente l'inflation sur le prix des matières premières, la quantité produit est de 19300 tonnes, 'X_n' est le coût de la matière première, soit 558 euros par tonne de styrène produite (voir tableau 15). 'n' est le nombre d'années. Ce qui donne:

$$VA_{MP} = 19300 \text{ tonnes} \times \frac{558 \text{ euros}}{(1+0.9\%)^{2016-2012}} = -11.2 \text{ millions d'euros}$$

Les coûts fixes, quant à eux, sont répartis entre des coûts directs et alloués. Ils sont également actualisés pour chaque période selon la formule:

$$\text{Coût fixe en } t_x = \text{coût} \times \text{quantité produite} \times (1 + \text{inflation OCDE})^{\text{année } t_{x+1} - \text{année } t_x}$$

Chaque coût fixe est actualisé grâce aux valeurs fournies par l'organisation de coopération et de développement (OCDE). Ces valeurs, actualisées chaque année par l'organisme, restent néanmoins une base de travail sûre dans l'estimation des coûts fixes [14].

Des ces valeurs découle le résultat d'exploitation avant intérêts, impôts et amortissement (EBITDA : Earnings Before Interest, Taxes, Depreciation, and

Amortization) égale à la différence de la marge sur coûts variables et les coûts fixes, soit :

$$EBITDA = MCV - \text{Coûts fixes} = 13.7 - 3.3 = 10.4 \text{ millions d'euros}$$

Le résultat d'exploitation trouvé, il reste à soustraire les taxes issues du revenu obtenu par déduction de la dépréciation et des intérêts financiers au résultat d'exploitation. En pratique, cela donne:

$$Revenu_{2016} = 10.4 - 3.9 - 2.1 = 4.5 \text{ millions d'euros}$$

Ce revenu est ensuite imposé à hauteur de 33% (voir tableau 17), ce qui donne

$$Taxes_{2016} = 4.5 \text{ millions d'euros} \times 33\% = 1.5 \text{ millions d'euros}$$

A ces charges s'ajoutent les charges liées au personnel (embauche, rotation, salaire). Au final, nous avons accès au cash flow (CF) de l'année 2016, soit:

$$CF_{2016} = \text{résultat d'exploitation} - \text{Investissement} - \text{taxes} - \text{charge du personnel}$$

De manière générale, le tableau 19 nous fournit les cash flows qui vont être générés durant les 15 années d'amortissement de l'unité. Sur base de ceux-ci, il est aisé de calculer la valeur actuelle nette (VAN), de laquelle découlent l'indice de profitabilité (IP) et le taux de rentabilité interne (TRI) du projet.

Pour rappel, la VAN se calcule sur base de l'addition de cash flows actualisés pour chaque année (voir point 2.3.1).

$$VAN = CF_0 + \frac{CF_1}{(1 + r_{actif})^1} + \frac{CF_2}{(1 + r_{actif})^2} + \dots + \frac{CF_n}{(1 + r_{actif})^n}$$

Avec: 'n' = Nombre d'années de vie économique du projet

Le CF_0 est distribué ici sur les deux premières années (CF_1 et CF_2). r_{actif} est quant à lui équivalent à l'inflation de l'OCDE (2.5 %, voir tableau 17). La VAN équivaut alors à :

$$VAN = \frac{-45.3}{(1 + 2.5\%)^1} + \frac{-4.7}{(1 + 2.5\%)^2} + \dots + \frac{11.3}{(1 + 2.5\%)^{15}} = 14.5M€$$

D'autre part, la valeur actuelle nette nous permet de calculer l'indice de profitabilité (IP). Il s'agit d'une mesure de performance relative (excès de rendement/ euro investi), calculée selon la formule ci-dessous:

$$IP = \frac{VAN}{I_0}$$

La valeur actuelle nette est de 14.5 millions d'euros. Avec un investissement initial (I_0) de 58 millions d'euros, l'indice de profitabilité équivaut à:

$$IP = \frac{14.5 \text{ M€}}{58 \text{ M€}} = 0.25$$

Ceci signifie que chaque euro investi générera une plus value de 25 centimes.

Le TRI est quant à lui défini comme le taux d'actualisation qui annule la VAN (voir point 2.3.3).

$$VAN = CF_0 + \frac{CF_1}{(1 + TRI)^1} + \frac{CF_2}{(1 + TRI)^2} + \dots + \frac{CF_n}{(1 + TRI)^n}$$

En pratique, cela nécessite de résoudre l'équation ci dessous afin d'en extraire la valeur du TRI qui est ici égale à 12.2%.

$$\frac{-45.3}{(1 + TRI)^1} + \frac{-4.7}{(1 + TRI)^2} + \dots + \frac{11.3}{(1 + TRI)^{15}} = 0$$

De cette étude des flux, deux éléments sont à retenir : la valeur actuelle nette de 14.5 millions d'euros, représentative de la richesse créée au bout de 15 années d'amortissement et le taux de rentabilité interne de 12.2%. Notons qu'un taux de rentabilité interne supérieur au taux bancaire (6.5%, voir tableau 17) est gage de rentabilité économique du projet, notamment grâce à la diminution des risques liés à l'investissement [6].

5. TROISIÈME AXE: ANALYSE DE SENSIBILITÉ

5.1. CONTEXTE

Pour la technologie de référence, nous avons fixé un prix du baril de pétrole à 100 dollars et le prix d'une tonne de monomère styrène (produit) à 1250 dollars. Ceci a donné en première estimation un taux de rentabilité interne de 12.2% et une valeur actuelle nette de l'exploitation de 14.5 millions d'euros pour les 15 années d'amortissement (voir point 4.5).

Ce troisième axe aborde l'analyse de sensibilité de la VAN et du TRI du projet vis-à-vis de paramètres influents pour la robustesse économique de l'investissement. Cette analyse consiste à simuler la valeur du projet si nos prévisions étaient plus optimistes ou pessimistes que la réalité (voir point 2.5). A cette fin, nous allons soumettre ce projet à la variation des paramètres suivants:

- le prix du styrène : le produit final.
- l'investissement nécessaire à la mise en place de l'installation (capex). Celui-ci varie en fonction de l'estimation du prix des équipements choisis.
- le prix de la matière première (déchets plastiques), également très volatil en fonction du prix du baril de pétrole.

Ces paramètres représentent les sources principales d'incertitude pour le projet. Pour chacune d'elles, il est important d'établir un éventail plausible de valeurs. A cette fin, Total utilise un écart type de 20% autour des valeurs centrales. Pour le paramètre 'prix du styrène', Total se base sur l'expérience acquise depuis des années sur le marché. Par ailleurs, la valeur du styrène sur le marché évolue étroitement avec le prix du baril de pétrole.

Pour le capex, l'écart type de 20% se base uniquement sur des considérations propres au groupe et à son expérience dans le développement de projets.

La matière première, d'après les observations du groupe, ne suit pas la même corrélation que le prix du baril de pétrole. Ainsi, pour les 5 dernières années, les prix ont varié de 300 à 400 euros la tonne. Cependant, la qualité de la matière n'est pas prise en compte dans ces statistiques. Afin de mieux refléter l'incertitude du prix futur, il y a donc lieu de faire varier plus sensiblement ce paramètre. A cette fin, Total estime également ce paramètre avec un écart type de 20% autour d'une valeur choisie à 350 euros/tonne⁷.

5.2. MÉTHODE OFAT

Dans cette première approche, nous allons faire varier un seul paramètre à la fois (One Function At a Time) parmi ceux définis ci-dessus et observer les effets sur le système au travers des valeurs de la valeur actuelle nette (VAN) et du taux de rentabilité interne (TRI) (voir point 2.5).

Pour rappel, les valeurs de VAN et TRI pour la technologie de référence sont reprises dans le tableau 21.

TABLEAU 21: VAN ET TRI POUR LA TECHNOLOGIE DE RÉFÉRENCE

	VAN (M€)	TRI (%)
Technologie de référence	14,5	12,2

Les valeurs des VAN et TRI obtenues suite à l'analyse de sensibilité sont présentées dans les tableaux suivants (tableaux 22, 23 et 24 pour chaque variable et un tableau 25 récapitulatif de tous les résultats) ainsi que sur un graphe (voir figure 8).

⁷ Prix de la matière première = 350 euros / tonne. Une tonne de produit fini nécessite 1.6 tonne de déchet pour un coût total de 558 euros/tonne (voir point 4.4.2). Total Belgium SA, données internes.

Dans un premier temps, le prix du styrène, produit de l'unité, est varié de -20% à +20% autour de sa valeur marché (1250 euros/tonne⁸). En partant du tableau 19 défini au point 4.5, nous appliquons un facteur de sensibilité tel que:

$$\text{Revenus} = \text{prix du produit} \times \text{facteur sensibilité} \times \text{quantité produite} \\ \times (1 + \text{inflation sur les prix})^{\text{année } t_{x+1} - \text{année } t_x}$$

En fonction du facteur de sensibilité appliqué (-20%, -10%, +10%, +20%), nous obtenons de nouveaux cash flows. Ceux-ci sont ensuite actualisés et conduisent aux valeurs de VAN et TRI correspondantes (voir tableau 22).

TABLEAU 22: SENSIBILITÉ DU STYRÈNE

% variation prix STY	STY (€/T)	VAN (M€)	TRI (%)
-20	1000	-7,4	4,1
-10	1125	3,5	8,1
Valeur marché	1250	14,5	12,2
10	1375	25,8	15,8
20	1500	36,8	19,3

Le 2^{ème} paramètre soumis à l'étude de sensibilité est l'investissement (capex), lui aussi soumis à une variation de -20% à +20% autour de sa valeur nominale (58 millions d'euros). En pratique, dans le tableau 19 défini au point 4.5, nous appliquons un facteur de sensibilité tel que:

$$\text{Capex en tx (varié)} = \text{Capex en tx} \times \text{facteur sensibilité}$$

De nouveaux cash flows sont obtenus à partir de la valeur du capex corrigée par les facteurs de sensibilité -20%, -10%, +10% et +20%. Pour rappel, l'investissement de 58 millions d'euros sera réparti durant les deux premières années, à hauteur de 80% la

⁸ Total Belgium SA, données internes.

première année, puis 20% la seconde. Les cash flows obtenus sont actualisés et donnent les valeurs de VAN et TRI respectives (voir tableau 23).

TABLEAU 23: SENSIBILITÉ DU CAPEX

% variation du Capex	Capex (M€)	VAN (M€)	TRI (%)
-20	46,4	20,9	15,9
-10	52,2	17,7	13,9
Capex de base	58	14,5	12,2
10	63,8	11,3	10,7
20	69,6	8,1	9,5

De la même manière, le prix de la matière première est ajusté de -20% à +20% autour de sa valeur marché (558 euros/tonnes). A partir du tableau 19, un facteur de sensibilité est appliqué comme suit sur la valeur de la MP:

$$MP \text{ variée} = \text{prix de MP} \times \text{facteur sensibilité} \times \text{quantité produite} \\ \times (1 + \text{inflation sur les MP})^{\text{année } t_{x+1} - \text{année } t_x}$$

Les valeurs de VAN et TRI calculées en fonction du facteur appliqué sont reprises au tableau 24.

TABLEAU 24: SENSIBILITÉ DE LA MATIÈRE PREMIÈRE

% variation de MP	MP (€/T)	VAN (M€)	TRI (%)
-20	446,4	23,5	15,2
-10	502,2	19	13,7
Prix de base	558	14,5	12,2
10	613,8	10	10,6
20	669,6	5,5	9

Suite à cette étude, il apparaît que la VAN et le TRI montrent des signes de sensibilités différentes selon le paramètre varié.

Pour une meilleure vue d'ensemble de cette analyse, le tableau 25 récapitule les valeurs des VAN et TRI et les figures 8 et 9 schématisent ces résultats.

TABEAU 25: RÉCAPITULATIF DES VARIATIONS DE VAN ET TRI

	VAN (M€)			TRI (%)		
% variation	Capex	MP	STY	Capex	MP	STY
-20	20,9	23,5	-7,4	15,9	15,2	4,1
-10	17,7	19	3,5	13,9	13,7	8,1
0	14,5	14,5	14,5	12,2	12,2	12,2
10	11,3	10	25,8	10,7	10,6	15,8
20	8,1	5,5	36,8	9,5	9	19,3

Graphiquement, nous obtenons pour la valeur actuelle nette (VAN) :

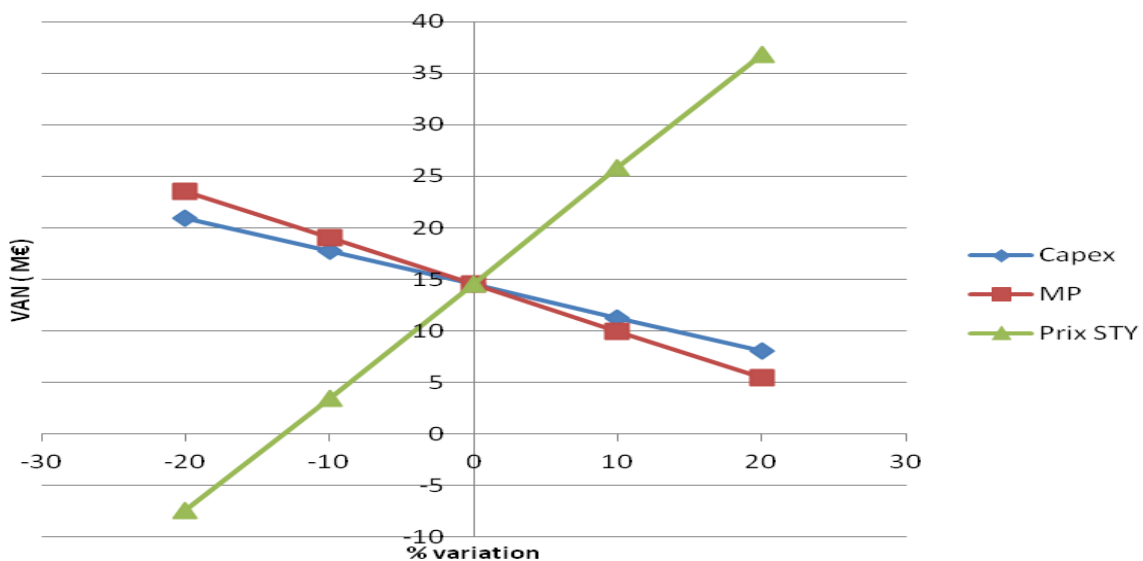


FIGURE 8: EVOLUTION DE LA VAN

Et pour le taux de rendement interne (TRI) :

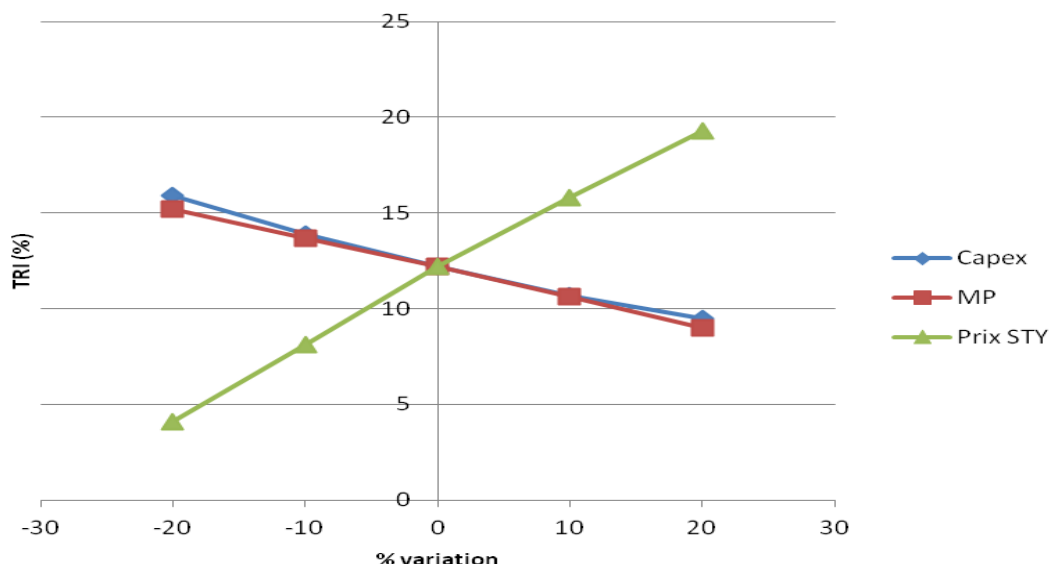


FIGURE 9: EVOLUTION DU TRI

Nous constatons que la valeur actuelle nette (VAN) et le taux de rentabilité interne (TRI) sont sensibles aux variables mais à des degrés différents. Tout d'abord, le prix du styrène influence de manière considérable la VAN et le TRI : lorsque le prix de vente du produit final augmente de 20%, la VAN augmente de $\pm 150\%$ (elle passe de 14.5 millions d'euros à 36.8 millions d'euros) et le TRI de $\pm 7\%$ (de 12.2% à 19.3%). A l'opposé, si le prix de vente du styrène chute de 20%, la VAN devient négative et dégringole de $\pm -150\%$ (de 14.5 millions d'euros à -7.4 millions d'euros) et le TRI tombe à 4.1% (chute de $\pm 8\%$). Le prix du styrène est clairement le paramètre le plus influent. En effet, sa seule variation peut causer la destruction des richesses du projet.

Ensuite, le prix d'achat des matières premières influence également, mais d'une manière un peu moins prononcée, la valeur de la VAN et du TRI. En effet, lorsque ces frais d'achat baissent de 20%, la VAN augmente de 62% (de 14.5 millions d'euros à 23.5 millions d'euros) et le TRI de 3% (de 12.2% à 15.2%). Cette variation peut paraître moins influente par rapport à l'effet du prix du styrène, mais son degré est également conséquent et d'une grande importance pour la viabilité du projet. De manière symétrique, dans l'hypothèse où les frais des matières premières augmentent de 20%, la VAN chute de $\pm 62\%$ (de 14.5 millions d'euros à 5.5 millions d'euros) et le TRI chute de 3% (en passant de 12.2% à 9%).

Enfin, le dernier paramètre à faire varier est le capex. Diminué de 20%, il conduit à une augmentation de la VAN de $\pm 45\%$ (de 14.5 millions d'euros à 21 millions d'euros) et du TRI de 3.5% (de 12.2% à 15.9%). Majoré de 20%, le capex amène de la même manière une diminution de la VAN de $\pm 45\%$ (de 14.5 millions d'euros à 8.1 millions d'euros) et du TRI de $\pm 3\%$ (de 12.2% à 9.5%). Ce dernier paramètre a un impact plus modéré sur la VAN et le TRI du projet. Le capex représente un investissement durant les deux premières années, l'amortissement durant 15 ans permet d'en minimiser l'effet.

Il ressort de cette étude de sensibilité selon la méthode OFAT (one function at a time) que le prix du styrène a un impact prépondérant sur la stabilité économique du projet. Produit de la pétrochimie, il est étroitement lié au prix du baril de pétrole. Il convient donc d'être particulièrement attentif à ce paramètre dans l'élaboration de ce projet.

5.3. MÉTHODE MONTE CARLO

Le but de cette simulation est de tester la robustesse économique du projet dans diverses situations économiques pouvant survenir au cours de son déroulement. En prémices à celle-ci, il est nécessaire de déterminer des scénarii probables, afin de les utiliser comme base pour définir le modèle qui sera soumis à la simulation (voir point 2.5). Ce modèle simple à mettre en œuvre est basé sur la somme des cash flows engendrés tout au long de l'amortissement du projet (15 ans).

5.3.1. DÉTERMINATION DES SCÉNARIIS PROBABLES

En variant simultanément les trois paramètres, pour rappel le prix du styrène, le capex et le prix des matières premières, à $\pm 20\%$ autour de leurs valeurs attendues, nous allons mettre en avant 3 scénarii : le scénario attendu, le scénario optimiste et le pessimiste. Ceux-ci sont détaillés dans le tableau 26.

TABLEAU 26: SCÉNARIIS PROBABLES

	Amortissement du projet en 15 ans		
Synthèse des scénarii	Pessimiste	Attendu	Optimiste
Éléments variables (M€)			
Capex	-69	-58	-46
Prix du styrène	447	538,6	630
Matière première	143,5	179,3	215,1
VAN (M€) et TRI (%)			
VAN	-21.9	14,5	52.6
TRI	-0.9	12,2	27.8

- Le scénario attendu consiste à une variation de 0% des valeurs des paramètres. Autrement dit, c'est le scénario de base du projet. Sa VAN s'élève à 14.5 millions d'euros et son TRI à 12.2%.
- Le scénario optimiste combine une variation négative de 20% des variables capex et prix des matières premières et une variation positive de 20% du prix de vente du styrène. Dans ce scénario idéal, le projet devient clairement créateur de richesse avec un taux de rentabilité de 27.8% et une valeur actuelle nette de 52.6 millions d'euros.
- Le scénario pessimiste considère à la fois les montants du capex et du prix des matières premières augmentés de 20%. Le prix du styrène, le produit final, est quant à lui diminué de 20% par rapport à sa valeur estimée dans le cas de base. Avec un tel scénario, le projet devient destructeur de richesse: la valeur actuelle nette devient négative et passe à -21.9 millions d'euros, tout comme le taux de rentabilité interne qui passe à -0.9%.

En première conclusion, à partir des résultats obtenus dans ces trois scénarii, la VAN et le TRI sont positifs dans les deux premiers scénarii; attendu et optimiste. En ce qui concerne le scénario pessimiste, tiré vers le bas dû à l'importance du paramètre prix du styrène, avec un TRI négatif et une VAN donnant un résultat largement négatif, le projet n'est pas rentable. La simulation Monte Carlo, qui sera basée uniquement sur la somme des cash flows, va permettre d'approfondir cette étude quant à la probabilité d'obtenir une situation néfaste à l'économie du projet.

Ces scénarii nous ont permis d'examiner des combinaisons extrêmes, mais cohérentes, de variables. Bien que basée sur l'analyse d'un nombre limité de combinaisons de variables, cette méthode permet de déterminer des bornes inférieures et supérieures permettant l'analyse de sensibilité du projet. Afin de compléter cette analyse, nous allons appliquer la simulation de Monte Carlo qui, sur base de distribution des paramètres influents (voir point 5.1), génère un grand nombre de combinaisons possibles sur le modèle représentant le projet.

5.3.2. SIMULATION MONTE CARLO

La simulation Monte Carlo procède à l'analyse du risque par élaboration de modèles de résultats possibles, en substituant une plage de valeurs possibles par les paramètres choisis [16]. En d'autres mots, chaque paramètre porteur d'incertitude subit une distribution de probabilités. Sur base d'un modèle défini, la simulation calcule, selon un ensemble distinct de valeurs aléatoires des paramètres, des distributions de valeurs d'issues possibles.

Cette simulation, uniquement basée sur l'étude des cash flows dans le cas présent, va être réalisée avec le logiciel Crystal Ball en conjonction avec le tableur Excel [17]. L'utilisation de ce logiciel nécessite une méthodologie résumée en trois étapes:

1. Déterminer le modèle qui décrit le comportement à analyser

Ce modèle est construit sur base de la somme totale des cash flows engendrés durant les 15 années d'amortissement du projet (voir tableau 19).

Ce modèle se base sur les trois scénarii probables : pessimiste, attendu et optimiste, définis au point 5.3.1. En effet, pour chaque scénario, nous obtenons un total de cash flows différents, obtenus par addition du capex, des revenus (issus de la vente du styrène), de la matière première (faisant partie des charges variables), des coûts fixes, des taxes et du prix nécessaire au changement de personnel, le tout pour les 15 années d'amortissement du projet.

Ceci se résume de la manière suivante :

Total cash flows scénario

$$= \text{Capex}_{15 \text{ ans}} + \text{Revenus}_{15 \text{ ans}} - \text{Charges variables}_{15 \text{ ans}} - \text{Coûts fixes}_{15 \text{ ans}} \\ - \text{Taxes}_{15 \text{ ans}} - \text{Charges du personnel}_{15 \text{ ans}}$$

Pour illustrer, prenons le cas du scénario attendu :

$$\text{Total cash flows scénario attendu} = -58 + 538,6 - 280,1 - 58,5 - 44,3 - 3 = 94,7\text{M€}$$

Les scénarii pessimiste et optimiste, dont les total des cash flows sont respectivement de 9.3 millions d'euros et de 186 millions d'euros, sont obtenus de la même façon (voir tableau 27).

TABLEAU 27: CASH FLOWS POUR LES SCÉNARIIS ÉTUDIÉS

	Attendu	Pessimiste	Optimiste
Capex (M€)	-58	-69	-46
Revenus (M€)	538,6	447	630
Charges variables (MP) (M€)	-280,1	-315,9	-244,2
Coûts fixes (M€)	-58,5	-58,5	-58,5
Taxes (M€)	-44,3	8,7	-92,3
Charges de personnel (M€)	-3	-3	-3
Résultats			
Total des cash flows (M€)	94,7	9,3	186

Ces cash flows seront ensuite reliés à la valeur de la VAN. L'intérêt de cette pratique est de pouvoir déterminer le montant minimum de cash flows pour lequel la VAN devient nulle (voir point 2.3.1). En effet, si la VAN est positive, le projet est créateur de richesse, alors qu'une VAN négative rend le projet destructeur de richesse. Il est donc important de connaître le montant de cash flows correspondant à ce seuil d'équilibre pour lequel la VAN est nulle et à partir duquel le projet entraîne une perte ou un gain économique.

Dans le cas présent, les VAN et les cash flows des cas extrêmes suivent des relations linéaires. La raison de cette linéarité provient de la construction du modèle défini: chaque paramètre le composant suit une relation linéaire (voir figure 10) entre les scénarii pessimiste, attendu et optimiste.

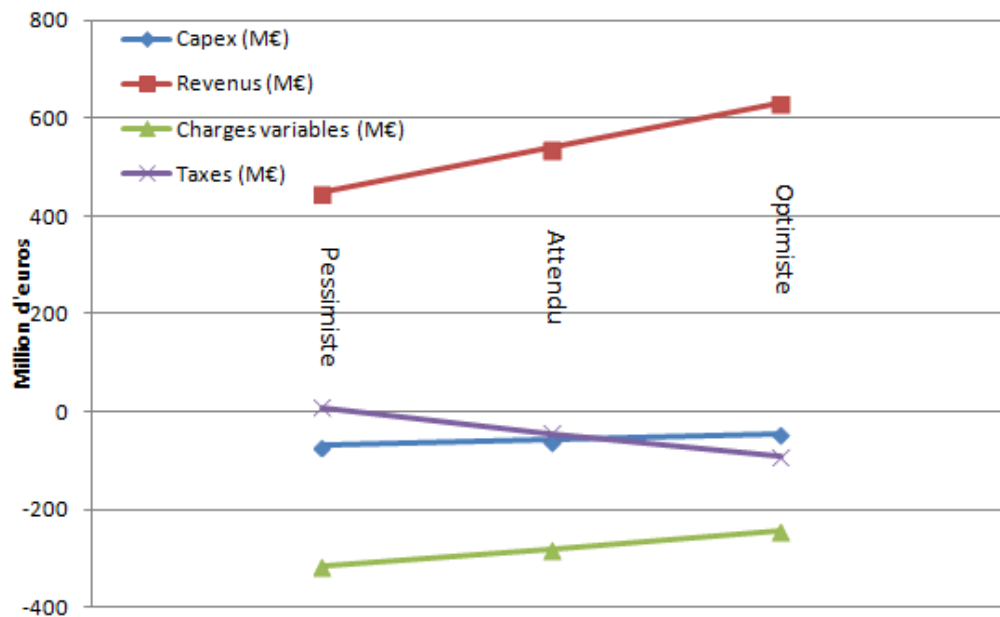


FIGURE 10: RELATION LINÉAIRE ENTRE LES PARAMÈTRES INFLUENTS

La réponse du modèle suivra également une relation linéaire. Sur base des valeurs présentées dans le tableau 28, il est possible de tracer des droites représentant d'un côté le total des cash flows et de l'autre celle correspondant aux VAN des différents scénarii (voir figure 11).

TABLEAU 28: TOTAL DES CASH FLOWS ET VAN POUR LES DIFFÉRENTS SCÉNARI

	Attendu	Pessimiste	Optimiste
Total des cash flows (M€)	94,7	9,3	186
VAN (M€)	14.5	-21.9	52.6

Dès lors, via l'équation de la droite correspondant à la somme des cash flows et l'équation de la droite représentant les VAN de nos scénarii, il est aisé de composer un système de 2 équations et de tirer la valeur de cash flows minimum pour laquelle la VAN devient nulle.

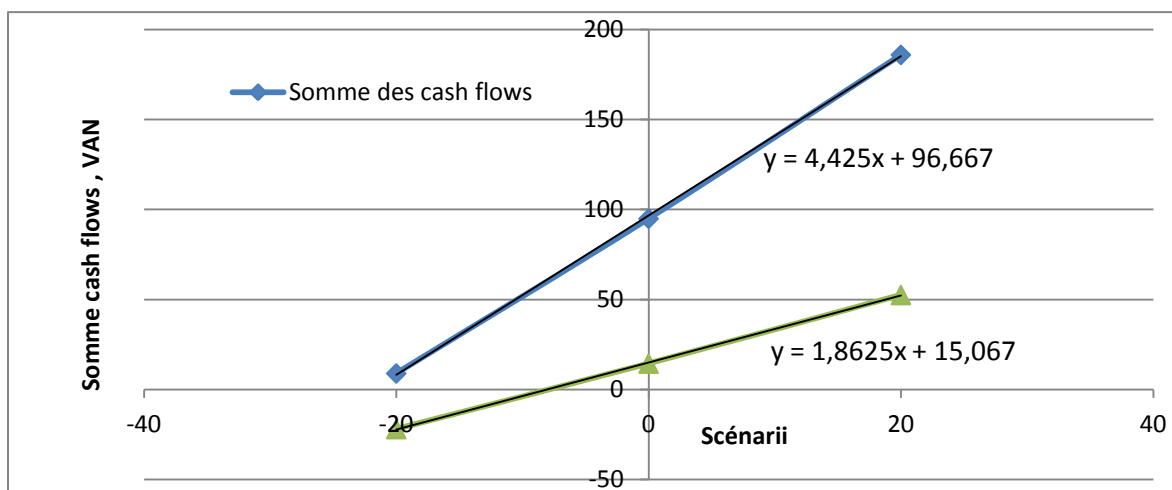


FIGURE 11: CASH FLOWS ET VAN DANS LES CAS PESSIMISTE, ATTENDU ET OPTIMISTE

La résolution du système de deux équations (voir figure 11) donne: $y_{\text{somme des CF}} = 4.42x + 96.67$ et $y_{\text{VAN}} = 1.86x + 15.07$ pour lesquelles $y_{\text{somme des CF}} = y_{\text{VAN}}$ donne une VAN nulle pour une somme de cash flows égale à 60.87 millions d'euros.

2. Fixer les paramètres incertains du processus

Les paramètres incertains sont décrits en utilisant des distributions de probabilité. Celles-ci expriment les probabilités d'occurrence des différentes valeurs que peuvent prendre les paramètres.

Nous faisons l'hypothèse de distributions normales (voir figure 12) des erreurs de prévisions pour les paramètres capex, revenus (issus de la vente du styrène) et prix des matières premières (faisant partie des charges variables).

Ce type de distribution est entièrement défini par deux nombres: sa valeur moyenne et son écart type qui décrit la variation autour de la moyenne.

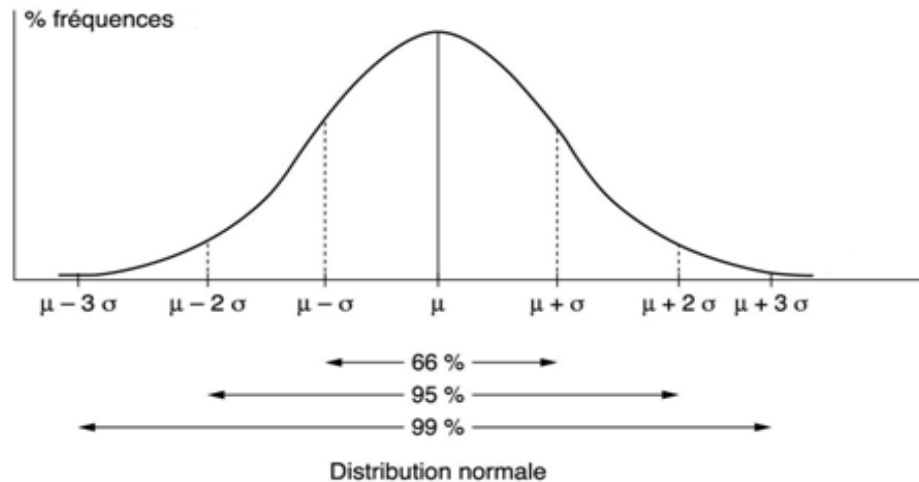


FIGURE 12: DISTRIBUTION NORMALE DES PARAMÈTRES [18]

μ représente la valeur moyenne du paramètre, dans notre cas, c'est la valeur que prend le paramètre pour le cas du scénario attendu. σ représente l'écart type qui symbolise la dispersion des résultats autour de la valeur moyenne. Plus des valeurs sont proches de la moyenne, plus elles s'avèrent probables: 66% des valeurs se trouvent dans l'intervalle $\mu + \sigma$, 95% à $\mu + 2\sigma$, 99% à $\mu + 3\sigma$ [18]. Dès lors, nous émettons l'hypothèse que l'ensemble des valeurs prises par les paramètres se trouvent entre les deux scénarii extrêmes. Dans le cas de la distribution normale choisie, cette quasi certitude signifie que l'intervalle défini entre la valeur que prend le paramètre pour le cas du scénario attendu et la valeur du paramètre dans les scénarii pessimiste et optimiste est égale à 3σ [6].

Une variable 'taxe' s'ajoute à cette simulation. Celle-ci correspond à l'imposition financière qui est variable en fonction des gains engendrés par le projet. La distribution de probabilités de cette variable suit une loi triangulaire (voir figure 13) dont les points extrêmes sont définis par les valeurs minimum, attendue et maximum prises par la variable taxe.

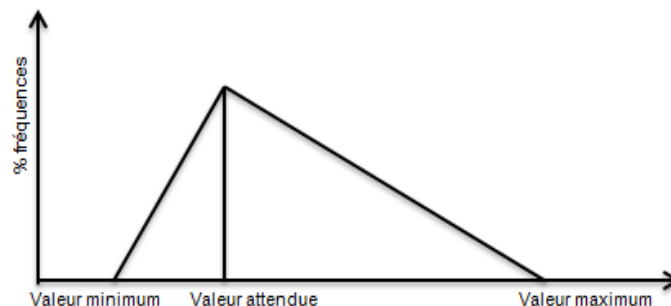


FIGURE 13: DISTRIBUTION TRIANGULAIRE DE LA VARIABLE TAXE

La raison de ce choix de distribution provient du système d'imposition. En effet, un projet créant de la richesse ne subit pas les mêmes mécanismes de taxation que dans le cas d'un projet dont les revenus sont négatifs.

Les coûts fixes et les charges de personnel restent identiques dans tous les scénarii.

3. Sur base du modèle défini au point 1 et des distributions de probabilités des valeurs des paramètres qui ont été définies au point 2, le programme va simuler un grand nombre de scénarios et ainsi générer une distribution résumant l'effet des variables sur le système.

Les valeurs entrées dans le simulateur sont reprises au tableau 29.

TABLEAU 29: BASE DE LA SIMULATION MONTE CARLO

	Attendu	Pessimiste	Optimiste	3 σ	Distribution
Capex (M€)	-58	-69	-46	12	normale
Revenus (M€)	538,6	447	630	91,4	normale
Charges variables (MP) (M€)	-280,1	-315,9	-244,2	35,9	normale
Coûts fixes (M€)	-58,5	-58,5	-58,5		uniforme
Taxes (M€)	-44,3	8,7	-92,3		triangulaire
Charges de personnel (M€)	-3	-3	-3		uniforme
Résultats					
Somme des cash flows (M€)	94,7	9,3	186		
VAN	14.5	-21.9	52.6		

Le simulateur génère une distribution normale de la somme des cash flows (voir figure 14).

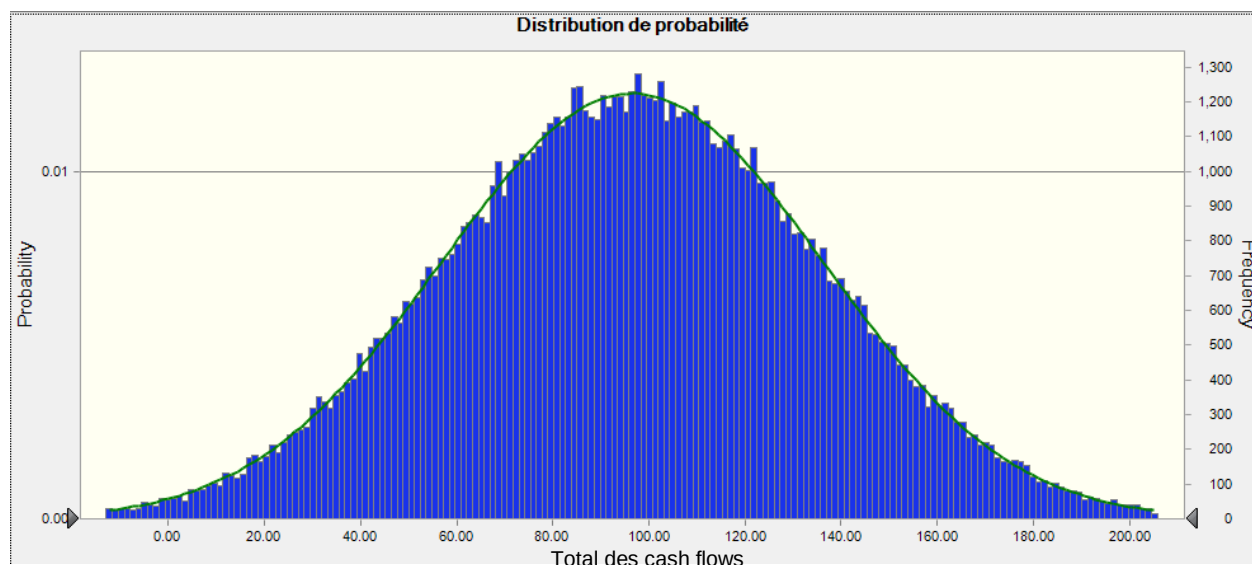


FIGURE 14: DISTRIBUTION DES CASH-FLOWS

La série des cash flows simulés obtenue montre que la somme moyenne des cash flows du projet s'élève à 95 millions d'euros. Rappelons qu'une valeur actuelle nette nulle est donnée pour une somme de cash flows aux alentours de 60 millions d'euros.

Présentée de façon cumulée (voir figure 15),

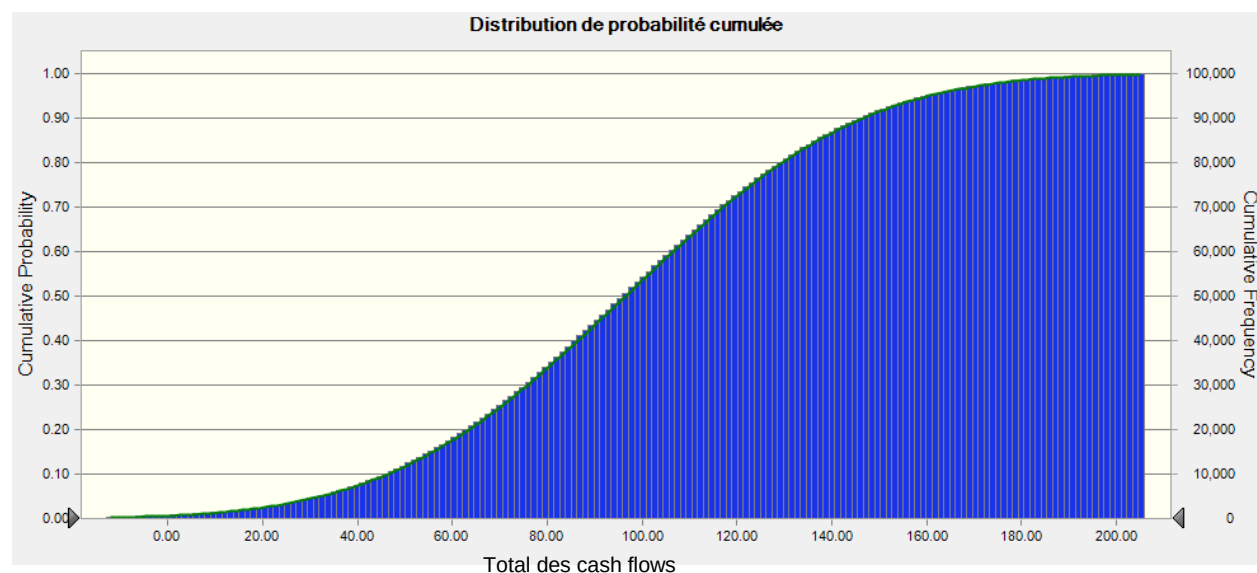


FIGURE 15: PROBABILITÉ CUMULÉE DES CASH FLOWS

Les résultats obtenus lors des simulations indiquent que plus de 80% des sommes des cash flows sont supérieures à 60 millions d'euros, soit le seuil d'équilibre pour lequel la VAN est nulle (voir point 2.5). Au delà de ce seuil, le projet est créateur de richesse. Cette proportion de 80% indique un réel potentiel de rentabilité du projet. A ce niveau, il est important de préciser que cette simulation est basée sur des scénarii dont les paramètres influents ont tous été variés entre leur valeur minimum (-20%) et maximum (+20%).

Grâce à la forte proportion de sommes des cash flows au dessus de la valeur critique équivalant à une VAN nulle, soit 60 millions d'euros, nous pouvons conclure que le projet présente un réel signe de rentabilité au vu de la richesse engendrée.

6. SENSIBILITÉ DU PROJET EN FONCTION DU PRIX DU BARIL DE PÉTROLE.

6.1 CONTEXTE

Dans un climat économique difficile, le prix du baril de pétrole est très volatil [18] (voir Figure 16), d'une part, à cause des raisons macro-économiques qui se traduisent par des incertitudes en terme de croissance économique et provoque la chute du prix du baril, et d'autre part, pour des raisons micro-économiques avec une vision positive sur le résultat qui amène à l'augmentation du prix du pétrole.



FIGURE 16: VOLATILITÉ DU PRIX DU BARIL DE PÉTROLE [19]

Ce point aborde une étude de la sensibilité de la valeur actuelle nette (VAN) et du taux de rentabilité interne (TRI), pour le scénario de attendu (voir point 5.3.1), envers les fluctuations du prix du baril de pétrole de 80 à 160 dollars.

En fonction de la valeur du baril, nous allons générer de nouveau flux d'exploitation pour le scénario attendu (voir point 4.5 pour la construction des flux totaux d'exploitation). Les cash flows qui en résultent vont générer de nouvelles VAN et TRI respectivement pour chaque prix du baril de pétrole (voir tableau 30).

TABLEAU 30: VARIATION VAN ET TRI POUR LE SCÉNARIO ATTENDU

Scénario attendu					
Prix du baril de pétrole(\$)	80	100	120	140	160
TRI (%)	9	12,2	15,2	18	20,7
VAN (M€)	5	14,5	24	33	43

Graphiquement, en première constatation, la VAN et le TRI deviennent tout deux de plus en plus intéressants lorsque le prix du baril de pétrole augmente (voir figure 17).

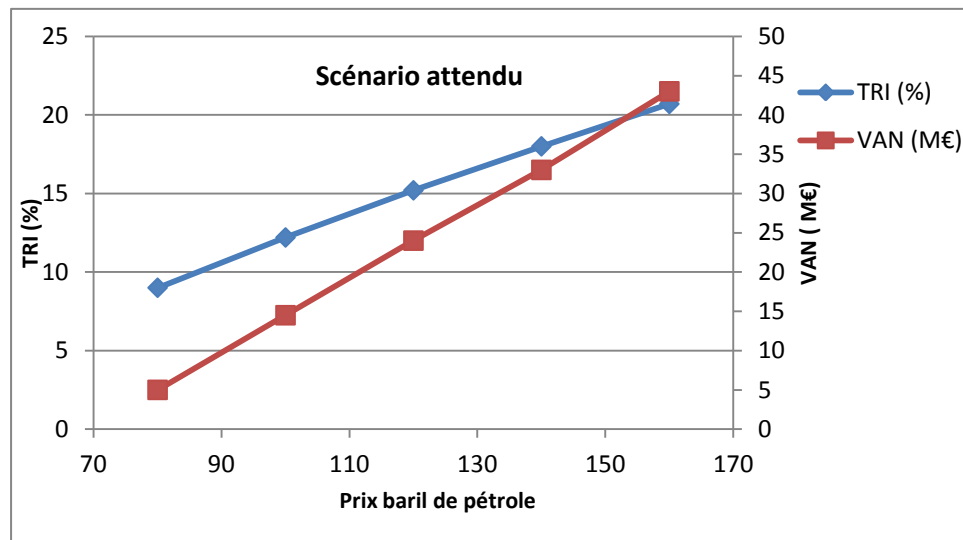


FIGURE 17: VAN ET TRI EN FONCTION DU PRIX DU BARIL DE PÉTROLE

La simulation Monte Carlo va permettre de simuler cette fluctuation du prix du baril de pétrole sur nos modèles. La simulation étudie toutes les possibilités de valeurs comprises entre les scénarii extrêmes. Le but est de tester la robustesse économique pour tous les cas se trouvant entre le cas le plus pessimiste et le plus optimiste. Ressortira de cette étude une gamme de cash flows pour lesquels le projet est soit viable, soit destructeur de richesse.

6.2. VARIATION DU PRIX DU BARIL DE PÉTROLE

6.2.1. DÉTERMINATION DES SCÉNARIIS ÉCONOMIQUES PROBABLES

Ces scénarii ont été développés au point 5.3.1. A ceux-ci, nous allons ajouter l'influence d'une modification du prix du baril de pétrole.

Pour le scénario optimiste; combinant une variation négative de 20% des paramètres investissement (capex), prix des matières premières et une variation positive de 20% du prix de vente du styrène, le projet devient clairement créateur de richesse avec un taux de rentabilité interne passant de 22.1% à 43, 9% et une valeur actuelle nette de 36.7 millions d'euros à plus de 100 millions d'euros lorsque le prix du baril de pétrole passe de 80 à 160 dollars (voir tableau 31).

TABEAU 31: VAN ET TRI EN FONCTION DU PRIX DU BARIL DE PÉTROLE POUR LE SCÉNARIO OPTIMISTE

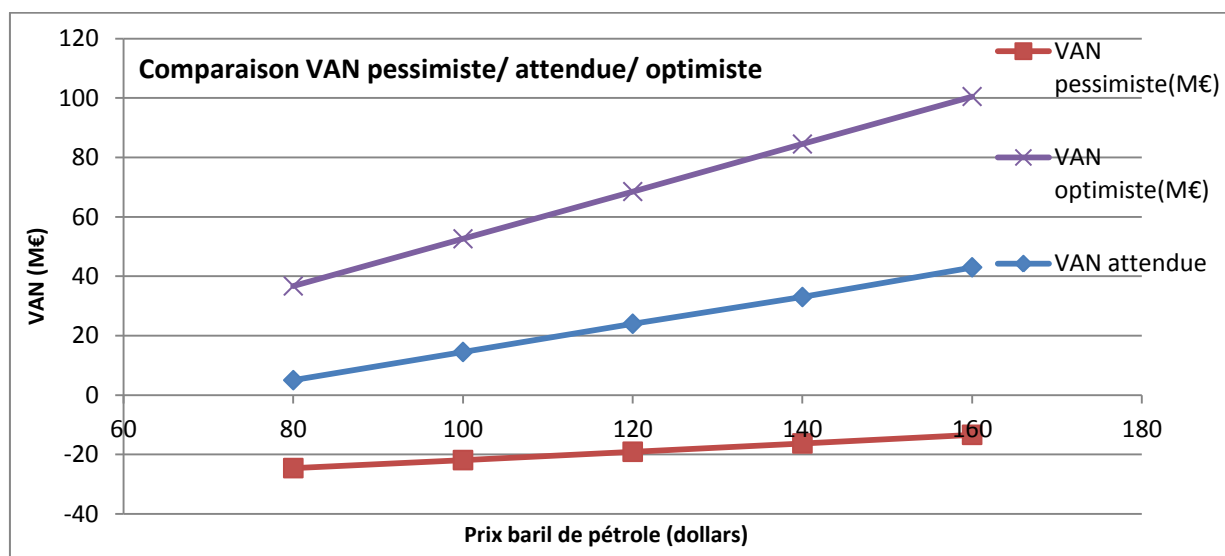
Scénario optimiste					
Prix du baril de pétrole(\$)	80	100	120	140	160
TRI (%)	22,1	27,8	33,2	38,6	43,9
VAN (M€)	36,7	52,6	68,5	84,5	100,5

Le scénario pessimiste est quant à lui défini par le montant du capex et le prix des matières premières augmentés de 20%, alors que le prix du styrène, produit final, est diminué de 20% par rapport à sa valeur nominale. Nous observons dans ce scénario (voir tableau 32) que le projet est destructeur de richesse dans toutes les situations selon le critère de la VAN. Seul le critère du TRI offre un très faible taux de rendement pour un prix du baril supérieur à 120 dollars.

TABEAU 32: VAN ET TRI EN FONCTION DU PRIX DU BARIL DE PÉTROLE POUR LE SCÉNARIO PESSIMISTE

Scénario pessimiste					
Prix du baril de pétrole(\$)	80	100	120	140	160
TRI (%)	-1,8	-0,9	0,4	1,5	2,6
VAN (M€)	-24,6	-21,9	-19,1	-16,3	-13,4

La figure 18 présente une comparaison graphique de l'évolution de la VAN en fonction du prix du baril de pétrole entre nos scénarii optimiste et pessimiste.

**FIGURE 18: COMPARAISON VAN POUR LES CAS PESSIMISTE ET OPTIMISTE**

Nous pouvons constater que l'écart est important d'un scénario à l'autre. Dans le cas d'un prix de baril de 80 dollars, plus de 50 millions d'euros séparent le cas pessimiste de l'optimiste. L'écart se creuse davantage dans le cas d'un prix du baril fixé à 160 dollars, où plus de 110 millions d'euros séparent alors les deux cas extrêmes. Ce plus grand écart est expliqué par le fait que le prix du styrène est le paramètre prépondérant pour le calcul de la VAN, et directement lié au prix du pétrole (voir point 5.2).

6.2.2. SIMULATION MONTE CARLO

De la même façon qu'au point 5.3.2, nous allons définir un modèle et le soumettre à la simulation Monte Carlo. Sur base des valeurs aléatoires des paramètres d'entrées, la simulation va produire des distributions de valeurs d'issues possibles.

Cette simulation, également basée sur la somme des cash flows, va également être réalisée avec le logiciel Crystal Ball en conjonction avec le tableur Excel [17]. Rappelons que ce processus comprend trois étapes.

1. Déterminer le modèle qui décrit le comportement à analyser:

Le fondement de ce modèle est la somme totale des cash flows. Il est basé sur les trois scénarii (voir point 5.3.2). Pour le scénario attendu, nous prenons les valeurs trouvées pour le prix du baril à 100 dollars (hypothèse de base utilisée au long de ce travail) pour lequel la VAN est de 14.5 millions d'euros et le total des cash flows pour 15 années d'amortissement de 94.7 millions d'euros.

Pour le scénario pessimiste, nous poussons les paramètres aux valeurs les plus défavorables, à cela nous ajoutons le prix du baril de pétrole à 80 dollars. La VAN passe alors à -24.6 millions d'euros et le total des cash flows à 2 millions d'euros.

Pour le scénario optimiste, les paramètres passent aux valeurs les plus favorables, à cela nous ajoutons le prix du baril de pétrole à 160 dollars. La VAN passe ainsi à 100.5 millions d'euros et le total des cash flows à 316 millions d'euros.

Pour résumer, cela donne (voir tableau 33) :

TABEAU 33: SOMMES DES CASH FLOWS ET VAN POUR LES TROIS SCÉNARI

	Attendu	Pessimiste	Optimiste
Somme des cash flows (M€)	94,7	2	316
VAN (M€)	14.5	-24.6	100.5

Les valeurs des VAN et des totaux de cash flows respectifs sont présentés graphiquement à la figure 19. Nous appliquons ensuite une régression linéaire sur base de ces points pour obtenir 2 équations attribuables aux valeurs de la VAN et aux valeurs des cash flows. Ces équations permettent de calculer la VAN et la somme des cash flows pour un prix du baril entre 80 et 160 dollars, et surtout de déduire la somme de cash flows minimale pour laquelle la VAN est nulle. L'intérêt de cette pratique est de déterminer la limite, soit le seuil d'équilibre (voir point 2.5), à partir duquel le projet devient rentable.

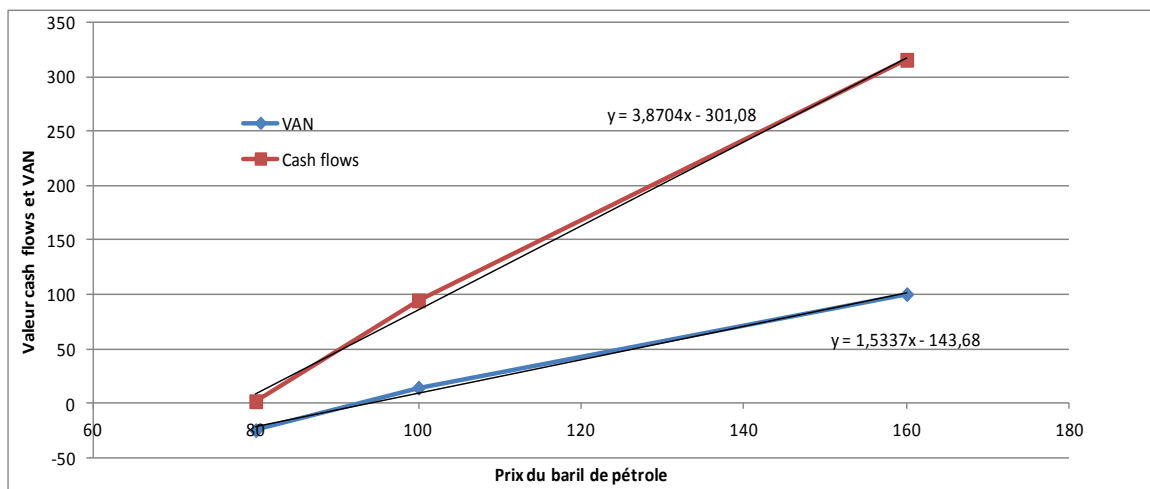


FIGURE 19: EVOLUTION DE LA VAN ET DES CASH FLOWS EN FONCTION DU PRIX DU BARIL DE PÉTROLE

La résolution du système à deux équations $y_{(VAN)} = 1.53x - 143.68$ et $y_{(somme\ des\ CF)} = 3.87x - 301.08$ donne une VAN nulle pour une somme de cash flows de 61 millions d'euros. Au delà de cette valeur de cash flows, la VAN devient positive et le projet créateur de richesse.

2. Fixer les paramètres du processus

De manière identique au point 5.3.2, nous allons étudier l'influence des paramètres capex, revenus et prix de la matière première (faisant partie des charges variables), soit les paramètres incertains choisis, sur la somme des cash flows, en se basant sur différents prix du baril. Afin de compléter ce modèle, nous faisons intervenir les coûts fixes, les taxes et le prix nécessaire au changement de personnel, le tout pour les 15 années d'amortissement du projet.

Tel que déjà défini, le capex suit une distribution normale. Pour les paramètres revenus et charges variables, le choix se porte ici sur des distributions triangulaires. Le choix de ces distributions provient de la non symétrie des scénarii pessimiste et optimiste autour du scénario attendu.

Une variable 'taxe' s'ajoute à cette simulation. Celle ci correspond à l'imposition financière qui est variable en fonction des gains engendrés par le projet. Les autres frais tels que les coûts fixes et les charges de personnel sont gardés identiques dans tous les scénarii.

3. Le programme, en fonction des paramètres entrés dans le simulateur (voir tableau 34), va générer une distribution.

TABLEAU 34: VALEURS DES PARAMÈTRES UTILISÉS POUR LA SIMULATION

	Attendu	Pessimiste	Optimiste	Distribution
Prix du baril (\$)	100	80	160	
Capex (M€)	-58	-69	-46	normale
Revenus (M€)	538,6	366,6	965	triangulaire
Charges variables (MP) (M€)	-280,1	-249,8	-380,7	triangulaire
Coûts fixes (M€)	-58,5	-58,5	-58,5	uniforme
Taxes (M€)	-44,3	14,7	-158,6	triangulaire
Charges de personnel (M€)	-3	-3	-3	uniforme
Résultats				
Somme des cash flows (M€)	94,7	2	316	
VAN (M€)	14.5	-24.6	100.5	

En fonction des valeurs entrées, le simulateur génère une distribution de probabilités des sommes des cash flows (voir figure 20).

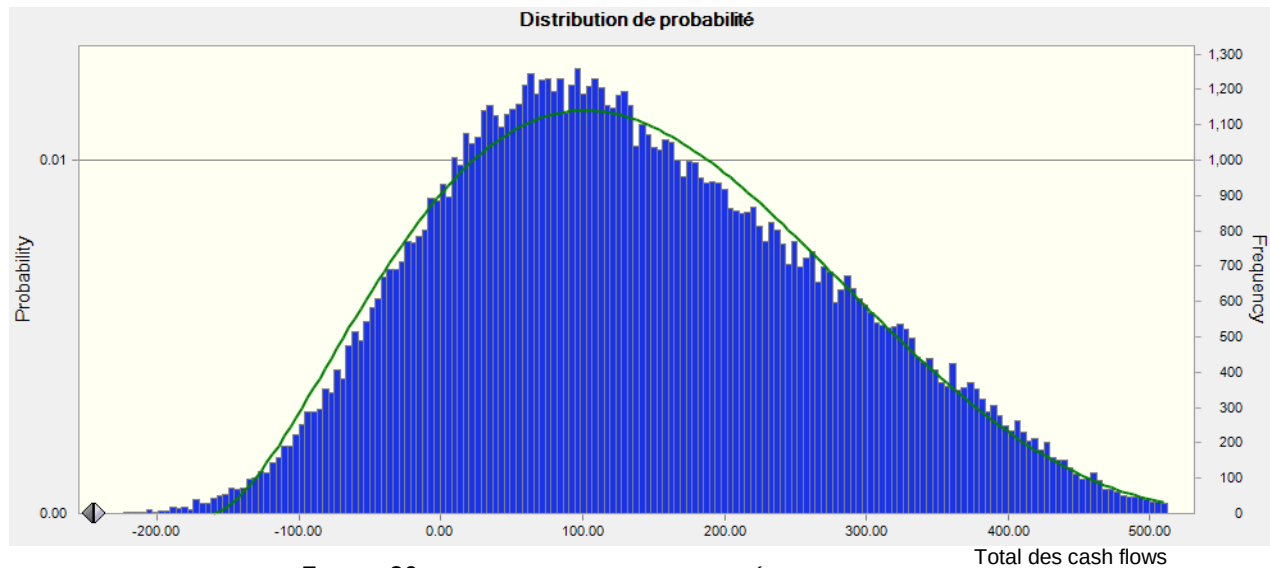


FIGURE 20: DISTRIBUTION DE PROBABILITÉ DES CASH-FLOWS

La moyenne de cette distribution se situe autour de la somme des cash flows obtenue dans le scénario attendu. La distribution présente une 'trainée' vers les valeurs de cash flows élevées. La raison provient du paramètre prix du styrène (revenus) : lié directement avec l'évolution du prix du baril de pétrole et facteur prépondérant (voir point 5.2), il tire la rentabilité du projet vers le haut lorsque le prix du baril atteint des valeurs très élevées. De manière cumulée, nous obtenons (voir figure 21):

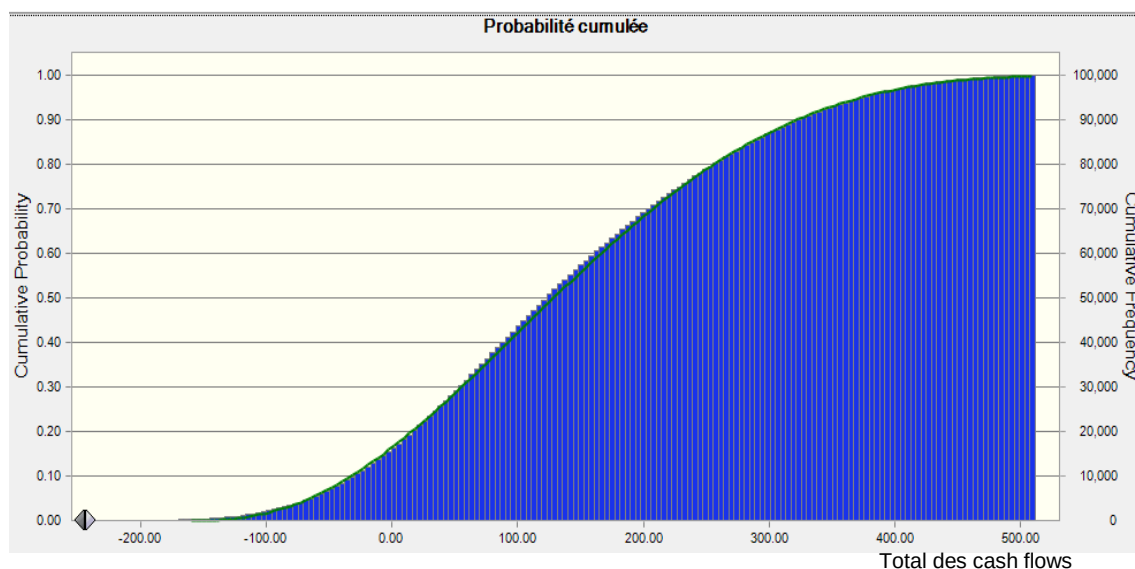


FIGURE 21: PROBABILITÉ CUMULÉE DES CASH FLOWS

Les résultats obtenus lors des simulations indiquent que moins de 35% des cash flows simulés sont inférieurs à 61 millions d'euros. Cette simulation met en avant la capacité de rentabilité du projet avec plus de 65% de probabilité quant à l'obtention d'une VAN supérieure à 0 et donc un projet créateur de richesse.

En conclusion, on constate que la hausse du prix du baril de pétrole tire le projet vers le haut. En critique à cette simulation, nous pourrions émettre le fait qu'une étude sur un prix du baril fixé en dessous de 80 dollars mettrait l'économie du projet à mal. Cependant, la conjoncture offerte par le marché indique une hausse continue du prix du baril de pétrole. L'U.S. Energy Information Administration (EIA), au travers de son article Annual Energy Outlook 2013, mentionne une augmentation de plus de 20% du prix du baril à horizon 2030 [20]. Cette affirmation nous pousse à croire en la rentabilité du projet étant donné sa propension à créer de la richesse lorsque le prix du baril de pétrole augmente.

7. ETUDE DES TECHNOLOGIES 1, 2 ET 3

Jusqu'à présent, nous avons exploité la technologie de référence (0). Cependant, d'autres technologies ont également été définies en aval du développement de cette technologie. Ce dernier point aura pour objectif, d'explorer de manière sommaire les opportunités économiques que peuvent apporter ces autres solutions dont les technologies sont rappelées ci-dessous :

- Technologie de référence (0) : Composée d'un four alimenté au gaz naturel préchauffant les gaz de fluidisation. Cette technologie n'inclut pas de valorisation énergétique des sous produits.
- Technologie 1 : Valorise l'ensemble des sous produits afin d'alimenter le four préchauffant les gaz de fluidisation utilisés dans le réacteur de pyrolyse.
- Technologie 2 : Option combinant l'utilisation d'un four alimenté au gaz naturel afin de préchauffer les gaz nécessaires à la pyrolyse. En parallèle, ce four permet d'obtenir de la vapeur valorisable dans le procédé.
- Technologie 3 : Développement ultime, cette technologie englobe une valorisation totale des sous produits comme combustibles du four préchauffant les gaz nécessaires à la pyrolyse. En plus de ce point, cette technologie permet de produire de la vapeur basse pression utilisable dans le procédé mais également de la vapeur haute pression valorisable sur le site industriel jouxtant l'unité de recyclage.

Chacune de ces technologies comprend différents niveaux d'intégration énergétique avec valorisation partielle ou totale des sous-produits du procédé. Dans la suite de ce travail, nous allons développer l'ensemble des coûts et flux d'exploitation pour les technologies 1, 2 et 3.

Les hypothèses développées restent identiques à celles explicitées au point 4.

7.1. TECHNOLOGIE 1

Pour cette technologie, l'investissement total est de 54 millions d'euros. Les coûts sont répartis de la façon suivante (voir tableau 35) :

TABEAU 35: RÉSUMÉ DES COÛTS POUR LA TECHNOLOGIE 1

Type de coûts	Unités	Prix
MP (déchet PS)	€/t	556
MP (additifs)	€/t	8
Sous produit	€/t	-83
Utilitaires et énergies	€/t	120
Livraison / logistique	€/t	0
Coût opératoire (main d'œuvre)	M€/an	1,8
Coût opératoire (site)	M€/an	1

En référence au point 5.3, il est possible d'obtenir les flux d'exploitation (voir annexe 13.1). Pour la technologie 1, l'analyse basée sur 15 années d'amortissement donne une VAN de 17.9 millions d'euros et un TRI de 13.7%.

7.2. TECHNOLOGIE 2

Pour cette technologie, l'investissement total est de 60 millions d'euros. Les coûts sont répartis de la façon suivante (voir tableau 36) :

TABEAU 36: RÉSUMÉ DES COÛTS POUR LA TECHNOLOGIE 2

Type de coûts	Unités	Prix
MP (déchet PS)	€/t	556
MP (additifs)	€/t	8
Sous produit	€/t	-213
Utilitaires et énergies	€/t	67
Livraison / logistique	€/t	0
Coût opératoire (main d'œuvre)	M€/an	1,9
Coût opératoire (site)	M€/an	1.2

Ces valeurs nous donnent accès aux flux d'exploitation (voir annexe 13.2) et permettent d'obtenir une VAN de 30.4 millions d'euros et un TRI de 17% pour un amortissement du projet durant 15 années.

7.3. TECHNOLOGIE 3

Pour cette technologie, l'investissement total est de 61 millions d'euros, soit le plus élevé de l'ensemble des 4 technologies. De la même façon, les coûts sont répartis de la façon suivante (voir tableau 37) :

TABEAU 37: RÉSUMÉ DES COÛTS POUR LA TECHNOLOGIE 3

Type de coûts	Unités	Prix
MP (déchet PS)	€/t	556
MP (additifs)	€/t	8
Sous produit	€/t	-83
Utilitaires et énergies	€/t	120
Livraison / logistique	€/t	0
Coût opératoire (main d'œuvre)	M€/an	1,8
Coût opératoire (site)	M€/an	1.1

Après avoir dressé nos flux d'exploitation (voir annexe) pour un amortissement du projet durant 15 années, nous obtenons une VAN de 17.5 millions d'euros et un TRI de 12.9%.

7.4. DISCUSSION AUTOUR DES TECHNOLOGIES ENVISAGEABLES

A partir de la technologie de référence sélectionnée au début de ce travail, nous avons effectué une étude de rentabilité complète et démontré la sensibilité des prévisions vis-à-vis de variables critiques pour la survie économique du projet.

Trois améliorations de la technologie ont ensuite été étudiées par Total : technologie 1, 2 et 3. Ces trois variantes sont évaluées d'un point de vue financier à iso-production, sur base des critères de la VAN et du TRI (voir tableau 38).

TABEAU 38: VAN ET TRI POUR L'ENSEMBLE DES TECHNOLOGIES

	Technologie 0	Technologie 1	Technologie 2	Technologie 3
VAN (M€)	14,5	17,9	30,4	17,5
TRI (%)	12,2	13,7	17	12,9

Si nous résumons ces résultats sous forme d'histogramme (voir figure 22), la technologie 2 se démarque de ses homologues en offrant une VAN de 30.4 millions d'euros et un TRI de 17%.

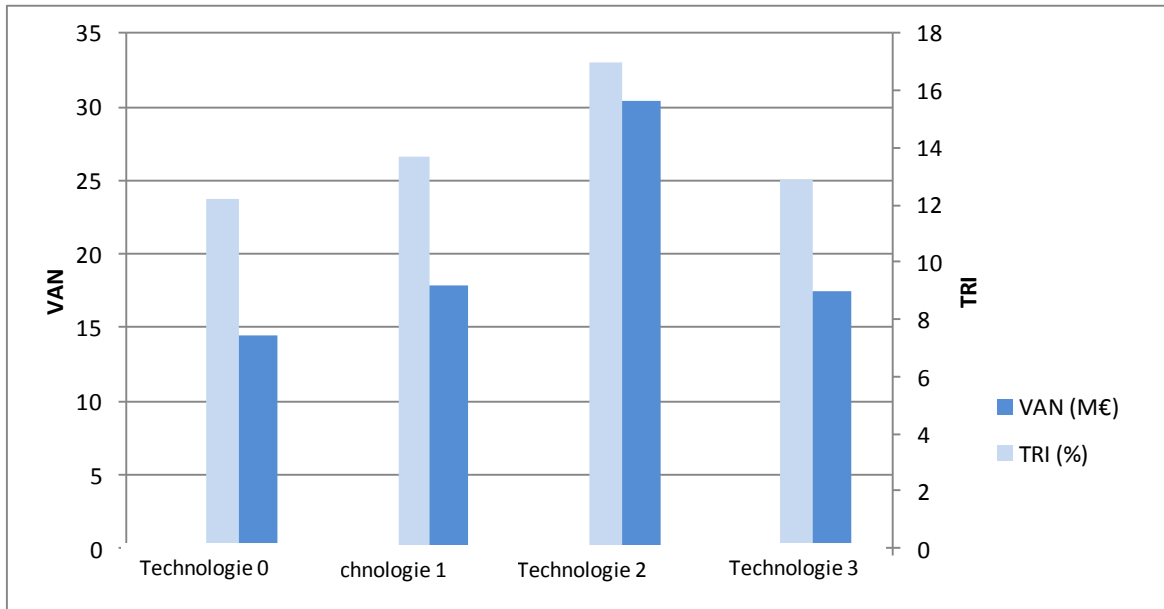


FIGURE 22: VAN ET TRI DES 4 TECHNOLOGIES

Sans en faire une approche complète, si nous soumettons l'ensemble des technologies (1, 2 et 3) à nos cas pessimiste, attendu et optimiste, cela donne les résultats suivants (voir tableau 39) :

TABEAU 39: VAN ET TRI POUR L'ENSEMBLE DES TECHNOLOGIES ET CAS

	Technologie 0 (référence)			Technologie 1			Technologie 2			Technologie 3		
Cas	Pessimiste	Attendu	Optimiste	Pessimiste	Attendu	Optimiste	Pessimiste	Attendu	Optimiste	Pessimiste	Attendu	Optimiste
VAN (M€)	-21,9	14,5	52,6	-12,7	17,9	49,4	-0,7	30,4	61,9	-12,9	17,5	48,7
TRI (%)	-0,9	12,2	27,8	1,4	13,7	24,1	6,7	17	26,3	2	12,9	22,3

Parmi les technologies envisagées, la technologie de référence est la plus sensible au cas pessimiste défini dans cette étude. Cela en fait un bon choix de référence, à partir duquel des solutions plus rentables sont apportées par des améliorations basées sur la valorisation des flux énergétiques et des sous-produits. Parmi celles-ci, la technologie 2 s'avère la plus intéressante, avec une VAN doublée dans le cas attendu par rapport aux autres technologies, et un gain potentiel plus élevé d'environ 10 millions d'euros dans le cas optimiste. Cette robustesse économique s'explique par la grande quantité de sous produit valorisable sur le marché. L'autre point primordial est la faible consommation énergétique qui permet au projet d'offrir une VAN et un TRI élevés. En conclusion, la technologie 2 est sans nul doute la solution à développer dans l'optique de maximiser la création de richesse.

8. DISCUSSION ET PRISE DE RECUL

Dans ce travail, nous avons étudié l'économie du projet par des procédés traditionnels d'évaluation d'investissements tels que les analyses de coûts, la valeur actuelle nette et le taux de rentabilité. Ces méthodes permettent d'obtenir une première approche sur le rendement économique du projet étudié.

Bien que déjà bien avancée, ces analyses ne permettent pas d'évaluer complètement la robustesse financière d'un projet face aux aléas économique qui pourraient survenir. D'où la nécessité d'envisager des études de sensibilité du projet face à des paramètres incertains.

Deux méthodes ont été développées dans ce travail. La première consistait à faire varier une seule variable à la fois et observer les effets sur le système (méthode OFAT: one function at a time). Cette méthode, fiable et facile à mettre en œuvre s'avère être un bon outil pour effectuer des comparaisons et juger l'importance de paramètres. Cette étude a permis de mettre en exergue l'importance du paramètre 'prix du styrène'. Le point négatif à retirer de cette méthode est qu'elle ne considère pas les interactions possibles entre les différents paramètres du système, comme souvent le cas dans l'économie d'un projet.

En seconde approche, nous avons soumis le système à la simulation de Monte Carlo. Celle-ci a permis une observation plus précise de la variabilité potentielle de la rentabilité du projet grâce à l'utilisation d'intervalle de confiance décrivant le comportement des paramètres incertains. Bien qu'étant un outil efficace, il impose la définition d'un modèle et le choix de distribution sur les variables clés entrant dans le processus. Les hypothèses faites sur les intervalles de valeurs possibles par les paramètres peuvent s'avérer incertaines et ainsi mettre en doute les résultats fournis par la simulation.

D'un point de vue personnel, ces deux dernières méthodes sont à utiliser en complément afin de qualifier au mieux la réalisation d'un projet. La méthode OFAT, de par sa facilité de mise en œuvre est mise à contribution par le groupe afin de déceler les paramètres les plus importants pouvant conduire à la perte de capitaux. La simulation

Monte Carlo est d'usage moins répandue dans les études économique de la société. En effet, la création d'un modèle, qui doit refléter au mieux le projet, impliquant de déterminer de façon optimale des distributions sur les paramètres incertains en font une méthode délicate à appliquer.

9. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

9.1. CONCLUSION

L'objectif de cette étude est de déterminer la faisabilité économique d'un procédé de valorisation de flux styréniques recyclés. De taille industrielle, cette installation serait stratégiquement située dans le bassin industriel de Carling (France).

Dans le premier axe de ce travail, nous avons successivement comparé d'un point de vue économique trois concepts d'installations établis sur des procédés différents. Le choix du procédé le plus intéressant, la pyrolyse, s'est justifié sur base de critères alliant rentabilité économique et faisabilité technique.

A partir du procédé choisi, des investigations techniques effectuées par le groupe Total ont abouti à 4 technologies 'd'amélioration', présentant toutes des valorisations énergétiques différentes, à partir des mêmes quantités de matière entrante et de produit en sortie.

Au travers du second axe, nous avons étudié la situation économique de la technologie de référence. Dans un premier temps, tous les coûts totaux engendrés ont été détaillés, nous donnant accès aux flux d'exploitation pour une période de 15 années d'amortissement. A partir de ces cash flows, une valeur actuelle nette de 14.5 millions d'euros et un taux de rentabilité interne de 12.2% ont été déduits.

Nous avons ensuite testé la robustesse économique du projet en le soumettant à deux démarches d'évaluation multifactorielle, d'abord avec la méthode OFAT, puis avec la simulation Monte Carlo. En effet, l'évaluation financière de tout projet exige de scruter l'avenir et de détecter les paramètres clé pour lesquels des changements dans les hypothèses de valeurs sont déterminants vis-à-vis du rendement du projet.

A cette fin, les paramètres étudiés sont l'investissement, le prix des matières premières et le prix du produit fini (styrène). La méthode OFAT a pour principe de faire varier un seul paramètre à la fois afin d'observer l'influence de ce paramètre sur le système. En première observation, il ressort que le prix du styrène a un impact

prépondérant sur la stabilité économique du projet. Il convient donc d'être particulièrement attentif à ce paramètre dans l'élaboration de ce plan.

La simulation Monte Carlo, quant à elle, permet de faire varier simultanément tous les paramètres influents dans l'économie du projet et d'évaluer la probabilité de réussite économique du projet. Cette simulation renseigne une rentabilité du projet au delà de 80%, pour des paramètres variés de + et - 20% par rapport à leur valeur nominale.

Afin de compléter l'étude économique du projet, le troisième axe de ce travail a traité l'influence du prix du baril de pétrole entre 80 et 160 dollars sur l'ensemble du projet. Pour le modèle étudié, la simulation de Monte Carlo a permis de conclure que le projet a 65% de probabilité d'être créateur de richesse, et ce, malgré la volatilité du prix du baril de pétrole.

Les technologies 'améliorées', issues de la technologie initiale, ont également été étudiées afin d'en calculer les VAN et TRI respectifs. De ces études, la technologie 2 se distingue par sa valeur actuelle nette de 30.4 millions d'euros et son taux de rentabilité interne de 17%. Cette création de richesse se justifie par la grande quantité de sous produit valorisable sur le marché mais également par sa faible consommation en énergie, qui en font un projet potentiellement très rentable.

Actuellement, malgré la rentabilité économique du projet, Total maintient le projet en attente d'investissement. Il reste à la discrétion du groupe de prendre la décision stratégique quant à la décision d'investir. Comme dans plusieurs études, un projet peut être jugé rentable mais son exécution peut ne pas avoir nécessairement l'aval des décideurs.

9.2. PERSPECTIVES

Dans le cadre de ce projet, deux perspectives sont proposées pour en améliorer le développement.

La première consiste à la mise en place d'une unité de tri sélectif, installée en amont de l'unité. En effet, en termes techniques, le polystyrène déchet récolté peut contenir des contaminants dangereux tels que le brome. Ce composé est principalement présent dans les déchets WEEE (waste electrical and electronic equipment) [21] dans lesquels son rôle est d'assurer la résistance au feu. Au delà de son effet néfaste sur l'organisme et l'environnement, le brome est dangereux pour les installations de par sa réactivité avec les métaux mais provoque également une chute du rendement de l'installation (de 70% à 20% si présence de contaminant) [4].

Cette première perspective, qui consiste à trier de façon mécanique les déchets plastiques selon leur application (soit à l'aide de machine, soit par action humaine), est développée grâce à sa simplicité et au respect de l'environnement. Cependant, elle n'offre pas la certitude d'obtenir une charge exempte de tout contaminant et demeure une solution de pré-traitement peu chère mais dont l'efficacité peut s'avérer insuffisante dans notre cas.

Une deuxième perspective, adaptée à nos besoins, consiste à la mise en place d'une unité de déshalogénéation. Cette méthode chimique consiste à supprimer une substance halogénée dans un composé. Un halogène désigne les éléments chimiques tels que le fluor, le chlore, le brome, l'iode, ... Ces composés halogènes doivent être éliminés grâce à des équipements spéciaux [4]. Installée en parallèle du projet Loops, cette unité permettrait de traiter l'ensemble des déchets à base de polystyrène présents sur le marché, faisant ainsi un ensemble plus flexible mais également plus coûteux en termes d'investissement.

Dans nos hypothèses, nous supposons un prix de la matière première acheminée à ± 350 euros / tonne : il s'agit de déchets 'propres' ayant déjà subi un tri sélectif.

Un pré-traitement de déshalogénation tel que mentionné implique un surcoût de ± 150 euros/tonne [21]. Cependant, l'unité acceptera dans ce cas tous les déchets plastiques, y compris les déchets WEEE, nettement moins chers sur le marché, entraînant une chute du prix d'achat de la matière déchet brute. Au niveau économique, la balance s'équilibre et le projet resterait rentable.

Cette perspective reste délicate à développer, principalement d'un point de vue technique, car elle nécessite de gérer l'impact au niveau environnemental (eau de rejet contaminée). Les études sur ce cas sont donc encore à approfondir et figurent en bonne place en tant que perspective à ce projet.

10. TABLEAU DES ABRÉVIATIONS

ABS: Acrylonitrile Butadiène Styrène

CF : cash flow = flux financier généré durant la vie du projet lux financier

M€: million d'euros

MP: matière première

PS : polystyrène

STY : styrène

EPS: Expandable PS

t: temps

TRI: Taux de Rentabilité Interne

VAN: Valeur Actuelle Nette

11. BIBLIOGRAPHIE

- [1] PLASTICSEUROPE, 2010, "Plastic & sustainability", <http://www.plasticseurope.org/plastics-sustainability.aspx>, Consulté en février 2013.
- [2] Directive 2008/98/CE, disponible sur : <http://eur-lex.europa.eu/fr/index.htm>, 2008, consulté en mars 2013
- [3] Département de la communication de TOTAL, "Total Petrochemicals Research Feluy", Bruxelles, 2011.
- [4] RICHEZ A., "Dépolymérisation du polystyrène", Total Research and Technology Feluy, 2012, Rapport de stage ENSGTI Pau (confidentiel).
- [5] DUC M., "Loops project; statement of requirements", Total Research and Technology Feluy, 2012. Rapport interne (confidentiel).
- [6] BREALEY R., MYERS S., ALLEN F., "Principes de gestion financière", 8^{ème} édition, Pearson Education, 2006.
- [7] ENGELS F., KLETZ F., "Cours de comptabilité analytique" , Ecole des mines de Paris, 2005.
- [8] EMMANUEL D., "Management des projets : techniques d'évaluation, analyse, choix et planification", L'Harmattan, 2004.
- [9] Contributeurs de Wikipédia, 2013, "Taux de rentabilité interne.", http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Taux_de_rentabilit%C3%A9_interne&oldid=89789649, Wikipédia, l'encyclopédie libre, Consulté en février 2013.
- [10] GREGERSEN H., CONTRERAS A., "Evaluation économique des impacts des projets forestiers", Etude FAO forêts, Chapitre 7 : Traitement de l'incertitude : analyse de sensibilité, 1994.

- [11] PANNELL D., 2011, "Sensitivity analysis of normative economic models: Theoretical framework and practical strategies", *Agricultural Economics* 16.
- [12] HORNBERGER G., SPEAR R., 1981, "An approach to the preliminary analysis of environmental systems", *Journal of Environmental Management* 7, 7–18.
- [13] PROCESS ECONOMICS PROGRAM REPORT 199B, 1998, "Plastics recycling to liquids", Chapitres 6, 7 et 8.
- [14] CARNOY G., 2003, "La durée d'amortissement d'un bien tenu en usufruit, superficie ou emphytéose", http://www.droit-fiscalite-belge.com/article_568.html, Droit fiscalité Belge, Edition du G.I.E. BusinessAndLaw.be. Consulté en février 2013.
- [15] OCDE (Organisation de coopération et de développement), 2013, <http://www.oecd.org/fr/statistiques/>, Consulté en février 2013.
- [16] PALISADE®, 2013, "Simulation Monte Carlo", http://www.palisade.com/risk/fr/simulation_monte_carlo.asp, Consulté en mars 2013.
- [17] Oracle®, logiciel Crystal Ball, application pour tableur Microsoft® Office Excel, <http://www.oracle.com> et <http://office.microsoft.com>
- [18] ALBOUY M., "Les grands auteurs en finance", Edition EMS, 2003.
- [19] MAISONNIER G. (IFP Energies nouvelles), 2010, "Comprendre les variations du prix du pétrole", <http://www.ifpenergiesnouvelles.fr/espace-decouverte/tous-les-zooms/marches-petroliers-et-crise-de-la-dette-tendances-et-enjeux/comprendre-les-variations-du-prix-du-petrole-decembre-2010>, Consulté en février 2013.

- [20] EIA (Independent Statistics and Analysis), 2013, " Annual Energy Outlook 2013", U.S. Energy Information Administration.
- [21] FREEGARD K., TAN G., MORTON R., 2006, "Develop a process to separate brominated flame retardants from WEEE polymers", The Waste & Resources Action Program.

12. ANNEXES

12.1. Flux d'exploitation pour la technologie 1

12.2. Flux d'exploitation pour la technologie 2

12.3. Flux d'exploitation pour la technologie 3

12.1. FLUX D'EXPLOITATION POUR LA TECHNOLOGIE 1

	Unités	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Capex	M€	0	0	0	-43	-11	0	0												
Capex %		0%	0%	0%	80%	20%	0%	0%												
Revenus	M€	0,0	0,0	0,0	0,0	26,0	26,6	27,2	27,8	28,5	29,1	29,7	30,4	31,1	31,8	32,5	33,2	34,0	34,7	35,5
Marge sur coût variable	M€	0,0	0,0	0,0	0,0	13,9	14,4	14,9	15,3	15,8	16,3	16,9	17,4	17,9	18,5	19,1	19,7	20,3	20,9	21,5
MP	M€	0,0	0,0	0,0	0,0	11,16	11,27	11,37	11,48	11,59	11,69	11,80	11,91	12,03	12,14	12,25	12,37	12,48	12,60	12,72
MP (additifs)		0,0	0,0	0,0	0,0	1,6	1,6	1,7	1,7	1,7	1,8	1,8	1,9	1,9	1,9	2,0	2,0	2,1	2,1	2,2
Energie	M€	0,0	0,0	0,0	0,0	-2,5	-2,6	-2,7	-2,7	-2,8	-2,8	-2,9	-3,0	-3,0	-3,1	-3,2	-3,2	-3,3	-3,4	-3,5
Coûts fixes	M€	0,0	0,0	0,0	0,0	-3,2	-3,3	-3,4	-3,5	-3,6	-3,6	-3,7	-3,8	-3,9	-4,0	-4,1	-4,2	-4,3	-4,4	-4,6
Directs	M€	0,0	0,0	0,0	0,0	-2,0	-2,1	-2,1	-2,2	-2,2	-2,3	-2,4	-2,4	-2,5	-2,5	-2,6	-2,7	-2,7	-2,8	-2,9
Alloués	M€	0,0	0,0	0,0	0,0	-1,2	-1,2	-1,3	-1,3	-1,3	-1,3	-1,4	-1,4	-1,5	-1,5	-1,5	-1,6	-1,6	-1,6	-1,7
EBITDA	M€	0,0	0,0	0,0	0,0	10,7	11,1	11,5	11,9	12,3	12,7	13,1	13,6	14,0	14,5	15,0	15,4	15,9	16,4	17,0
Taxes	M€	0,0	0,0	0,0	1,0	-1,7	-1,8	-2,1	-2,3	-2,7	-3,0	-3,2	-3,3	-3,5	-3,6	-3,8	-3,9	-4,1	-4,3	-5,4
Dépréciation	M€	0,0	0,0	0,0	-2,9	-3,6	-3,6	-3,6	-3,6	-3,6	-3,6	-3,6	-3,6	-3,6	-3,6	-3,6	-3,6	-3,6	-3,6	-0,7
Intérêts financiers	M€	0,0	0,0	0,0	0,0	-1,9	-2,2	-1,7	-1,2	-0,7	-0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Revenu imposable	M€	0,0	0,0	0,0	-2,9	5,2	5,3	6,2	7,0	8,0	8,9	9,5	10,0	10,4	10,9	11,4	11,8	12,3	12,8	16,2
Turnover main d'œuvre	M€	0,0	0,0	0,0	0,0	2,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Cash-Flows	M€	0,0	0,0	0,0	-42,2	-3,9	9,3	9,4	9,5	9,6	9,7	9,9	10,2	10,5	10,8	11,1	11,4	11,8	12,1	11,5

Pour cette technologie 1, la valeur actuelle nette est de 17.9 millions d'euros et le taux de rendement interne de 13.7%.

12.2. FLUX D'EXPLOITATION POUR LA TECHNOLOGIE 2

	Unités	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Capex	M€	0	0	0	-48	-12	0	0												
Capex %		0%	0%	0%	80%	20%	0%	0%												
Revenus	M€	0,0	0,0	0,0	0,0	26,0	26,6	27,2	27,8	28,5	29,1	29,7	30,4	31,1	31,8	32,5	33,2	34,0	34,7	35,5
Marge sur coût variable	M€	0,0	0,0	0,0	0,0	17,8	18,3	18,9	19,5	20,1	20,7	21,3	21,9	22,6	23,2	23,9	24,6	25,3	26,0	26,8
MP	M€	0,0	0,0	0,0	0,0	-11,2	-11,3	-11,4	-11,5	-11,6	-11,7	-11,8	-11,9	-12,0	-12,1	-12,3	-12,4	-12,5	-12,6	-12,7
MP (additifs)		0,0	0,0	0,0	0,0	4,3	4,4	4,5	4,6	4,7	4,8	5,0	5,1	5,2	5,3	5,4	5,5	5,7	5,8	5,9
Energie	M€	0,0	0,0	0,0	0,0	-1,4	-1,5	-1,5	-1,5	-1,6	-1,6	-1,6	-1,7	-1,7	-1,7	-1,8	-1,8	-1,9	-1,9	-1,9
Coûts fixes	M€	0,0	0,0	0,0	0,0	-3,4	-3,5	-3,6	-3,7	-3,8	-3,9	-4,0	-4,1	-4,2	-4,3	-4,4	-4,5	-4,6	-4,7	-4,9
Directs	M€	0,0	0,0	0,0	0,0	-2,1	-2,2	-2,2	-2,3	-2,3	-2,4	-2,5	-2,5	-2,6	-2,6	-2,7	-2,8	-2,9	-2,9	-3,0
Alloués	M€	0,0	0,0	0,0	0,0	-1,3	-1,4	-1,4	-1,4	-1,5	-1,5	-1,5	-1,6	-1,6	-1,7	-1,7	-1,7	-1,8	-1,8	-1,9
EBITDA	M€	0,0	0,0	0,0	0,0	14,3	14,8	15,3	15,8	16,3	16,8	17,3	17,8	18,4	18,9	19,5	20,1	20,7	21,3	21,9
Taxes	M€	0,0	0,0	0,0	1,1	-2,7	-2,8	-3,2	-3,6	-4,0	-4,3	-4,4	-4,6	-4,8	-5,0	-5,2	-5,4	-5,6	-5,8	-7,0
Dépréciation	M€	0,0	0,0	0,0	-3,2	-4,0	-4,0	-4,0	-4,0	-4,0	-4,0	-4,0	-4,0	-4,0	-4,0	-4,0	-4,0	-4,0	-4,0	-0,8
Intérêts financiers	M€	0,0	0,0	0,0	0,0	-2,1	-2,4	-1,7	-1,1	-0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Revenu imposable	M€	0,0	0,0	0,0	-3,2	8,2	8,5	9,5	10,7	11,9	12,8	13,3	13,8	14,4	14,9	15,5	16,1	16,7	17,3	21,1
Turnover main d'œuvre	M€	0,0	0,0	0,0	0,0	2,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Cash-Flows	M€	0,0	0,0	0,0	-46,9	-2,5	11,9	12,0	12,2	12,2	12,5	12,8	13,2	13,5	13,9	14,3	14,7	15,1	15,5	14,8

Pour cette technologie 2, la valeur actuelle nette est de 30.4 millions d'euros et le taux de rendement interne de 17%.

12.3. FLUX D'EXPLOITATION POUR LA TECHNOLOGIE 3

	Unités	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Capex		0	0	0	-49	-12	0	0												
Capex %		0%	0%	0%	80%	20%	0%	0%												
Revenus		0,0	0,0	0,0	0,0	26,0	26,6	27,2	27,8	28,5	29,1	29,7	30,4	31,1	31,8	32,5	33,2	34,0	34,7	35,5
Marge sur coût variable		0,0	0,0	0,0	0,0	15,0	15,5	16,0	16,5	17,0	17,6	18,1	18,7	19,2	19,8	20,4	21,0	21,7	22,3	23,0
MP		0,0	0,0	0,0	0,0	-10,9	-11,0	-11,1	-11,2	-11,3	-11,4	-11,5	-11,6	-11,7	-11,8	-11,9	-12,1	-12,2	-12,3	-12,4
MP (additifs)		0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8
Energie		0,0	0,0	0,0	0,0	-0,7	-0,7	-0,7	-0,7	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,9	-0,9	-0,9	-0,9	-0,9
Livraison / logistique		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Coûts fixes		0,0	0,0	0,0	0,0	-3,5	-3,6	-3,7	-3,8	-3,9	-4,0	-4,1	-4,2	-4,3	-4,4	-4,5	-4,6	-4,7	-4,8	-4,9
Directs		0,0	0,0	0,0	0,0	-2,1	-2,2	-2,2	-2,3	-2,4	-2,4	-2,5	-2,5	-2,6	-2,7	-2,7	-2,8	-2,9	-3,0	-3,0
Alloués		0,0	0,0	0,0	0,0	-1,4	-1,4	-1,4	-1,5	-1,5	-1,5	-1,6	-1,6	-1,7	-1,7	-1,7	-1,8	-1,8	-1,9	-1,9
EBITDA		0,0	0,0	0,0	0,0	11,5	11,9	12,3	12,7	13,2	13,6	14,0	14,5	15,0	15,4	15,9	16,4	17,0	17,5	18,0
Taxes		0,0	0,0	0,0	1,1	-1,8	-1,8	-2,1	-2,4	-2,7	-3,1	-3,3	-3,5	-3,6	-3,8	-4,0	-4,1	-4,3	-4,5	-5,7
Dépréciation		0,0	0,0	0,0	-3,3	-4,1	-4,1	-4,1	-4,1	-4,1	-4,1	-4,1	-4,1	-4,1	-4,1	-4,1	-4,1	-4,1	-4,1	-0,8
Intérêts financiers		0,0	0,0	0,0	0,0	-2,2	-2,5	-2,0	-1,4	-0,9	-0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Revenu imposable		0,0	0,0	0,0	-3,3	5,3	5,4	6,3	7,2	8,2	9,2	10,0	10,4	10,9	11,4	11,9	12,4	12,9	13,4	17,2
Turnover main d'œuvre		0,0	0,0	0,0	0,0	2,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Cash-Flows		0,0	0,0	0,0	-47,7	-4,5	10,1	10,2	10,3	10,4	10,5	10,7	11,0	11,3	11,6	11,9	12,3	12,6	13,0	12,2

Pour cette technologie 3, la valeur actuelle nette est de 17.5 millions d'euros et le taux de rendement interne de 12.9%.

