



MUTATIONS ÉCONOMIQUES DANS LE DOMAINE DE LA CHIMIE

FÉVRIER 2010

PIPAME

Pôle interministériel de prospective et d'anticipation
des mutations économiques



Liberté • Égalité • Fraternité

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

MINISTÈRE
DE L'ÉCONOMIE, DE L'INDUSTRIE
ET DE L'EMPLOI

MINISTÈRE
DE L'ÉCOLOGIE, DE L'ÉNERGIE
DU DÉVELOPPEMENT DURABLE
ET DE LA MER

MINISTÈRE
DE L'ALIMENTATION
DE L'AGRICULTURE
ET DE LA PÊCHE

PIPAME

Pôle interministériel de prospective et d'anticipation
des mutations économiques

Le pôle interministériel de prospective et d'anticipation des mutations économiques (PIPAME) a pour objectif de construire, en coordonnant l'action des départements ministériels, un éclairage de l'évolution des principaux acteurs et secteurs économiques en mutation, en s'attachant à faire ressortir les menaces et les opportunités pour les entreprises, l'emploi et les territoires.

Des changements majeurs, issus de la mondialisation de l'économie et des préoccupations montantes comme celles liées au développement durable, déterminent pour le long terme la compétitivité et l'emploi, et affectent en profondeur le comportement des entreprises. Face à ces changements, dont certains sont porteurs d'inflexions fortes ou de ruptures, il est nécessaire de renforcer les capacités de veille et d'anticipation des différents acteurs de ces changements : l'État, notamment au niveau interministériel, les acteurs socio-économiques et le tissu d'entreprises, notamment les PME.

Dans ce contexte, le PIPAME favorise les convergences entre les éléments microéconomiques et les modalités d'action de l'État. C'est exactement là que se situe en premier l'action du PIPAME : offrir des diagnostics, des outils d'animation et de création de valeur aux acteurs économiques, grandes entreprises et réseaux de PME / PMI, avec pour objectif principal le développement d'emplois à haute valeur ajoutée sur le territoire national.

Le secrétariat général du PIPAME est assuré par la sous-direction de la prospective, des études économiques et de l'évaluation (P3E) de la direction générale de la compétitivité, de l'industrie et des services (DGCIS).

Les départements ministériels participant au PIPAME sont :

- le Ministère de l'Économie, de l'Industrie et de l'Emploi / direction générale de la compétitivité, de l'industrie et des services et direction générale de l'emploi et de la formation professionnelle
- le Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer / direction générale des infrastructures, des transports et de la mer et direction générale de l'aviation civile
- Le Ministère de l'Espace rural et de l'Aménagement du territoire / délégation interministérielle à l'aménagement et à la compétitivité des territoires
- Le Ministère de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Pêche
- Le Ministère de la Défense / délégation générale pour l'armement
- Le Ministère de la Santé et des Sports
- Premier Ministre, Conseil d'analyse stratégique (CAS)

Mutations économiques dans le domaine de la chimie



Pôle interministériel de prospective et d'anticipation
des mutations économiques

Membres du comité de pilotage
Sous la présidence de François Loos, député, ancien ministre

Pierre Beaugrand	Directeur général d'Axyntis, vice-président de l'UIC Paca
Michel Chantrein	Chargé de mission à la DRIRE Lorraine
Marc Chollet	Directeur général adjoint de Rhodia
Sylvie Drugeon	Adjointe au chef de bureau au MEEDDAT/DGPR
Richard-Emmanuel Eastes	Directeur du groupe TRACES-DEC-ENS
Denis Ferrand	Directeur général de Coe-Rexecode
Marc Gillmann	MAAP/DGPAAT
Gilles Hériard Dubreuil	Directeur de Mutadis
Jean-Marc Le Lann	Directeur de l'INP Toulouse/ ENSIACET
Noël Le Scouarnec	Chef de bureau Prospective à la DGCIS
François Magnien	Secrétaire général du PIPAME
Daniel Marini	Directeur des affaires économiques et internationales de l'UIC
Michael Matlosz	Directeur de l'ENSIC-Nancy
Jean-Paul Péron	Chef de bureau de la Chimie à la DGCIS
Yves Robin	Chef de service de l'Industrie à la DGCIS
Michel Serpelloni	Directeur du programme plastique végétaux Gauiahub de Roquette
Éric Quenet	Directeur plan et stratégie Holding chimie de TOTAL

Le présent rapport résume les travaux d'un groupe interministériel piloté par le PIPAME et a été réalisé par :

A.T. Kearney
44 rue de Lisbonne
75008 Paris

L'équipe A.T.Kearney :

Louis Besland – Partner et Vice-président

David Weill - Partner et Vice-président

Julien Pellefigue – Manager

Louis Albert – Manager

Pascal Colombani – Senior Advisor

SOMMAIRE

SYNTHÈSE.....	9
1. "BASE STRATÉGIQUE INITIALE" DE LA CHIMIE DURABLE	23
1.1. Introduction	23
1.2. Les enjeux de la chimie durable	26
1.3. Chimie durable – Base stratégique	49
1.4. Les conditions d'une accélération vers la durabilité	63
2. PERSPECTIVES SUR LA CHIMIE DU VÉGÉTAL	69
2.1. Introduction	69
2.2. La chimie du végétal	70
2.3. La réalité industrielle actuelle	77
2.4. Perspectives d'évolutions économiques et technologiques	81
2.5. La problématique de la disponibilité des ressources	93
2.6. Le modèle économique	101
2.7. Conclusions et recommandations	104
3. LES PETITES ET MOYENNES ENTREPRISES DE LA CHIMIE	107
3.1. Introduction et objectif de ce document	107
3.2. Enjeux liés aux PME	107
3.3. Rappels sur l'Industrie chimique et les PME.....	108
3.4. Importance économique des PME.....	119
3.5. Conclusions sur les facteurs de croissance des PME et pistes de politiques publiques	131
TABLE DES MATIERES.....	134

SYNTHÈSE

Panorama et enjeux de l'industrie chimique en France

L'industrie chimique représente une contribution au PIB français d'environ 18 milliards d'euros et de 182 000 emplois directs. Il s'agit d'un secteur fortement intensif en capital mais dont les agents éprouvent des difficultés à accéder au financement bancaire compte tenu de son caractère parfois cyclique. Les chaînes de valeur chimiques sont très largement internationales, ce qui se traduit par des échanges internationaux très importants (en 2007, 44 milliards d'euros d'exportations soit 13% des exportations nationales, 38 milliards d'euros d'importations pour un CA total d'environ 87 milliards d'euros). Le secteur chimique est actif en Recherche et Développement puisque ses investissements représentent 1,3 milliard d'euros, soit 5,4% du montant total en R&D au niveau national.

L'industrie chimique est un secteur très hétérogène qui regroupe des activités, des savoir-faire et des marchés finaux très différents comme la pharmacie, l'automobile, l'agriculture, la construction ou l'agroalimentaire. La classification entre "chimie de base" et "chimie de spécialité" ne rend pas compte de cette complexité. L'industrie chimique a un caractère "pervasif", ses produits sont utilisés dans de très nombreuses industries. Elle est souvent décrite comme l'industrie des industries.

L'industrie chimique française fonctionne largement comme un système ouvert, fortement dépendant de ressources non renouvelables et bon marché, encore assez éloigné de la durabilité. Ainsi un euro de valeur ajoutée par l'industrie chimique génère 59 grammes de déchets industriels dangereux et 1,6 kilogramme de CO₂ avec bien entendu une grande disparité selon les segments chimiques concernés. Dans ce cadre, les engagements du Grenelle de l'environnement, tant du côté des pouvoirs publics que des engagements volontaires de l'industrie, sont une base qui appelle des prolongements.

La chimie en France est représentée par quelques grands champions mondiaux de souche française : Total, Rhodia, Arkema, Air Liquide, Roquette, ... et par de nombreuses PME/PMI concentrées sur des domaines de chimie de spécialité. Sont également largement présentes en France les filiales de groupes internationaux tels que Solvay, BASF, Basell, Exxon ou INEOS. Il existe de nombreux domaines chimiques dans lesquels la France peut être considérée comme leader européen ou mondial, que ce soit par les activités de ses grands groupes ou de ses PME : chimie du fluor, chimie du soufre, polyamides, chimie du traitement de l'eau, arômes et fragrances, chimie du traitement des métaux, chimie de l'amidon, ...

Cependant en France, et plus généralement sur le territoire européen, la chimie connaît une fragilité double, en amont et en aval de sa chaîne de valeur.

En amont, l'activité pétrochimique ou de première transformation est déclinante en Europe et les nouvelles capacités de transformation tendent à se positionner à court terme au Moyen-Orient afin d'accéder directement à l'éthane, matière première très compétitive ou en Asie pour une intégration plus directe avec les industries en aval utilisatrices.

En aval, le déclin des industries traditionnelles est associé à des délocalisations ainsi qu'à des mouvements de concentration qui pèsent sur le pouvoir de négociation des industries intermédiaires comme l'industrie chimique. La compétitivité-prix redevient alors un enjeu important et invite à suivre fournisseurs et clients.

Contexte de l'économie durable

Les enjeux du développement durable sont bien connus et désormais largement partagés par l'ensemble des acteurs des secteurs privés et publics. Ils recouvrent une dizaine de problématiques critiques et interconnectées telles que le changement climatique, la raréfaction des ressources fossiles et des ressources en eau, les enjeux du développement humain, l'érosion de la biodiversité ou la pollution, pour lesquelles des solutions cohérentes devront être trouvées dans le moyen / long terme.

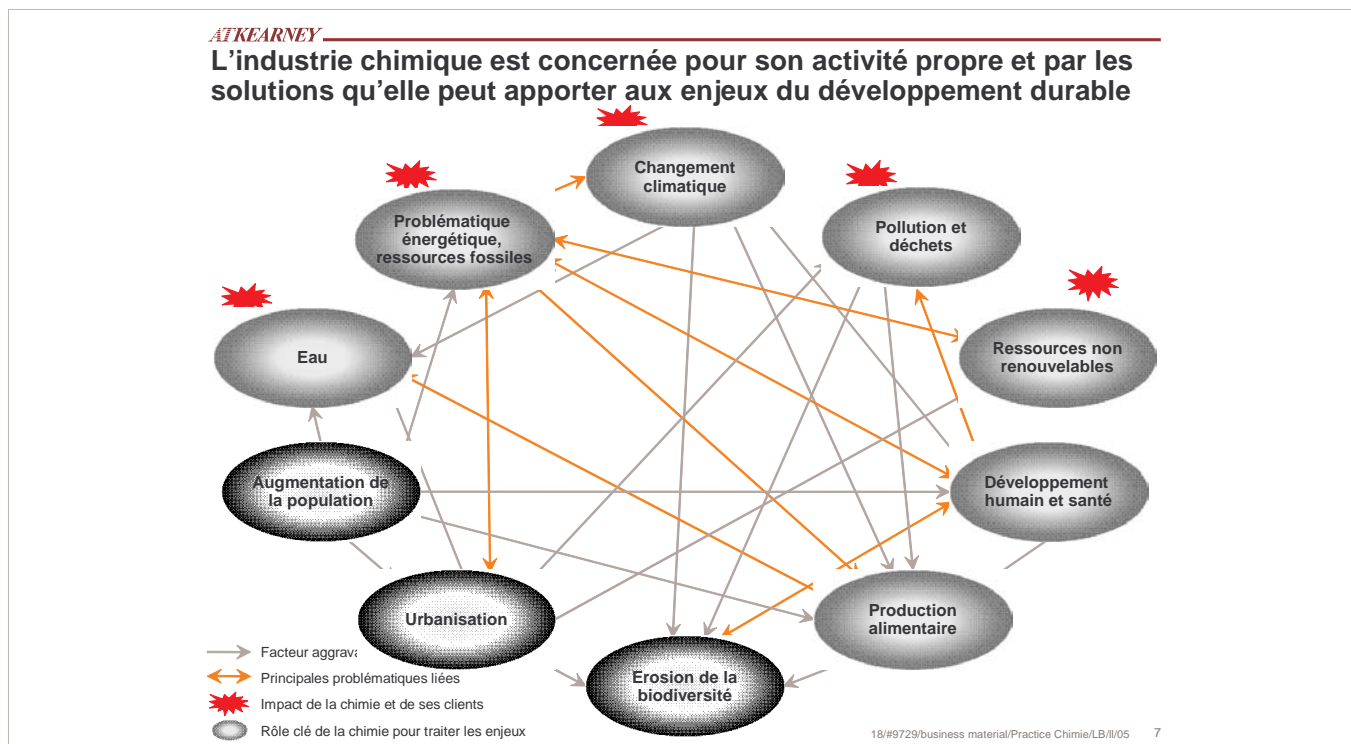
L'activité économique a un impact significatif sur ces problématiques. Afin de faire face aux enjeux sociétaux de la durabilité, il importe donc de réunir l'ensemble des agents économiques (entreprises, consommateurs, État) autour d'une politique industrielle qui puisse à la fois contribuer à résoudre les problématiques de durabilité – elles-mêmes parfois contradictoires - tout en ménageant trois impératifs additionnels :

- Impératif économique : la transformation de l'économie doit, dans le court terme, être compatible avec des objectifs de croissance du PIB et de l'emploi ;
- Impératif de compétitivité internationale : il importe que les mesures prises en France ne conduisent pas à obérer durablement la compétitivité de l'industrie française (par exemple en augmentant significativement ses coûts de production sans contrepartie) ;
- Impératif social : enfin, des considérations environnementales pourraient aboutir à la nécessité d'organiser la restructuration profonde voire la disparition de certaines filières industrielles – et/ou leur remplacement par d'autres, fondées sur des connaissances ou des expertises différentes. La question de la transition vers une nouvelle organisation de l'économie devra donc être traitée avec soin pour éviter les dommages sociaux.

L'économie durable, qui vérifie toutes les contraintes listées ci-dessus peut être définie comme une économie qui maîtrise ses flux de matière et d'énergie, basée sur la conception et la production de biens durables et recyclables, à l'impact le plus faible possible sur les écosystèmes et favorisant le progrès social.

Rôle de la chimie dans l'économie durable

L'industrie chimique, en tant que fournisseur de produits de base ou de spécialité pour l'agriculture, l'industrie ou les services, a une position singulière dans le dispositif de durabilité. La **chimie durable** peut ainsi être comprise comme l'industrie chimique qui maîtrise durablement sa propre empreinte environnementale et qui contribue à réduire celle des autres industries ou secteurs applicatifs, tout en respectant les impératifs de compétitivité économique et de progrès social.



Ainsi, la présente étude s'est attachée à déterminer :

- de quelle manière l'industrie chimique peut contribuer à favoriser la transition vers l'économie durable ;
- comment les pouvoirs publics peuvent agir pour faciliter, à leur tour, la transition de la chimie vers une chimie durable.

Les voies d'accès à une chimie durable

Leviers utilisables

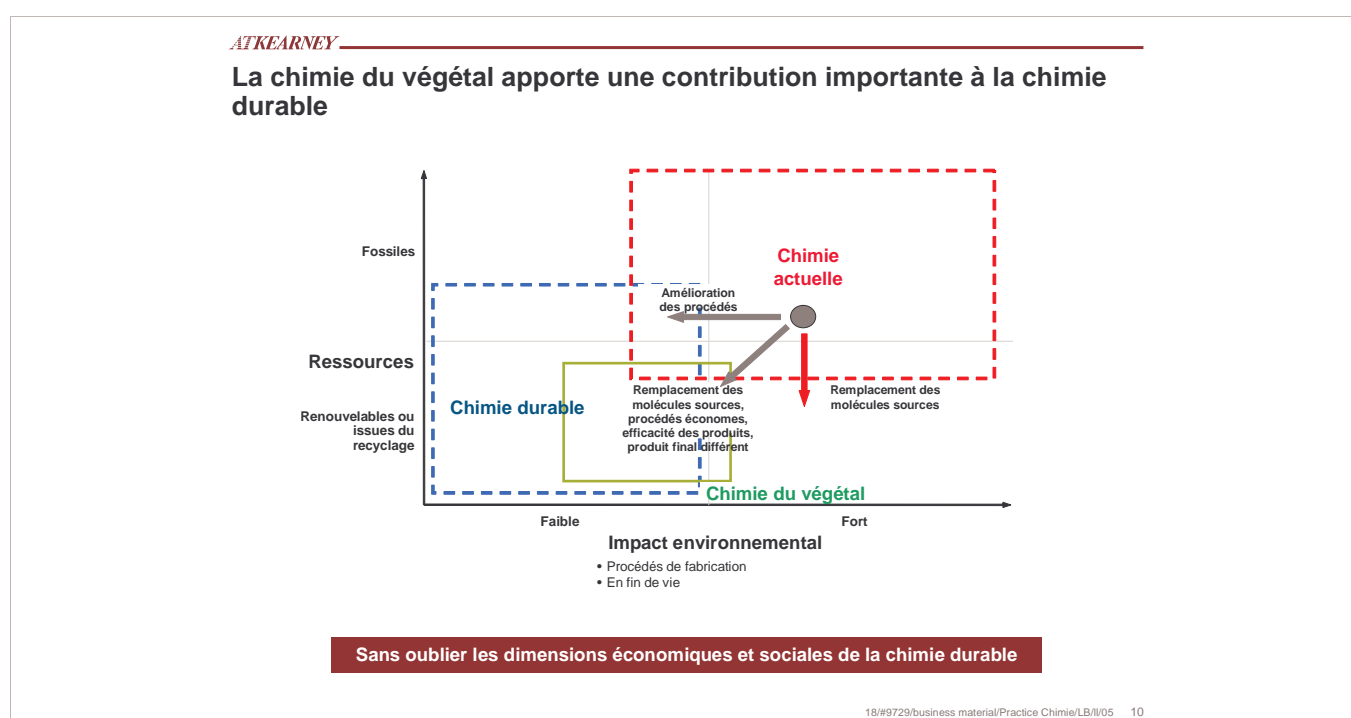
La chimie est la science de transformation de la matière et l'industrie chimique met en œuvre sur la base de ses connaissances scientifiques un bouquet de technologies pour produire économiquement l'ensemble des substances correspondant à la demande des marchés. A partir de ressources (gaz, liquides ou solides), un procédé permet d'obtenir une nouvelle matière, plus ou moins durable, qui est à son tour utilisée par des industries aval pour un usage plus ou moins durable.

Dans ce cadre, les leviers utilisables par l'industrie chimique pour tendre vers la durabilité sont de trois natures :

- **Procédés : améliorer la durabilité intrinsèque de l'industrie chimique** : de nombreuses pistes existent pour limiter l'empreinte environnementale de l'industrie chimique elle-même et notamment autour de la catalyse (classique ou enzymatique), des techniques de contrôle et de caractérisation de la matière à l'échelle atomique ou de la microfluidique permettant de repenser certains modes de production actuels.
- **Gérer les ressources, utiliser tous les leviers pour faire face à la rareté des ressources** : La matière ne peut plus être seulement considérée de manière indirecte, comme support de

fonctionnalités ou d'économies d'énergie, elle devra également à terme être appréhendée pour elle-même, dans le sens d'une responsabilisation de nos sociétés. Eau, ressources organiques, métaux ne pourront pas éternellement être exploités dans le cadre d'un circuit ouvert, reposant sur les capacités de l'environnement, en entrée et en sortie. La rareté des ressources impliquera le passage à une économie circulaire dans laquelle le raisonnement en termes de stock se substituera à la référence quasiexclusive aux flux. Recyclage et Chimie du végétal constituent les piliers essentiels d'une économie circulaire de la matière. La chimie doit constituer un moteur de ce défi qui lui offre un nouvel élan.

- **Nouveaux marchés, intégrer la chimie dans les filières d'avenir** : il s'agit pour la chimie de contribuer à la durabilité en mettant au point de nouveaux produits permettant d'améliorer la durabilité des industries aval (matériaux plus légers, isolants, recyclables, solutions de stockage de l'énergie, ...) voire de réparer des désordres au travers de technologies de chimie curative.



Procédés : améliorer la durabilité intrinsèque de l'industrie chimique

Outre l'action de la chimie sur la durabilité de l'ensemble de l'industrie, il est également nécessaire de continuer d'améliorer la durabilité intrinsèque de l'industrie chimique, via l'amélioration de ses procédés. Deux grandes technologies semblent à ce titre particulièrement pertinentes : la catalyse et l'intensification des procédés.

La catalyse recouvre de nombreux domaines, notamment :

- Les technologies non enzymatiques, reposant sur une technologie ancienne mais particulièrement transverse aux différentes applications de la chimie, la plupart des réactions chimiques faisant appel à des catalyseurs. Malgré sa maturité, des améliorations, voire des ruptures sont encore possibles tant en termes de création de valeur que d'amélioration de la durabilité notamment en matière de catalyse hétérogène.

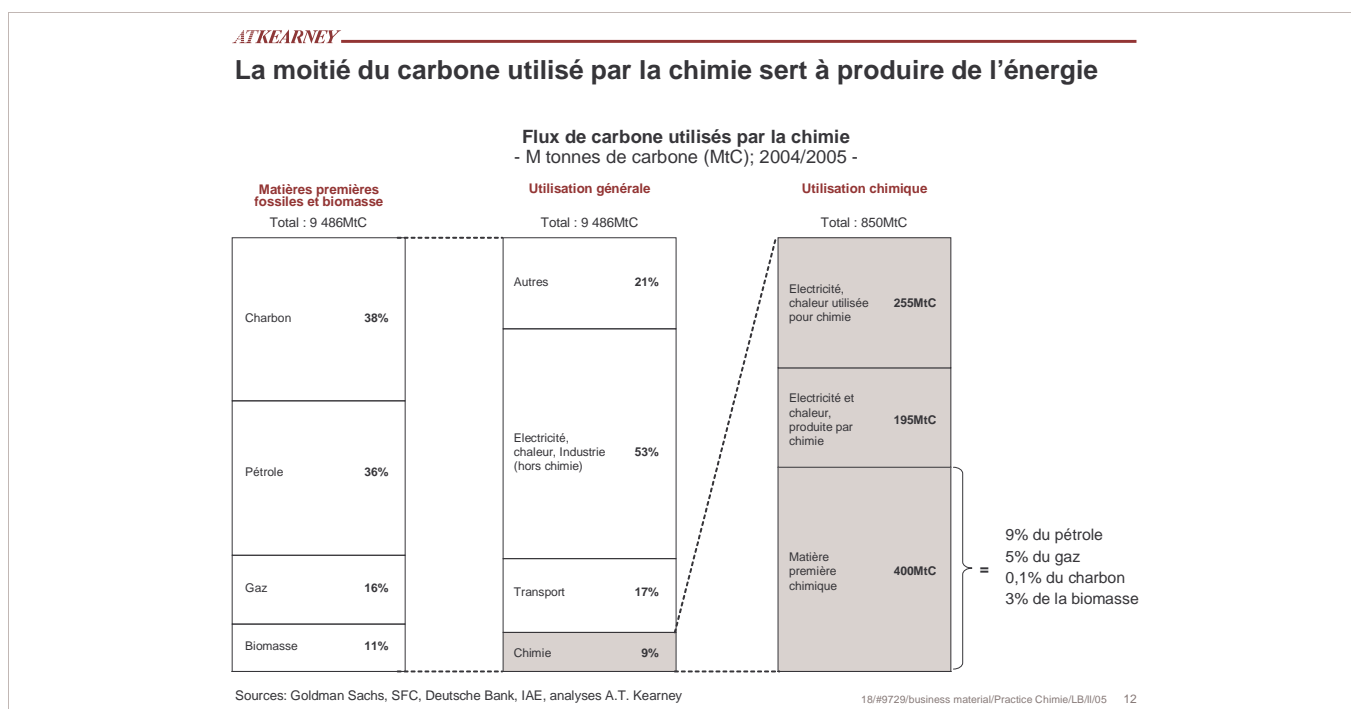
- Les biotechnologies blanches concernent l'utilisation de systèmes biologiques (bactéries) pour la fabrication, la transformation ou la dégradation de molécules grâce à des procédés enzymatiques ou de fermentation. Ces technologies représentent un potentiel d'amélioration très significatif des rendements des réactions. Elles pourraient permettre d'accomplir des économies d'énergie significatives (et éventuellement de carbone fossile utilisé en matière première) mais nécessitent une modification radicale des infrastructures industrielles et des savoir-faire.

L'intensification des procédés recouvre également différentes technologies :

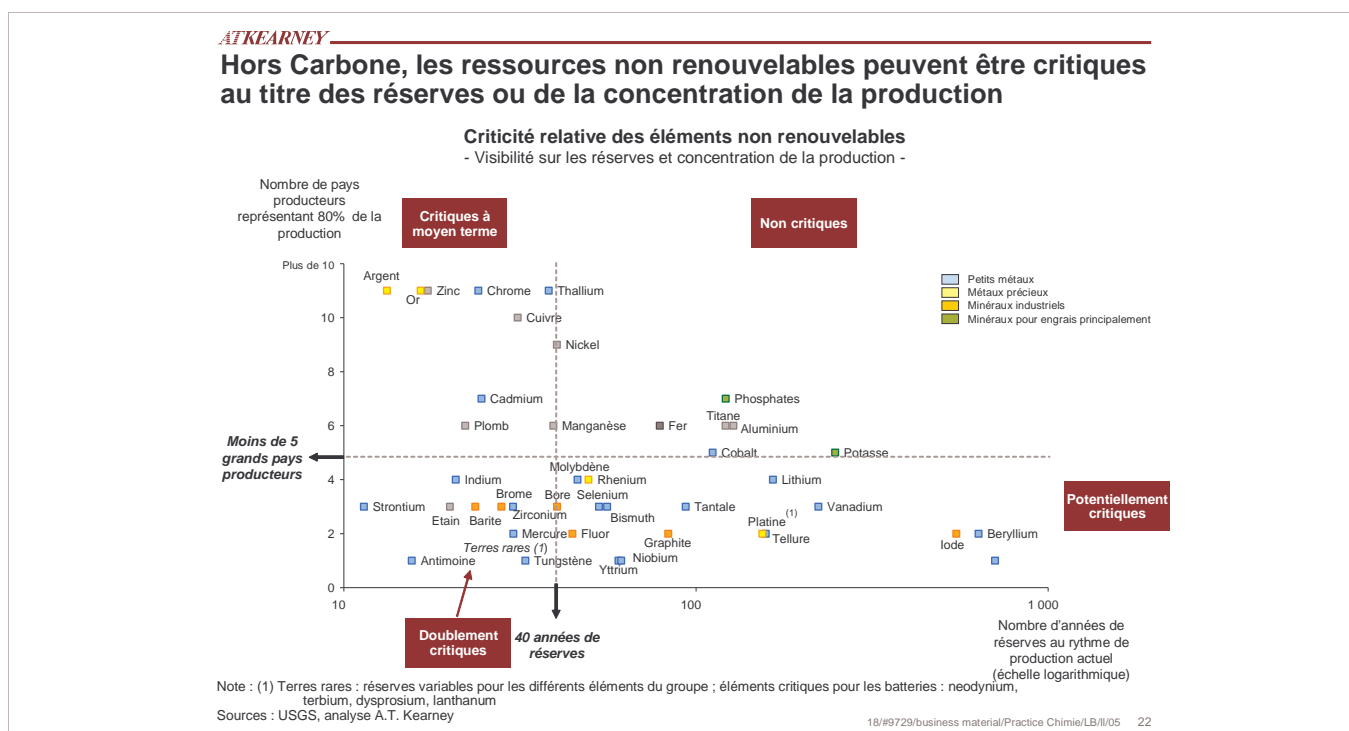
- La microfluidique regroupe un ensemble de techniques visant à permettre le remplacement d'infrastructures lourdes, coûteuses et fortement consommatrices d'énergie, par des équipements plus petits, plus efficaces, plus sûrs, plus automatisables (robotique) et diminuant l'impact environnemental. L'application de ces technologies permettrait notamment de faire évoluer les lignes de production et d'installer des réacteurs au plus près des sites des clients. Cette nouvelle organisation permettrait ainsi de réduire l'impact des risques environnementaux liés au transport de composés dangereux, et constituerait également une opportunité de services additionnels pour de nombreuses PME chimiques.
- D'autres recherches sont en cours, qui concernent la modification des réactions actuelles pour aboutir à une utilisation plus efficace des ressources et une économie d'atomes.

Ressources : utiliser tous les leviers pour faire face à la rareté des ressources

A moyen terme, l'augmentation de la croissance mondiale pose la question de la dépendance de l'économie aux ressources fossiles non renouvelables. À plus court terme, la tension sur les matières premières, notamment énergétiques, pose la question de la pérennité économique de certaines filières voire du risque de dépendance géopolitique. La chimie utilise dans le monde l'équivalent de 850 millions de tonnes de carbone par an.



Au-delà de la ressource carbone que la chimie transforme et utilise comme source d'énergie, de nombreuses ressources minérales sont également transformées par l'industrie chimique. Parmi ces ressources minérales certaines présentent des profils de risque important quant à leur disponibilité à venir : il s'agit en particulier des terres rares (utilisées pour la catalyse, les batteries, ou les nouvelles ampoules, ...), du Lithium particulièrement en demande pour les nouvelles batteries, ou de certains métaux nobles.



Quatre grands leviers peuvent être utilisés pour réduire la dépendance de l'économie à ces ressources non renouvelables. Ces leviers sont complémentaires, dans le sens où ils s'appliquent à des situations différentes, ils doivent donc être tous utilisés de manière parallèle, sans privilégier l'un plutôt que l'autre.

• Substitution par les ressources renouvelables

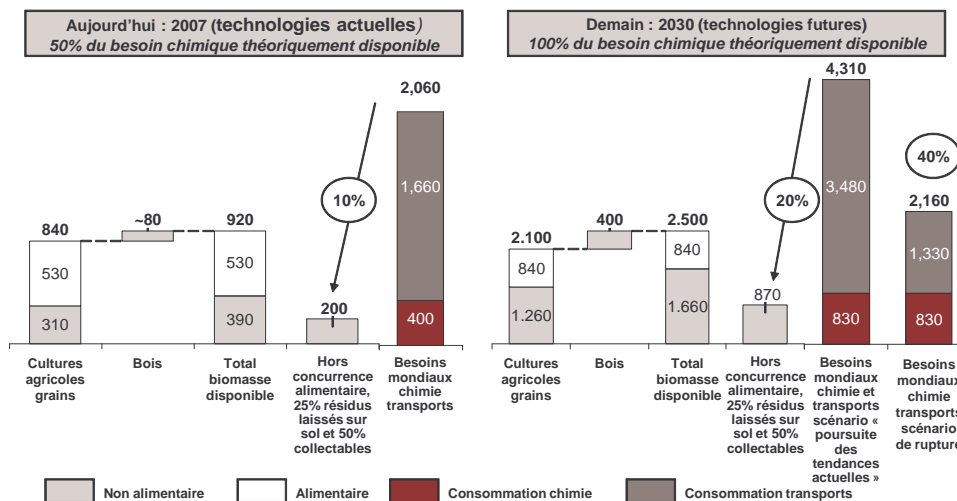
- Ce levier est particulièrement pertinent pour l'ensemble des produits à base fossile de nature "périssables", c'est-à-dire qui sont dispersés après usage (comme par exemple les shampoings). Ces produits ne pouvant en effet pas être recyclés doivent être produits à partir d'un substitut durable aux hydrocarbures. D'une manière générale les produits de spécialité apportant une performance technique, environnementale ou toxicologique (substitution de produits ne passant pas les tests REACH) sont des débouchés intéressants pour les ressources végétales ;
- Parmi tous les modèles de chimie du végétal, capables de transformer des agroressources, la chimie des sucres semble offrir le potentiel de développement le plus important. L'amélioration des rendements et des productivités actuelles nécessite un effort accru dans la recherche en biotechnologies, au travers de coopérations renforcées entre chimistes et

biologistes. Sans compétition avec les usages alimentaires et compte tenu du développement probable des biocarburants, environ 10-20% des besoins carbone de l'industrie chimique mondiale pourraient être satisfaits par la chimie du végétal à l'horizon 2020 ;

- La biomasse ne peut substituer que partiellement le carbone fossile utilisé dans les secteurs du transport (entre 20% et 40% à l'horizon 2030 selon le scénario choisi : 20% dans le cas d'un scénario de croissance identique à ce que nous avons connu ces dernières années, 40% dans le cas d'une réduction très volontariste des émissions dans les transports au niveau mondial) et de la chimie. La question de l'arbitrage entre les valorisations du carbone renouvelable est donc posée. Dans la mesure où le carbone renouvelable est la seule alternative connue au carbone fossile dans le secteur de la chimie, les politiques de valorisation de la biomasse pourraient être réajustées en faveur de l'utilisation du carbone renouvelable en chimie. Ceci passera par le développement de la technologie. D'un côté, il faut développer en priorité des produits chimiques biosourcés pour lesquels le recyclage n'est pas possible ou qui présentent des caractéristiques techniques (e.g. : compatibilité Reach, biodégradabilité, ...) qui ne peuvent être remplies par des produits chimiques à base de carbones fossiles. D'un autre côté, le développement de nouvelles technologies non carbonées dans le secteur du transport contribuera à offrir progressivement des alternatives à l'utilisation du carbone fossile dans les transports (véhicules électriques, source d'énergie nucléaire ou photovoltaïque,...).

A long terme, 20-40% des besoins de la chimie et des transports pourraient être comblés par les ressources renouvelables

Comparaison entre le carbone utilisable à partir de la biomasse (hors algues) et la consommation de l'industrie chimique et des transports dans le monde
- Monde ; Millions de tonnes de carbone ; 2007 - 2030 -



• Développement du recyclage

- Ce levier est quant à lui particulièrement adapté aux produits "non périssables", dont les composantes sont susceptibles d'être récupérées en fin de vie pour être réutilisées ;
- La revue de l'existant en matière de recyclage montre que ce sujet est très faiblement promu en France. La recherche dans ce domaine (mise au point de procédés innovants, réutilisation des matériaux sans dégradation des usages) est très peu développée alors qu'il s'agit d'une

technologie à fort potentiel, à la fois d'un point de vue économique et d'un point de vue de durabilité. Par ailleurs, les investissements industriels privés dans ce domaine sont encore faibles puisque le prix actuel des matières premières rend non économique le processus de recyclage ;

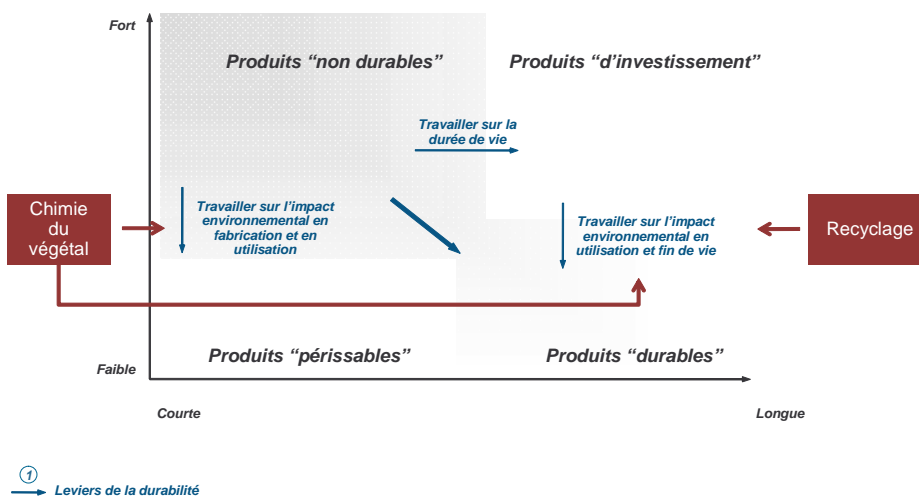
- Ce levier pourrait cependant être actionné dès maintenant via l'action publique. L'exemple de la chaîne de valeur des plastiques automobiles a montré que le développement du recyclage était susceptible de générer en France une valeur ajoutée de l'ordre de 0,5 à 1 milliard d'euros et d'avoir un impact environnemental très positif (réduction des déchets plastiques de fin de vie). Ce développement devra se faire en tenant compte des impacts environnementaux liés à l'efficacité énergétique et à la logistique.

- **Amélioration de la durabilité des produits via la promotion de l'économie de la fonctionnalité**

- Au-delà des deux leviers exposés précédemment, il est également possible de contribuer à la durabilité de l'économie en travaillant sur la durée de vie des produits finaux. Ainsi, en sortant de la logique de l'obsolescence programmée, et en rendant le réutilisable, le durable et le réparable socialement et économiquement valables, il est possible de réduire l'impact environnemental de l'outil de production industriel de manière significative ;
- Sans changement majeur de paradigme, il est également possible d'évoluer vers une durabilité accrue des biens de consommation en favorisant l'établissement de nouveaux modèles économiques de type "économie de la fonctionnalité". Dans ce genre de modèle, les entreprises industrielles deviennent prestataires de services plutôt que producteurs de biens, le service fourni étant alors la fonctionnalité offerte par le produit plutôt que le produit lui-même. L'entreprise fonctionnant suivant cette logique doit alors axer son développement sur la préservation de son actif, afin d'en maximiser la rentabilité, s'inscrivant ainsi dans une perspective à long terme et dans une vision durable de ses produits et de son activité. L'évolution vers ce type d'économie suppose, pour les entreprises notamment du secteur chimique, des transformations importantes en matière de compétences et de modèles d'affaires ;
- Notons en outre que l'évolution vers des modèles de cette nature représente une opportunité significative pour de nombreuses PME de l'industrie chimique. En effet, celles-ci sont parfois positionnées sur des technologies matures, sans réelles capacités de différenciation, et sont donc mises en danger par l'érosion des prix imposée par les grands clients. Dans ce cadre de concurrence de prix, la diversification vers les services représente une opportunité de différenciation très pertinente de nature à favoriser la croissance des PME chimiques dont l'impact sur l'emploi dans ce secteur est très positif.

ATKEARNEY

Le recyclage semble adapté aux produits d'investissements alors que la chimie du végétal est la seule à pouvoir améliorer la durabilité des produits à courte durée de vie



• Politique d'approvisionnement d'État à État

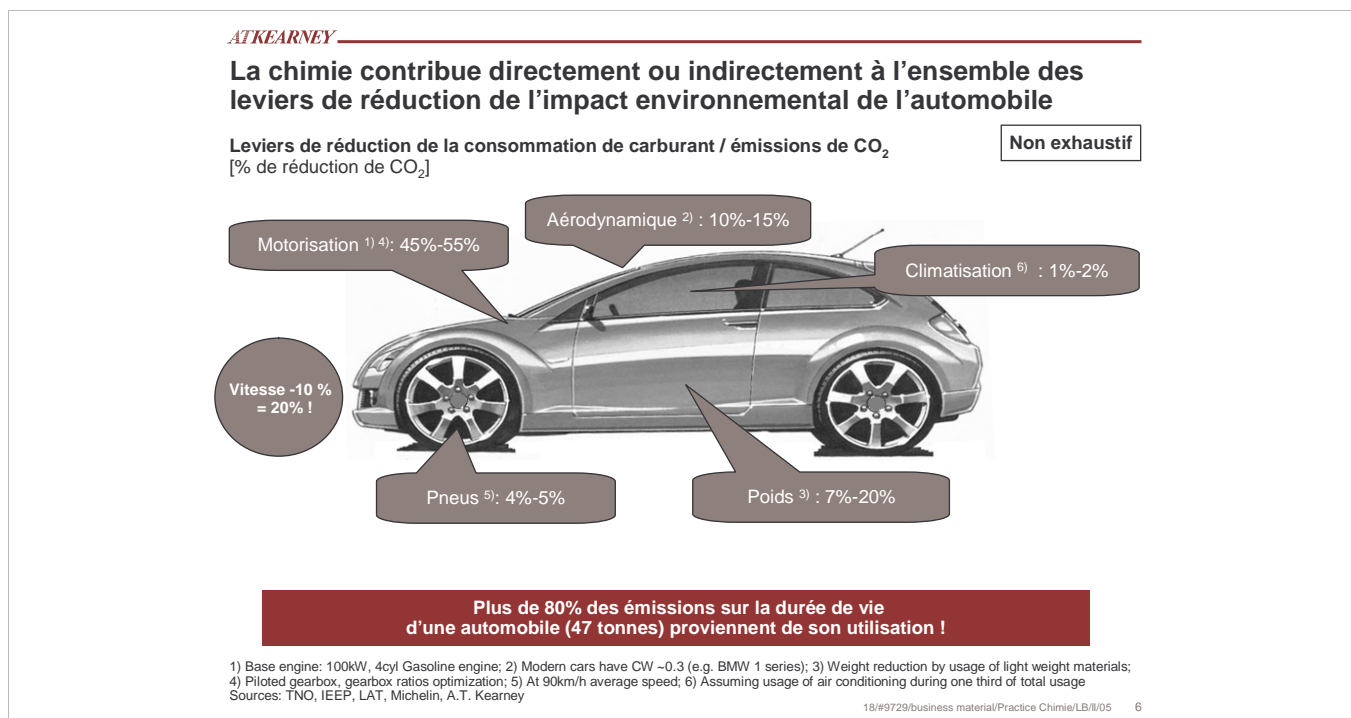
Pour certaines matières premières qui vont devenir très demandées par les nouvelles technologies, notamment pour produire de l'énergie décarbonée ou pour stocker l'énergie, le développement pérenne de filières industrielles en France nécessitera de diversifier les sources d'approvisionnement et dans certains cas de mener des négociations d'État à État pour sécuriser ces ressources.

Nouveaux marchés : intégrer la chimie dans les filières d'avenir

La contribution de l'industrie chimique à l'économie durable ne doit pas être mesurée aux bornes de l'activité chimique proprement dite, mais doit au contraire englober l'ensemble de la chaîne de valeur dans laquelle la chimie s'intègre. L'industrie chimique est en effet susceptible d'avoir un impact déterminant sur la durabilité globale de la chaîne, en agissant sur la durabilité des produits finaux. Deux exemples illustrent ce principe :

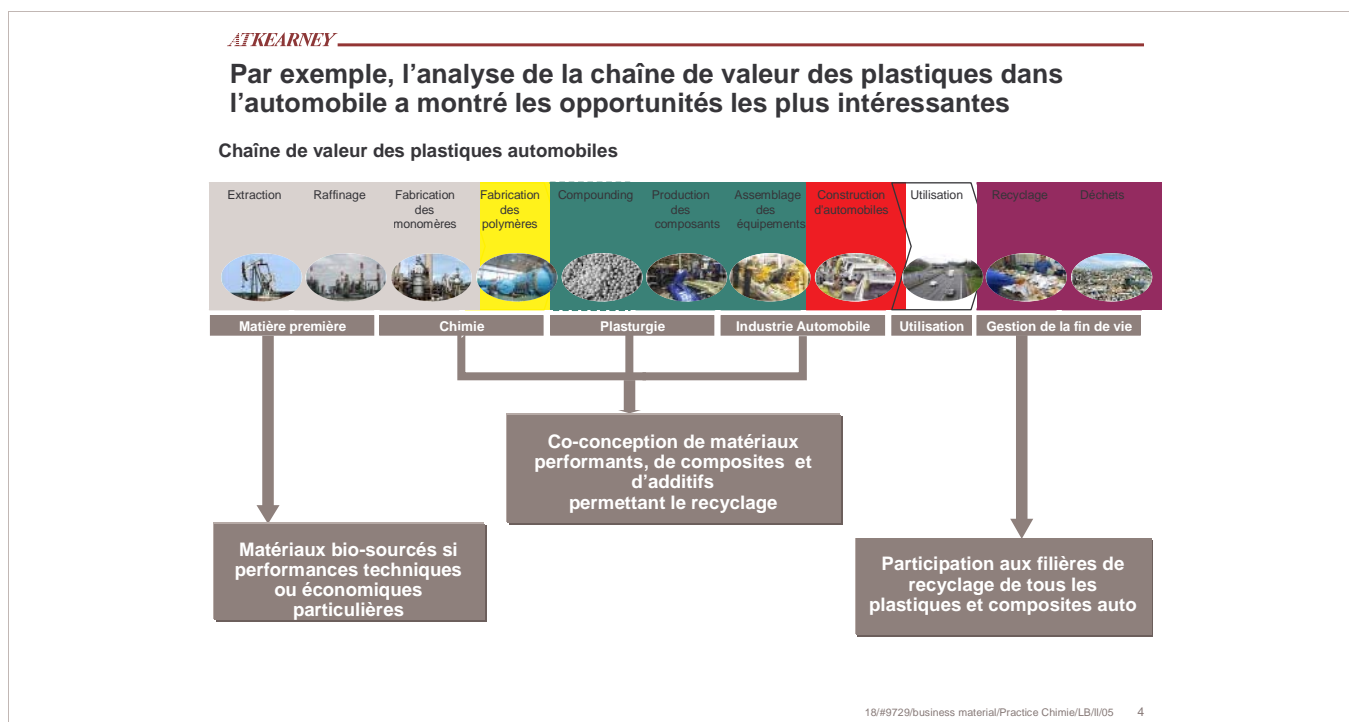
- La mise au point de plastiques de performance (qui peuvent être parfois biosourcés), susceptibles de se substituer au métal dans la conception des véhicules, même si elle augmente les émissions polluantes aux bornes de l'industrie chimique, permettrait de réduire le poids moyen des véhicules et ainsi de réduire les émissions globales de 20% (pour une réduction de poids de 20%) sur l'ensemble de la chaîne de valeur automobile.
- Ce principe selon lequel les émissions des industriels de la chimie peuvent être largement compensées par les bénéfices liés à l'usage de leurs produits a été confirmé par de nombreuses analyses de cycle de vie réalisées par des grands chimistes ou par des associations ; les économies d'émissions de CO₂ liées à l'usage de nouveaux produits sont en moyenne deux à trois fois plus importantes que les émissions de CO₂ nécessaires à la production de ces nouveaux produits. L'analyse sur le cycle de vie d'une automobile en est un bon exemple : sur 47 tonnes de CO₂ émises au cours de l'ensemble de son cycle, des matières premières à la fin de vie, 80% le sont lors de son

utilisation. La chimie peut très fortement contribuer à réduire ces 80%, par exemple en apportant des solutions de réduction du poids du véhicule (matériaux plus légers).



- Les bénéfices liés à l'intégration de la chimie dans des filières dépassent en outre largement le cadre environnemental. Ainsi, le GFI (groupe des fédérations industrielles) pose comme objectif pour l'industrie française à 2020 la prise de positions de leader sur certains marchés d'avenir, liés à l'évolution de la démographie, au développement durable, à la mobilité et aux technologies de rupture (concernant notamment les nouveaux matériaux ou l'énergie). Or, la capacité à développer des produits innovants dans ces secteurs repose en partie sur une innovation chimique en amont, comme cela est développé dans les deux exemples ci-dessous. Dans une perspective d'allocation de ressources publiques limitées sur certains secteurs industriels, il nous semble donc pertinent, non pas de considérer comme un secteur industriel la chimie de base, la chimie de spécialité ou l'un de leurs sous-segments, mais plutôt de considérer un marché final et de soutenir l'ensemble des industries (notamment chimiques) qui concourent à servir ce marché :
 - La croissance de l'industrie automobile repose sur le succès industriel et commercial de véhicules utilisant de nouveaux systèmes de propulsion. Or, ceux ci sont très fortement liés au développement de nouveaux modèles de batteries plus performantes, capables d'assurer aux véhicules une autonomie supérieure à 80 km (technologie actuelle). La chaîne de valeur des batteries est complexe, mais elle inclut une étape chimique en amont, dont l'importance est critique dans la mesure où une amélioration sensible de la performance ne pourra être obtenue que par une innovation chimique ;
 - Un autre marché porteur est celui du photovoltaïque, estimé à 10 Md\$ mondialement et qui devrait poursuivre sa forte croissance dans le futur, tiré par les besoins de gestion plus rationnelle de l'énergie dans de nombreux secteurs (bâtiment, industrie,...). L'innovation dans ce domaine pourrait là encore provenir de la chimie, liée au développement des polymères

conducteurs, qui permettrait de développer des enduits photovoltaïques ne nécessitant pas de silicium, beaucoup moins coûteux et beaucoup plus simples à utiliser.



Comment enclencher la dynamique ?

L'évolution vers l'économie durable décrite ci-dessus engage l'ensemble des acteurs de la société et ne saurait être imposée unilatéralement par l'État. Pour autant, les impératifs économiques de court terme rendent peu probable une évolution importante purement inspirée par le secteur privé. Il importe donc de déterminer de quelle manière les pouvoirs publics peuvent enclencher une dynamique vertueuse et l'accompagner dans la durée. Les outils utilisables dans ce cadre, à utiliser de manière cohérente et équilibrée, sont les suivants :

- L'investissement direct public (dans la R&D et la création de pilotes industriels)
- La réglementation
- Le maintien de la cohérence des différentes initiatives vers la durabilité et l'animation des filières

Investir dans des projets à fort impact

Le premier rôle des pouvoirs publics est d'identifier les technologies les plus critiques (suivant des critères économiques, environnementaux et sociaux), via l'établissement d'une cellule de veille centrale. A titre d'exemple, une analyse préliminaire a ainsi identifié six technologies prioritaires : la catalyse non enzymatique, les biotechnologies blanches (micro-organismes, fermentation et enzymes, la microfluidique, le stockage d'électricité, le photovoltaïque organique, les technologies du recyclage et les technologies de la dépollution).

Une fois les technologies clairement identifiées, l'État peut intervenir directement et par une action s'inscrivant dans la continuité :

- en finançant des projets de recherches académiques ou industriels portant sur ces domaines. Les modes de financement sont variés et engagent plus ou moins la décision de l'État dans le choix précis du sujet de recherche. Il est ainsi possible de financer directement des laboratoires de recherche ou des pôles de compétitivité, ou de mener une activité de financement de start-ups innovantes comme cela est réalisé par le DOE (*Department of Energy*) américain qui investit dans des start-ups engagées dans l'énergie photovoltaïque ;
- en finançant la mise au point de démonstrateurs industriels pour des technologies existantes. Ainsi, le développement à grande échelle de techniques de recyclage de plastiques repose aujourd'hui sur une validation industrielle de ces techniques, qui pourrait être accélérée en finançant un démonstrateur. Des pays comme l'Allemagne ou les États-Unis ont créé des agences publiques spécialement dédiées au transfert de la recherche académique au milieu industriel. C'est le cas par exemple du NREL (*National Renewable Energy Laboratory*) américain ou du centre d'évaluation photovoltaïque de Freiburg en Allemagne ;
- en utilisant son pouvoir d'actionnaire de grands groupes pour veiller à créer les conditions d'investissement favorables à des projets innovants, à garantir des débouchés à de nouvelles technologies et ainsi limiter les risques d'investissement et par là même les difficultés de financement.

Utiliser toutes les ressources de la réglementation

La problématique de l'usage de la réglementation doit être analysée sous l'angle de la compétition internationale. Les mesures prises en France doivent être conçues de manière à inciter les entreprises à faire évoluer leur stratégie vers la durabilité, mais sans pour autant obérer durablement leur compétitivité (par exemple en leur imposant des surcoûts critiques).

L'action de l'État doit intégrer l'usage de l'ensemble des outils à sa disposition d'une manière cohérente. Ainsi, si l'on considère les meilleures pratiques en matière de politiques liées au développement durable (en se fondant sur des exemples tirés du développement du photovoltaïque et du recyclage), on constate que les États ont à la fois :

- Utilisé toutes les ressources de la réglementation
 - Tarifs : fixation de tarifs préférentiels d'achat de l'électricité photovoltaïque en Allemagne et dégressivité du taux d'indemnisation pour assurer la baisse des coûts via le développement de nouvelles technologies moins coûteuses (plastique photovoltaïque)
 - Fiscalité :
 - crédits d'impôt, ex: ITC (Investment Tax Credit) aux États-Unis pour l'installation de systèmes photovoltaïques
 - Nouvelles taxes, ex: taxe sur les bouteilles en PET en Suisse, taxe de recyclage au Japon
 - Labels: création du Duals Systems Deutschland qui a créé un label de recyclage des emballages qui peut être affiché par les entreprises qui vérifient certaines contraintes
 - Utilisation de la commande publique pour imposer des objectifs aux fournisseurs (ex : recyclabilité des matériaux utilisés)
 - Normes : rôle actif joué dans l'élaboration et l'imposition de normes et standards internationaux.

- Inscrit les nouvelles mesures au sein d'une politique cohérente plus large
 - L'ensemble disparate des mesures concernant le recyclage (stockage de déchets, conception des produits, valorisation énergétique, production de mobiliers urbains en plastique, etc.) ont été revues par le gouvernement japonais pour éviter les comportements opportunistes des acteurs et assurer l'efficacité globale.
- Organisé la filière, en s'assurant des responsabilités de chacun pour profiter des effets de la croissance verte
 - Le Japon a créé une agence dédiée à la gestion de la filière du recyclage des emballages (la JCPRA), qui assure la bonne collaboration de l'ensemble des parties prenantes (industriels, collectivités locales, recycleurs) en plus de fonctions réglementaires (ex: enregistrement des recycleurs et vérification de leurs bilans).
- Assuré le financement des mesures
 - Les mesures les plus efficaces ont été financées par l'établissement de quotas monnayables, d'une taxe spécifique ou d'une prise en compte du recyclage dans la taxe carbone.

Assurer la cohérence de la vision et animer les filières au niveau local

De très nombreux projets sont actuellement menés parallèlement que ce soit en France ou en Europe, qui concernent le développement durable, la chimie durable, l'identification des technologies et des marchés du futur, etc. Tous ces sujets étant très fortement reliés, il importe d'assurer la cohérence de la vision en matière d'économie durable et de limiter les initiatives visant à mobiliser des ressources pour mener des projets collectifs. Ainsi, en matière de chimie durable, l'ensemble des travaux pourrait être orienté par le COSIC et piloté opérationnellement par Suschem France.

En plus du rôle direct d'investisseur décrit plus haut, l'État, et notamment les collectivités locales et territoriales, peuvent avoir un rôle d'animation de filières afin de rapprocher différents acteurs autour de projets fédérateurs. L'exemple de la Lorraine peut notamment être cité à ce titre. La société Ineos qui est installée dans cette région disposait d'actifs industriels lourds, destinés à polymériser le propylène mais inutilisés. A la recherche d'un moyen d'utiliser ces actifs, Ineos a accueilli très favorablement l'idée proposée par la DRIRE Lorraine de réaliser, avec une société locale opérant dans le recyclage des déchets automobiles, un projet commun de mise au point d'un système de recyclage des plastiques. Le développement de technoparc chimiques, permettant la mutualisation d'infrastructures coûteuses et la mise en place de centres techniques locaux, est également un axe concret pour favoriser ces échanges et assurer l'efficacité de la mise en œuvre de la vision au niveau local.

1. "BASE STRATÉGIQUE INITIALE" DE LA CHIMIE DURABLE

1.1. Introduction

1.1.1. Objectif

L'objectif de cette note est de proposer une "base stratégique initiale de la chimie durable".

1.1.2. Constat de départ

La "chimie durable" est un concept largement accepté par les parties prenantes (industriels, recherche publique, société civile) mais dont le périmètre n'est pas clairement défini.

De nombreuses actions sont en cours tant chez les industriels que dans les différents organismes de recherche, aux niveaux régional, national et international. Il est cependant particulièrement difficile, devant le foisonnement des objectifs, des programmes, des appels à projet, des annonces et des publications, de faire émerger une vision cohérente ou une "doctrine" de la chimie durable, et ce notamment pour les raisons suivantes :

- À la complexité pluridisciplinaire des enjeux du développement durable s'ajoute la complexité d'un secteur multiforme (chimie de base, intermédiaire, de spécialité) dont les enjeux, le niveau d'exposition aux ruptures attendues, la capacité à évoluer (types d'investissement, nature de la R&D et de l'innovation, effet parc) sont extrêmement variables.
- En tant qu'activité produisant des biens intermédiaires destinés à être intégrés, associés, complétés en aval dans des produits finaux, l'industrie chimique possède un fort effet de levier sur les performances environnementales des secteurs aval. Ainsi :
 - les exigences de durabilité et les initiatives peuvent concerner la chimie elle-même (amélioration de certains procédés par exemple) et la contribution aux marchés utilisateurs (à travers de nouveaux matériaux et de nouvelles fonctionnalités notamment) ;
 - l'angle d'approche pour aborder le périmètre de la chimie durable varie selon les parties prenantes : approche marchés / produits, procédés, ou ressources par exemple.
- Il y a souvent insuffisance dans la manière d'articuler ce qui pourrait ou devrait relever du champ propre de l'entreprise (bonnes pratiques environnementales, stratégie développement durable, futurs marchés porteurs...), de l'industrie dans sa composante collective (réflexion de filière, approche normative, "soft law") ou du législateur (réglementation et politique incitative, "hard law").
- Comme pour toute problématique de développement durable, il existe un décalage entre la vision (avec un certain consensus) de ce qu'il conviendrait de faire (une cible esquissée par une vision environnementale forte et les enjeux de la recherche fondamentale à long terme par exemple) et ce qu'il paraît possible compte tenu des contraintes économiques (compétition internationale, contraintes de concurrence, conjoncture économique, attentes limitées du marché) ou sociales (problématiques de transition). Autrement dit la dialectique entre une cible utopiste et une évolution incrémentale est particulièrement criante dans une industrie aux besoins forts en investissements et aux cycles de mise sur le marché longs.

Les entretiens menés auprès d'acteurs de la chimie (monde de la recherche, industrie, secteurs utilisateurs, sociologues...) permettent de mettre en évidence les différentes perceptions de ces acteurs dans la définition et le périmètre de la chimie durable.

On trouve ainsi :

- **Une approche "marketing" pour améliorer l'image de la chimie**

"La chimie durable, c'est un slogan pour revaloriser la chimie, car la chimie Est durable dans le sens que c'est une science / industrie qui évolue depuis toujours vers plus d'efficacité et vers une utilisation plus rationnelle des ressources"

"La vraie durabilité serait de réconcilier les choix scientifiques avec l'opinion (qui manque de connaissance et de confiance dans la science)"

- **Une approche technique de la chimie**

"La chimie durable inclut la production de synthons d'origine renouvelable pour des procédés classiques et l'évolution des procédés eux-mêmes pour répondre à des critères de durabilité"

"La chimie écologique intègre non seulement un aspect préventif mais aussi un aspect curatif : dépollution de l'environnement, séquestration du CO₂"

"La chimie durable inclut le recours aux matières renouvelables, le recyclage, la gestion de la fin de vie des produits, le respect de l'eau..."

- **Une approche économique de la chimie**

"La chimie durable est une chimie construite sur des ressources pérennes pour lesquelles la France dispose d'avantages pour construire une industrie compétitive et créatrice d'emplois : terres agricoles, surfaces maritime et côtière, surfaces boisées"

"La chimie durable est une science et ses applications industrielles qui prend ses décisions sur la base d'analyses objectives de sorte à maximiser au moins un des critères de durabilité tout en limitant les antagonismes ou à défaut en veillant à leur acceptation démocratique"

- **Une approche méthodique de la chimie**

"Bien au-delà des 12 principes de bon sens déjà respectés par tous, il s'agit de prendre en compte des critères mesurables de progrès avec des outils d'évaluation disponibles et partagés (bilan carbone, ACV, bilan énergétique...). La chimie durable, c'est une chimie qui avance avec des bonnes pratiques et accepte le challenge d'experts. Il s'agit d'abord d'éveiller les consciences"

"Le principal sujet est de faire évoluer les mentalités pour promouvoir l'écoconception dans l'ensemble des équipes de recherche"

"La démarche d'écoconception est une pierre angulaire de la chimie durable"

"Seul un bilan global de type ACV permet de déterminer si un produit / un procédé est durable ou pas. On ne peut pas le savoir a priori de façon générique : cela dépend de chaque produit / procédé / site..."

"La chimie durable, c'est une industrie capable de prendre des décisions sur des indicateurs objectifs avec un bilan sur l'ensemble de la filière, permettant d'anticiper les conséquences de ce qu'elle fait"

- **Une approche sociologique de la chimie**

"Du point de vue de la recherche, la chimie durable, c'est répondre à certain nombre de challenges pour ne pas détruire l'environnement tout en trouvant des modes d'action permettant de valoriser et renforcer le potentiel de l'humanité"

"La chimie durable doit s'inscrire dans une société durable. La crise actuelle est propice au distinguo entre 'vivre mieux' et 'la surabondance'. Il faut mobiliser des sociologues pour apprendre à économiser de la matière et de l'énergie"

"Il y a un problème majeur, c'est celui de la responsabilité. Il est essentiel d'instaurer un mécanisme de responsabilité sur tout usage de nouvelle matière en impliquant le chimiste sur l'utilisation en aval (ou par ceux qui achètent sa licence) de sa molécule"

"La chimie durable s'inscrit dans un nouveau modèle de société qui évite la fuite en avant : les ressources renouvelables sont intéressantes, mais la vraie question c'est de limiter le besoin en matière et en énergie"

1.1.3. Précaution sémantique

L'expression "chimie durable" est équivoque à deux points de vue :

- Sous le vocable "chimie", se réfère-t-on à la chimie en tant que science, à la chimie industrielle (en tant que bouquet de techniques et procédés), ou aux industries chimiques ?
- Sous la connotation durable subsiste l'ambiguïté de la notion de développement durable, et notamment la question de la posture ou du résultat. En d'autres termes, une chimie durable est-elle une chimie qui progresse vers une certaine durabilité (et à quel rythme) ou une chimie dont l'activité est déjà durable en tant que telle ?

Plusieurs formulations plus précises ont été proposées, comme au CNRS, à l'ANR ou à la Fédération Française pour les sciences de la Chimie avec des programmes "chimie pour un développement durable" ou "chimie pour le développement durable", l'équivoque étant dans ce cas maintenue sur le terme de chimie.

Si l'on se place dans la perspective d'une économie durable et des réalités industrielles et économiques de l'industrie chimique, il conviendrait d'adopter une expression plus précise du type "l'industrie chimique pour le développement durable" ou "l'industrie chimique dans une économie durable".

Cette précaution étant posée, nous userons néanmoins dans la suite de ce document de l'expression "chimie durable", dont l'usage est déjà largement adopté, sans parler de la "chimie verte", dont l'ambiguïté est encore plus grande puisqu'elle est souvent confondue par les non-experts avec la chimie du végétal.

1.1.4. Intention

Face à ces difficultés initiales, notre objectif est donc de donner, dans le cadre de cette note, quelques pistes de réflexion autour du concept de chimie durable qui permettront de "donner à voir" (point de départ et perception initiale) et de "catalyser" (base de réflexion et orientation vers l'action pour les différentes parties prenantes).

Pour ce faire, nous balaierons dans un premier temps les enjeux de la durabilité pour la chimie (chapitre 1.2), puis nous nous attacherons à explorer les voies de la durabilité pour la chimie à tirer quelques conclusions du panorama actuel (chapitre 1.3) et à examiner les pistes pour accélérer les mutations vers la durabilité (chapitre 1.4).

1.2. Les enjeux de la chimie durable

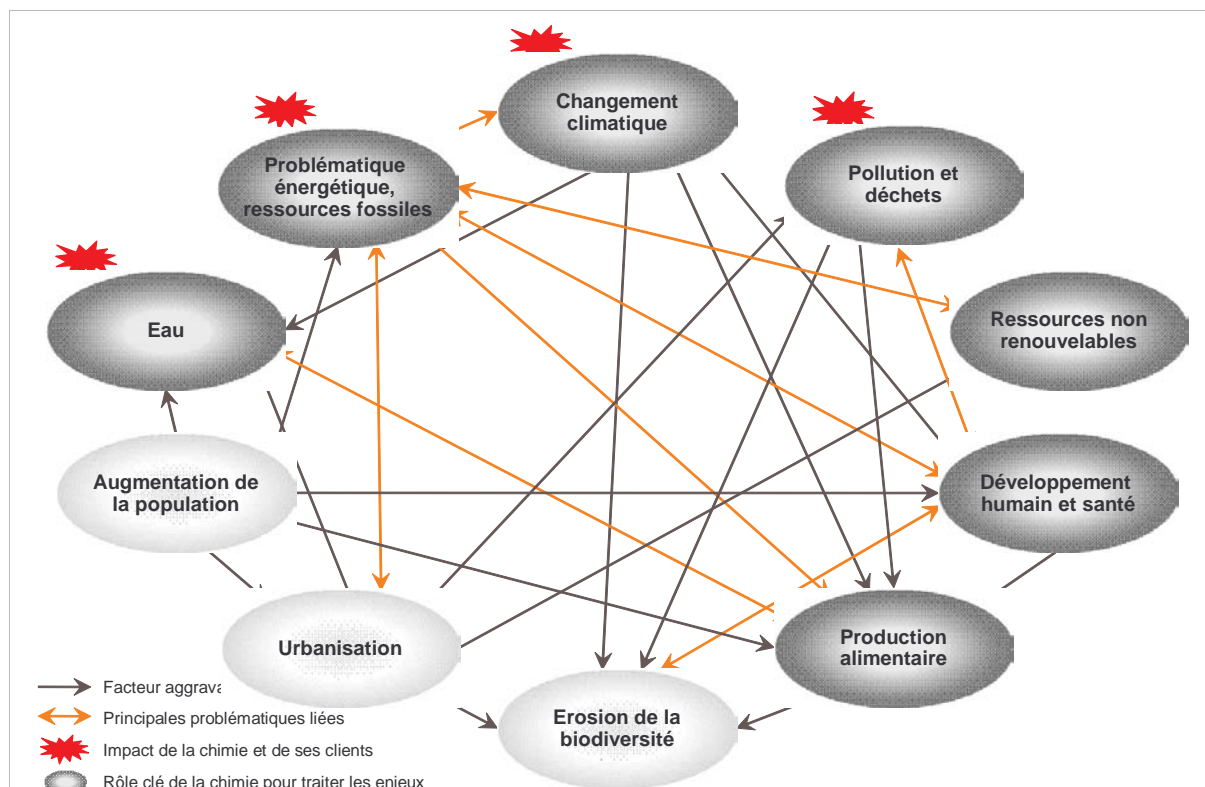
Les enjeux du développement durable sont bien connus et désormais partagés, avec une dizaine de problématiques qui en constituent les défis immédiats ou des prochaines décennies :

- Le changement climatique ;
- La problématique énergétique mondiale et la raréfaction des ressources non renouvelables (énergies fossiles, métaux, etc.) ;
- Les ressources limitées en eau ;
- L'augmentation de la population et la forte tendance à l'urbanisation ;
- La problématique des ressources renouvelables (bois, etc.) et de la production alimentaire (besoins croissants, rendements plafonnés ou décroissants, érosion des sols, effondrement des pêcheries, etc.) ;
- Les enjeux du développement humain (notamment l'accès à la santé) ;
- L'érosion de la biodiversité ;
- La pollution (locale ou globale) et la gestion des déchets.

Chacune de ces problématiques est en interaction forte avec de nombreuses autres, soit à travers des questions d'arbitrage, soit comme facteur aggravant (boucles de rétroaction courtes ou longues).

Ainsi par exemple, le changement climatique est un facteur aggravant des problématiques liées à l'eau, la biodiversité, la production alimentaire et la santé. Il est en interaction forte avec la question énergétique. Les problématiques de ressources, d'urbanisation, de production alimentaire, de biodiversité, de changement climatique sont liées par les questions d'arbitrage sur l'usage des sols (cf. figure 1.1, sur laquelle nous n'avons représenté que les interactions principales et directes).

Figure 1.1 – Interactions entre les enjeux du développement durable et place de la chimie



En tant que "fournisseur" de produits de base ou de spécialités pour l'agriculture, l'industrie et les services, et de par son propre impact environnemental, la chimie est au cœur des enjeux du développement durable.

Comme toute activité économique actuelle, le secteur des industries chimiques est porteur d'une partie des problèmes à résoudre. Mais il est également générateur d'une partie des solutions à travers les contributions potentielles à la résolution des problèmes posés par les différents secteurs utilisateurs.

Nous nous attacherons ainsi à distinguer, dans les exigences de durabilité pour la chimie, les éléments endogènes, concernant l'industrie chimique elle-même, des éléments exogènes, liés à l'utilisation des produits chimiques dans les autres branches de l'industrie, les services ou les consommateurs

1.2.1. Les exigences de durabilité pour la chimie

- **Changement climatique**

De manière endogène, le secteur de la chimie contribue à environ 5% des émissions de gaz à effet de serre au niveau mondial (cf. figure 1.2), en comptabilisant les émissions directes et les émissions indirectes (utilisation de chaleur ou d'électricité). Ces émissions sont principalement du CO₂, et dans une moindre mesure du N₂O, des HFC et des PFC.

Ceci est dû principalement au fait que les grandes commodités de base (éthylène / propylène, ammoniac, chlore...) qui se situent en amont des chaînes de valeur chimiques, requièrent une forte intensité énergétique pour leur production. La chimie de base est donc la plus contributrice, la chimie

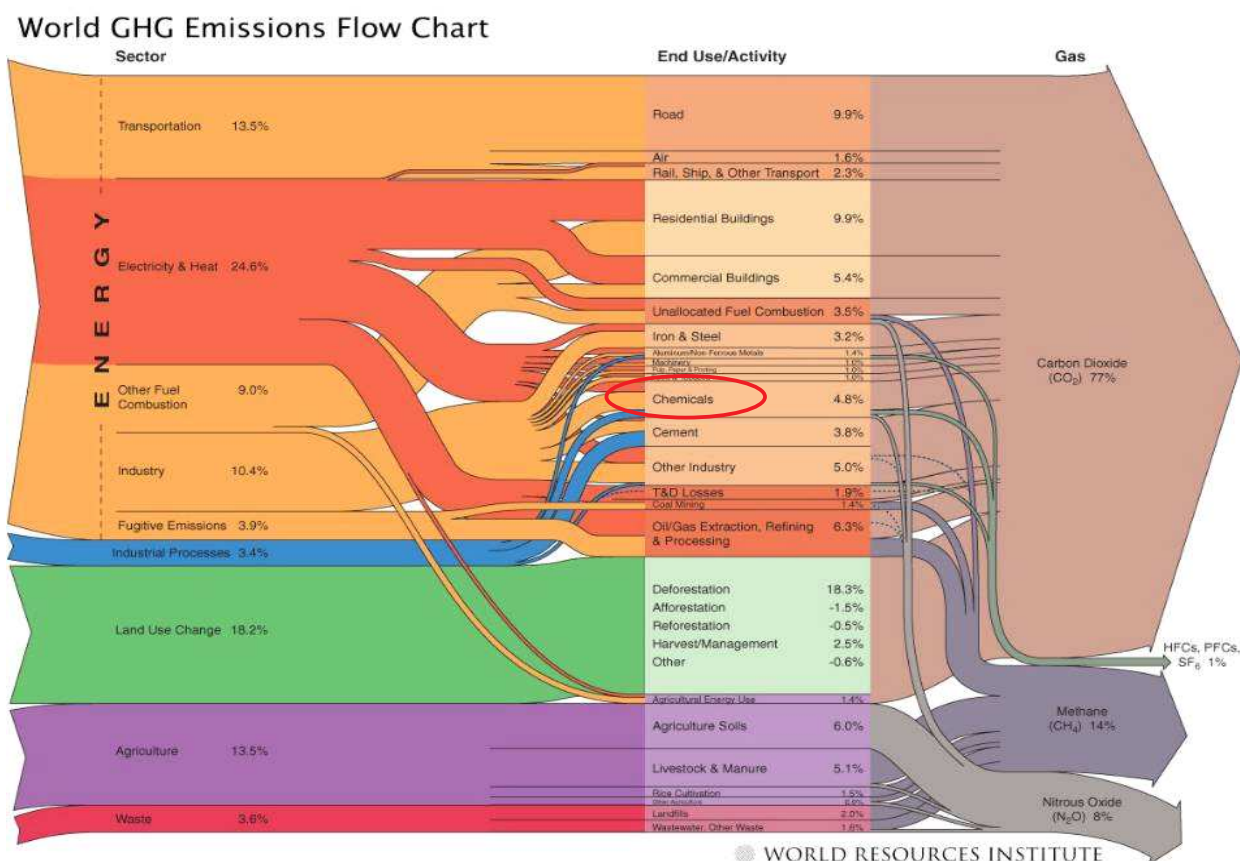
intermédiaire dans une moindre mesure, et la chimie de spécialité de manière marginale directement (et indirectement car elle est utilisatrice de petites quantités de commodités de base).

Ainsi les matières plastiques "contiennent" en moyenne une énergie de 25 kWh par kilogramme, soit un peu plus de 2 kilogrammes équivalent pétrole, 1 kilogramme au titre de l'énergie dépensée et 1 kilogramme au titre des matières premières utilisées. Les dépenses énergétiques de la chimie représentent annuellement 350 millions de tonnes équivalent pétrole, un tiers sous forme d'électricité et deux tiers sous forme de chaleur par la combustion directe de gaz, pétrole ou charbon (cf. figure 1.3).

De manière exogène, les performances des produits chimiques peuvent contribuer à baisser les émissions de gaz à effet de serre dans les principaux secteurs émetteurs : amélioration des rendements dans les transports routiers (10% des émissions de gaz à effet de serre), performances énergétiques dans le bâtiment (15% des émissions de gaz à effet de serre), développement des énergies renouvelables principalement. La chimie peut donc théoriquement contribuer à des baisses d'émission dans des secteurs qui représentent 3 à 4 fois les émissions directes du secteur chimique.

La lutte contre le changement climatique et les émissions de gaz à effet de serre passe donc nécessairement par une contribution forte de la chimie. Des efforts considérables ont d'ailleurs déjà été réalisés, en particulier dans un souci d'optimisation de la consommation énergétique et sur certains procédés émetteurs de N₂O comme la fabrication des engrais.

Figure 1.2 – Emissions directes de Gaz à Effet de Serre par secteur



Source : WRI, 2000

- **Ressources non renouvelables**

La chimie produit environ 100 000 produits différents, dont 30 000 produits ou importés en quantité supérieure ou égale à une tonne en Europe.

Ces produits sont issus à 60% des ressources fossiles (pétrole, gaz et charbon), 5 à 8% de la biomasse, le reste étant constitué de ressources minérales, disponibles généralement en grande quantité, et pouvant être considérées comme majoritairement "durables" : silice, soufre, sel... La chimie utilise cependant dans un certain nombre de cas des ressources minérales rares et non renouvelables (exemple des métaux – platinoïdes, molybdène, cobalt, etc. comme catalyseurs, additifs...) dont les perspectives de réserve sont comparables aux ressources fossiles.

L'industrie chimique représente ainsi environ 400 millions de tonnes de carbone utilisées annuellement comme matières premières, et consomme un montant équivalent pour sa fourniture d'énergie, qu'elle soit produite en propre sur les sites chimiques ou achetée auprès des producteurs d'électricité (voir figure 1.2).

A moyen terme se pose donc la question de la dépendance du secteur de la chimie aux ressources fossiles et non renouvelables. A plus court terme, la tension sur les matières premières, notamment énergétiques, posent la question de la pérennité économique de certaines filières voire du risque de dépendance géopolitique.

La question du pétrole est la plus aigüe. Qu'il soit dû à des raisons de déplétion géologique, d'accès limité aux ressources dans certains pays ou de retard dans les investissements, le pic de production est bel et bien attendu à courte échéance. Ainsi le groupe Total estime que la production plafonnera à 89 millions de barils par jour à partir de 2015 : la précédente estimation était de 95 millions de barils par jour aux alentours de 2020, mais le recul récent du prix du baril va limiter les investissements à court terme.

Avec une consommation actuelle de 85 millions de barils par jour, et compte tenu de l'augmentation du parc mondial de véhicules (nette malgré la crise...), la marge de manœuvre est donc extrêmement réduite.

Les perspectives sont plus lointaines pour le gaz (dont le pic pourrait être passé dans les années 2020) et le charbon (quelques décennies d'ici le pic, en fonction de l'usage que nous en ferons – recours massif ou non pour la production de carburant de synthèse via les procédés *coal to liquid* par exemple).

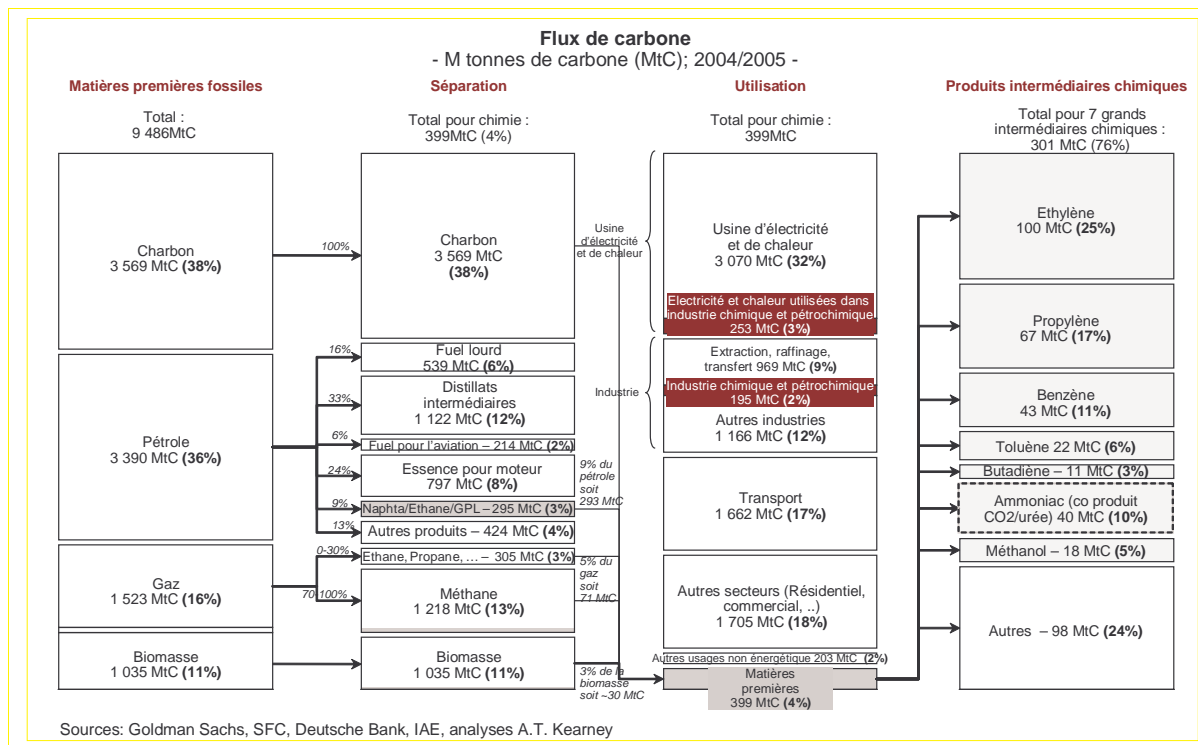
Le risque de rupture d'approvisionnement sur ces ressources reste faible à l'horizon du temps qui nous intéresse, en particulier pour la chimie. En effet, on peut toujours imaginer d'affecter une part plus grande des ressources fossiles à la chimie, au détriment de l'usage énergétique, au prix de quelques ajustements techniques dans les raffineries. C'est d'autant plus vrai pour la chimie intermédiaire et la chimie fine, dans lesquelles la part des ressources fossiles (en tant que matières premières) dans le coût est rapidement écrasée par la valeur ajoutée.

Mais une fois le pic de production passé, les prix vont repartir à la hausse durablement pour ajuster, dans un mécanisme de marché, la demande à l'offre contrainte. Les prémices en ont été visibles en 2007 et 2008. Les coûts pour la chimie augmenteront donc au titre des matières premières et au titre de la consommation énergétique.

Se poseront donc pour le secteur de la chimie la question, à court terme, du remplacement de certaines sources fossiles par des sources renouvelables, plus stables en prix et éventuellement plus sûres en approvisionnement, et la question, à moyen / long terme, de la substitution des sources fossiles entre elles (pétrole vers gaz, gaz vers charbon) puis de l'abandon progressif des sources fossiles.

En chimie organique, la chimie de base est la plus exposée à la problématique carbone fossile, puisque 75% des atomes de carbone sortis du sous-sol chaque année sont transformés en 7 grands produits de base (cf. figure 1.3). La chimie minérale est globalement moins sensible à la question des ressources.

Figure 1.3 – Flux de carbone des matières premières aux grands intermédiaires chimiques



Enfin, de manière exogène, la chimie peut contribuer à limiter les prélèvements sur les ressources rares ou non renouvelables. En effet, de nombreux procédés de traitement des déchets en vue d'un recyclage font ou pourraient faire intervenir des composés chimiques.

• **Déchets, pollution locale et globale**

C'est sans doute à cette dimension que le secteur de la chimie doit son image peu flatteuse auprès du grand public et de la société civile.

Le secteur de la chimie est générateur d'un certain nombre de "déchets" tout au long du cycle de vie des produits :

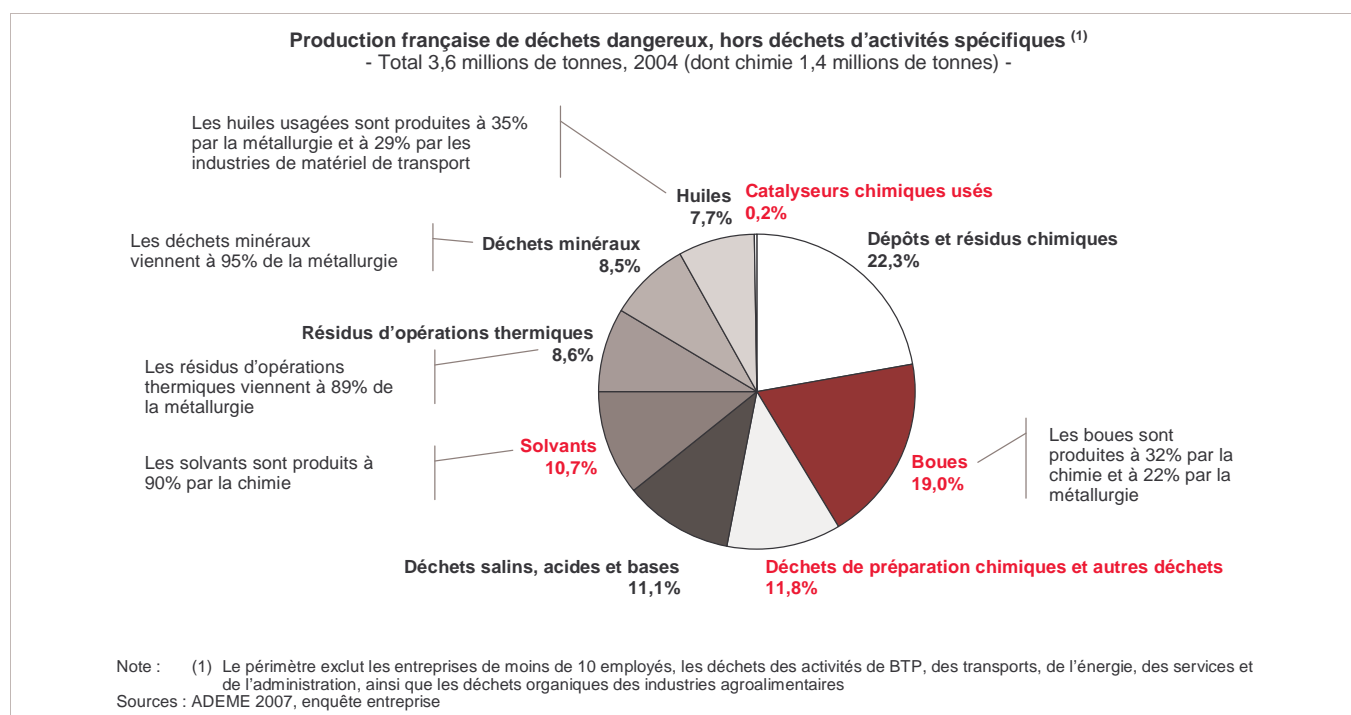
- à travers ses activités directes de production : émissions de gaz et rejets d'effluents dans l'environnement, production de déchets liquides et solides ;
- à travers la mise en œuvre, l'utilisation ou pendant la durée de vie et le vieillissement de certains produits (cf. par exemple les émissions de solvants pour certains produits de l'habitat, etc.) ;

- à travers la fin de vie des produits : les produits non biodégradables et difficilement recyclables (pour des questions techniques, sociologiques ou économiques) peuvent s'accumuler dans l'environnement au niveau moléculaire (cas des polluants organiques persistants qui peuvent se concentrer dans les chaînes alimentaires par exemple), ou poser des problèmes de gestion (incinération ou mise en décharge).

Déchets liés aux activités directes de production

Le secteur de la chimie en France produit environ 40% des déchets industriels dangereux, soit 1,4 million de tonnes par an (cf. figure 1.4), principalement des boues et des solvants. C'est le premier secteur contributeur, devant la métallurgie (environ 30% des déchets industriels dangereux).

Figure 1.4 – Production de déchets industriels dangereux

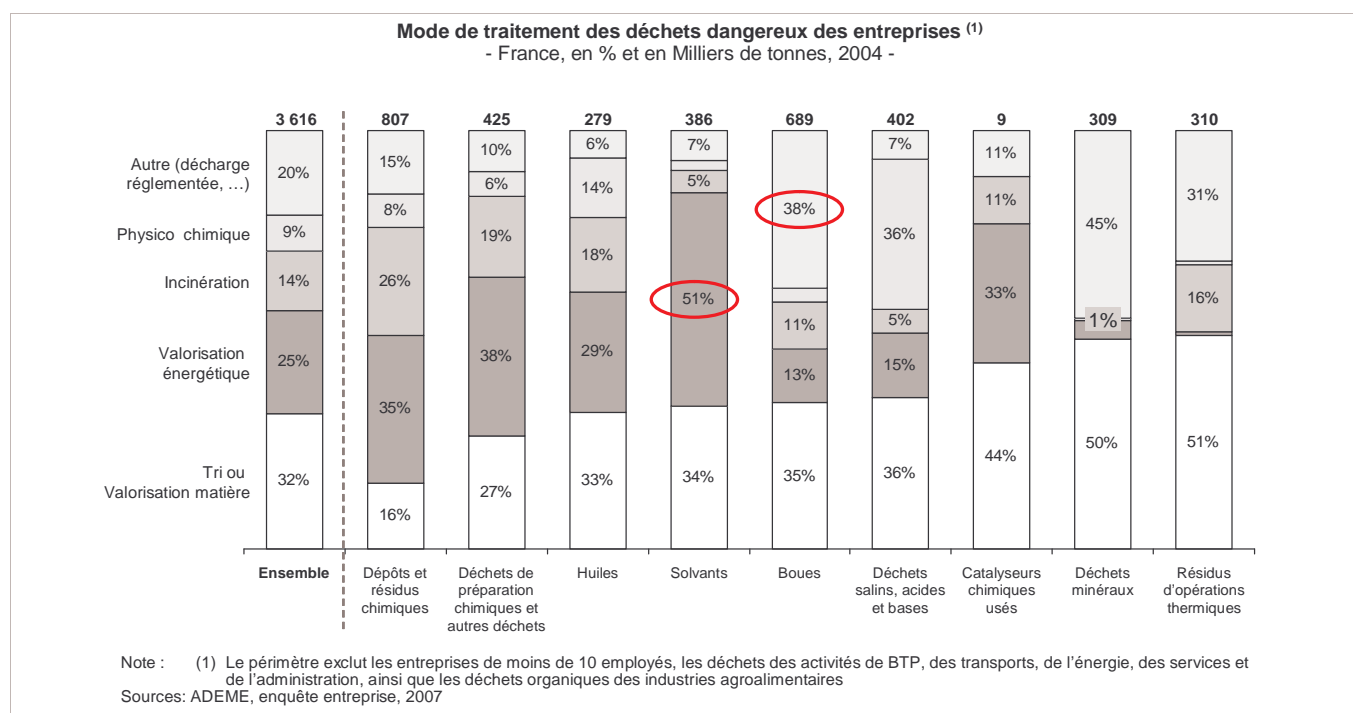


Ces déchets sont traités selon différents modes (valorisation matière, valorisation énergétique, incinération, mise en décharge spécifique type classe I...), selon une répartition qui devrait s'améliorer substantiellement dans une logique de durabilité (cf. figure 1.5).

En effet, la part "tri ou valorisation matière" est autour de 30%, tandis que la mise en décharge classée reste une voie parfois privilégiée (38% des boues par exemple). La valorisation énergétique est un mode de gestion plus durable, mais qui peut probablement être substituée à terme par des méthodes limitant "la génération d'entropie" qui consiste à brûler des molécules complexes.

Les enjeux sur l'amélioration des procédés, pour réduire les déchets à la source, mais également sur les logiques de synergie industrielle ou d' "écosystème industriel" sont donc très importants. Un certain nombre d'expériences sont en cours dans ce domaine.

Figure 1.5 – Mode de traitement des déchets industriels dangereux



Les risques liés à la dissémination de molécules non biodégradables (et éventuellement dangereuses pour la santé) dans les écosystèmes est également un sujet majeur. Cette dimension sera en particulier regardée dans le cadre de la réglementation REACH et devrait aboutir au déréférencement progressif d'un certain nombre de produits.

Déchets liés à l'utilisation et à la fin de vie des produits

L'accumulation de déchets, au niveau global et au niveau local, liée à la production de masse de produits non ou peu biodégradables pose également des problèmes de durabilité.

Au niveau global, on peut citer l'emblématique "plaque de déchets du Pacifique nord", plusieurs centaines de milliers de km² qui contiennent des débris plastiques, polymères en particulier. Les matériaux plastiques y sont photodégradés en pièces et particules de plus en plus petites, mais les molécules individuelles ne sont que très lentement métabolisées par les êtres vivants. En outre, la photodégradation de certains matériaux plastiques peut également conduire à la production de produits polluants.

Au niveau local, la gestion des déchets soulève des questions économiques, environnementales et sanitaires : coût de la collecte et du recyclage partiel, arbitrage entre les différents modes de gestion (recyclage, incinération ou enfouissement) et leurs inconvénients respectifs...

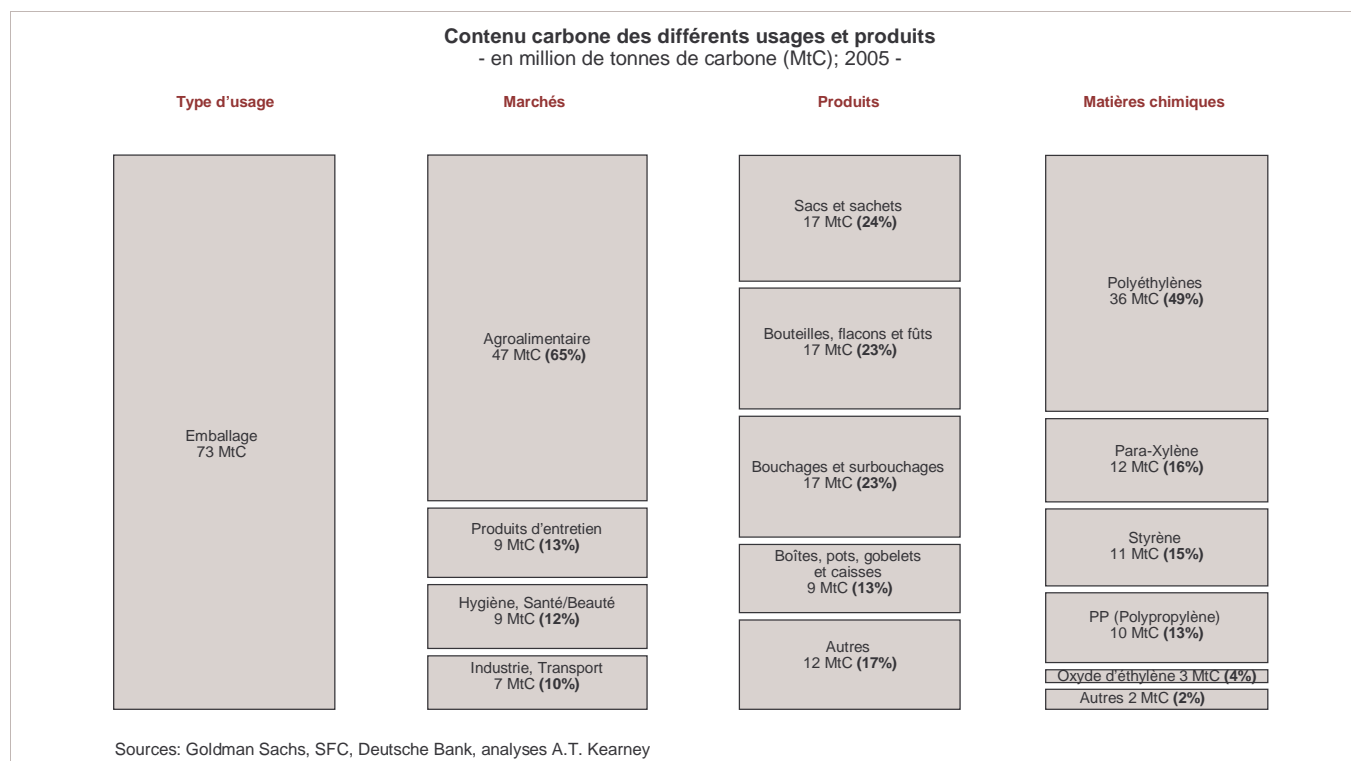
À environ 540 kg par an et par habitant, la production de déchets municipaux continue à progresser, la part non putrescible (emballages, notamment plastiques, etc.) étant d'environ 70%.

Cependant la question des déchets en fin de vie est une responsabilité partagée entre producteur, secteur utilisateur et consommateur final.

À ce titre le cas des emballages est emblématique. 25% des atomes de carbone sortis chaque année du sous-sol sont utilisés comme emballage, à 90% à destination des consommateurs (cf. figure 1.6).

Difficile de mettre en cause le fabricant d'éthylène, de styrène, de paraxylène ou de propylène (même s'il doit porter clairement sa part de responsabilité) sans se poser la question de l'optimisation de l'emballage par les acteurs de l'agro-alimentaire (questions du suremballage, des doses individuelles, etc.), de la responsabilité propre des consommateurs (utilisation et réutilisation, tri des déchets) et des organisations (mise en place des filières de valorisation adéquates).

Figure 1.6 – Génération de déchets en fin de vie : Exemple de l'emballage



En conclusion, la chimie est donc face à un double enjeu en termes de développement durable.

Concevoir des produits plus recyclables ou plus biodégradables, selon les usages ; cela impliquera notamment la question de l'intégration des produits issus des filières de recyclage à un certain niveau (variable) de la chaîne de valeur.

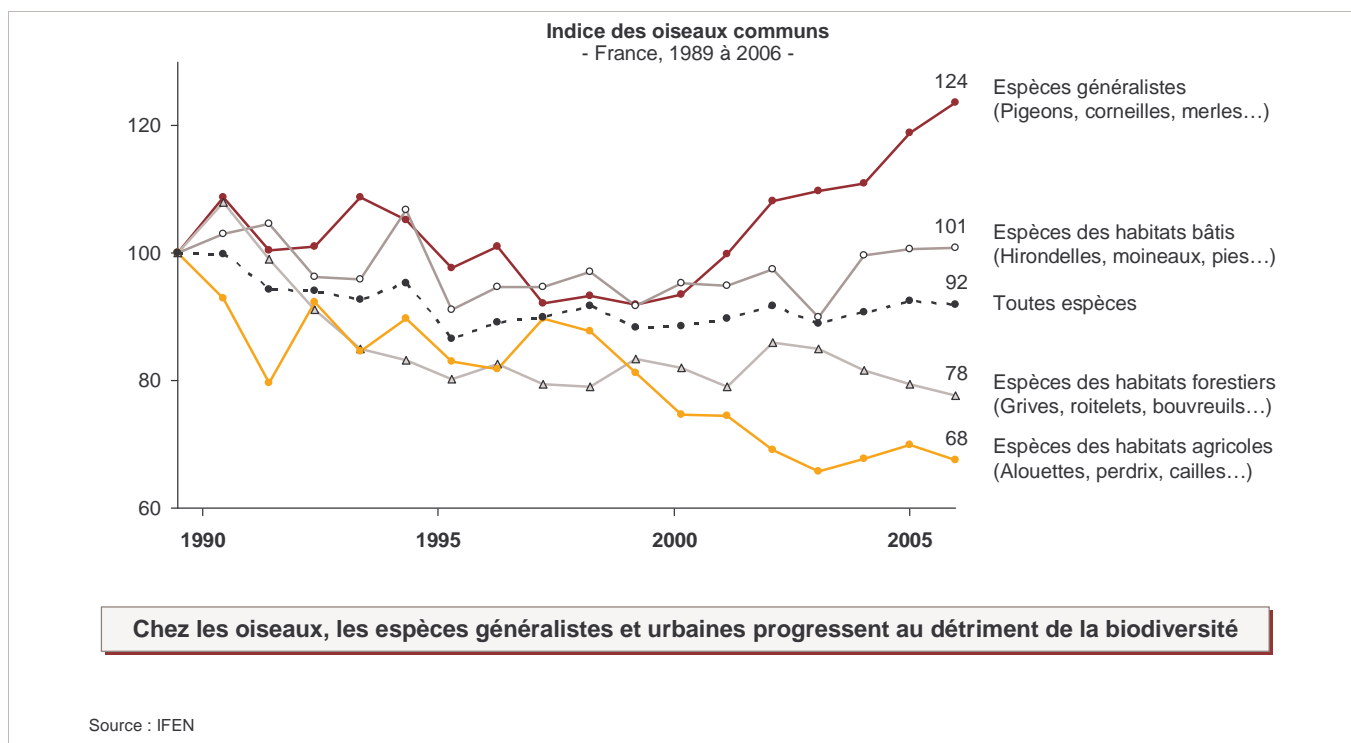
Optimiser les procédés industriels pour réduire les émissions, les effluents et les déchets, travailler sur la valorisation matière des coproduits et des déchets.

Tous les sous-secteurs de la chimie (base, intermédiaire, spécialité) sont plus ou moins concernés par cette problématique en fonction de la "propreté" du procédé et du couple impact environnemental / volume des produits chimiques fabriqués.

- **Biodiversité**

A l'échelle planétaire nous faisons face à une perte de biodiversité sans précédent. Elle est due en particulier à la destruction rapide de grands écosystèmes riches en biodiversité comme les forêts tropicales et les récifs coralliens, mais elle est également sensible dans des pays comme la France (cf. figure 1.7 à titre d'exemple).

Figure 1.7 – Erosion de la biodiversité



Comme le reste des activités économiques, le secteur de la chimie a un impact direct et indirect sur l'érosion de la biodiversité, à travers de nombreuses boucles de rétroaction qui peuvent être plus ou moins longues. Cinq facteurs au moins peuvent être mentionnés :

- L'exploitation minière pour les matières premières ou les énergies fossiles, pouvant conduire à de la déforestation, des pollutions locales, une perturbation du régime d'écoulement des eaux...
- L'utilisation de certaines matières premières renouvelables en cas de surexploitation ou de concurrence dans l'usage des sols : ainsi les filières basées sur l'huile de palme (biodiesel, oléo-chimie) contribuent à la déforestation massive de la forêt primaire en Asie du Sud-Est et à la perte de biodiversité associée ;
- La pollution globale et localisée (cf. la question des déchets et la réglementation REACH) ;
- La toxicité directe de certains produits, comme dans l'exemple emblématique de la large dissémination de produits phytosanitaires, ou indirecte en cas d'usage "non raisonné" comme pour les engrais ;
- La contribution au changement climatique et à la bio-invasion (liée aux échanges internationaux), qui sont deux facteurs clés de la perte de biodiversité, avec la surexploitation, le changement d'usage des sols et la pollution.

Les progrès du secteur de la chimie dans les autres domaines (énergie, ressources, déchets) devraient avoir un impact positif sur la question de la biodiversité, un effort particulier devant être mené sur l'écotoxicité et le ciblage de certains produits.

La question de la toxicité est d'abord une question de niveau d'exposition et donc de maîtrise des risques. Quelques centaines de molécules sur 30 000 produites à plus d'une tonne par an sont très préoccupantes.

La question de l'appel à des ressources agricoles et donc de l'impact en termes de concurrence d'usage des sols en cas d'utilisation massive est également majeure pour la biodiversité. Par exemple, la mise en culture des jachères de l'Union Européenne pour un usage énergétique ou de matières premières chimiques est une menace forte pour la biodiversité, les jachères servant de zone refuge face aux cultures annuelles.

• Développement humain

De nombreux produits chimiques contribuent à l'accès aux besoins fondamentaux et au développement humain notamment dans les secteurs suivants :

- Production d'eau potable et traitement des eaux usées ;
- Agriculture (engrais, certains produits phytosanitaires...) et agroalimentaire (emballages spéciaux) ;
- Produits médicaux et pharmaceutiques ;
- Produits d'hygiène et cosmétique ;
- Environnement (détection, traitement / dépollution...) ;
- Textile et habillement ;
- Etc.

On y trouve la contribution d'une partie de la chimie de base et intermédiaire (engrais par exemple), mais surtout de la chimie de spécialité, de la chimie fine et des produits de performance.

Les produits chimiques devront donc continuer à contribuer à l'innovation dans ces secteurs (d'après l'UIC, 50% des innovations dans la pharmacie, le textile, la métallurgie, la pétrochimie, l'environnement...viennent de la chimie), à l'amélioration des procédés, et également à une "économie réparatrice" à travers les métiers de l'environnement (dépollution, etc.)

Cependant des arbitrages forts seront à prévoir, notamment au regard des autres exigences de durabilité (ressources, déchets, biodiversité), entre :

- l'utilité sociétale et sociale, réelle ou perçue, des biens et services actuels ou à venir, en d'autres termes les "avantages" d'un produit ou d'une gamme de produits ;
- et ses "inconvenients", c'est-à-dire son impact environnemental, au sens large.

La question de l'existence du besoin, si la substitution produit n'est pas possible, devient alors centrale.

Pour prendre un exemple sur les produits phytosanitaires (les problématiques d'utilité, d'efficacité, de substituabilité, de risque et de nocivité variant bien entendu grandement d'un produit à l'autre), les questions pouvant être, par ordre d'élargissement de la réflexion (et donc peut-être par ordre inverse dans lequel on doit se poser les questions...) :

- Peut-on réduire la nocivité du produit ?

- Peut-on optimiser sa mise en œuvre pour réduire la dissémination avec la même efficacité ?
- Peut-on le substituer par d'autres produits ?
- Peut-on le substituer par des traitements biologiques ?
- Peut-on organiser les cultures différemment pour faire disparaître ou réduire le besoin ?

• **Emploi et économie**

Le secteur de la chimie représente un poids important en France avec un chiffre d'affaires de 81 milliards d'euros, 44 milliards d'euros d'exportations, 38 milliards d'euros d'importations et 188 000 emplois (2007).

C'est un secteur "précurseur" qui irrigue le reste de l'économie française.

À ce titre, l'exigence de durabilité est donc de contribuer, par le maintien et le développement de filières en France, à la mise en place d'une économie ancrée dans les territoires et à un gisement d'emplois durables.

Cette exigence est de plus cohérente avec le besoin de "relocalisation" ou de "déglobalisation partielle" de l'économie, basée sur des circuits de transport les plus courts possibles ou optimisés, en lien avec la problématique énergétique et du changement climatique.

La prise en compte des exigences de la durabilité peut prendre différentes formes pour l'économie et le secteur de la chimie en particulier, principalement à travers :

- Une évolution de la structure de la demande sur les marchés existants, à travers une prise de conscience environnementale ou un effet prix, par le marché ou la réglementation (coût des matières premières, de l'énergie, du CO₂, taxe sur le recyclage, etc.) ;
- Un développement des nouveaux marchés (notamment dans les transports, le bâtiment, les énergies nouvelles, la santé) ;
- Une évolution de la réglementation (normes environnementales, obligation de recyclage ou traitement de fin de vie, etc.) impactant in fine les coûts et les prix.

Sur les marchés existants, la chimie devrait avant tout être impactée de manière indirecte à travers les grands marchés finaux eux-mêmes. En effet, le secteur de la chimie "se dilue" rapidement dans les secteurs utilisateurs : il s'agit bien de comparer environ 19 milliards de valeur ajoutée du secteur de la chimie à plus de 330 milliards de PIB industriel, et plus de 1 700 milliards de PIB national.

À titre d'exemple, la mise en place de dispositifs d'intégration des externalités environnementales dans les prix (type taxe carbone, pour étendre ou remplacer le mécanisme de permis d'émission) pourrait avoir un effet de réduction du volume d'affaires pour la chimie de deux manières :

- La baisse de la consommation de mobilité (plus chère car intégrant une taxe carbone dans les carburants) pourrait entraîner une baisse du nombre de véhicules vendus et donc des matériaux issus de la chimie pour ces véhicules ;
- Les véhicules vendus plus chers (car intégrant le surcoût d'une taxe carbone ou ETS dans les matériaux) se vendraient moins par élasticité au prix, ou les matériaux plus chers issus de la chimie seraient remplacés par d'autres matériaux plus durables (bois, etc.)

L'ordre de grandeur étant dans cet exemple que 80 à 90% du contenu carbone, donc du surcoût environnemental, est lié à l'usage, pour 10 à 20% à la construction du véhicule¹ (et une part chimique encore plus faible), on voit bien que l'effet volume sur la chimie serait probablement avant tout entraîné par l'évolution du marché automobile en aval (mais cette considération a vocation d'exemple uniquement et ne présume pas de ce que serait l'effet réel d'une taxe carbone sur le marché automobile).

Ces facteurs sont donc directement liés aux marchés utilisateurs et à leur capacité à faire face aux exigences de durabilité. C'est justement le rôle assigné aux segments porteurs potentiellement contributeurs au développement durable (énergies nouvelles, performance énergétique dans les transports et le bâtiment, recyclage, etc.)

L'évolution de la réglementation offre a priori les mêmes règles du jeu à tous les acteurs économiques, *cependant se poseront deux questions classiques* :

- La question de la distorsion concurrentielle possible, entre intérieur et extérieur de la zone réglementée, et d'un possible mécanisme d'ajustement aux frontières (avec la question du marché interne et de la compétitivité internationale pour les marchés à l'export) ;
- La capacité très différente des entreprises, en fonction de leur taille, à mettre les moyens pour anticiper, se préparer à saisir les opportunités des évolutions à venir.

Nous aborderons les questions de régulation et réglementation au paragraphe 1.4.2.

1.2.2. L'économie durable et la nouvelle donne économique

1.2.2.1. Le point de départ

Force est de constater que l'économie française est encore loin de la durabilité et fonctionne largement comme un système ouvert fortement dépendant de ressources non renouvelables et bon marché.

Ainsi, pour produire un euro de valeur ajoutée, il faut prélever dans la nature 20 litres d'eau, 80 grammes de pétrole et de gaz, 420 grammes de matériaux (dont 10 au moins non renouvelables ou peu abondants), et rejeter dans l'environnement 320 grammes d'équivalent CO₂ en gaz à effet de serre, et 240 grammes de déchets (hors déchets verts, boues de stations d'épuration et déchets putrescibles) dont 5 grammes de déchets industriels dangereux largement non recyclés et 36 grammes de déchets divers (entreprises, ordures ménagères et collectivités). Le tout en transportant 1 kilogramme de fret sur 120 kilomètres !

Nous diminuons également le "stock" d'espaces naturels puisque le territoire est artificialisé très rapidement (+20% entre 1990 et 2000 avec 7 000 km² supplémentaires), donc beaucoup plus rapidement que l'accroissement de la population.

Autrement dit, chaque Français, chaque jour, consomme 31 kilogrammes de matériaux divers, fait transporter 90 kilogrammes sur 100 kilomètres, produit 15 kilogrammes de déchets inorganiques, dont 400 grammes de déchets industriels dangereux. Il est également "propriétaire" de 700 m² de territoire artificialisé... (chiffre qui augmente de 10 m² par an).

¹ Source ADEME / Bilan Carbone

Le même état des lieux aux bornes du "système chimie France" donnerait un résultat comparable, logiquement plus intense en intrants matières et énergie et en déchets générés (ainsi 59 grammes de déchets industriels dangereux et 1,6 kilogramme de CO₂ par euro de valeur ajoutée).

Au regard des enjeux de durabilité précédemment évoqués, les engagements du Grenelle de l'environnement, tant du côté des pouvoirs publics que des engagements volontaires de l'industrie, sont une base qui appelle des prolongements.

C'est compréhensible dans la mesure où la chimie ne peut devenir réellement "durable" qu'en cohérence avec le système économique complexe dans lequel elle est enchâssée.

1.2.2.2. Les enjeux de la production et de la consommation durable

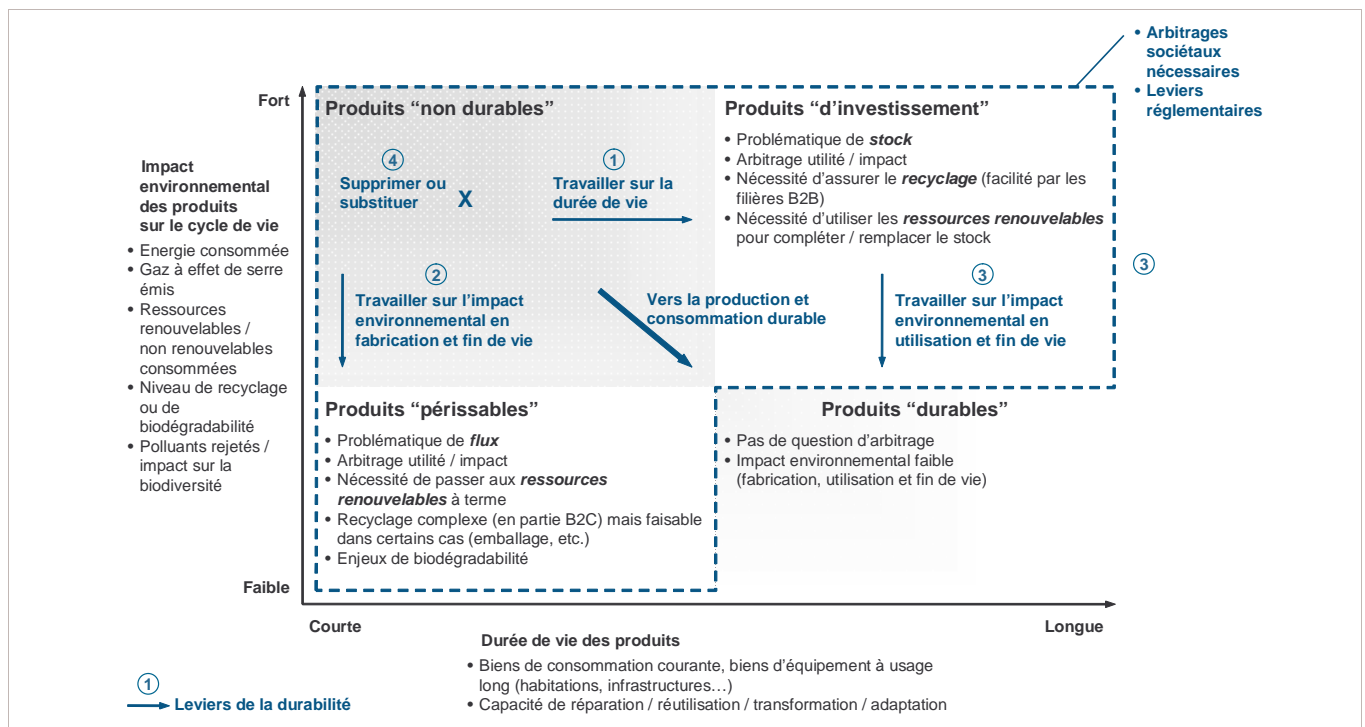
L'économie durable se définit comme étant une économie qui réduit ses flux de matière et d'énergie, basée sur la conception et la production de biens durables et recyclables, à l'impact le plus faible possible sur les écosystèmes.

Dans le principe, les choses sont assez simples : il s'agit donc de passer d'une consommation de produits "non durables" (impact environnemental fort, durée de vie courte), à des produits "durables" (impact environnemental faible, durée de vie longue).

En pratique, c'est un peu plus complexe (cf. figure 1.9) car :

- Tous les produits ne peuvent pas, par leur nature même, avoir une durée de vie augmentée : il s'agit par exemple des produits *consommables*, qui sont dispersés après usage (savon, shampoing, traitement de l'eau, produits d'hygiène...) et des produits *périssables* (emballages alimentaires...);
- Certains produits ont un impact environnemental qui restera fort (produits de l'habitat, des infrastructures...) mais acceptable car leur durée de vie étant longue; ils pourront être acceptés comme un "mal nécessaire" lié à un *investissement*.

Figure 1.9 – Les enjeux de la production et consommation durable



Face à une économie dont la production et la consommation de biens et services sont aujourd'hui majoritairement des produits "non durables" ou des produits "d'investissement" (au sens de la segmentation de la figure 1.10), les leviers de la durabilité, qui ne sont pas indépendants les uns des autres mais complémentaires, sont donc les suivants :

Levier 1 : pour tous les produits il s'agira avant tout de **travailler sur la durée de vie**. Il faut intégrer l'exigence de durabilité dès la conception, avec des produits réutilisables, réparables, récupérables en partie grâce à leur modularité, et enfin recyclables en fin de vie.

A première vue, cette exigence s'oppose de manière frontale avec les fondements de notre économie de croissance actuelle. En effet, pour cela il faut :

- Arbitrer différemment entre coût de l'énergie / coût environnemental et coût du travail humain (rendre le réparable et le recyclable économiquement viables) ;
- Sortir de la logique de l'obsolescence programmée, poussée par la façon dont on comprend et envisage la création de valeur, et la culture dominante "être et consommer" (rendre le réutilisable, le durable et le réparable sociologiquement viables) ;
- Affronter la problématique de la propriété industrielle et des normes (rendre le réparable et le récupérable techniquement viables). Il est donc clair qu'une partie du mouvement devra avoir lieu au sein des associations industrielles plutôt qu'au niveau de chaque entreprise.

Pour certaines applications, une des pistes pourrait être "l'économie de la fonctionnalité", basée sur une facturation des services rendus par les objets plutôt que sur la facturation des objets eux-mêmes.

Les enjeux sur ce levier dépassent largement le secteur de la chimie et c'est sans doute au niveau des filières industrielles que les choses devront techniquement s'organiser. Son rôle sera néanmoins clé sur un certain nombre de dimensions : durabilité, robustesse (pour faciliter la réutilisation et allonger la durée de vie), signalétique (pour faciliter l'identification au recyclage), capacité de recyclage des matériaux du futur en particulier (par exemple comment obtenir des fonctionnalités en assemblant différents matériaux plutôt qu'en les mélangeant, etc.).

Levier 2 : pour les produits "périssables" dont la durée de vie restera courte par la nature même du service rendu, il s'agira de *travailler sur l'impact environnemental en fabrication et en utilisation (fin de vie)*.

Sur ce levier, le secteur de la chimie peut jouer un rôle moteur, la complexité filière est moins grande et la "révolution des esprits" n'est pas nécessaire puisque l'on reste dans une logique de produits à courte durée de vie.

Les pistes de la chimie durable sont donc à ce titre de :

- Travailler sur les procédés de fabrication pour réduire leur impact environnemental ;
- Privilégier les matériaux recyclables (si la filière peut effectivement être viable économiquement et sociologiquement), et sinon biodégradables ;
- Travailler sur l'efficacité des produits (utilisation de moins de produits pour la même fonction) ;
- Introduire les ressources renouvelables comme les agroressources si cela fait sens en termes d'impact environnemental (analyse de cycle de vie en particulier).

Levier 3 : pour les produits "d'investissement", il s'agira de *travailler sur l'impact environnemental en utilisation et en fin de vie*. Bien entendu, il faudra tout faire pour économiser sur les procédés de fabrication dans cette gamme de produits. Mais compte tenu de la durée de vie, les enjeux majeurs sont probablement sur l'impact environnemental durant le cycle de vie.

On trouve ici tout le rôle de la chimie comme contributrice dans des secteurs comme l'énergie, les transports et l'habitat. Si l'on prend l'exemple des véhicules automobiles, il s'agit donc de :

- Développer les produits permettant un gain environnemental sur l'utilisation : allègement et optimisation des carburants et de la motorisation pour réduire la consommation, catalyse pour réduire les émissions nocives, etc. ;
- Concevoir différemment les produits pour optimiser le recyclage (comment éviter les thermodurcissables au profit de thermoplastiques réellement recyclables, comment gérer des produits a priori non recyclables comme les peintures, etc.).

Levier 4 : Enfin, pour les produits qui resteront "non durables", se posera la question de les *supprimer ou substituer*. Pourquoi continuer à inclure des produits nocifs pour l'environnement dans des produits d'hygiène ou de cosmétique, par exemple, si des substituts simples existent ?

On voit que dans tous les cas, les *arbitrages sociétaux et leur prolongement réglementaire* doivent être au cœur des réflexions sur l'économie durable :

- Pour les produits à durée de vie courte, quels sont les dégâts environnementaux acceptables (à condition d'avoir l'information et les outils d'analyse...) au regard de l'utilité réelle (ou perçue...) de tel produit ou service ? Il ne peut y avoir de réponse d'expert à cette question (le

débat sur le superflu et le nécessaire...) qui doit donc être tranchée par un débat démocratique, un arbitrage social et sociétal ;

- Pour les produits d'investissement à durée de vie longue, quels sont les dégâts environnementaux acceptables pour préparer le futur ? De la même manière le débat doit trancher entre l'utilité relative d'une autoroute ou d'un hôpital.

Les leviers 2 et 3 sont clairement intégrés par les entreprises et se mettent déjà en œuvre (même si une accélération est souhaitable) :

- soit à travers de l'imposition de réglementations progressives, de la logique de progrès continu et des besoins de travailler sur les coûts, dont l'énergie et les matières premières sont un poste important (levier 2 : impact environnemental fabrication et fin de vie) ;
- soit à travers des besoins des marchés aval en nouveaux matériaux, plus performants, etc. (levier 3 : impact environnemental des secteurs utilisateurs des produits de la chimie).

En revanche, il est probable actuellement que les leviers 1 (conception de produits durables) et 4 (suppression de certains produits à l'arbitrage utilité / nocivité défavorable) ne peuvent s'enclencher dans le secteur de la chimie sans une poussée réglementaire forte, comme une taxe carbone généralisée, des obligations de recyclage et de gestion des déchets en fin de vie, des normes sur la conception, le tout devant être accompagné d'un véritable programme sociétal pour en assurer l'acceptation sociale, car il s'agit bien, selon le type d'usages, *de muter vers une économie de la fonctionnalité ou vers une économie de la sobriété / frugalité. Le moteur du changement ne peut pas être uniquement basé sur l'augmentation des prix de marché des énergies fossiles.*

En résumé, et dans une perspective plutôt long terme, la "chimie durable" fait face à (cf. figure 1.11) :

- une *problématique de flux* pour les produits à courte durée de vie : il faut donc tendre au maximum vers des ressources renouvelables (cf. déplétion des ressources) en optimisant les possibilités limitées de recyclage, et en systématisant la biodégradation pour le reste ;
- une *problématique de stocks* pour les produits à moyenne et longue durée de vie : il faut donc tendre au maximum vers le recyclage et la gestion de fin de vie, pour "économiser le stock de carbone complexe", et ne se servir des ressources renouvelables que pour renouveler (ou augmenter comme investissement) le stock.

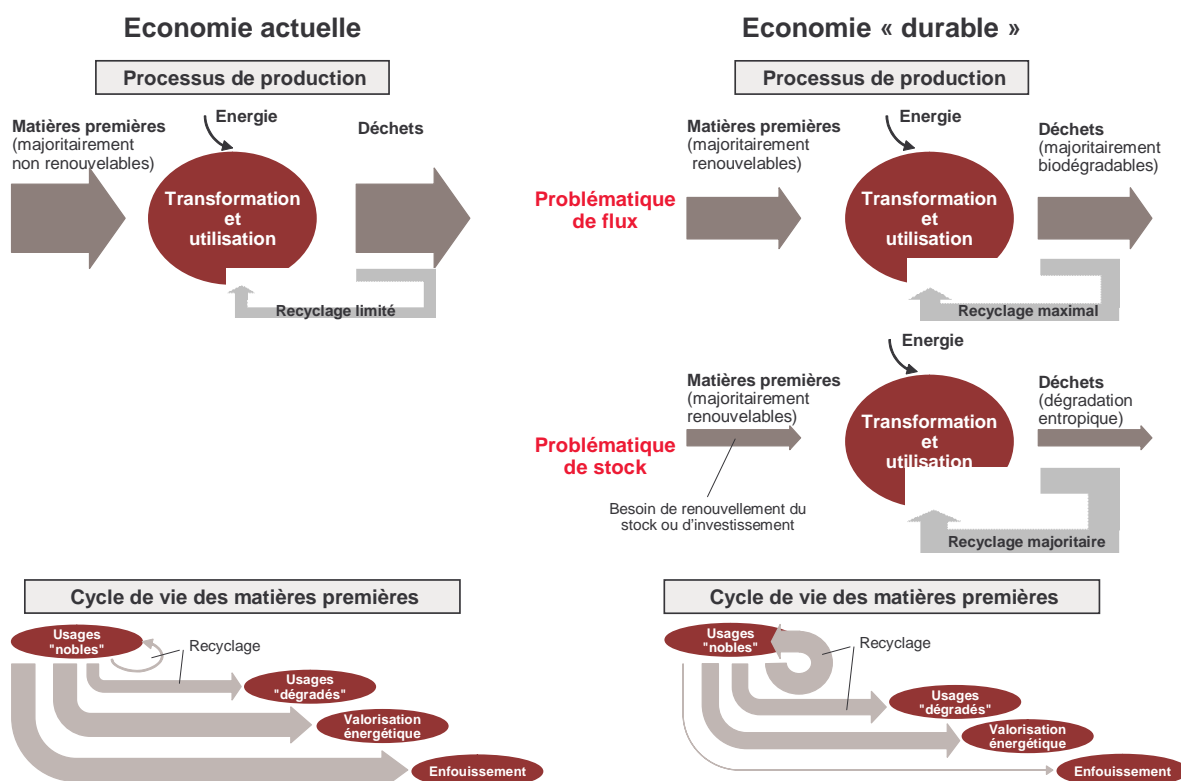
Du point de vue de la chimie (organique en particulier), *le cycle de vie des matières premières, et notamment du principe du recyclage, devrait être fortement repensé* (cf. figure 1.10) : en effet, dans l'économie actuelle, les filières de recyclage consistent souvent à récupérer des matières premières ayant servi pour des usages "nobles" ou "primaires" pour les réinjecter dans des usages "dégradés" ou "secondaires".

Pour des questions de mélanges, d'additifs non séparables (couleurs, stabilisants, etc.) ou non séparés, de qualité et de dégradation (grade des plastiques...), de perception, les produits recyclés sont souvent réutilisés dans des usages techniquement ou visuellement moins exigeants.

Ce problème n'est pas spécifique à l'industrie chimique. On peut citer par exemple :

- Le cas du verre : le mélange des verres blancs et des verres de couleur condamne le calcin à une utilisation dans le verre de bouteille uniquement, au détriment des verres plats pour le bâtiment ou des verres automobiles.
- Le cas de l'acier : les faibles quantités de métaux non ferreux contenues dans certains aciers spéciaux sont ferrillées la plupart du temps sans possibilité de récupération (sauf mise en place de filières très spécifiques avec tri plus fin) et finissent donc en ferrailage pour le bâtiment (ronds à béton).

Figure 1.10 – Economie actuelle et économie durable



Sur cette proposition de clé de lecture, on peut déjà tirer quelques enseignements, par exemple :

- le recyclage apparaît à long terme comme un des enjeux principaux, auquel il faudra bien donner toute sa place, technologique, économique et sociétale ;
- une pétrochimie des agroressources, destinée à des produits de moyenne durée de vie (comme l'automobile), qui ne conduirait pas à des produits recyclables et moins nocifs pour l'environnement, pourrait être une fausse route, par rapport à une utilisation des agroressources pour les "produits de flux" (comme les cosmétiques, les emballages alimentaires, etc.).

1.2.2.3. La question internationale

La question internationale ne peut être dissociée de la réflexion sur l'économie durable et la chimie durable en particulier.

Premièrement, car le *secteur de la chimie est particulièrement ouvert et exposé à l'international*. Ainsi les exports représentent 55% du chiffre d'affaires de la chimie en France, tandis que les imports représentent 51% du marché domestique (chiffres 2007).

Certains secteurs sont particulièrement exposés à la concurrence internationale, notamment des pays émergents, grâce à leurs avantages de coût et leur accès privilégié à certaines matières premières (cas du gaz au Moyen-Orient, en Russie et en Ukraine par exemple).

Deuxièmement, car la plupart des *enjeux environnementaux sont désormais globaux* ou continentaux (changement climatique, couche d'ozone, pollution des mers...). Il ne s'agit donc pas de prendre des mesures ou des orientations qui régleraient le problème localement tout en ayant un impact négatif sur le système global. C'est par exemple tout le débat du système de permis d'émission et de ses risques de "fuite carbone" hors de l'Europe des secteurs les plus exposés, et éventuellement dans leur sillage de certaines industries aval.

Troisièmement, car le *développement durable est indissociable de la question de la localisation*. Compte tenu du coût climatique des transports, le paradigme de la course à l'effet d'échelle par les regroupements de sites, de la recherche des coûts les plus faibles par la délocalisation dans des pays aux réglementations sociales et environnementales plus souples est mis à mal.

L'économie durable est une économie ancrée dans le local, aux circuits économiques les plus courts possibles. Elle ne renonce pas aux échanges (il ne s'agit donc pas d'un retour au protectionnisme), mais les concentre là où ils font le plus de sens, pas uniquement en termes économiques, mais plutôt en termes d' "avantages comparatifs environnementaux" :

- Quel est le bon niveau de taille pour une unité entre gains de rendements énergétiques liés à la taille et coût énergétique du transport vers les marchés ?
- Quels liens territoriaux entre chimie base et chimie de spécialité ?
- Est-ce qu'il vaut mieux transporter des matières premières ou des produits déjà transformés ?
- Comment articuler au mieux les activités qui dépendent les unes des autres ?

En ce sens, une chimie durable française est bien d'abord *une chimie française qui échange à bon escient*.

1.2.2.4. Court terme contre moyen et long terme

La problématique court terme / long terme est encore plus délicate à envisager du fait du contexte récent très incertain, que l'on caractérise souvent de la manière suivante :

- Il donne un très mauvais signal prix aux acteurs économiques sur les ressources non renouvelables. Même si la flambée en 2008 était en partie due à la spéculation, les fondamentaux de l'offre et de la demande n'ont pas changé à moyen et long terme ;
- Il limite l'accès au crédit et donc la capacité des entreprises à financer des projets nouveaux et des mutations ;

- Il focalise les énergies et les compétences sur les problématiques de court terme, vu les difficultés rencontrées par de nombreuses entreprises (forte baisse des commandes et du chiffre d'affaires, etc.)
- Il fragilise le secteur dans la compétition internationale.

Côté opportunités, ce qui se joue actuellement permet d'envisager différemment les questions de court terme et long terme, et donne plus de marges de manœuvre pour installer un système durable assis sur des bases plus saines, à condition toutefois qu'une stratégie l'autorise.

Ce contexte a notamment permis de reconsidérer la nature possible des interventions publiques, jusqu'à présent réservées à la survie à court terme de certains secteurs, mais également bien adaptées aux questions de long terme et de développement durable. Les plans de relance actuels ou à venir sont également l'occasion de trouver des financements pour favoriser l'innovation.

Par ailleurs, le secteur de la chimie est caractérisé par une forte intensité en capital et des cycles longs pour lancer une nouvelle molécule sur le marché. Ce qui renforce d'autant plus le besoin de visibilité réglementaire à court terme, pour influencer le changement à moyen et long terme.

A ce stade de l'étude, l'articulation entre les deux échelles de temps reste donc à trouver.

1.2.3. Une question d'arbitrage

1.2.3.1. Les antagonismes du développement durable

Les enjeux du développement durable étant multidimensionnels, un certain nombre d'antagonismes peuvent apparaître. Dans les grands antagonismes, on peut citer la construction de grandes infrastructures ferroviaires ou l'arrêt de l'artificialisation du territoire, la mise en culture de jachères à des fins alimentaires ou énergétiques ou leur maintien comme refuges de biodiversité, etc.

Dans le cadre de la chimie durable apparaissent au moins trois types d'antagonismes.

Les antagonismes liés à l'utilisation accrue de ressources renouvelables à une échelle industrielle :

On trouve surtout dans cette catégorie des antagonismes liés à la compétition dans l'usage des sols, entre espaces naturels et jachères (préservation de la biodiversité et des grands équilibres naturels), cultures alimentaires (développement humain), cultures énergétiques (lutte contre le changement climatique) ou cultures comme matières premières (chimie durable).

Les biocarburants de première génération en sont l'exemple emblématique, mais on pourrait citer également la filière oléagineuse, contribuant également à la déforestation pour la culture de l'huile de palme en Asie du Sud-Est notamment.

On y trouve également la problématique des OGM et plus généralement la diversité semencière, puisque les besoins productifs tendent à "standardiser" le vivant pour optimiser les procédés, tandis que la diversité est le gage de la stabilité long terme du système (adaptation aux conditions locales et changeantes, lutte contre les maladies et les agressions, etc.).

Les antagonismes liés au développement de nouveaux matériaux :

Les tendances et les exigences de durabilité paraissent contradictoires sur au moins trois sujets qui mériteront d'être approfondis :

- **Complexité ou recyclage** : la complexité croissante (en nombre et en technicité) des matériaux nouveaux, exigée par les nouvelles applications de développement durable des marchés aval (transport, énergie, habitat) pourrait aller à l'encontre du besoin du maximum de simplicité pour mettre en place des filières de recyclage possibles techniquement et économiquement (il y a déjà actuellement des dizaines de polymères différents dans une pièce avant de véhicule par exemple). En d'autres termes, en pariant sur le "tout technologique", ne se condamne-t-on pas à ne pas savoir recycler une partie de nos productions ?
- **Durabilité ou impact environnemental** : les exigences de durabilité impliqueraient a priori la fabrication de produits plus robustes, plus résistants à la dégradation par l'air et le soleil, etc. Ce qui pourrait être contradictoire avec le besoin de gérer la fin de vie (car le recyclage a ses limites). La réponse passe probablement par un questionnement sur la notion d'investissement et l'analyse du cycle de vie ;
- **Nouveaux matériaux ou impact sur la santé et l'environnement** : le besoin en nouvelles fonctionnalités, matériaux plus performants, etc. favorise le foisonnement des nouveaux matériaux, avec un risque sur notre capacité à suivre en termes d'études de toxicité. La question de la toxicité combinée ne peut d'ailleurs probablement pas être résolue. En d'autres termes, la course aux nouveaux matériaux nous bouscule dans la rapidité à apporter des réponses satisfaisantes en termes de risques écologiques. L'acceptabilité sociale est en tout cas une dimension à prendre en compte. L'exemple le plus flagrant est le déploiement actuel des nanomatériaux, dans des usages qui ne sont pas tous abordés dans une logique service rendu / risque potentiel (dans certaines applications cosmétiques par exemple).

On peut très bien accepter pour les deux premiers points, et pour certains usages particulièrement techniques, une fin de vie par l'incinération...mais dans une logique de "durabilité forte", il faudrait alors également utiliser une source renouvelable, ce qui implique des contraintes supplémentaires.

Les antagonismes entre exigences économiques et sociales et exigences environnementales :

Se posent notamment :

- La question de la création de la valeur d'emploi adossée à la consommation croissante de matière et d'énergie ;
- Les questions sociales de l'adaptation de filières qui seraient destinées à disparaître (de manière réglementaire) pour des raisons environnementales ou d'arbitrage défavorable ;
- Les questions de transition et la capacité à évoluer suffisamment rapidement par rapport à une augmentation importante des flux et des procédés standards (croissance mondiale sous forme majoritairement de *business as usual*) ;
- Les questions de propriété intellectuelle et de concurrence basée notamment sur la différenciation, là où le besoin normatif et de standardisation est énorme pour assurer la modularité et la possibilité de réparer les objets. Le modèle d'innovation est donc peut-être lui-même à remettre en question.

1.2.3.2. Des pistes de résolution des antagonismes

Il semble bien qu'une piste de résolution d'un certain nombre d'antagonismes soit un mode ou un autre de valorisation monétaire de la durabilité, dont l'exemple emblématique pourrait être la mise en place d'une taxe carbone.

De tels mécanismes sont mis en place dans des méthodologies de type ACV (analyse du cycle de vie), qui mériteraient probablement une certaine mise en cohérence, par les pouvoirs publics, entre les différents acteurs (décisions d'arbitrage entre des grands paramètres comme l'énergie / les gaz à effet de serre, l'eau et les matières premières par exemple, hypothèses implicites ou cachées, etc.).

Cependant, la plupart de ces antagonismes adressent des dimensions différentes et souvent non "chiffrables" (qualité de vie, confort, biodiversité, risque global...) et ne peuvent être résolus que par des choix de société, les avis d'expert pouvant être éclairants mais ne permettant pas de trancher.

Comment, en effet, répondre aux questions suivantes :

- Quels "usages chimiques" des sols accepte-t-on au détriment des usages alimentaires ? localement et globalement ?
- Comment chiffrer la perte de la biodiversité ? Fixer le prix des matières premières non renouvelables (métaux par exemple) dans la logique des besoins des générations futures ?
- Quels risques sommes-nous prêts à prendre sur les nanomatériaux, entre des matériaux super-isolants et des crèmes solaires transparentes ?
- Jusqu'à quel point doit-on maintenir des filières pourvoyeuses d'emplois mais destructrices pour l'environnement (la question est plus large que le secteur de la chimie) ?
- Etc.

Les différents engagements du Grenelle de l'environnement montrent bien les difficultés à résoudre les antagonismes liés aux finalités multiples du développement durable. Les engagements au titre d'un groupe de travail renvoient ainsi aux exigences d'un autre groupe, on propose de développer tel ou tel champ d'action "dans la limite" des objectifs portés par d'autres groupes de travail, mais sans que ces limites soient explicitées.

Les antagonismes n'ont donc pas été arbitrés explicitement, et ne peuvent probablement l'être qu'au cas par cas, tantôt à un niveau national ou supranational (choix d'un type d'énergie à développer, d'un mix énergétique cible, d'une politique de transport ferroviaire par exemple) tantôt à une échelle plus régionale ou locale (choix d'urbanisme, implantation d'équipements, etc.).

C'est la vision au niveau national (quelle politique française suivre en matière de développement durable ?) et supranational (quelles orientations proposer à l'échelle européenne et mondiale ?) qui mériterait d'être clarifiée, en explicitant un certain nombre de choix et d'arbitrages entre les antagonismes identifiés.

Mais finalement un des grands défis est peut-être la capacité à imaginer et à mettre en œuvre des outils et moyens de traitement opérationnel de ces antagonismes. La question de la gouvernance pour le faire est probablement centrale.

Un exemple sur les agroressources

Le choix à titre d'exemple des agroressources comme matière première de la chimie nous paraît riche d'enseignements, car :

- Il est emblématique des possibilités de faire de la "chimie durable" et de s'affranchir d'une certaine dépendance aux matières premières fossiles ;

- Il est porteur de forts antagonismes, la plupart difficilement réductibles au sein d'équations économiques (faim dans le monde, perte de biodiversité, question des OGM, etc.) ;
- Le précédent des agrocarburants de première génération est assez édifiant sur le passage dans l'opinion publique d'une image de solution miracle à celle d'un scandale humanitaire, qui laisse penser que la question des agroressources chimiques devra être abordée avec méthode et réflexion.

Les questions autour des agroressources sont donc les suivantes :

- Quelle part peuvent prendre à terme les agroressources dans les matières premières chimiques ? Qu'est-ce qui est techniquement réalisable, économiquement envisageable et moralement souhaitable ?
- Faudrait-il privilégier certains usages et orienter la recherche et la réglementation dans ce sens ?

Un premier niveau d'analyse – qui mériterait très probablement d'être creusé, en préparation de la déplétion des ressources fossiles à venir – portant sur 3/4 des 400 millions de tonnes de carbone annuellement extraites sous forme fossile, nous montre que (cf. figure 1.11) :

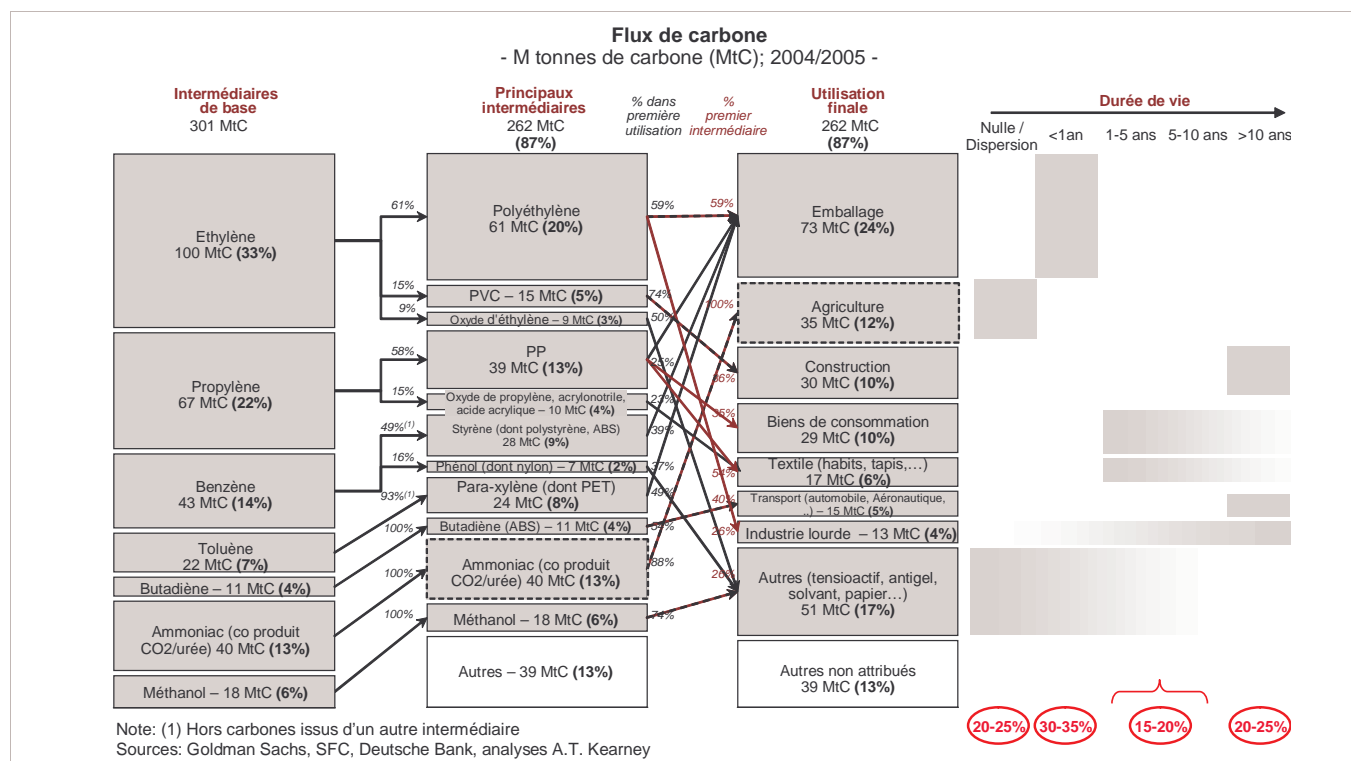
- 20 à 25% des usages sont dispersifs¹, sans possibilité de recyclage donc ;
- 30 à 35% des usages correspondent à une durée de moins d'un an, avec des possibilités de recyclage très variables (emballage principalement) ;
- 15 à 20% constituent le cœur de cible de l'"économie circulaire", avec des usages correspondant à une durée de vie de 1 à 10 ans et des possibilités de recyclage plus fortes (transport terrestre, biens de consommation...) ;
- 20 à 25% des usages correspondent à des durées de vie supérieures à 10 ans, dans une logique d'investissement (transport aérien et maritime, habitat, industrie lourde...).

En mettant de côté les engrais (l'hydrogène pouvant être produit par une autre voie), restent 40 à 50% des usages à durée de vie très courte et peu recyclable (passage par le consommateur final, mélange...).

Dans la logique de flux exposée précédemment (tout ce qui est à durée de vie courte et non recyclable devrait être à terme source renouvelable), c'est donc de l'ordre de 150 à 200 millions de tonnes qu'il faudrait pouvoir fournir à terme par les écosystèmes...à hypothèse de croissance nulle. S'y rajouteraient ensuite les besoins de remplacement du stock sur les produits de moyenne durée de vie et les besoins d'investissement (montant du même ordre de grandeur).

¹ Pour les engrais (35 millions de tonnes soit 12% du carbone fossile), le carbone est dispersé dès la phase de production du produit sous forme de CO₂

Figure 1.11 – Flux de carbone des grands intermédiaires chimiques aux secteurs finaux



En fonction des hypothèses de rendement agricole à l'hectare variable selon la plante et la localisation (0,5 à 3 tonnes équivalent pétrole, disons 1 tep pour fixer les idées), une production de cet ordre impliquerait une mise en culture dédiée au niveau mondial de 1 à 2 millions de km², soit une surface équivalente aux grandes cultures comme le blé (2,1 Mkm²) ou le maïs (1,4 Mkm²), et plus que ce qu'il est prévu de mettre en culture d'ici 2030, d'après la FAO (Food and Agriculture Organization). Ce n'est pas impossible cependant sur le papier à moyen terme, mais au prix d'arbitrages douloureux avec les forêts et les usages alimentaires.

On pourrait rétorquer que la chimie des matières premières végétales pourrait se baser :

- **Sur les déchets de plantes uniquement.** C'est effectivement possible (même si c'est techniquement beaucoup plus compliqué à un horizon plus lointain car les procédés chimiques actuels s'accordent mal à la diversité moléculaire du vivant), mais cela ne résoudrait pas entièrement les problèmes : en effet se poserait encore la question de la perte minérale des sols (en ce sens, une utilisation des déchets de biomasse à usage énergétique, sur des circuits courts, avec retour des cendres aux terres cultivées pour maintenir l'équilibre minéral des sols, paraît en première intention beaucoup plus crédible) ;
- **Sur des cultures basées en zones arides ou sur sols pauvres,** non cultivables ou non exploités pour l'instant. Mais on pourrait toujours rétorquer que ces zones pourraient être également cultivées pour des usages alimentaires à terme (avec des plantes bien sélectionnées), vu les besoins futurs (passage de 6 à 9 milliards d'habitants à l'horizon 2050), ou même énergétiques.

Il est donc plus probable que la chimie des agroressources restera très en deçà de ces chiffres, et donc ne pourra pas couvrir ne serait-ce que les usages dispersifs et à courte durée de vie. L'antagonisme lié à la concurrence d'usage des sols est donc entier et ne doit pas être négligé.

Ceci ouvre alors le débat des usages qui devraient être privilégiés : hygiène, santé, peintures & vernis, colles, encres, emballages alimentaires, textile ? Ou automobile, aéronautique ? Quels intermédiaires clés et quelles cultures pour ces usages ?

Et dans la foulée de l'orientation que devrait prendre la recherche ? car les usages les plus faciles à positionner sur le marché aujourd'hui ne sont pas forcément ceux qui seront utiles le moment venu.

Une logique tout économique du laisser-faire, en laissant ressources et produits trouver leur voie opportuniste vers des marchés pertinents à court terme mais pas forcément à long terme, peut ainsi s'avérer contre-productive pour gérer ce type d'antagonisme.

Mais il ne s'agit pas d'aboutir à des réflexions trop générales (comme un "classement" des meilleurs usages) qui stériliseraient la démarche, mais bien d'apporter des clés de lecture permettant :

- soit de convenir d'usages "impropres" ;
- soit de faire sens à des initiatives comme on en voit apparaître dans des domaines circonscrits.

1.3. Chimie durable – Base stratégique

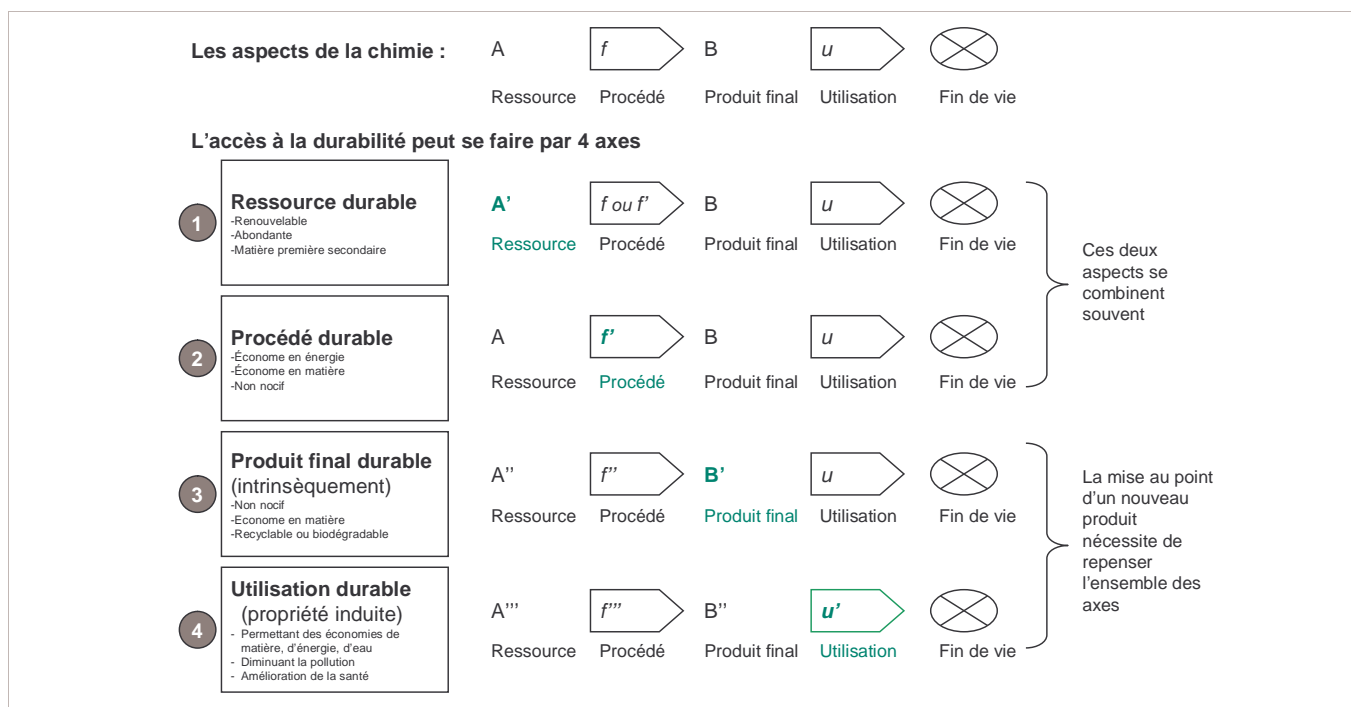
1.3.1. Les voies d'accès à la durabilité pour la chimie

Fondamentalement, la chimie consiste à transformer de la matière : à partir de ressources, un procédé permet d'obtenir une nouvelle matière. Cette matière elle-même plus ou moins durable (selon sa consommation de ressources, sa capacité à être recyclée ou biodégradée, etc.) peut contribuer par son utilisation à l'amélioration de la durabilité des industries en aval de la chaîne de valeur.

Les voies d'accès à la durabilité sont donc (cf. figure 1.12) :

- L'évolution dans les ressources utilisées ;
- L'évolution des procédés de fabrication ;
- L'amélioration du produit final ;
- La contribution à la durabilité en aval.

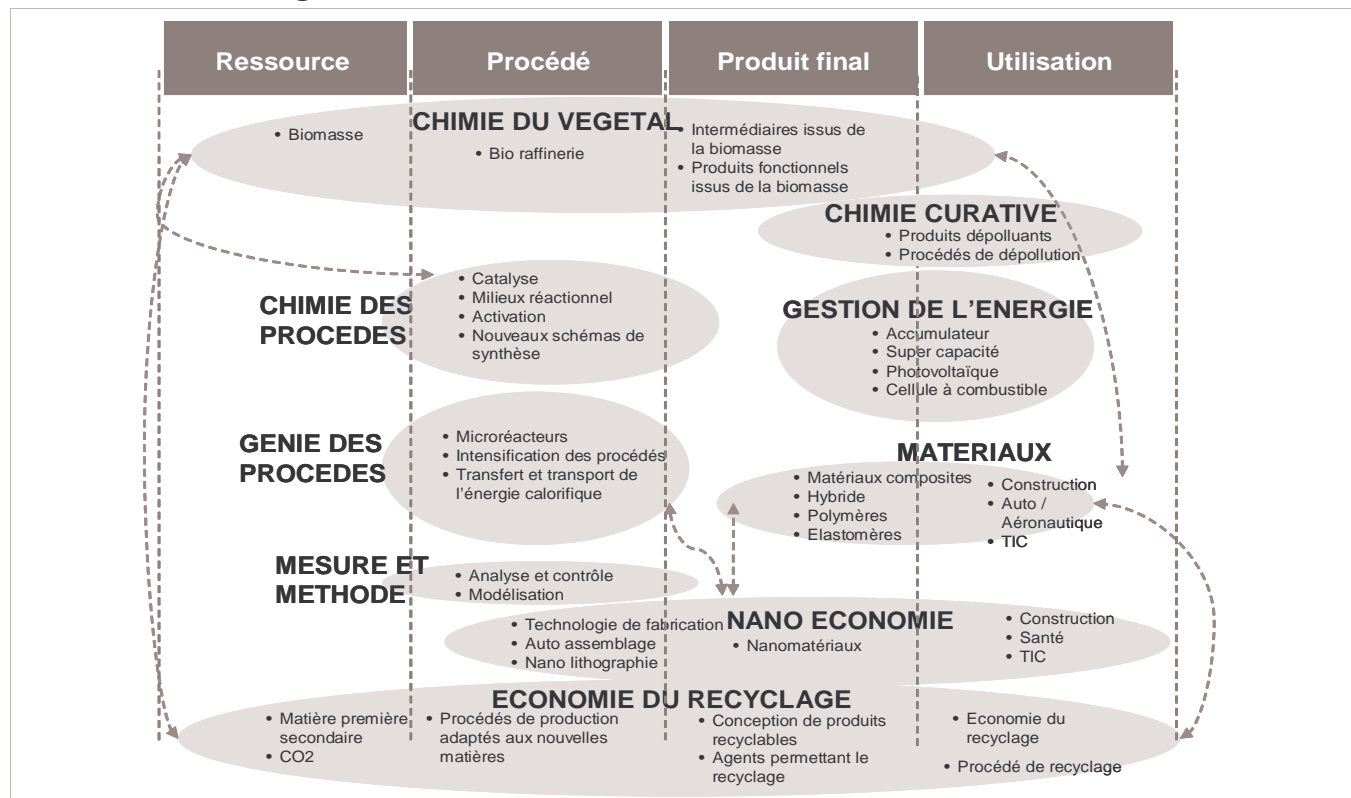
Figure 1.12 – Axes d'accès à la durabilité



Cependant, ces grands axes ne peuvent être considérés de façon totalement indépendante. S'ils correspondent à une façon d'approcher la problématique de la chimie durable, ils ne correspondent pas aux solutions qui elles se trouvent généralement à l'intersection de plusieurs de ces axes : l'exploitation de nouvelles ressources va nécessiter l'adaptation des procédés de fabrication, un nouveau produit aura une utilisation induite modifiée et sera produit selon un nouveau procédé...

Au final, les grands thèmes d'évolution durable de la chimie concernent plus ou moins chacun de ces axes, comme schématisé dans la figure 1.13.

Figure 1.13 – Grands thèmes d'évolution durable de la chimie



Neuf grands thèmes d'évolution de la chimie peuvent ainsi être identifiés, portant sur différents axes d'accès à la durabilité.

En premier lieu, trois thèmes mis en avant par l'industrie chimique sont très directement liés à l'évolution de la demande et des usages des filières en aval. Il s'agit donc des marchés en développement, poussés par les exigences du développement durable, et le gain de durabilité attendu se situe principalement dans l'usage du produit :

- **Gestion de l'énergie** : la chimie est impliquée dans l'ensemble des projets poussés par le Grenelle de l'environnement, l'ANR, Suschem pour améliorer la gestion de l'énergie. Il s'agit principalement des recherches sur le stockage de l'énergie (accumulateurs, piles à combustible...) ou encore sur l'amélioration des rendements du photovoltaïque.
- **Matériaux** : les matériaux composites, hybrides, les nouveaux polymères ou élastomères permettent par exemple d'améliorer l'isolation thermique et phonique de bâtiments, disposer de nouvelles solutions de soins en santé, ou encore de réduire le poids (donc l'énergie nécessaire) des moyens de transport sans nuire à la sécurité...

Essentielle à la compétitivité des marchés aval, soit par contrainte réglementaire comme pour la construction et l'automobile ou par contrainte économique comme pour l'aéronautique, cette recherche est naturellement poussée par les acteurs économiques de la chimie car elle est porteuse d'une forte valeur ajoutée.

Cette recherche sur les nouveaux produits finaux de la chimie inclut aussi la substitution de substances toxiques par des substances non toxiques, issues ou pas de la biochimie.

- **Nanoéconomie** : de façon similaire, les nanotechnologies sont une façon high-tech d'aborder la problématique de matériaux plus performants pour des applications spécifiques. Nouvelles, ces solutions requièrent en outre l'adaptation des procédés de production et l'étude des usages appropriés en santé, technologies de l'information et communication ou construction.

Deux thèmes d'évolution ont une incidence transverse et peuvent bouleverser l'ensemble des filières :

- **La chimie du végétal** : la chimie de la biomasse peut être une réponse pour s'affranchir partiellement des ressources fossiles. Cette thématique englobe la recherche sur les matières premières utilisées, les procédés de fabrication à adapter, les intermédiaires et produits nouveaux que l'on peut obtenir et valoriser.
 - La première génération de biochimie portait sur l'utilisation de céréales (maïs, blé) ou sucres (canne, betterave) pour produire des diester, du bioéthanol. Déjà opérationnel en termes de technologie et d'activité économique, cet axe donne aujourd'hui lieu à relativement peu d'efforts complémentaires, compte tenu du faible rendement et des conflits d'intérêts majeurs avec les ressources alimentaires. Cependant, l'industrie chimique actuelle continue de développer de nouveaux produits (tensioactifs, solvants...);
 - La seconde génération porte sur l'usage de biomasse non alimentaire (bois, paille) et la troisième génération sur l'usage d'algues. En sus de la recherche sur les procédés d'exploitation et sur la valorisation de ces produits, des efforts significatifs sont déployés par les organismes publics dans la recherche, très amont, de plantes pour la chimie du futur : non alimentaire, poussant facilement et abondamment sans perturber l'utilisation des ressources naturelles, à fort rendement, avec des molécules "intéressantes"...;
 - L'exploitation de la biomasse nécessite une évolution des procédés. La "bioraffinerie", permettant de traiter des produits d'entrée diversifiés et d'obtenir une large gamme de synthons en sortie, avec peu de déchets et d'énergie consommée, reste une perspective à très long terme. Cependant, les recherches sur les procédés d'extraction, de séparation, de fractionnement de la biomasse sont importantes (tirées notamment par les besoins en bioénergie). Les étapes plus spécifiques du procédé comme la fonctionnalisation des molécules et la formulation ne sont à ce stade poussées significativement que par quelques acteurs focalisés ;
 - Enfin, la chimie du CO₂ est un axe potentiellement prometteur (même s'il paraît compliqué du fait de la stabilité chimique de la molécule) et qui donne lieu à relativement peu d'efforts de recherche à ce stade, conditionnés par la problématique de capture et stockage du CO₂.
- **L'économie du recyclage** implique une évolution sur les matières premières, les procédés, la conception des produits, la façon de les utiliser et de gérer leur fin de vie. Il s'agit donc pour la chimie :
 - de concevoir, en cohérence avec les filières utilisatrices, des matériaux possédant les mêmes fonctionnalités mais facilitant le recyclage (standardisation, assemblages plutôt que mélanges, réduction ou standardisation des additifs, signalétique, etc.) ;
 - d'intégrer les matériaux recyclés dans de vraies filières de production. En effet, la plupart des usages actuels des matériaux recyclés sont en fait "dégradés" (de la bouteille au mobilier de jardin). Dans une logique de jeu sur le stock, il faudra "circulariser" les atomes

de carbone, donc intégrer les filières de recyclage dans la production primaire (comme pour une partie de l'acier ou du verre par exemple).

Trois thèmes concernent essentiellement l'amélioration de la durabilité intrinsèque de l'industrie chimique.

- **La chimie des procédés** regroupe les travaux relatifs aux modalités réactionnelles : la catalyse, les milieux réactionnels, les schémas d'activation ou encore de nouveaux schémas de synthèse. La recherche est assez active avec l'implication d'une grande diversité d'acteurs : chercheurs académiques, start-up industrielles.

En particulier, les différentes formes de catalyse (homogène, hétérogène, enzymatique...) connaissent d'importants progrès. De nouveaux catalyseurs sont très régulièrement identifiés et la recherche amont se poursuit encore. La France dispose de compétences reconnues dans ce domaine.

En outre, si la catalyse permet d'améliorer le rendement des réactions, voire de réduire les consommations énergétiques (catalyse enzymatique par exemple), elle doit être mise au point de façon spécifique selon l'usage attendu. Une économie indépendante de la catalyse passe par la capacité à fournir des services, notamment de définition du catalyseur en fonction du produit.

- **Le génie des procédés** consiste à améliorer l'efficacité énergétique et de consommation de ressources par le recours à une nouvelle conception des sites de production et à de nouveaux outils. Le sujet emblématique de ce thème porte sur les microréacteurs. De nombreux programmes sont concernés par ces aspects (ANR, Suschem, Oséo...). Avec une rentabilité (et une durabilité) évidente dès lors qu'ils engendrent des économies de matière et d'énergie, cet axe de recherche est bien accueilli et même favorisé par les industriels. Certaines recherches commencent à porter leurs fruits, et pourraient même être utilisées prochainement par certains acteurs. Cependant, indépendamment de la maturité des solutions, le contexte économique et le long cycle de renouvellement des investissements sont peu propices au déploiement rapide de nouvelles technologies (15 ans environ ?).
- **Mesure et méthode** : il s'agit des méthodes et outils pour mesurer, comprendre, modéliser, anticiper et optimiser des réactions. Ceux-ci ont énormément progressé et permettent les recherches sur l'optimisation des procédés, le développement de nouvelles molécules, l'analyse du cycle de vie, etc.

Enfin on trouve un dernier thème qui semble émerger :

- **La chimie curative** : nouvelle activité, poussée par la prise de conscience des enjeux sur l'environnement et la biodiversité, la chimie curative consiste à trouver les moyens de dépolluer un environnement (eau, sol,..), en lien avec les "biotechnologies jaunes". Elle manque encore à ce stade de modèle économique pour décoller et les contours en sont mal définis.

1.3.2. Les enjeux

1.3.2.1. Degré de maturité et horizon de déploiement

La perspective de mise sur le marché, à une échelle industrielle, des nouveaux produits ou procédés, dépend du degré de maturité technologique (pouvant lui-même évoluer en fonction de l'effort de recherche), du contexte économique (viabilité économique des solutions, marchés pertinents, attente des clients) et de l'évolution réglementaire (incitations ou interdictions...).

Au niveau des efforts de recherche, on constate :

- Une prise de conscience relativement généralisée des chercheurs et industriels qui amène à prendre en compte dans les recherches appliquées et les nouveaux développements les enjeux de durabilité. On voit ainsi se développer les méthodologies d'analyse de cycle de vie, le travail incrémental sur certains procédés, etc.
- Le cœur de l'effort de recherche appliquée porte sur les procédés – cf. notamment les avancées significatives sur la catalyse et les microréacteurs par exemple – et les marchés en développement (particulièrement l'énergie et certains matériaux techniques), permettant non seulement d'améliorer la durabilité mais aussi la compétitivité économique et la différenciation des industriels, donc un effort de recherche fortement tiré et orienté par les marchés aval.
- Des projets de recherche fondamentale, donc très en amont, dans plusieurs domaines, comme par exemple la sélection des plantes les plus prometteuses en tant qu'agroressources, les nouveaux matériaux comme les hydrures pour le stockage solide de l'hydrogène, ou les procédés en chimie aqueuse au lieu de milieux solvants.

La perception actuelle, par les différentes parties prenantes, de l'horizon de déploiement des différents thèmes est la suivante (cf. figure 1.14) :

- Sur les thèmes tirés par les marchés aval (gestion de l'énergie, matériaux), les évolutions attendues sont plutôt rapides ;
- Les évolutions techniques de la chimie (procédés) sont attendues de manière continue, y compris de manière significative à court terme ;
- Quelques avancées emblématiques sont attendues en bioéconomie, mais globalement bioéconomie et recyclage sont plutôt des sujets de moyen terme.

Figure 1.14 – Horizon de déploiement

	Grands thèmes	Horizon				Commentaires
		<5 ans	5-10 ans	10-15 ans	>15 ans	
1	Gestion de l'énergie	Très probable	Probable	Peu probable		<ul style="list-style-type: none"> • Avancées significatives en cours (ex photovoltaïque, batteries...) • Ruptures (stockage de l'énergie) à plus long terme
2	Matériaux	Très probable	Probable	Peu probable		<ul style="list-style-type: none"> • Avancées permanentes sous l'impulsion des industries aval + recherches
3	Economie du recyclage	Peu probable	Probable	Très probable	Probable	<ul style="list-style-type: none"> • Ensemble des leviers encore à activer : conception des produits, procédés, modalités de traitement, évolution sociologique nécessaire...
4	Nano économie	Probable	Très probable	Peu probable		<ul style="list-style-type: none"> • Nombreuses recherches, start-up dans le domaine ; transition industrielle à réussir
5	Chimie du végétal	Très probable	Probable	Peu probable	Probable	<ul style="list-style-type: none"> • Quelques rares applications industrielles aujourd'hui • Recherche fondamentale en cours pour aller beaucoup plus loin
6	Chimie curative	Probable	Peu probable	Très probable	Très probable	<ul style="list-style-type: none"> • Nouveau sujet
7	Chimie des procédés	Très probable	Très probable	Très probable	Probable	<ul style="list-style-type: none"> • Nécessité d'établir le lien entre recherche fondamentale et application industrielle
8	Génie des procédés	Très probable	Très probable	Probable	Probable	<ul style="list-style-type: none"> • Mise en œuvre progressive
9	Mesure et méthode	Très probable	Peu probable			<ul style="list-style-type: none"> • Pré-requis – priorité partagée mais difficulté de traduction industrielle faute de tissu économique adapté

Légende : Très probable Probable Peu probable

1.3.2.2. Ampleur des mutations

L'ampleur des mutations sur chacun des thèmes dépend :

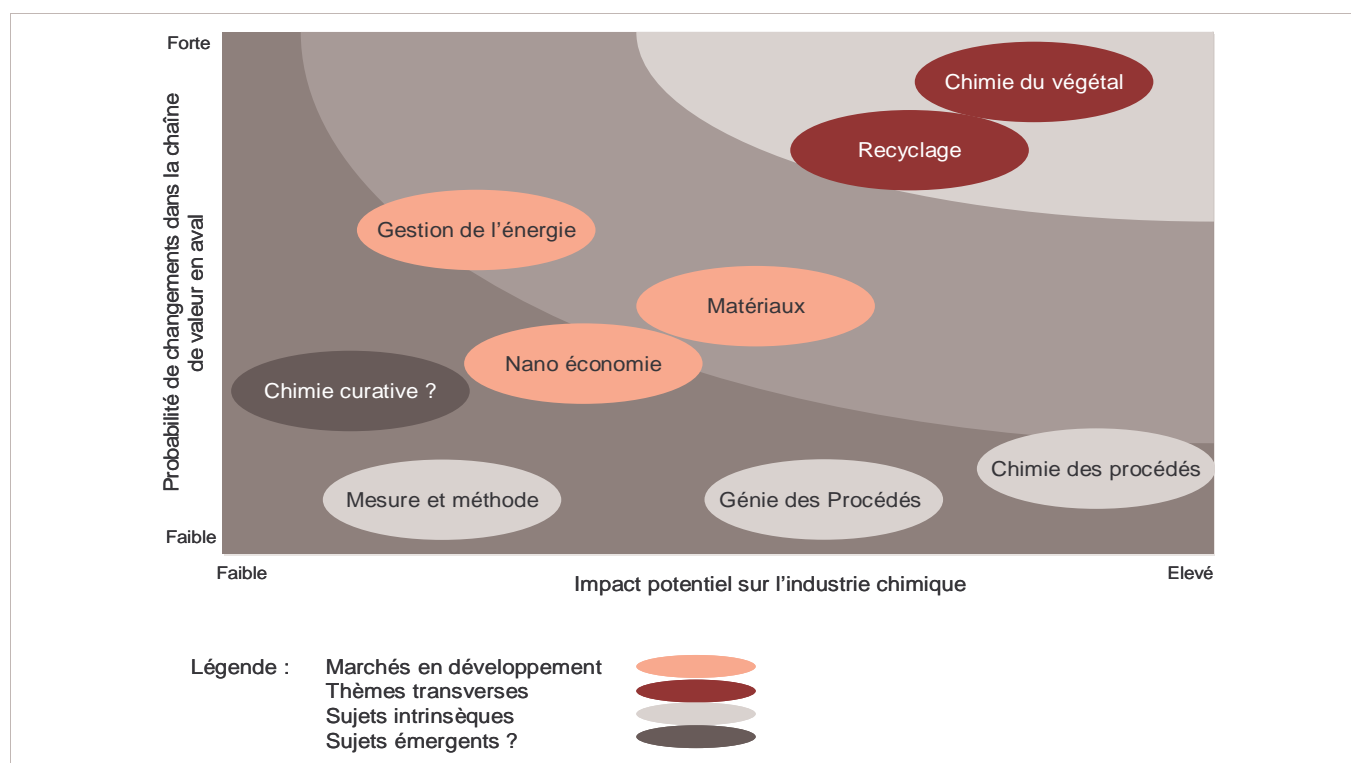
- du gain "effectif" en termes de durabilité : s'agit-il d'un sujet qui va améliorer les choses de manière marginale – par exemple avec un effet unitaire fort sur un procédé mais agissant sur un faible volume de produits concernés – ou à une échelle importante permettant un fort effet de levier – par exemple un gain de rendement dans les domaines du transport ou de l'énergie ? La taille des marchés concernés est donc un facteur majeur mais non exclusif.
- de l'impact potentiel sur l'industrie chimique : s'agit-il d'une évolution "normale" de la chimie (le développement de nouveaux matériaux dans une logique d'innovation produits qui se poursuit depuis toujours) ou en rupture, donc d'une nouvelle manière de concevoir et d'appréhender le rapport aux fournisseurs, à la production et aux clients (comme l'économie du recyclage ou la logique de clusters industriels par exemple) ?
- Du bouleversement des chaînes de valeur, en amont et en aval, comme dans le cas de la bioéconomie et du recyclage (apparition de nouveaux acteurs, intégration de sources différenciées et potentiellement en concurrence, partenariats permettant une économie de la fonctionnalité, etc.).

Nous présentons, ci-dessous, l'ampleur des thèmes d'évolution de la chimie selon ces deux derniers critères (cf. figure 1.15) :

- Chimie du végétal et recyclage sont les deux thèmes majeurs, impactant fortement le secteur de la chimie et les chaînes de valeur ;
- La gestion de l'énergie, via les technologies de stockage, de catalyse, les énergies renouvelables, les piles à combustible, etc. vont modifier fortement le marché de l'énergie sans changement considérable pour les acteurs de la chimie ;
- Les nouveaux matériaux, y compris les composites et les nanomatériaux, vont stimuler l'innovation produit dans les industries aval ;
- Le génie des procédés permettra essentiellement des économies d'énergie et de matière au sein du secteur chimique, sans grande perturbation ;

Des bouleversements importants sont à attendre au sein du secteur dans la chimie des procédés, comme les catalyseurs innovants ou les microréacteurs.

Figure 1.15 – Ampleur des mutations



Bien entendu, cette vision "macro" gagnerait à être précisée, selon une logique de segmentation thèmes / sous thèmes et dans une logique dynamique, au fur et à mesure que l'on évoluera de la recherche fondamentale au développement industriel.

1.3.3. Les initiatives actuelles

De très nombreuses initiatives en France et en Europe traitent ou concernent la chimie durable. Ce foisonnement, témoin de l'intérêt des acteurs industriels, académiques ou institutionnels pour cette problématique, est à la fois prometteur de richesse créatrice, mais aussi symptomatique d'un sujet neuf, encore mal appréhendé, et qui peut souffrir d'un défaut de cohérence en particulier en ce qui concerne les choix d'orientation de politique publique et de lobbying au niveau européen.

Sans prétendre à l'exhaustivité, nous recensons ci-après les principales initiatives en mettant en évidence les différences de parti pris (cf. figure 1.16).

Figure 1.16 – Principales initiatives et répartition des efforts

Grands thèmes	CNRS	ANR (CPDD)	SUS-CHEM	végétal	Assoc Chimie du végétal	COST	INRA	compétitivité	Pôles de	Oseo	Indus-triels
i1		H2 & piles, bioénergies, stockage									
2		Matériaux fonctionnels								Molécules chirales, chimie fine	
3											
4		Nano sciences & nano-tech.									
5	Ressources	Bio-ressources								Biotech. industrielles	
6		Contaminants, écosyst., santé									
7	Schémas de synthèse	Synthèse							catalyse	Catalyse Solvants...	
8	Chimie des procédés	Procédés verts & surs								intensification	
9	Chimie analytique									Modélisation & simulation	

Importance des efforts de recherche : **Significative** **Faible** Nulle

Sur ce rapide panorama, on constate clairement :

- Une forte implication sur les sujets des nouveaux marchés à haute technologie (énergie, matériaux), ce qui est logique puisque les opportunités d'application immédiate y sont les plus visibles ;
- Une forte volonté de traiter des sujets d'amélioration des pratiques des industries chimiques (procédés, mesures et méthodes...), ce qui se comprend compte tenu de l'exposition du secteur aux différentes problématiques du développement durable, de l'évolution continue de la réglementation et de la pression sur les coûts (prix de l'énergie, etc.) ;
- Une présence systématique du sujet des agroressources, qui joue un rôle emblématique dans la communication autour de la chimie durable ;
- Une carence évidente autour de l'économie du recyclage : sans dresser l'inventaire exhaustif des initiatives, il semble que cet axe de travail soit peu répandu en France et mériterait probablement de plus amples efforts, eu égard aux enjeux et aux potentialités décrites précédemment ;
- Une deuxième carence sur le chimie curative, ce qui peut s'expliquer par le fait que ce sujet n'est encore qu'une ébauche aux contours mal définis.

Il est compréhensible que le sujet du recyclage n'ait pas été pour l'instant considéré, à de rares exceptions près, à sa juste valeur. En effet, il s'agit d'un sujet d'une complexité plus grande, nécessitant une approche pluridisciplinaire et multiacteurs (producteurs, utilisateurs, collecteurs) reposant sur un modèle économique éventuellement nouveau (écoconception, durée de vie longue, facturation d'une

fonctionnalité), reposant souvent sur de nouveaux comportements de société, et qui au global peine à trouver sa place sur le marché sans nouvelles contraintes réglementaires ou incitations.

Cependant les enjeux du recyclage ne sont pas seulement sociétaux ou économiques, mais bien technologiques dans un certain nombre de cas : capacité à réintégrer les matériaux collectés dans les procédés actuels, séparation des matériaux, etc.

1.3.4. Les contours de la chimie durable

Sur la base des considérations précédentes, les contours de la chimie durable se dessinent autour de quelques grandes caractéristiques que nous proposons ci-dessous.

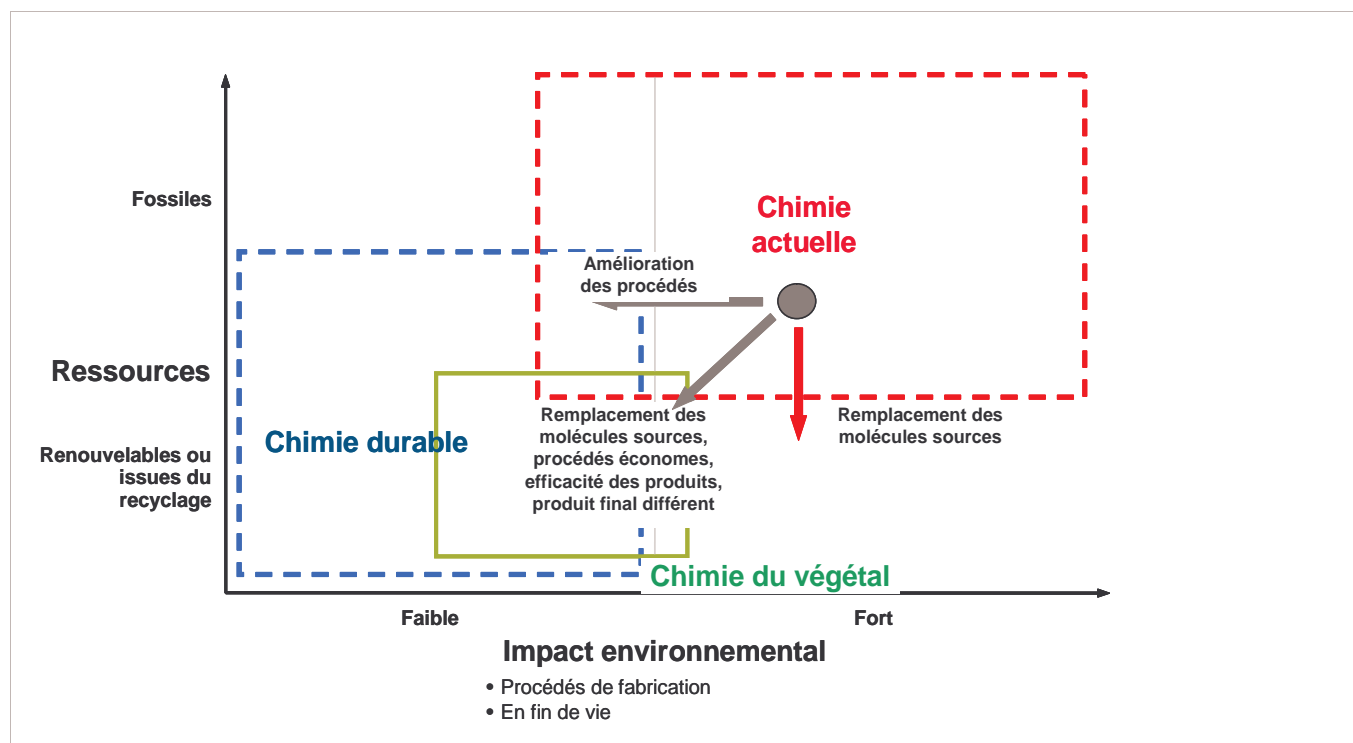
- **Une chimie qui fait appel aux ressources végétales et aux biotechnologies quand cela fait sens**

L'articulation entre les concepts de chimie durable et chimie du végétal est un point critique dans la mesure où ces notions peuvent être confondues, notamment par le grand public, à travers la notion de "chimie verte". Il s'agit pourtant de deux mondes bien distincts, qui ont aujourd'hui tendance à se rapprocher dans la recherche d'alternatives aux ressources fossiles.

Sur la base d'une double dimension ressources / impact environnemental (cf. figure 1.17), on peut établir que :

- À moyen terme, la chimie durable devrait être une chimie à faible impact environnemental, basé principalement sur des ressources renouvelables ou issues du recyclage, mais pas exclusivement : même à long terme, on peut imaginer d'utiliser certaines ressources fossiles abondantes mais inexploitable comme sources d'énergie (c'est le cas de la plus grande part des schistes bitumineux et des sables asphaltiques), à un usage exclusivement chimique (applications critiques pour la santé, etc.) ;
- La chimie du végétal est la chimie des ressources renouvelables, mais pas exclusivement puisqu'une chimie du CO₂ est également envisageable, par exemple ;
- La chimie actuelle est largement une chimie basée sur les ressources fossiles, à fort impact environnemental. Mais il y a déjà des filières végétales et une partie de la chimie est sans impact majeur (il conviendrait d'ailleurs ici de distinguer chimie de base, chimie des intermédiaires et chimie de spécialité).

Figure 1.17 – Chimie du végétal et chimie durable



Un couple produit / procédé (symbolisé ci-dessus par le point gris) peut donc :

- Réduire son impact environnemental par l'amélioration des procédés ;
- Être substitué entre source fossile et source végétale, mais sans modification fondamentale du procédé ou du produit final, et donc conserver (selon les cas) un impact environnemental fort. C'est le cas notamment pour certains intermédiaires ;
- Être substitué entre source fossile et source végétale, avec l'utilisation de la biotechnologie blanche pour le procédé (en général largement bénéfique au niveau environnemental) ; le produit final peut également être différent tout en possédant la fonctionnalité recherchée (c'est le cas de certains tensioactifs par exemple).

La chimie du végétal, au sens des ressources végétales et des procédés qui peuvent lui être associés, est donc une voie privilégiée, mais non exclusive, de la chimie durable.

Réciproquement, une partie de la chimie du végétal ne peut sans doute pas prétendre à être une chimie durable. Il s'agira, au cas par cas, d'analyser les avantages de chaque solution de substitution (analyse de cycle de vie, bilan carbone, etc.), avec en arrière-plan les antagonismes potentiels associés à l'utilisation chimique de certaines ressources renouvelables.

C'est pourquoi la chimie durable doit être une chimie qui fait appel aux ressources renouvelables uniquement quand cela fait sens au regard des différents critères de durabilité.

En particulier, la question de l'antagonisme majeur lié à la concurrence d'usage des sols doit être traitée.

Compte tenu du fait que c'est bien l'effet volume qui pose problème dans cet antagonisme, une piste pourrait être de faire appel aux ressources renouvelables uniquement pour des usages de spécialité, à

faible volume, plutôt que des usages de commodité à fort volume. Cette considération rejoint d'ailleurs bien la logique économique (non subventionnée), le surcoût des agroressources par rapport aux pétroressources pouvant être plus facilement absorbé par des filières à haute valeur ajoutée.

A nouveau, sur cette clé de lecture, un engagement de certaines filières à augmenter la part des ressources renouvelables (avec des bioplastiques par exemple) devrait être considéré avec précaution.

- **Une chimie qui ne fait pas le pari du "tout technologique"**

Il est clair que deux axes sont aujourd'hui privilégiés par la plupart des acteurs. Les deux sont poussés par un fort contenu technologique.

Le premier axe est lié à la demande en forte croissance des marchés aval et des besoins de développement durable en termes d'eau et assainissement, de transport, d'énergie par exemple. C'est un axe qui convient bien aux acteurs privés qui peuvent développer de nouveaux produits, dans une logique de différenciation et sur des marchés porteurs. C'est le cœur de la "croissance verte".

Le deuxième axe est poussé par les exigences de coût et dans une moindre mesure des contraintes réglementaires, qui forcent les entreprises à améliorer constamment leurs procédés. Il s'agit encore d'un fort contenu technologique. Dans une certaine mesure, l'appel aux agroressources, pouvant contribuer à un prix plus stable et à une sécurité d'approvisionnement plus grande que les ressources fossiles sur le moyen terme, peut être rangé dans cette catégorie. C'est donc l'amélioration continue.

Compte tenu des enjeux de départ (consommation énergétique énorme, économie ouverte consommatrice de ressources et génératrice de déchets, etc.), la croissance verte et l'amélioration continue ne permettront probablement pas une transition vers une économie réellement durable, réduisant (suffisamment vite...) ses flux de matière et d'énergie dans les proportions qui seront nécessaires.

En complément de ces volets technologiques, il y aura donc bien une réflexion sociologique à mener sur nos modes de consommation (cf. économies de la fonctionnalité et de la frugalité décrites précédemment...). La manière dont la filière automobile semble commencer à se remettre en question dans ses réflexions de sortie de crise – vers un abandon du "toujours plus d'équipements, etc." vers la question du "juste besoin" – est intéressante de ce point de vue.

La chimie durable se doit donc d'être partie prenante de ces réflexions plus larges, ne serait-ce que pour anticiper les mutations des besoins à venir et pas simplement subir l'impact des secteurs clients.

- **Une chimie qui agit de manière proactive au sein des filières**

La chimie ne peut pas se décréter durable en elle-même. Les filières utilisatrices sont omniprésentes que ce soit au titre des besoins exprimés, des modes d'utilisation (comment minimiser l'impact de produits phytosanitaires au cours de la mise en œuvre par exemple), de la gestion des déchets.

Les réflexions sur l'écoconception, le recyclage, la modularité et la standardisation permettant la réparation ou la réutilisation, ne peuvent se faire qu'au sein des filières avec toutes les parties prenantes (utilisateurs, producteurs, pouvoirs publics).

Les industries chimiques, au titre de la chimie durable, devraient y contribuer de manière proactive à plusieurs titres :

- Apport d'expertise et conseil sur les produits, leur impact à chaque étape du cycle de vie, leurs substituts éventuels en fonction des fonctionnalités recherchées, etc. ;
- Recherche appliquée sur les technologies de tri et séparation, de recyclage, de réintégration des matières recyclées dans les procédés industriels.

Encore une fois, il nous semble que la thématique de la chimie durable est l'opportunité pour l'industrie chimique de prendre son destin en main en pilotant sa propre transformation, plutôt que subir des changements par le biais de décisions uniquement prises en aval de la chaîne de valeur.

- **Une chimie qui se place dans la posture développement durable mais qui mesure des résultats globaux tangibles**

Une fois les objectifs partagés, se pose ensuite la question de ce que l'on peut appeler "durable". Est-on durable une fois la posture prise (c'est bien la logique du développement durable qui implique une notion de démarche à travers le mot développement), ou une fois le résultat atteint (les activités ont effectivement un impact environnemental nul ou très faible).

Etant donné le point de départ, très loin d'une durabilité "atteinte" pour la grande part des secteurs économiques et la chimie en particulier, il paraît raisonnable de se contenter de la logique de posture.

La chimie durable serait ainsi la chimie qui tend vers la durabilité.

Reste qu'il est alors un peu trop simple de se contenter d'objectifs à très long terme, donc invérifiables et non pilotables (exemple du facteur 4 en 2050 pour l'économie française par exemple) – même s'il est intéressant de se donner une perspective ou une vision – et d'améliorations incrémentales (sur lesquelles il est d'ailleurs pratique de communiquer), sans engagement ou ambition de rythme de la progression.

Il serait donc judicieux de mettre en place et de suivre une série d'indicateurs pertinents (qui existent déjà en partie), ainsi que le système de collecte des informations correspondant, pour mesurer de manière globale l'amélioration du "système chimie" et permettre un pilotage fin.

C'est bien l'idée d'un pilotage par les objectifs plutôt qu'un pilotage par les moyens qui pourrait être la piste de réflexion.

- **Une chimie qui se donne les moyens de gérer les antagonismes**

Chacun des thèmes de la chimie durable est potentiellement porteur d'antagonismes (cf. figure 1.18). Ceux-ci doivent être affrontés – c'est-à-dire effectivement assumés – pour permettre l'arbitrage le plus pertinent en toute transparence et ne pas bloquer les démarches d'innovation qui sont probablement nécessaires même si non suffisantes pour atteindre les résultats escomptés.

Figure 1.18 – Durabilité et antagonismes des grands thèmes d'évolution durable

Grands thèmes	Principaux aspects de durabilité	Eventuels antagonismes
Chimie du végétal	<ul style="list-style-type: none"> • Ressources renouvelables • Moindre toxicité 	<ul style="list-style-type: none"> • Compétition d'usage des sols • Efficacité du bilan énergétique • Bilan économique • Précaution sur les OGM
Chimie des procédés	<ul style="list-style-type: none"> • Economie d'énergie • Economie de matière (ressources / déchets) • Moindre toxicité 	
Génie des procédés	<ul style="list-style-type: none"> • Economie d'énergie et de matière • Moindre toxicité 	
Mesure	<ul style="list-style-type: none"> • Condition pour la connaissance et la maîtrise de l'efficacité et de l'impact environnemental 	
Gestion de l'énergie	<ul style="list-style-type: none"> • Economie d'énergie 	<ul style="list-style-type: none"> • Utilisation de certaines ressources • Toxicité éventuelle • Recyclage
Matériaux	<ul style="list-style-type: none"> • Durabilité indirecte : économie d'énergie, de matière, recyclage... 	<ul style="list-style-type: none"> • Recyclage
Nano économie	<ul style="list-style-type: none"> • Durabilité indirecte : santé, économie de matière, d'énergie... 	<ul style="list-style-type: none"> • Toxicité éventuelle
Economie du recyclage	<ul style="list-style-type: none"> • Economie de matière 	<ul style="list-style-type: none"> • Bilan énergétique ? • Bilan économique • Utilisation de certaines ressources

En premier lieu, il s'agit d'identifier et de reconnaître ces antagonismes. La démarche du Grenelle de l'environnement, structurée en groupes de travail thématiques, n'a pas permis réellement ce travail. On y trouve seulement quelques mentions interthématiques (recommandation dans un groupe de telle ou telle mesure dans la limite des travaux de tel autre groupe, mais sans spécifier réellement ce que devrait être cette limite).

En second lieu, il s'agit de se doter de méthodes et outils accessibles pour prendre conscience des arbitrages nécessaires, aligner les approches type "analyse de cycle de vie", et traiter au mieux les antagonismes avec une approche scientifique quand c'est possible (d'où le besoin normatif par les pouvoirs publics), ou une approche démocratique (d'où le besoin de débat public quand c'est pertinent).

L'enjeu de quantification reste fort, car même un arbitrage démocratique ne pourra être rendu que sur des éléments et des dimensions "qui parlent à tout le monde". Comment rendre simple et "aligner" quantitativement ou qualitativement des problématiques comme :

- La concurrence d'usage des sols ;
- La question de l'économie de ressources, renouvelables ou non ;
- Les notions de temporalité, entre effets court terme / long terme, investissement ;
- Les questions de toxicité, de recyclage ;
- Etc.

• Une chimie qui articule le chemin et la cible

Un des antagonismes majeurs de la chimie durable reste le besoin de transformation très important du secteur (bouleversement du business model avec l'économie de la fonctionnalité et le recyclage, nécessité de se placer en rupture technologique sur les produits et les procédés, transformation

profonde de certaines activités non durables, travail en filière ou en coopération au sein du secteur, etc.) au regard des capacités effectives des acteurs à changer (capacité d'adaptation, évolution des organisations, compétences).

Pour la chimie durable il s'agit donc d'articuler une cible forcément ambitieuse à moyen terme (car la capacité à relever effectivement les enjeux doit être le moteur de la transformation) et la capacité effective des acteurs et de leur environnement à évoluer plutôt de manière incrémentale.

Autrement dit se placer suffisamment en rupture, mais en évitant de "perdre des acteurs en route", notamment des PME, et permettre un chemin qui démontre la viabilité de la cible tout en permettant certaines mutations progressives.

Le chemin choisi sera donc critique pour le tissu économique, en articulant la nécessité d'une recherche fondamentale en rupture sur le long terme, poussée par la recherche publique et de gros industriels (les PME peuvent difficilement participer à ces investissements très longs et coûteux) et le besoin d'un certain pragmatisme industriel avec des ressources et équipements permettant la recherche vers des évolutions à 4-5 ans.

Deux moyens opérants sont à signaler :

- Le fait que la chimie se donne le moyen de "parler à la société" ;
- La nécessité d'une politique économique qui soutienne la transition.

1.4. Les conditions d'une accélération vers la durabilité

Le cycle de mise en œuvre des mutations envisagées – recherche fondamentale, recherche appliquée et développement / formulation spécifique, pilote, lancement industriel – peut être plus ou moins accéléré en fonction des conditions économiques et réglementaires, des conditions sociologiques, des questions d'éducation et de compétences.

La question internationale est également critique pour faire émerger une chimie durable.

1.4.1. Stratégie économique et réglementaire (au regard des marchés)

"Les évolutions se feront à la marge, de façon incrémentale, en fonction de leur rentabilité."

"Jusqu'à 150\$ le baril, le seul endroit où le carbone bio est compétitif, c'est le Brésil. A court terme, il y a plus d'avenir du côté des procédés."

"Le driver principal des évolutions sera l'énergie et son coût."

"Les mutations ne se feront pas sans lisibilité sur les prix et la disponibilité des ressources (inconvenient majeur des bioressources aujourd'hui)."

"La chimie actuelle est déjà aussi verte que possible compte tenu des conditions de marché."

"La forte résilience / viscosité de l'outil industriel tend à ralentir le déploiement des mutations économiques."

"Il faut un mélange de plusieurs drivers de fond pour provoquer les évolutions : taxe carbone, normes techniques... "

Comme en témoigne ce florilège, la viabilité économique sera évidemment le point majeur du déploiement de nouvelles ressources et procédés, de nouveaux produits ou de nouveaux paradigmes comme l'écoconception et le recyclage dans les filières industrielles.

Au regard de ces travaux, les grandes considérations économiques (niveau général des charges, fiscalité) sont considérées comme des données. En revanche, ce qui suit particularise dans le domaine de la chimie.

L'équation économique dépendra fortement du coût et de la stabilité d'approvisionnement en ressources (pétrole et gaz au prix du marché international contre agroressources internationales ou locales, intégrées à la filière chimique ou non), des économies d'énergie et de matière induites par les mutations, des débouchés envisageables, et des capacités d'investissement de l'industrie par rapport à un parc existant.

Concernant le passage à des ressources renouvelables, on peut noter que :

- La stabilité du prix est un facteur essentiel pour les industriels. L'évolution du prix des matières premières en 2007 et 2008 leur a clairement fait prendre conscience de l'intérêt d'agroressources dont le prix pourrait être plus stable (avec les questions possibles d'intégration amont ou de partenariat pour sécuriser les besoins). Cependant la problématique de compétition d'usage des sols et les rendements annuels inégaux (aléas climatiques, pertes, etc.) maintiennent la question de l'instabilité des prix dans tous les cas ;
- A contrario l'effondrement des prix en 2008 donne un mauvais signal, qui rend les agroressources à court terme peu ou non éligibles, sauf subvention, à l'exception de quelques filières comme le sucre / éthanol au Brésil (mais la question de dépendance se pose alors). Pourtant tous les acteurs s'accordent sur l'augmentation future et continue des prix du pétrole et du gaz ;
- Au-delà de la subvention de filière, souvent mal perçue car jamais totalement adéquate avec les besoins du marché (création d'une rente de situation temporaire), un mode de valorisation du carbone pourrait être une solution pour stabiliser le "signal prix" sur les matières premières fossiles et ouvrir un champ d'application rapide à certaines agroressources.

La seule évolution du prix des matières premières fossiles et de l'énergie ne permettra un passage aux agroressources que de manière marginale.

Le déploiement industriel de nouveaux procédés permettant des gains immédiats de matière et d'énergie devrait être plus naturel et plus rapide. Deux moyens permettent de favoriser encore les conditions économiques pour l'émergence de ces procédés :

- La valorisation carbone dans les matières premières et l'énergie ;
- L'évolution réglementaire continue (ou la valorisation d'une manière ou d'une autre) des questions de rejets, déchets, coproduits non exploités, que les nouveaux procédés peuvent contribuer à réduire.

Sur les marchés en développement, les nouveaux produits / procédés trouvent et continueront à trouver rapidement des débouchés. L'évolution de la réglementation (transport, bâtiment), les mesures incitatives (énergies renouvelables) créent les conditions de marché favorables aux produits à haute valeur ajoutée de la chimie qui permettent, par effet de levier, des économies en aval. Une taxe

carbone, par exemple en complément du schéma ETS pour adresser les émissions diffuses des véhicules et de l'habitat, serait un accélérateur puissant.

Concernant le recyclage, il apparaît clairement que les seules conditions de marché (prix des matières premières et de l'énergie) ne permettront pas un développement significatif dans ce sens, aux horizons de temps de l'étude. En effet, la complexité technologique, organisationnelle, économique de la mise en place de filières de recyclage n'est que rarement compensée par une augmentation du prix des matières premières.

Trois éléments paraissent donc de nature à "changer de braquet" sur la question du recyclage :

- Une évolution réglementaire forte concernant la responsabilité en fin de vie des déchets, l'obligation de taux de recyclage et d'utilisation de matière recyclée, etc. ;
- Le passage là où il est possible à une économie de la fonctionnalité (location d'un service s'appuyant sur un bien plutôt que la vente du bien). Outre le fait qu'il permet d'augmenter la durée de vie des biens produits, l'économie de la fonctionnalité permettrait en effet de réduire certains éléments de complexité liés au recyclage : la collecte et le tri (effectués par le constructeur), la gestion de la complexité des produits eux-mêmes composés de nombreux matériaux (bien maîtrisée par le constructeur, par définition), le besoin de standardisation (géré au niveau d'un constructeur plutôt qu'au niveau d'une filière)... ;
- Le soutien à la recherche pour régler un certain nombre de problèmes technologiques (dégradation de la qualité, des performances, des fonctionnalités...).

Tous ces raisonnements conduisent à envisager d'approfondir, au regard de l'évolution vers le durable, la manière de concevoir, actualiser et manipuler les normes, dans une optique de contrôler et d'évaluer les activités sans bloquer l'innovation. Ce point devra être approfondi, soit dans le cadre des benchmarks et d'une veille qui est prévue dans le cadre de l'étude.

1.4.2. Stratégie économique et réglementaire (au regard des acteurs et des structures)

Il y a aussi dans une démarche prospective des alternatives sur la façon de comprendre et d'envisager le soutien aux entreprises et aux autres acteurs sur le chemin de la durabilité. Seront abordés ultérieurement des points tels que :

- La dynamique des PME (avec une finalité de création d'emplois) ;
- La relation grands groupes / PME ;
- Une activité support comme la logistique (une logistique durable pour une chimie durable).

1.4.3. Conditions sociologiques et organisationnelles

"La chimie durable s'inscrit dans une société durable."

"L'évolution vers la durabilité se fera plutôt en 'push' pour les intermédiaires et synthons en amont de la chaîne de valeur, et plutôt en 'pull' pour les polymères techniques, les produits finis en contact avec le consommateur."

Les questions sociologiques doivent être intégrées dans la réflexion sur les mutations de la chimie. En effet, elles sont au cœur des questions d'économie durable, du rapport à la consommation, de la

perception du besoin et de la valeur. Elles peuvent agir aussi bien comme frein vis-à-vis de certaines technologies (comme par exemple les OGM ou les nanotechnologies) ou comme accélérateur des changements (par exemple la prise de conscience environnementale est a priori favorable au développement de la chimie du végétal et de l'économie du recyclage).

Les réflexions sociologiques permettront d'une part de mieux appréhender l'utilisation et la fin de vie des produits, l'évolution des usages et les moyens d'accélérer les mutations par des décisions légales, réglementaires ou fiscales, d'autre part de pousser des sujets majeurs comme les questions de recyclage. Sociologie et technique doivent travailler ensemble.

En premier lieu, la prise de conscience doit être effectuée au sein de la communauté académique et industrielle. Les nombreux séminaires, colloques, les différentes publications et autres groupes de travail participent tous de cette prise de conscience. Les travaux menés sur les mesures, les outils de modélisation et d'analyse des produits et procédés permettent d'intégrer des éléments rationnels favorisant un arbitrage pour la durabilité dans les nouveaux développements.

En second lieu, c'est l'opinion publique et les consommateurs qu'il s'agira d'inscrire dans le mouvement. Certains éléments de référentiel devront ainsi être déplacés, par exemple :

- Des aspects esthétiques liés à l'utilisation de matériaux recyclés dans des usages non dégradés (on peut à ce titre regarder le chemin parcouru, y compris au niveau marketing, par le papier recyclé...);
- Des aspects comportementaux sur le tri des déchets ;
- Des aspects valeur perçue / prix en cohérence avec la monétisation des questions de carbone ou d'impact environnemental ;
- Des questions de rapport à la propriété pour les biens éligibles à l'économie de fonctionnalité ;

Etc.

1.4.4. Education, formation et compétences

Nous abordons le thème des compétences en tant qu'organisation dynamique de l'activité.

La mise en œuvre des mutations requiert de disposer des compétences clés, ce qui représente un enjeu majeur compte tenu du caractère multidisciplinaire de la problématique (développement durable) et de certaines solutions (biochimie, agroressources).

La formation et la gestion des compétences deviennent alors essentielles à plusieurs titres.

Il s'agirait en premier lieu de travailler à "l'anoblissement" du secteur chimique.

La chimie souffre en France d'une mauvaise image. Systématiquement associée aux problèmes de toxicité, de pollution, etc., elle n'est guère perçue comme une science de pointe permettant d'apporter des solutions pour une société moderne et responsable et disposant de débouchés attractifs. Peu d'étudiants de talent s'orientent donc actuellement vers la chimie, en dépit des nombreuses écoles et facultés existant en France.

Le renouvellement des talents de chimistes, l'identification de nouvelles équipes innovantes passent donc par une communication et une formation adaptée, dès l'enseignement secondaire, pour recruter les talents. Bien sûr, il faut aussi s'assurer de pouvoir offrir des situations intéressantes à ces jeunes

lorsqu'ils sont en fin de cursus universitaire. Ceci n'est probablement possible qu'en travaillant parallèlement à l'image globale de la chimie dans la société.

Il s'agirait également d'aborder la question de la multidisciplinarité.

Les équipes de chercheurs souffrent non seulement de discontinuité générationnelle et d'un problème de "relève", mais aussi d'une hypersegmentation des compétences dans les nouvelles générations. Alors que la connaissance n'a cessé de croître, les formations sont devenues de plus en plus pointues, spécifiques. Cette tendance à l'expertise, bénéfique sous certains aspects, se fait au détriment de la capacité à être un chimiste généraliste, interdisciplinaire, capable de comprendre ou à défaut de parler avec ses collègues d'une autre spécialité. Or, l'évolution actuelle tend à rompre les clivages d'antan (exemple : entre biologie et chimie).

La capacité à faire se rencontrer des sciences de pointe en formant des hommes de façon appropriée est sans doute une condition d'accélération des mutations de la chimie.

Enfin, les méthodes de conception et de production sont des clés dans l'approche de la chimie durable et doivent être inculquées comme référence de travail pour les nouvelles générations de chimistes.

Il s'agira enfin d'assembler les compétences collectives entre entreprises et institutions : compétences financières, disciplinaires, managériales...

1.4.5. Prise en compte de la question internationale

"L'évolution vers une chimie plus durable ne se fera pas sans maintien voire amélioration des qualités techniques et des conditions économiques".

"Ne nous trompons pas d'enjeu : il faut construire des filières durablement compétitives dans un contexte international. La priorité n'est donc pas sur les commodités à faible coût".

Les mutations technologiques et le changement des équilibres économiques actuels peuvent venir de l'international. L'évolution de la chimie française vers une chimie plus durable ne peut se faire sans des conditions de compétitivité par rapport aux technologies actuelles utilisées en France ou à l'étranger.

Certains éléments seront donc à prendre en compte dans la conception du chemin vers une chimie plus durable :

- L'accès compétitif aux ressources actuelles et futures ;
- La maîtrise de procédés et technologies actuelles ;
- Le soutien à l'innovation ;
- Les éléments de réglementation ou de fiscalité pouvant jouer sur le niveau de concurrence internationale en corrigeant certains éléments de "distorsion concurrentielle" induits par la réglementation locale ;
- Les politiques de soutien à la chimie durable pratiquées à l'étranger.

La course engagée à la productivité, à la réduction continue des coûts, à l'effet d'échelle (exemple des nouvelles installations de pétrochimie au Moyen-Orient par exemple), laisserait présager, sans virage réglementaire international considérable (remise en cause de la politique menée par l'OMC) une évolution comparable aux dernières années, avec :

- Une certaine désindustrialisation sur les segments les moins créateurs de valeur (chimie de base, pétrochimie), au moins pour les produits aisément transportables. Dans cette optique, un abandon des activités pétrochimiques en France est envisageable ;
- Un terrain de jeu concurrentiel qui continue à se focaliser sur l'innovation produit et les activités à plus forte valeur ajoutée.

Cette évolution s'accommode bien des volets procédés et nouveaux marchés de la chimie durable. En effet, les nouveaux procédés permettent de réduire les coûts (directs ou indirects) ou d'améliorer la qualité des produits de sortie. La croissance sur les marchés en développement (transport, habitat, énergie) est essentiellement tirée par des produits à forte valeur ajoutée, soit en substitution de produits plus basiques, soit adressant de nouvelles fonctionnalités permettant d'améliorer les performances en termes de durabilité.

Au contraire, cette évolution est assez peu compatible avec les questions d'agroressources et de recyclage.

A même niveau de performance, les matières premières issues du recyclage ont peu de chances d'être compétitives avec des produits de première main arrivant de l'étranger (part de main d'œuvre locale intégrée). Le moyen de les aligner étant alors réglementaire (intégration du coût carbone par exemple).

Le prix des agroressources est également fortement lié à la part et au coût de la main d'œuvre (c'est bien ce qui rend le sucre brésilien si compétitif...) et la production primaire végétale nette en Europe ne permet pas l'établissement de filières agricoles pour matières premières chimiques compétitives avec des productions tropicales. Se pose alors la question des subventions.

La question internationale devra donc être prise à deux niveaux :

- Il paraît pertinent de jouer la carte de la compétitivité par l'innovation, comme c'est le cas dans les autres filières soumises à la compétition internationale ;
- Il sera cependant nécessaire de déployer un certain nombre de mécanismes réglementaires et/ou incitatifs, temporaires ou pérennes, en fonction des finalités recherchées.

Cette dernière considération amène à poser la nécessité que cette base stratégique chimie durable serve à la construction d'une stratégie à l'échelle internationale.

2. PERSPECTIVES SUR LA CHIMIE DU VÉGÉTAL

2.1. Introduction

2.1.1. Objectifs proposés

Le cahier des charges proposait d'articuler la réflexion sur la chimie du végétal autour de deux livrables, le B3.2 sur la biochimie des systèmes complexes et le B3.3 sur les intermédiaires chimiques. L'objectif initial du B3.3 sur les bio-intermédiaires, tel que défini dans le cahier des charges, était de concevoir un outil capable de collecter auprès des industriels de la chimie et / ou des agro-industriels des coûts de production des différents intermédiaires pouvant être produits à partir de matières végétales. Cependant, l'étude de la littérature disponible et des discussions avec l'Union des industries chimiques (UIC) et des industriels du secteur ont révélé la grande difficulté à réaliser cet outil, dans le cadre de la présente note et l'intérêt à aborder la problématique de la chimie du végétal dans une perspective plus large :

- D'une part, une étude de grande qualité, "The Brew project", réalisée en 2006 par l'université d'Utrecht en collaboration avec des industriels européens (dont le groupe Roquette Frères) et sous l'égide de la Commission européenne, a calculé les coûts de production et l'impact environnemental de 21 intermédiaires, aujourd'hui et à long terme (en tenant compte des avancées technologiques). Cette étude est reconnue par l'ensemble de la communauté académique et industrielle, malgré certaines limites inhérentes à l'exercice de modélisation des coûts de production ;
- D'autre part, il apparaît impossible de recueillir des données précises auprès des industriels compte tenu de leur confidentialité et de leur caractère stratégique. Cette difficulté est actuellement rencontrée par l'Association chimie du végétal qui regroupe des agro-industriels et des industriels de la chimie ;
- Enfin, on peut rappeler que la chimie du végétal, hormis l'oléochimie, est une industrie récente, dont la plupart des applications potentielles sont encore au stade du laboratoire de recherche ou du pilote industriel. Si le concept est ancien, les recherches appliquées sont relativement récentes et de nombreuses évolutions technologiques sont attendues. La modélisation précise des coûts ne saurait donc être réalisée par analogie aux pratiques de la pétrochimie, qui bénéficie d'une expérience accumulée de plus de 50 ans.

La chimie du végétal n'a pas de modèle unique. Elle est, à l'image du vivant, multiple et complexe. De nombreuses publications sur le sujet sont disponibles mais la plupart n'abordent qu'une partie de la question : certaines sont centrées sur l'analyse des marchés, d'autres sur les évolutions technologiques, d'autres encore sur les besoins d'utilisation des ressources végétales... Elles sont le plus souvent dédiées à un type de produits (bioplastiques, bio-intermédiaires...) ou à un type de technologie (fermentation, catalyse enzymatique...). Si tant est que le concept de chimie du végétal est rarement appréhendé dans son ensemble alors que les problématiques qu'ils soulèvent sont pourtant fortement corrélées : en effet, comment aborder la question de l'utilisation des ressources (occupation des sols) sans évoquer celles des technologies ? Comment évaluer le potentiel des bioplastiques sans évaluer celui des bio-intermédiaires ?

Dès lors, le groupe projet a souhaité regrouper dans une même note la question des bio-intermédiaires (B3.3) et des systèmes complexes (B3.2) et les replacer dans une perspective plus large, afin de donner aux pouvoirs publics une première base de réflexion, qui pourrait être enrichie par la suite.

Ainsi, la présente note a pour objectif de définir les différents modèles de la chimie du végétal et d'identifier l'état de l'art actuel, les opportunités et les limites de ce concept. Elle ne vise pas à apporter des réponses définitives – par exemple sur le potentiel de marché de tel ou tel produit – mais plutôt à donner un cadre d'analyse et à identifier les grands enjeux. Le groupe projet espère que certains thèmes abordés dans cette note feront ensuite l'objet d'analyses plus approfondies par des experts (ministères, centres de recherche, industriels...). L'étude se donne comme objectif de répondre aux questions clés suivantes :

- Qu'est-ce que la chimie du végétal et quels sont les différents modèles de chimie du végétal actuels ou envisageables ?
- Quelle est la réalité industrielle actuelle des différents modèles de chimie du végétal ? Comment l'expliquer ?
- Quelles sont les différentes technologies et quel est l'état de l'art actuel ? Comment la France se positionne-t-elle ?
- Quelles sont les ressources agricoles disponibles ?
- Quels sont les différents modèles économiques envisageables et les éventuelles modifications de la répartition des rôles sur la chaîne de valeur ?

2.1.2. Méthodologie proposée

La présente note s'appuie sur la littérature existante et des entretiens avec des experts, industriels de la chimie et de l'agronomie et chercheurs.

2.2. La chimie du végétal

2.2.1. Le principe de la chimie du végétal

La chimie du végétal n'est pas un concept nouveau. Ses applications sont bien antérieures à celles de la pétrochimie. Plusieurs évolutions récentes ont conduit à remettre la chimie du végétal au cœur des préoccupations des industriels de la chimie, des pouvoirs publics et des agro-industriels :

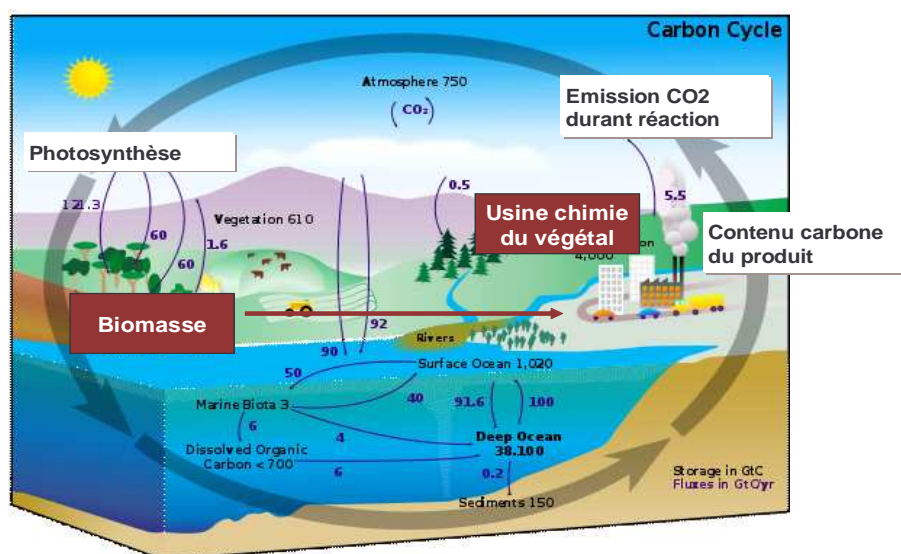
- La prise de conscience des enjeux de développement durable, et en particulier le Grenelle de l'environnement ;
- La tendance haussière du prix des matières fossiles – pétrole et gaz – avec l'atteinte d'un pic historique en 2008, même si la crise économique actuelle s'est traduite par une baisse – temporaire ? – des prix des hydrocarbures ;
- La nécessité de trouver une alternative au pétrole, dont les réserves ne sont pas inépuisables et seront consommées dans un avenir relativement proche.

Le principe de la chimie du végétal est relativement simple. Les principales matières premières de la chimie sont des atomes de carbone (C) et d'hydrogène (H) qu'il s'agit ensuite de lier entre eux. Ces atomes sont présents dans le pétrole (et constituant, pour la chimie, le naphta), le charbon et le gaz mais également dans les matières végétales sous des formes et dans des proportions très variables.

En termes environnementaux, la chimie du végétal – hors utilisation de l'énergie lors de la production – est neutre en termes d'émissions de gaz à effet de serre. Les atomes de carbone contenus dans la plante et transformés pour produire le produit chimique sont compensés par l'absorption de CO₂ par la

plante lors de la photosynthèse, comme expliqué dans la figure 2.1. Cependant, la mesure de l'impact environnemental doit prendre en compte l'ensemble du cycle de vie du produit, depuis la production des matières premières (notamment en utilisant des engrais) jusqu'à la transformation chimique en passant par le transport. En effet, l'analyse réalisée sur les polymères (dans le cadre de la note sur les plastiques automobiles) a démontré que la dissipation du carbone contenu dans les produits chimiques en fin de vie n'était responsable que de 25% des émissions de gaz à effet de serre tout au long de la vie des polymères contre 63% pour la consommation énergétique lors de la production et 12% pour le procédé, la part du transport étant négligeable. Ainsi, l'émission de gaz à effet de serre liée à la consommation énergétique est un élément d'appréciation déterminant entre les différents procédés envisageables (en particulier la voie thermochimique).

Figure 2.1 - Schéma simplifié du concept de chimie du végétal



Cependant, derrière ce principe relativement simple, se cache une réalité multidimensionnelle s'articulant autour :

- du type de biomasse utilisé, en fonction de la composition des différentes matières végétales, de leur rendement à l'hectare, de leur disponibilité... ;
- des procédés et technologies de fabrication : plusieurs procédés de fabrication existent et font appel à différentes technologies, notamment les biotechnologies blanches. Cependant, une première distinction entre procédé biologique et non biologique pourra être utilisée ;
- du niveau de complexité accepté en entrée (matières premières) et en sortie (mono ou multi produits) ; autrement dit, du niveau de rupture avec un modèle pétrochimique optimisé pour l'utilisation d'une matière première quasiment unique (gaz et naphta), dont les propriétés varient peu (d'une récolte à l'autre...) et pour la production d'un produit en grandes quantités (dans le cas de la chimie de commodités).

2.2.2. Les modèles de la chimie du végétal

Différents modèles de valorisation de la biomasse à des fins chimiques sont possibles. Ils sont caractérisés par les trois dimensions listées ci-dessus, le type de biomasse qu'ils valorisent, les technologies qu'ils utilisent et le niveau de complexité qu'ils savent gérer. Six modèles sont ainsi possibles :

- L'oléochimie, qui valorise l'huile contenue dans le végétal, principalement par voie non biologique et dans une approche monoentrant / monosortant ;
- La chimie du sucre, qui valorise les sucres contenus dans le végétal par voie biologique et dans une approche monoentrant / monosortant ;
- L'approche mécanique, capable de valoriser la plante entière par voie mécanique et dans une approche multientrants / monosortant ;
- La thermochimie, capable de valoriser la plante entière par voie chimique et dans une approche multientrants / multisortants ;
- Les systèmes complexes, concept faisant référence à une usine biotechnologique sachant valoriser l'ensemble de la complexité de la biomasse et produisant de multiples produits ;
- Enfin, la valorisation de la lignine qui vise à transformer un seul type de molécules du végétal, particulièrement présent dans le bois, avec des technologies chimiques ou biologiques.

La figure 2.2 représente le type de molécules du végétal valorisées par chaque modèle. La figure 2.3 cartographie ces modèles selon les technologies qu'ils utilisent et leur niveau de gestion de la complexité.

Figure 2.2 - Types de molécules valorisées selon les modèles de la chimie du végétal

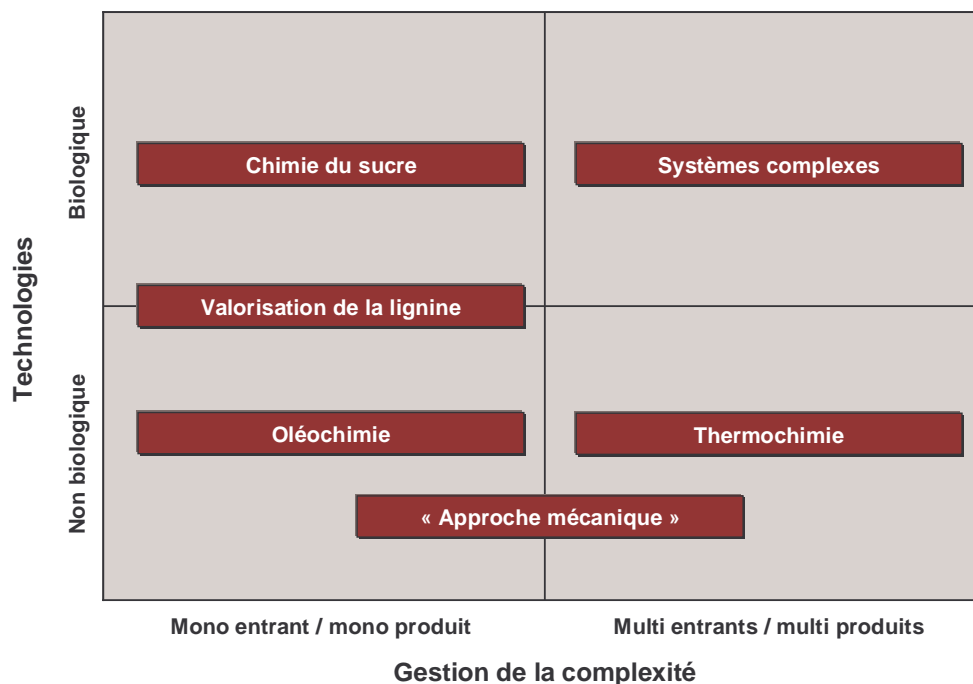
Cartographie des modèles de chimie du végétal selon le type de molécules valorisées

Types de molécules	Molécules	Exemples de plantes	Modèles de la chimie du végétal					
			Oléochimie	Chimie du sucre	Approche mécanique	Thermochimie	Systèmes complexes	Valorisation de la lignine
Sucres	Sucres (saccharose, amidon...)	Céréales (blé, maïs, riz...), tubercules, betteraves, canne à sucre						
	Cellulose							
	Hemicellulose							
Huile	Oléagineux (colza, tournesol, soja, palme, ricin...)							
Lignine	Toutes les plantes et le bois							
Autres	Toutes les plantes et le bois							

 Molécules valorisées

Figure 2.3 - Modèles du végétal selon leur technologie et leur niveau de gestion de la complexité

Cartographie des modèles de chimie du végétal selon les technologies et leur gestion de la complexité

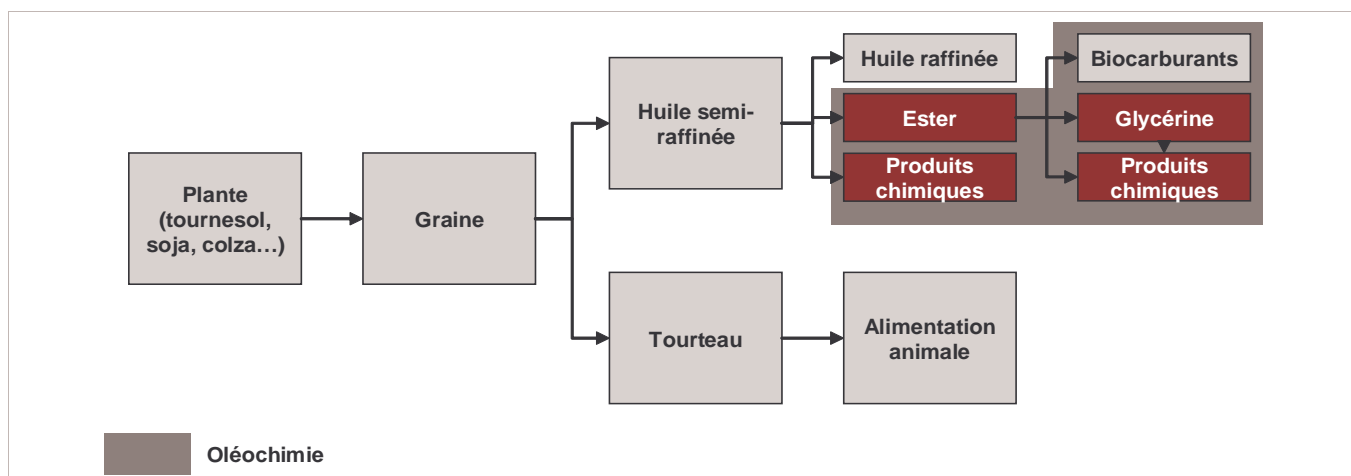


Note : ce schéma simplifié ne considère pas les coproduits fatals comme faisant partie d'une approche multiproduits

2.2.2.1. L'oléochimie

L'oléochimie – littéralement la chimie des huiles – est une technologie ancienne de production de produits chimiques à base d'huile. Ses principales applications concernent la fabrication de solvants, de tensioactifs et de lubrifiants.

Figure 2.4 - Schéma simplifié de la filière des oléagineux



Ainsi, l'oléochimie est un débouché naturel de la production des oléagineux, à partir de l'ester, des huiles semi-raffinées ou de la glycérine, coproduit de l'estérification (notamment lors de la production de biocarburants). L'oléochimie produisant des "mélanges chimiques" est une industrie relativement

mature. Les industriels rencontrés n'ont pas fait état d'avancées technologiques majeures, notamment en matière d'utilisation de biotechnologies :

- "Il n'y a pas de changement technologique majeur"
- "Les biotechnologies n'ont pas permis de réaliser un saut quantique"

2.2.2.2. La chimie du sucre

Si l'oléochimie repose sur l'utilisation de l'huile comme matière première, une autre chimie à base de sucre s'est également développée, à partir de procédés de fermentation ou de catalyse enzymatique. La chimie du sucre est ancienne, en particulier celle de l'éthanol mais la mise au point de technologies robustes permettant la conduite de procédés optimisés à grande échelle s'est véritablement développée depuis les années 1970. Mais c'est surtout le **développement des biotechnologies** permettant de concevoir des micro-organismes plus performants qui donne à la chimie du sucre de nouvelles perspectives.

Les réactions de fermentation reposent sur l'utilisation de levures (micro-organismes) dont l'action permet la transformation d'une source d'énergie carbonée sous une autre forme. L'exemple de l'éthanol, exemple historique de production d'un produit chimique à partir de sucres (réaction de Gay-Lussac), permet d'illustrer ce phénomène : $C_6H_{12}O_6 \Rightarrow 2 C_2H_5OH + 2 CO_2$.

Le sucre est transformé par la levure en éthanol ; la réaction libère du CO_2 et produit de l'énergie, consommée en partie par le métabolisme de la levure et libérée sous forme de chaleur. D'autres coproduits sont également générés mais dans de faibles proportions. Le rendement carbone théorique est significatif puisque, sur les 6 atomes de carbone utilisés, 4 sont utilisés pour l'éthanol (66%).

L'autre voie technologique repose sur l'utilisation de la catalyse enzymatique. Les enzymes sont des protéines, produites par les cellules vivantes et sont les catalyseurs des réactions biologiques. Les enzymes sont essentiellement produites par des micro-organismes sélectionnés et cultivés dans des grandes cuves de fermentation en utilisant le glucose comme substrat. La biologie moléculaire (clonage des gènes codant pour ces enzymes) permet d'améliorer leur efficacité.

Le glucose utilisé comme matière première est issu de plantes naturellement riches en sucres comme les céréales. Cependant, afin d'élargir les possibilités d'utilisation de la matière végétale et de limiter la concurrence avec l'usage alimentaire, d'autres composants génériques des plantes, la cellulose et les hémicelluloses, pourraient constituer une source importante de sucres fermentescibles.

En termes de durabilité, la chimie du sucre offre de nombreux avantages, au-delà du cycle du carbone évoqué précédemment :

- La consommation d'eau et d'énergie est réduite ;
- La production de sels est limitée (problématique des rejets salins dans les eaux douces) ;
- Certains procédés permettent de s'affranchir de l'utilisation de solvants.

Cette chimie fait l'objet de nombreuses études, en particulier celles réalisées sous l'égide de la Commission européenne "The Brew Project" ou par le Department of Energy des Etats-Unis. Hormis l'éthanol (utilisable à la fois en chimie et dans les biocarburants), produit à plus de 90% à partir de ressources végétales, seuls quelques intermédiaires sont aujourd'hui biosourcés.

2.2.2.3. L'approche mécanique

L'oléochimie et la chimie du sucre reposent sur l'extraction des molécules les plus nobles de la plante, l'huile et le glucose. Une autre chimie du végétal, "plus mécanique", est également en cours de développement avec la volonté de valoriser davantage la plante entière en limitant les étapes d'extraction et de purification. La matière végétale est utilisée "telle quelle", en utilisant les différentes propriétés des molécules qui la constituent (souplesse, solidité...). L'étude a permis de mettre en lumière plusieurs exemples de développement récents :

- L'émergence de différentes start-up, notamment la société Vegeplast (premier prix innovant 2006) qui a développé une gamme de thermodurcissables 100% biodégradables, notamment à partir de maïs utilisé en plante entière. Les produits actuels sont les suivants : tête de golf, liens de pépinière, agrafes à vignes, couverts jetables... ;
- Les projets de développement du pôle de compétitivité Fibres Grand Est sur la substitution des matériaux fibrés d'origine fossile par des fibres naturelles issues du bois. Il s'agit ainsi de réaliser des matériaux composites pour diminuer leur teneur en produits issus de la pétrochimie.

Cette voie originale offre des avantages évidents en termes de durabilité : elle améliore la biodégradabilité des produits pour les matériaux à durée de vie courte et permet de limiter les étapes de production entre la plante et le produit fini. Cependant, les experts rencontrés s'accordent sur les propriétés mécaniques restreintes des produits fabriqués par ce procédé ("*pas sûr qu'ils passent le crash test...*"). Mais le poids des applications à faible valeur ajoutée (emballages...) dans l'utilisation globale du carbone pour la chimie (400MT / an) est suffisamment significatif pour étudier les possibilités offertes par la voie mécanique. D'autant plus qu'on peut parfois s'interroger sur un éventuel écart entre les hautes performances des polymères pétrochimiques et le besoin réel de certaines applications industrielles.

2.2.2.4. La thermochimie

La thermochimie repose sur l'utilisation de procédés chimiques classiques. La gazéification est l'une des principales voies technologiques possibles. Il s'agit ici de faire fi de la complexité du vivant, en ramenant les matières végétales à des molécules CO et H₂ par un procédé de gazéification. La gazéification est une transformation thermochimique d'un solide combustible (par exemple de la biomasse) en présence d'un composé gazeux (vapeur d'eau, O₂, CO₂...). Le but de cette opération est de convertir un solide en un mélange gazeux. L'équation simplifiée de la réaction est ainsi : $C + H_2O \Rightarrow CO + H_2$.

Cette réaction nécessite une quantité importante d'énergie. Par ailleurs, en sus des molécules de CO et de H₂, différents composés sont présents à l'état de traces, dans des proportions variables selon la nature du combustible. Enfin, la réaction produit une part plus ou moins importante de composés hydrocarbonés ("goudrons"), résultant d'une réduction incomplète des produits de pyrolyse de la première étape de la transformation¹.

Une fois la gazéification réalisée, les molécules de CO et de H₂ doivent être assemblées pour fabriquer des polymères. Deux voies technologiques sont possibles :

- La catalyse chimique classique dont la plus connue est la catalyse dite "Fischer-Tropsch" (à base de fer ou de cobalt) produisant des hydrocarbures. Inventé en 1923 par Franz Fischer et

¹ Source : Cirad

Hans Tropsch, ce procédé a notamment été utilisé par l'Allemagne pendant la seconde guerre mondiale pour produire des hydrocarbures à partir du charbon. Datant de la même époque, la réaction "Water gaz Shift" permet de produire des alcools allant du méthanol jusqu'au pentanol. Ce procédé est encore largement utilisé en Chine pour la production de produits chimiques à partir du charbon ;

- La voie biotechnologique consiste à utiliser un micro-organisme capable de transformer les molécules de CO et de H₂ en un produit chimique.

Si le rendement théorique de ces procédés est relativement élevé, la logique sur laquelle ils reposent est sujette à discussion. En effet, la complexité du vivant est détruite pour produire des molécules très simples, qui sont ensuite réassemblées pour produire un produit complexe... Des études sont donc actuellement en cours pour dégrader la matière complexe (en particulier la lignine) sans redescendre au niveau des molécules CO et H₂.

2.2.2.5. Les systèmes complexes

La biochimie des systèmes complexes, parfois appelée usine cellulaire, est un concept d'usine capable de gérer la complexité de la matière première entrante pour fabriquer plusieurs produits en sortie, à l'image d'un tube digestif d'organismes évolués. Ce concept s'appuie sur une utilisation de biotechnologies (enzymes ou de micro-organismes).

2.2.2.6. La valorisation de la lignine

Au contraire de la cellulose et de l'hémicellulose contenues dans les plantes, la lignine n'est pas un sucre et ne peut donc pas être valorisée au travers de la chimie du sucre. Or, celle-ci représente environ 30% de la biomasse dans le monde¹. La lignine (bois en latin) est un polymère amorphe naturel. C'est la molécule qui confère à la plante sa structure. La structure de la lignine est complexe (composants aromatiques) et variable en fonction de la source de biomasse ce qui rend sa valorisation difficile. Aujourd'hui, la lignine est principalement utilisée comme combustible pour produire de l'énergie et de la chaleur, notamment par les industries papetières. Cependant, d'autres formes de valorisation sont envisageables à moyen et long terme :

- Valorisation thermochimique de la lignine : cette voie sera étudiée dans la partie consacrée à la thermochimie ;
- Transformation en macromolécules. Les principales applications actuelles sont les dispersants, les émulsifiants, les liants et les séquestrants. A moyen et long terme, la production de fibres de carbone, de polymères modificateurs, d'adhésifs et de résines est envisageable ;
- Production d'aromatiques : la lignine est la seule source renouvelable composée d'un volume important d'aromatiques.

¹ Source : US Department of Energy

2.3. La réalité industrielle actuelle

La présente note n'a pas vocation à réaliser une étude de marché précise de l'ensemble des produits chimiques à base de matières végétales. Elle s'appuie donc sur les études existantes, les entretiens réalisés avec les industriels et des recherches de données complémentaires.

En 2008, seules la chimie du sucre, l'oléochimie, l'approche mécanique et la valorisation de la lignine ont une réalité industrielle mesurable. La biochimie des systèmes complexes est au stade du concept tandis que la voie thermochimique est au stade du laboratoire ou du pilote (hors biocarburants qui ne sont pas étudiés dans cette note).

2.3.1. L'oléochimie

Les principales applications de l'oléochimie sont les biolubrifiants, les biosolvants, les biotensioactifs, certains biomatériaux (Rilsan / PA 11 issus de l'huile de ricin) et intermédiaires de synthèse tels que l'épichlorhydrine. Ces applications sont assez matures mais devraient continuer à croître. Les quantités de production actuelles sont listées ci-dessous¹ :

Figure 2.5 - Consommation française de produits issus de l'oléochimie

Produits	Consommation française en Milliers de Tonnes		
	Total	Oléochimie	Taux de pénétration
Lubrifiants	850	1	0,1%
Tensioactifs	400	110	27,5%
Encres	95	10	10,5%
Peintures	900	19,5	2,2%
Solvants	600	11	1,8%

Dans une étude récente, l'Ademe et le cabinet Alcimed prévoient une croissance forte des biolubrifiants, des biosolvants et des biotensioactifs. Cependant, ces prévisions dépendent fortement des scénarios élaborés (écart de 1 à 20 entre le scénario pessimiste et le scénario optimiste).

2.3.2. L'approche mécanique

Les applications industrielles de l'approche mécanique sont très faibles en France, avec un marché de quelques millions d'euros. Les principales applications sont les suivantes (liste non exhaustive) :

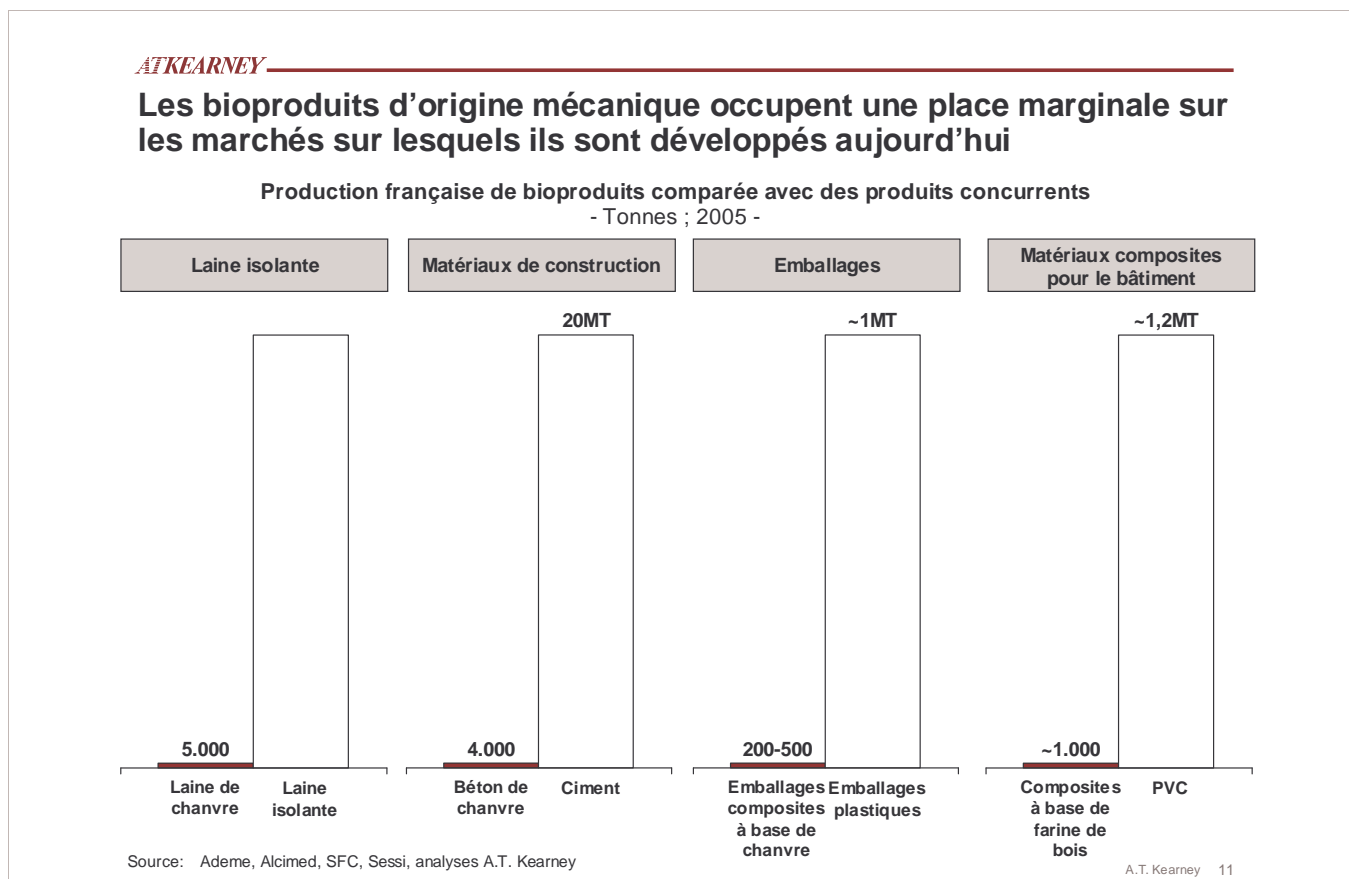
- La laine isolante d'origine végétale, composée de 80% de fibres de chanvre et de 20% de fibres de polyester. Deux acteurs sont présents sur le marché français : Effireal et Buitex. Les coûts de production sont 2 à 2,5 fois plus élevés mais les performances obtenues en termes de durabilité et de stabilité des fibres, de propriétés acoustiques et de facilité de pose seraient supérieures ;
- Les matériaux composites pour la construction, composés de 50% de béton de chanvre et de 50% de liants. Ces matériaux offrent des performances identiques aux matériaux traditionnels sauf en matière de dégradation à l'eau ;
- Des emballages composés de polyéthylène / polypropylène renforcés de fibres de chanvre à hauteur de 10-20%. Ces matériaux composites possèdent des propriétés supérieures, les fibres

¹ Source : étude ADEME / ALCIMED

de chanvre apportant de la rigidité et un gain de poids par rapport aux matériaux issus à 100% de la pétrochimie. Cependant, leur prix est aujourd'hui plus élevé. AFT Plasturgie est le principal acteur de cette filière qui comprend quelques start-up, comme Vegeplast ;

- Des matériaux composites pour la construction, composés de 50% de PVC et de 50% de fibres de bois, qui trouvent des applications dans les planchers de terrasse, les bordures de piscine... Ces matériaux sont plus chers que ceux issus à 100% du PVC ;
- Les feutres non tissés pour l'automobile, composés de 50% de polypropylène et de 50% de fibres naturelles (lin et chanvre).

Figure 2.6 - Production de bioproduits par voie mécanique



2.3.3. La chimie du sucre

Le marché adressable de la chimie du sucre est très important puisque de nombreux grands intermédiaires et produits finis peuvent théoriquement être produits à partir du sucre. Pourtant, l'émergence de la chimie du sucre comme alternative possible à la pétrochimie est relativement récente. En 2008, hormis l'éthanol (essentiellement biocarburant), seuls quelques produits ont trouvé une place sur le marché :

- Le 1,3 Propanediol (PDO) biosourcé dont la production est d'environ 45 kT, produit par Dupont à base de glucose de maïs. Le 1,3 PDO biosourcé génère environ 40% d'économie par rapport à la voie pétrochimique et possède des qualités supérieures (plus haut poids moléculaire et moins coloré) ;

- L'acide acétique biosourcé, dont la production est d'environ 200 kT, soit 3% de la production mondiale ;
- L'acide polylactique (PLA), dont la production mondiale serait d'environ 70 kT/an.

Ainsi, par comparaison avec les 300 MT des 7 principaux "building blocks" de la pétrochimie (benzène, butadiène, éthylène, méthanol, propylène, toluène et xylène), la production d'intermédiaires biosourcés est marginale (inférieure à 1%).

Cependant, de nombreux pilotes industriels sont actuellement à l'étude ou en voie de réalisation, principalement sur le PDO, l'acide succinique, l'épichlorohydrine, l'éthylène, le polypropylène glycol et l'isosorbide.

Figure 2.7 - Exemples de pilote sur la chimie du sucre dans le monde

Produits	Acteurs	Capacité (kt/an)	Matière première	Investissement	Pays	Délais
1,2 PDO	Metabolic Explorer		Glucose		France	2008
1,3 PDO	Metabolic Explorer		Glycérine		France	2008
1,3 PDO	Dupont & TATE	45	Sucre		USA	2006
1,3 PDO	Cargill - Ashland		Glycérine			
1,3 PDO	Dow		Glycérine			
1,3 PDO	Huntsman		Glycérine			
Acide succinique	Bio Amber (ARD et DNP)	5	Glucose / sucrose	21M€	France	Fin 2009
Acide succinique	Roquette/DSM	0,5			France	Fin 2009
Acide succinique	IGER - CARM				Royaume-Uni	
Acide succinique	MBI	6			USA	
Acide succinique	Mitsubishi - Ajinomoto		Amidon		Japon	
Biobutanol	BP, Dupont, ABF					
Butanol	Metabolic Explorer				France	2008
Diester isosorbide	Roquette	>0,1			France	Opérationnel
Epichlorohydrin	Dow	150	Glycérine		Chine	2010
Epichlorohydrin	Solvay	100	Glycérine		Thaïlande	mi 2009
Epichlorohydrin	Solvay	10	Glycérine		France	Opérationnel
Epichlorohydrin	Spolchemie	15	Glycérine		République Tchèque	Opérationnel
Polyhydroxyalkanoates (PHA)	DSM	10			Chine	
Ethylène	Union Paulo Carbide do Brasil Cubatão	24	Ethanol		Brésil	Ancienne usine pilote
Ethylène	Reliance Industry Kurkmbla		Ethanol		India	Opérationnel
Hydroxypropionic acid	Cargill					
Isosorbide	Roquette	1			France	Opérationnel
Lignine + HC base taille (140kt)	CIMV	5			France	2003
Lignine + HC base taille (140kt)	CIMV	50			France	2012
Polyéthylène	Crystalsev - Dow	350	Ethanol issu de la canne à sucre		Brésil	Début 2011
Polyéthylène	Songyuan Ji'an Biochemical Co.	300	Ethanol		Chine	
Polyéthylène haute densité	Braskem	200	Ethanol issu de la canne à sucre	110 M\$	Brésil	Début 2010
Propylène glycol	Archer Daniels Midland		Glycérine		NA	
Propylène glycol	Ashland - Cargill	65	Glycérine	90M\$	Europe	2011
Propylène glycol	Huntsman		Glycérine		USA	Début 2009
Propylène glycol	Synergy Chemicals	27	Glycérine		USA	Début 2008
Intermédiaires chimiques	BioHub : Roquette, Arkema, etc.			90M€ / 6 ans	France	

Parmi ces projets pilotes dont la liste n'est pas exhaustive, on notera en particulier deux projets sur l'éthylène et le polypropylène avec des quantités respectives cibles de 200 kT/an et 300 kT/an :

- Braskem est un pétrochimiste brésilien, leader sud-américain sur les résines thermoplastiques et 3^{ème} producteur aux États-Unis. Il exploite aujourd'hui 19 usines et 8 pilotes pour une production annuelle de 10 millions de tonnes. En 2007, Braskem a lancé son premier pilote de production de biopolyéthylène à partir d'éthanol. Suite à la réussite de ce pilote, Braskem a annoncé l'ouverture d'une première usine à échelle commerciale de production d'éthylène et de polyéthylène biosourcés dans son "Southern Petrochemical Complex". Cette usine, d'une

capacité de 200 kT/an, représentant un investissement de 500 M\$, fonctionnera à partir de bioéthanol (issu de la fermentation du sucre de canne) et devrait être pleinement opérationnelle fin 2011 ;

- Dow Chemical a également annoncé le lancement d'un site de production de 350 kT/an de polyéthylène à partir du bioéthanol. Prévue pour 2011, l'usine située au Brésil s'approvisionnera auprès de Crystalev, principal producteur d'éthanol du pays, avec qui Dow Chemical s'est allié. Cela permettra à Crystalev de diversifier les débouchés de son éthanol et à Dow Chemical de sécuriser ses approvisionnements en se rapprochant du producteur.

De par leur taille, ces deux projets semblent marquer un tournant dans la production de bio-intermédiaires en grandes quantités. Notons toutefois qu'ils sont situés au Brésil, pays disposant de sucre à faible coût (environ 70 € la tonne).

2.3.4. La valorisation de la lignine

La principale utilisation actuelle de la lignine est sa combustion dans l'industrie papetière. Les principaux produits biosourcés à partir de la lignine sont des lignosulfonates, produits à partir des lessives résiduelles de cuisson de l'industrie papetière. Les applications actuelles des lignosulfonates sont les suivantes :

- Adjuvant du béton (45%)
- Alimentation animale (16%)
- Construction de routes (11%)
- Dispersant de colorant (5%)

En synthèse, seules l'oléochimie, la chimie du sucre et l'approche mécanique ont une réalité industrielle ; à moyen terme, la chimie du sucre présente le plus gros potentiel théorique. La partie suivante présente les perspectives d'évolution économiques et technologiques pour la chimie du sucre, la voie thermochimique, la valorisation de la lignine et les systèmes complexes. L'oléochimie et l'approche mécanique ne sont pas abordées, ces modèles étant considérées comme plus matures.

Figure 2.8 - Synthèse des réalités industrielles actuelles et du potentiel théorique

Modèles	Réalité industrielle actuelle	Potentiel de développement théorique
Oléochimie	<ul style="list-style-type: none"> France : 150-200KT de produits oléochimiques, principalement des biotensioactifs et des bio-solvants et quelques bioplastiques (Rilsan) 	<ul style="list-style-type: none"> Technologie mature Poursuite du développement en France sur les mêmes produits
Chimie du sucre	<ul style="list-style-type: none"> Hors éthanol (biocarburants), 0-1% des intermédiaires produits à partir de biomasse (1,3 PDO, acide acétique, acide polylactide) Plusieurs projets pilotes sur le polypropylène 	<ul style="list-style-type: none"> En théorie, la plupart des grands intermédiaires En pratique, développement encore limité par le prix des matières premières et les biotechnologies
Approche mécanique	<ul style="list-style-type: none"> France : marché de quelques millions d'euros Principales applications : laine isolante, matériaux composites, emballage en fibres, feutres non tissés... 	<ul style="list-style-type: none"> Croissance des bioproduits, développement des matériaux composites à base de fibres, mais potentiel limité compte-tenu des propriétés obtenues avec cette approche
Voie thermochimique	<ul style="list-style-type: none"> Pas d'applications chimiques hors biocarburants 	<ul style="list-style-type: none"> Capacité à valoriser l'ensemble de la biomasse et à produire la plupart des grands intermédiaires (à partir de CO et de H₂) mais forte consommation d'énergie et investissements lourds
Valorisation de la lignine	<ul style="list-style-type: none"> Pas d'applications chimiques 	<ul style="list-style-type: none"> Essentiellement des aromatiques Technologie à moyen / long terme
Systèmes complexes	<ul style="list-style-type: none"> Pas d'applications industrielles 	<ul style="list-style-type: none"> A très long terme (30-50 ans ?)

2.4. Perspectives d'évolutions économiques et technologiques

2.4.1. La chimie du sucre

2.4.1.1. Les perspectives économiques de la chimie du sucre

Si le potentiel à moyen et long terme de la chimie du sucre est difficile à évaluer compte tenu des incertitudes technologiques existantes, force est de constater que les intermédiaires biosourcés, à l'exception de quelques produits et intermédiaires de spécialité, n'ont pas encore démontré leur rentabilité économique. Pour autant, pouvait-on légitimement attendre de la chimie du sucre qu'elle soit au niveau de performance de la pétrochimie, quelques années après le démarrage des études industrielles ? Rappelons que la pétrochimie bénéficie de 50 années d'expérience cumulée d'optimisation des procédés et qu'elle s'appuie sur des compétences reconnues dans les laboratoires de recherche.

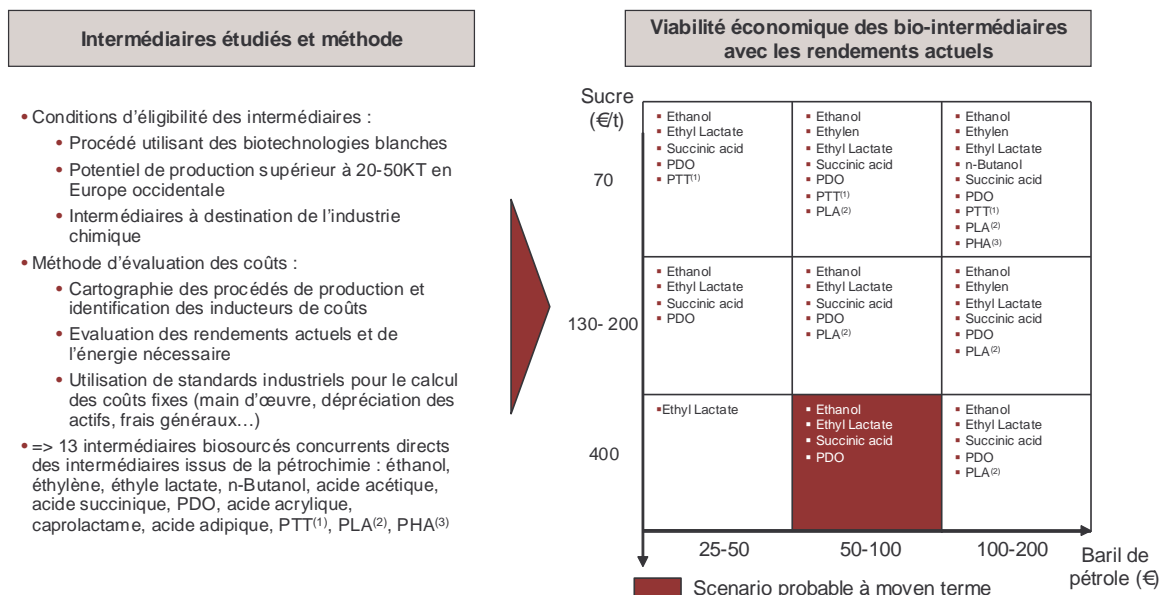
Comme précisé en introduction de la note, les études économiques réalisées par les industriels sont confidentielles. Pour donner un aperçu de la rentabilité économique actuelle de certains intermédiaires biosourcés, la présente note s'appuie donc sur les calculs réalisés par l'étude "The Brew Project". Treize intermédiaires biosourcés, sélectionnés par cette étude comme offrant le potentiel de développement le plus important, sont présentés ci-dessous :

Figure 2.9 - Viabilité économique de certains intermédiaires biosourcés

ATKEARNEY

En 2008, seul un nombre réduit d'intermédiaires biosourcés sont économiquement viables

NON EXHAUSTIF



Notes : (1) PTT : Polytriméthylène terephthalate en équivalent fonctionnel du PET

(2) PLA : Polylactide en équivalent fonctionnel du polystyrène à usage courant, du polyéthylène basse densité et du PET

(3) PHA : Polyhydroalcanoates en équivalent fonctionnel du polyéthylène haute densité

Source : BREW, analyse A.T. Kearney

A.T. Kearney 17

Lecture : les bio-intermédiaires ont été positionnés sur la matrice lorsqu'ils peuvent être produits pour un coût égal à +/- 10% du coût de production à partir de matières fossiles

Sans surprise, on retrouve les intermédiaires biosourcés aujourd'hui en quantité significative comme le 1,3 PDO et l'éthanol (intermédiaire de synthèse) ainsi que l'acide succinique qui fait l'objet de plusieurs pilotes industriels actuels. Même dans un scénario optimiste pour la chimie du végétal où le pétrole dépasserait son plus niveau haut de 2008 pour atteindre 200 € le baril, peu d'intermédiaires biosourcés seraient économiquement viables.

Pour améliorer la viabilité économique des bio-intermédiaires, deux principaux leviers peuvent être actionnés :

- Utiliser des matières premières disponibles à moindre coût, soit en utilisant les résidus agricoles, soit par la valorisation de coproduits issus de la chimie classique ou d'autres industries (papier, biocarburants) au travers du concept de procédés intégrés de bioraffinerie ;
- Améliorer les rendements et les productivités actuelles.

2.4.1.2. Le prix des matières premières

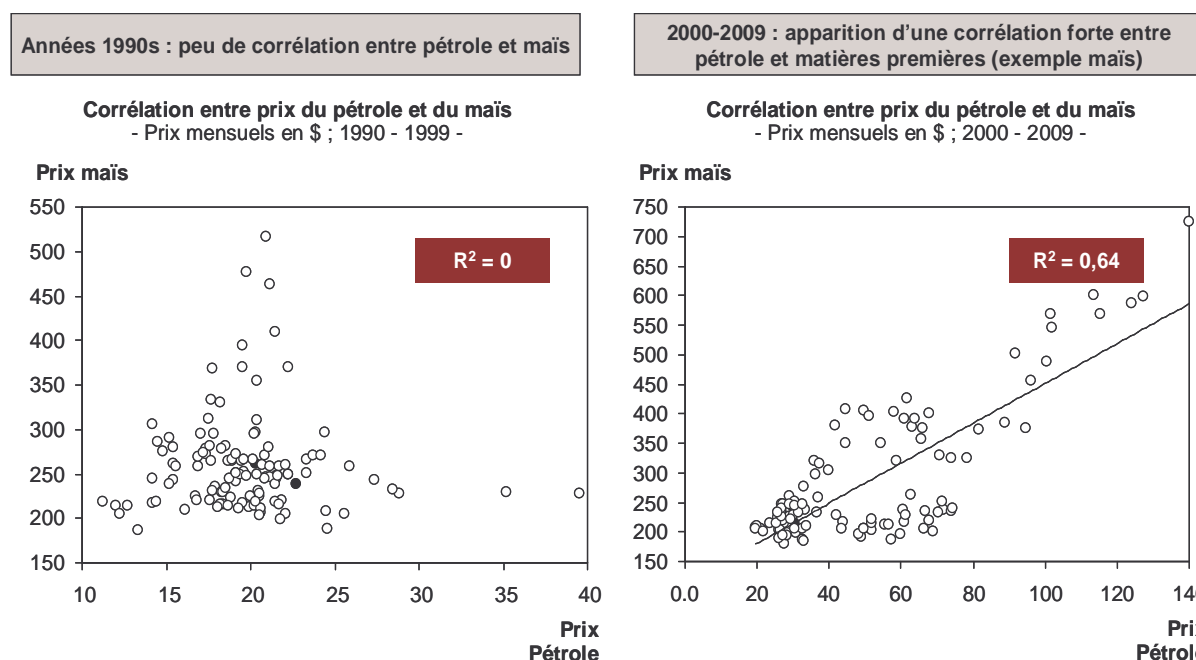
Le prix des matières premières agricoles transformables en sucre est un facteur limitant le développement de la chimie du végétal. En effet, à 300 € la tonne en Europe, les perspectives de développement de la chimie du sucre sont réduites. De plus, si la chimie du sucre venait à se développer, il est probable que cela exercerait une tension à la hausse sur le prix des matières premières. L'étude de l'impact du développement des biocarburants sur le prix des produits agricoles

permet d'appréhender ce phénomène. Même si les différentes études sur le sujet (Banque Mondiale, FAO, IFRI, CEA...) divergent sur le poids des biocarburants dans la hausse des produits agricoles (médiane à 30-40%), toutes s'accordent pour affirmer que la demande de biocarburants est pour beaucoup dans la hausse du prix des produits agricoles constatée depuis 2005. Ainsi, pour la Banque Mondiale, "Le niveau élevé des prix [des produits agricoles] est directement lié à l'augmentation de la production d'éthanol à partir du maïs aux États-Unis et du biodiésel à partir des huiles végétales en Europe". La part de la production mondiale de maïs utilisée pour l'éthanol était de 2,5% en 2000, 5% en 2004 et 11% en 2007.

Ainsi, la hausse du prix du pétrole a sans doute contribué au développement des biocarburants et donc à la hausse du prix des matières premières. On est donc face à une corrélation naissante entre le prix du pétrole et le prix des produits agricoles qui dépasse la relation classique entre ces deux matières premières, liées aux intrants. Cette corrélation est somme toute assez logique compte tenu de la concurrence entre ces deux sources de matières premières (phénomène d'élasticité croisée). Il faut cependant souligner le poids vraisemblable de la spéculation sur les marchés financiers dans le pic atteint en 2008 et le manque de recul pour conclure définitivement. De plus, il est possible que ces phénomènes de corrélation diffèrent d'un marché à un autre. En particulier, la politique agricole commune de l'Union européenne pourrait avoir un effet amortisseur sur les évolutions de prix. Le régulateur pourrait également être amené à intervenir afin de lever ce frein au développement de la chimie du végétal.

Dans une logique d'offre et de demande, la baisse des prix des matières premières peut provenir d'une augmentation des stocks de matières premières disponibles, notamment par l'utilisation et la transformation des résidus agricoles (composés principalement de cellulose, d'hémicellulose et de lignine) ou d'accords privilégiés d'approvisionnement hors prix du marché.

Figure 2.10 - Corrélation entre le prix du pétrole et les matières premières



La capacité à transformer la cellulose, l'hémicellulose et la lignine est donc un facteur clé de succès. Aujourd'hui, la dégradation efficace de la lignine est encore au stade du laboratoire. Les recherches

portent sur la conception de micro-organismes et d'enzymes capables de dégrader ces matières complexes.

Par ailleurs, un autre concept a émergé pour disposer de matières premières à faible coût, la bioraffinerie. L'idée est d'utiliser les coproduits peu valorisés comme intermédiaires de base de la chimie du végétal. Ce concept peut se décliner selon plusieurs formes (liste non exhaustive) :

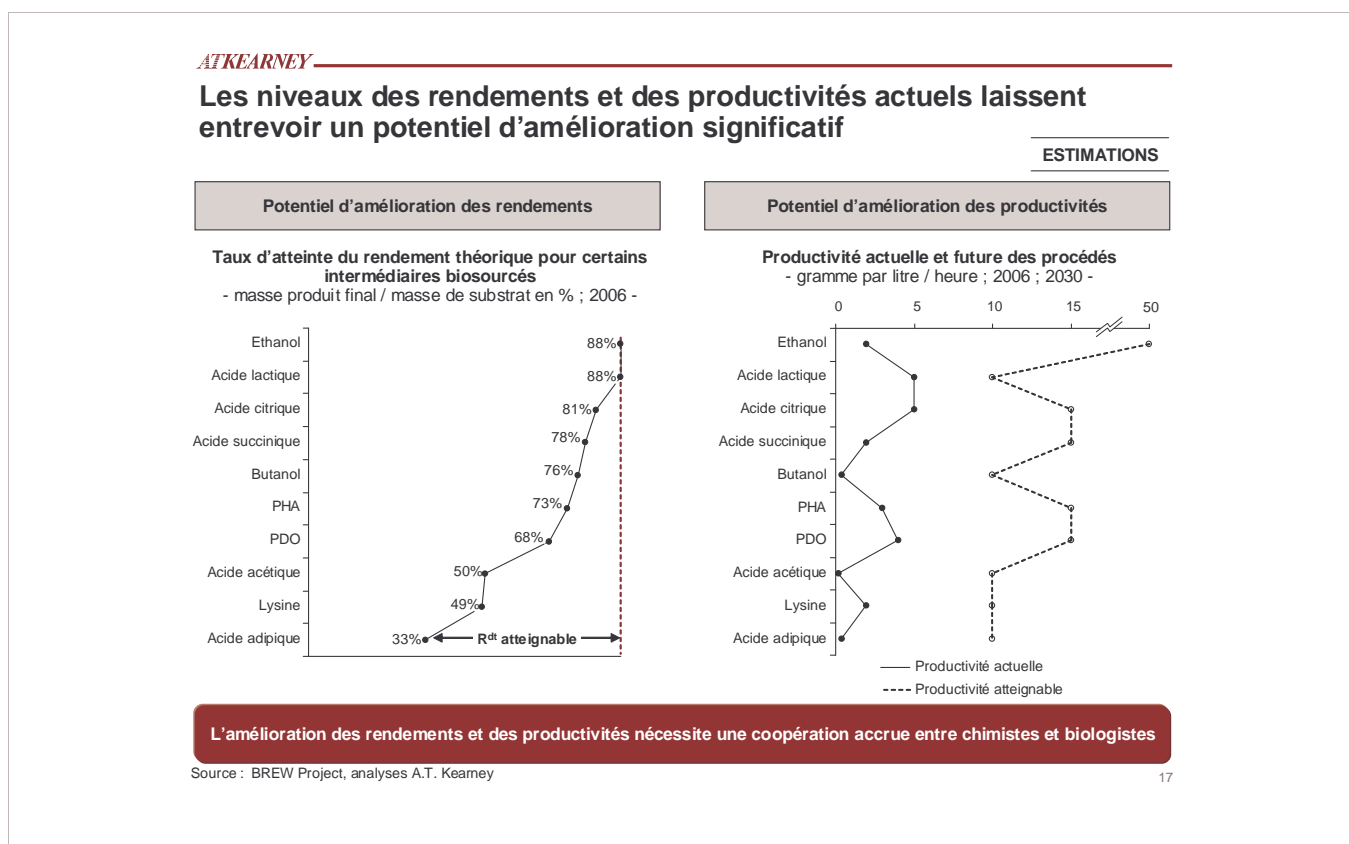
- L'utilisation de la glycérine, coproduit lors de la transformation des huiles en ester, et en particulier lors de la production de biocarburants (10% de la masse dans la réaction de production d'ester de colza). Le développement du biodiesel en Europe a entraîné une forte augmentation de la production de glycérine et une diminution du prix de 70% entre 1995 et 2006. Selon une étude du US Department of Energy, les nouvelles applications potentielles de la glycérine sont nombreuses, celle-ci pouvant être utilisée en tant qu'intermédiaire de base pour la production de 1,3 propanediol, de propylène glycol, de polyesters et nylons, de carbonate de glycérol ou encore d'acide glycérique. Cependant, les quantités de glycérol envisageables compte tenu du développement du biodiesel ne semblent pas permettre d'envisager un essor considérable de la chimie de la glycérine. En effet, en supposant que la production mondiale actuelle de biodiesel (10 MT) soit multipliée par 5 en 10 ans (hypothèse plutôt haute), cela générerait une capacité additionnelle de 4 millions de tonnes de glycérine par an soit 1,6 million de tonnes de carbone, soit 0,4% des besoins annuels de l'industrie chimique dans le monde (400 MT). Ainsi, la glycérine est certes une voie intéressante à explorer mais dont le potentiel semble bien moindre que celui du sucre ;
- La valorisation des hémicelluloses extraites des copeaux de bois utilisés pour la fabrication des pâtes papetières et aujourd'hui brûlées ;
- L'intégration de différentes activités industrielles au sein d'une bioraffinerie. En sus de la diminution des coûts de matières premières pour la chimie (regroupement des achats, valorisation des résidus et des coproduits, intégration entre les acteurs...), cette solution a l'avantage de diminuer les coûts de production (mutualisation de certaines infrastructures, diminution des coûts de transport...). Par exemple, le site Bazancourt-Pomacle regroupe une sucrerie, des unités de production d'éthanol (en construction), des usines de production de produits chimiques (oléochimie et projet pilote d'acide succinique), une amidonnerie, un projet pilote de production de papier à base de paille, un centre de R&D...

2.4.1.3. L'amélioration des rendements et de la productivité

A l'instar de la pétrochimie qui a su optimiser les procédés, les outils et les infrastructures pour atteindre des niveaux proches du rendement théorique, la chimie du sucre doit progresser dans la recherche du meilleur rendement.

De même, la productivité des réactions doit être améliorée au travers de l'accélération de la cinétique des réactions.

Figure 2.11 - Potentiel d'amélioration des rendements et productivité des intermédiaires biosourcés



2.4.1.4. Les recherches actuelles

Les recherches actuelles visent autant à accroître le stock de biomasse utilisable pour la chimie au travers de la transformation des sucres, de la cellulose, de l'hémicellulose et de la lignine qu'à améliorer les rendements et les productivités actuelles.

La valorisation des résidus agricoles et du bois nécessite de relever deux défis. Tout d'abord, être capable de séparer les différents composants de la structure des résidus : la cellulose, l'hémicellulose et la lignine. Cette séparation peut être réalisée par des procédés chimiques, thermo-chimiques ou biotechnologiques. Aujourd'hui, les meilleurs rendements obtenus en laboratoire pour la lignine sont de l'ordre de 50%. Le deuxième défi repose sur la dégradation de l'hémicellulose grâce à des "cocktails d'enzymes", différents selon le type de matières premières.

La recherche pour améliorer les rendements et les productivités s'articule autour de l'optimisation du couple matière première / enzyme ou micro-organisme. Deux domaines de recherche en biologie synthétique coexistent : la modification d'un catalyseur enzymatique et la modification des voies métaboliques d'un micro-organisme.

L'obtention de nouvelles enzymes se réalise par mutagenèse dirigée ou par évolution dirigée. La mutagenèse dirigée est l'induction d'une ou plusieurs mutations dans un génome, de façon précise et volontaire. L'évolution dirigée s'inspire des mécanismes de base de l'évolution pour améliorer une protéine ou un acide nucléique : il s'agit tout d'abord de générer une banque de variant du gène codant la protéine, puis de sélectionner les protéines à partir de test et enfin de réaliser un criblage.

Pour les micro-organismes, il faut rappeler qu'à ce jour plus de 95% de la diversité bactérienne n'est toujours pas connue¹. La recherche s'appuie sur 4 compétences complémentaires :

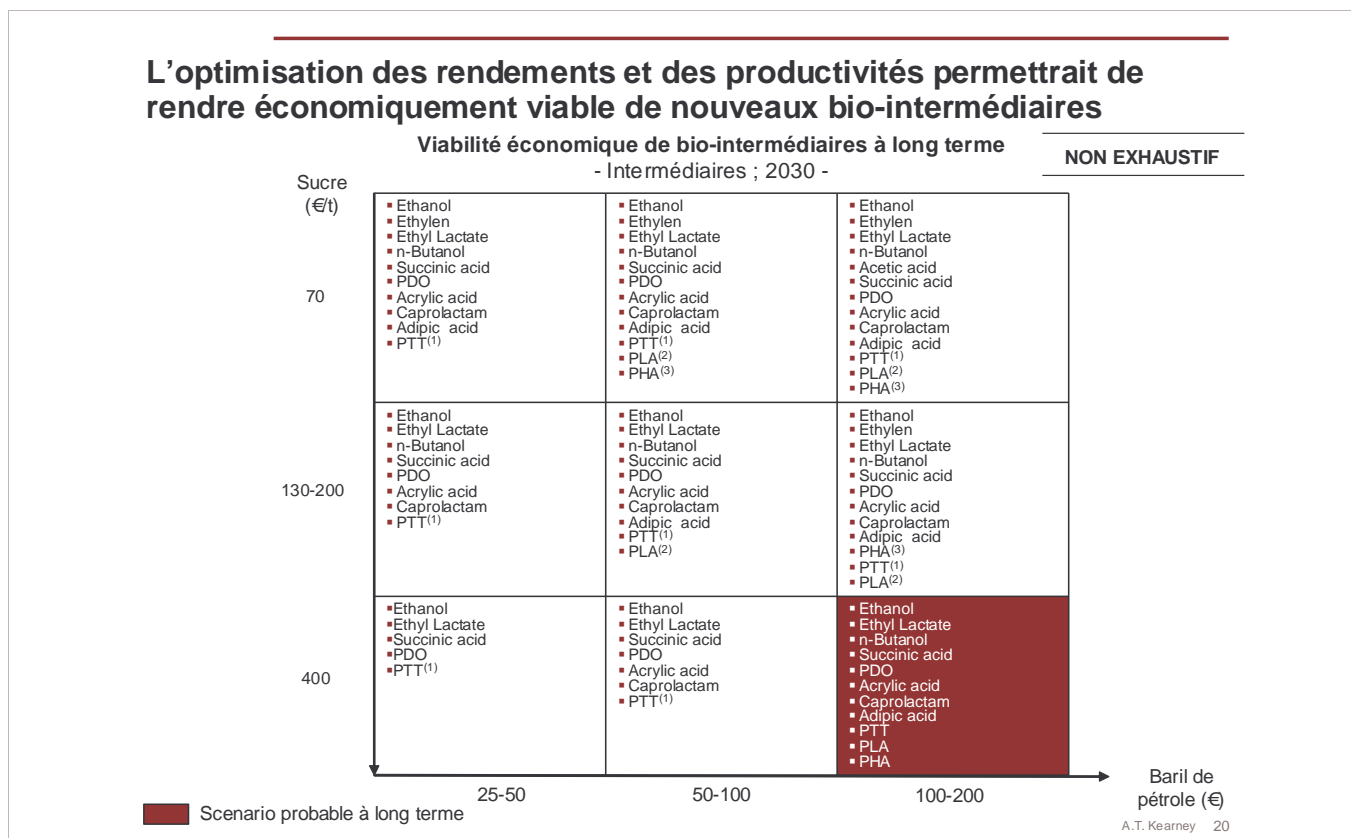
- Des compétences en biologie ;
- Des compétences en bioinformatique pour concevoir les modifications à apporter aux micro-organismes ;
- De l'ingénierie du génome pour modifier les séquences d'ADN du micro-organisme ;
- Des plates-formes expérimentales de fermentation.

L'idée est d'obtenir l'organisme optimal pour le rendement de la réaction en enlevant le partie du génome non utilisée (mais consommatrice de sucre...). Cette transformation peut s'effectuer soit en enlevant les morceaux du génome, soit en partant d'un organisme minimal auquel on rajoute des gènes. Dans les deux cas, cela nécessite de repérer les chemins métaboliques des micro-organismes, ce qui représente un travail considérable.

Il est difficile d'estimer la viabilité future des bio-intermédiaires, avec des productivités et des rendements optimisés. Cependant, les calculs théoriques disponibles au travers de l'étude "The Brew Project" révèle que plusieurs bio-intermédiaires produits en grandes quantités seraient économiquement viables, même avec un prix du sucre à 400 €/T. Avec un sucre inférieur à 200 €/T, l'éthylène deviendrait ainsi un candidat à la voie biologique. Cette estimation est à mettre en perspective avec le lancement récent de projets pilotes au Brésil sur le polyéthylène.

¹ Source : Amann et al., 1995 et Whitman et al. 1998

Figure 2.12 - Viabilité économique de certains intermédiaires biosourcés avec des procédés optimisés



Lecture : les bio-intermédiaires ont été positionnés sur la matrice lorsqu'ils peuvent être produits pour un coût égal à +/- 10% du coût de production à partir de matières fossiles.

En synthèse, la disponibilité de matières premières à coût réduit et l'amélioration des rendements et des procédés existants nécessitent tous deux des évolutions technologiques.

2.4.2. Les opportunités et les risques de la voie thermochimique

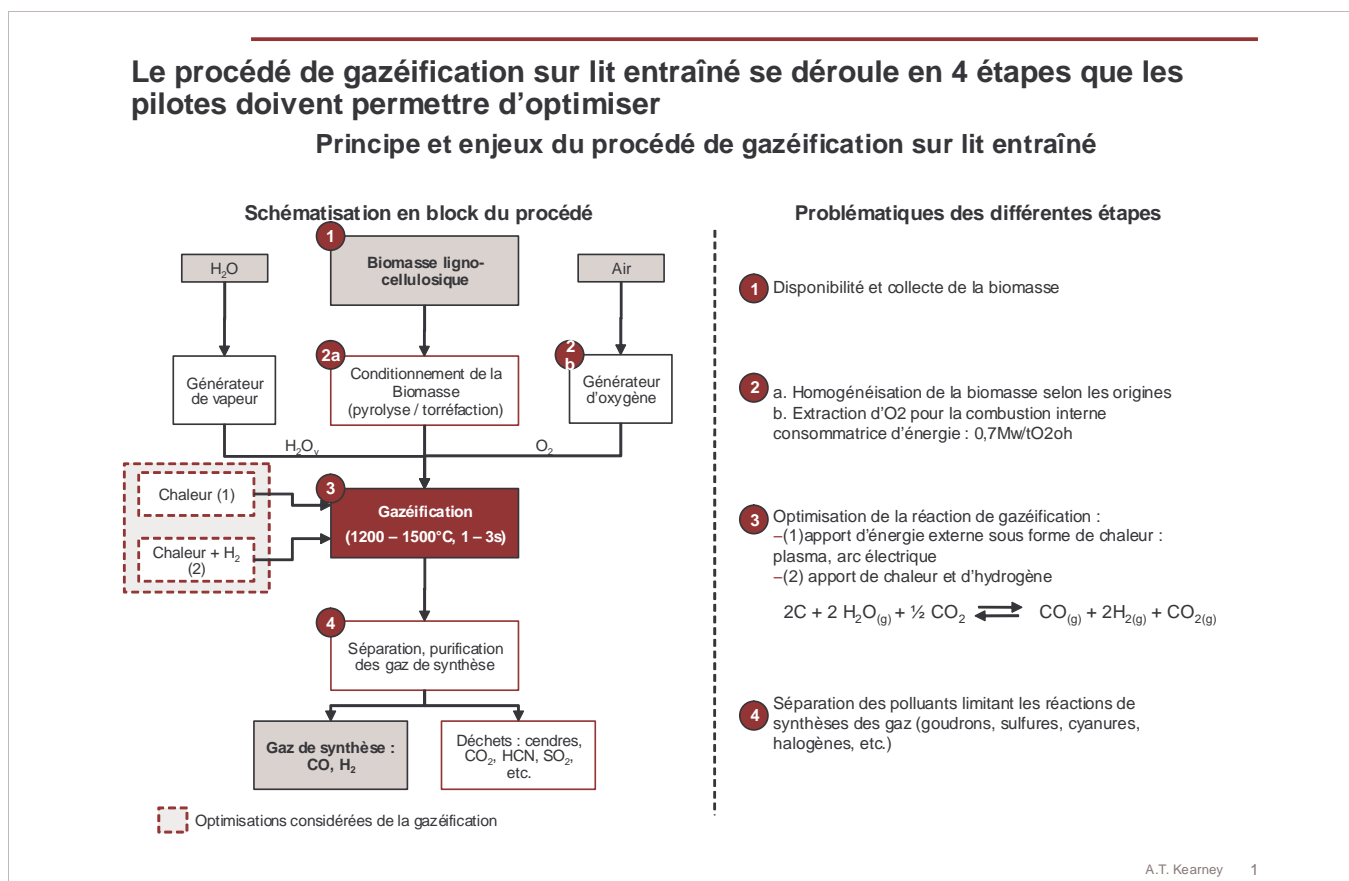
La thermochimie est revenue sur le devant de la scène avec les recherches autour de la 2^{ème} génération de biocarburants, dont l'objectif est d'exploiter l'intégralité de la plante, et en particulier sa part non alimentaire, composée en majorité de lignine, de cellulose et d'hémicellulose.

Les pilotes industriels sont encore peu nombreux mais certains projets voient le jour, en particulier en Europe où l'importance du diesel dans le parc automobile ainsi que la maîtrise du procédé de Fisher-Tropsch ont favorisé le développement de pilotes thermochimiques. Citons notamment les projets de Choren (Shell) en Allemagne (15 000 tonnes par an de BtL et nouveau projet de 200 000 tonnes par an), d'Enerkem au Canada (100 000 tonnes d'éthanol par an) et de Neste-StoraEnso en Finlande (100 000 tonnes par an de BTL).

La voie thermochimique est réalisée au travers de deux phases principales, une phase de gazéification et une phase de recombinaison des molécules. La gazéification est une technologie relativement ancienne. Cependant, elle est actuellement limitée par :

- La capacité à s'adapter aux propriétés de la biomasse : la biomasse est un combustible dont les propriétés varient dans de fortes proportions, notamment en matière d'humidité, de teneur en cendres, de température de fusion ou de ramollissement des cendres. Avec des matières végétales d'origines diverses, le choix du procédé devient critique compte tenu des particularités et des rendements de gazéification des différents procédés et des auxiliaires nécessaires. Deux technologies de conditionnement de la biomasse sont à l'étude : la torréfaction et la pyrolyse ;
- Un rendement théorique carbone de 50%, deux atomes de carbone issus de la biomasse étant nécessaires à la production d'une molécule de CO et d'une molécule de CO₂. Plusieurs technologies sont donc à l'étude pour améliorer ce rendement, notamment par un apport d'énergie extérieure mettant en œuvre un plasma (torche à plasma ou arc électrique) de façon à limiter la réaction d'autocombustion des gaz au sein du réacteur ou par un apport de chaleur extérieure et d'hydrogène comme complément d'énergie à la réaction de gazéification (et à la réaction de Fischer Tropsch) ;
- Enfin, la nécessité de purifier les gaz issus de la gazéification qui engendre d'importants surcoûts d'investissements et de maintenance.

Figure 2.13 - Principes et enjeux de la gazéification de la biomasse



Le procédé de recombinaison postgazéification qui semble être privilégié aujourd'hui est le procédé Fischer-Tropsch (FT) qui permet la synthèse d'hydrocarbures (essence, kérosène et gazole) à partir d'un gaz de synthèse issu de la gazéification de la biomasse. Cette réaction exothermique se produit sous une pression et des températures relativement modérées (~2MPa ; ~230°C) et fait intervenir des catalyseurs qui améliorent les rendements des différents produits. Les produits de cette réaction sont

appelés cires paraffiniques. Ils sont dirigés vers un hydrocraqueur (10 MPa, 400°C) puis fractionnés pour obtenir des hydrocarbures pouvant être utilisés dans les moteurs purs ou bien mélangés. La réaction FT est une réaction très sensible aux impuretés (en particulier aux composés sulfureux et aux goudrons) et c'est pourquoi la purification constitue un axe majeur de la recherche dans les biocarburants de seconde génération.

Une autre voie de recombinaison possible est la voie biotechnologique, actuellement au stade du laboratoire ou du pilote. Ainsi, Coskata a breveté un processus de synthèse d'éthanol par fermentation à partir des gaz de synthèse. Ce procédé aurait l'avantage de diminuer le besoin de purification, les micro-organismes étant moins sensibles aux impuretés que les réactions catalytiques, de réduire l'adaptation du ratio CO / H₂ en sortie de gazéification et enfin de limiter la production de coproduits et donc le nombre de phases d'extraction/séparation.

Evaluer le potentiel de développement de la voie thermochimique appliquée à l'industrie chimique n'est pas aisé. Tout d'abord, la voie thermochimique est considérée comme moins propre que la voie biologique, du fait de l'énergie nécessaire aux différentes étapes de transformation. Cet élément est important, quand on sait que la consommation d'énergie est la principale source d'émission de gaz à effet de serre lors du cycle de vie d'un polymère (hors utilisation). Cependant, il doit être nuancé compte tenu du pouvoir énergétique de la biomasse utilisée (exothermie). Deuxièmement, les procédés nécessaires, hors voie biotechnologique, sont lourds et nécessiteraient des investissements très importants. Enfin, les rendements actuels, bien que relativement faibles (50% de carbone), sont supérieurs à ceux de la voie biologique pour l'hémicellulose et la lignine, molécules présentes dans les résidus agricoles et le bois. On pourrait donc se trouver face à un arbitrage, entre d'un côté une voie biologique plus propre mais ne sachant pas encore valoriser l'ensemble des matières végétales et de l'autre une voie thermochimique permettant de valoriser les résidus et le bois à moyen terme mais avec une contribution à la durabilité moindre.

2.4.3. Les systèmes complexes, utopie ou réalité ?

La chimie actuelle est essentiellement basée sur la production d'un produit à partir d'une matière première dont les caractéristiques sont stables. Les modèles de chimie du végétal envisagés ne remettent pas en cause ce schéma. En effet, la complexité du vivant n'est pas valorisée, les différentes molécules le composant étant transformées, lors d'une première étape, en molécules plus simples – plates-formes sucres ou huiles – utilisées par la suite comme matières premières. Ainsi, le schéma de pensée revient à "décomplexifier" d'abord pour "recomplexifier" ensuite, le paroxysme étant atteint avec la voie thermochimique. Dans ce cadre, l'essentiel des recherches actuelles vise à optimiser le couple matière première – procédé afin d'atteindre des rendements supérieurs et d'améliorer la cinétique de la réaction.

Ce modèle dominant connaît cependant un certain nombre de limites, parmi lesquelles :

- Une difficulté intrinsèque à valoriser les coproduits, subis plus que souhaités, dont on cherche à diminuer la part dans le rendement final de la réaction ;
- Une dépendance forte envers les caractéristiques des matières premières : pureté (part des molécules utiles pour la réaction), part des différentes espèces utiles (glucose, polyoses ...). Cette dépendance se traduit par un besoin de contrôle des produits issus de la chaîne de transformation amont et limite le champ des possibles en termes de matières premières et de fournisseurs ;

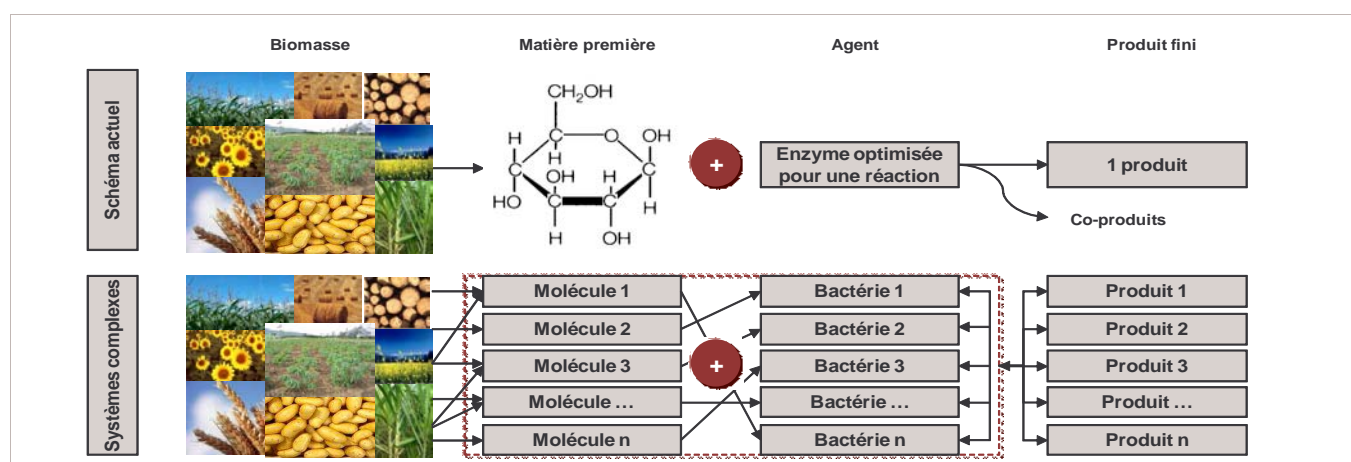
- Des émissions de gaz à effet de serre et un bilan énergétique non optimisé dû à l'hydrolyse de nombreuses liaisons avant recombinaison.

Sortir de cette logique industrielle établie n'est pas chose aisée, même en restant au stade du concept. Pour autant, la présente note tente de proposer une vision qualitative très prospective de ce que pourrait être un autre modèle, basé sur une meilleure gestion de la complexité. Cette vision, très théorique, a été élaborée au travers d'entretiens avec des chercheurs reconnus au niveau international dans le domaine de la chimie des systèmes complexes et n'a pas d'autre ambition que de présenter de façon simplifiée ce domaine de recherche et les opportunités qu'il pourrait offrir à la chimie du végétal.

Ainsi, les systèmes complexes pourraient permettre, en théorie, de dépasser certaines limites inhérentes à la chimie "classique" identifiée ci-dessus au travers de :

- La gestion de la complexité des matières premières entrantes dans la chaîne de production, quelles que soient leur origine, leur composition, leur pureté, autrement dit leur prédisposition à leur valorisation au travers des processus de l'industrie chimique ;
- La gestion de la complexité des procédés mis en jeu tant par le nombre de substances présentes que par leurs interactions ;
- La gestion de la complexité des produits issus des réactions chimiques dont les propriétés pourraient être sensiblement différentes des produits actuels, avec des variations de caractéristiques dépendant des modifications des matières premières et de l'environnement dans lequel se fait la réaction (éclairage, température, concentrations...).

Figure 2.14 - Schéma très simplifié des systèmes complexes par opposition au modèle actuel



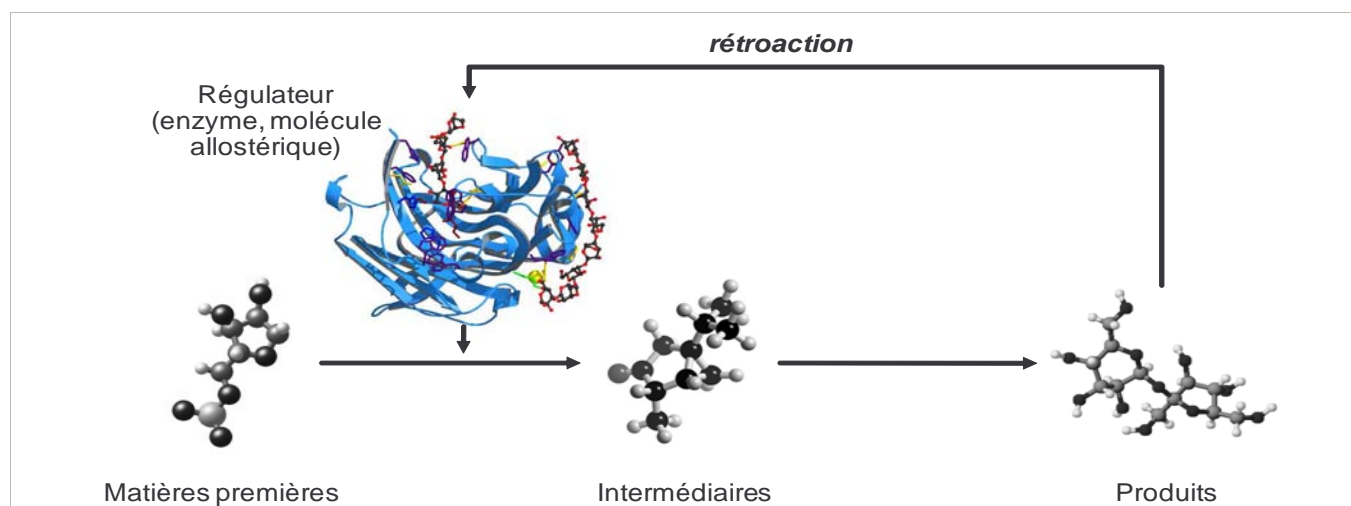
Issue des recherches en physique et en mathématiques, l'étude des systèmes complexes s'est peu à peu étendue à l'ensemble des domaines scientifiques. On y retrouve aussi bien l'étude des colonies de fourmis, des phénomènes météorologiques, des systèmes d'équations non linéaires que l'explication de certains phénomènes économiques.

Un système chimique complexe pourrait être composé d'un grand nombre de substances chimiques en interaction simultanée. Cette diversité se traduit par l'apparition d'un comportement propre au système dans sa globalité, distinct de la somme des comportements des composantes du système. Au contraire des réactions simples considérées séparément, le comportement d'un système complexe est difficilement modélisable, c'est-à-dire qu'il est difficile de le décrire, de l'analyser et de prévoir ses évolutions.

Le comportement type d'un système chimique complexe est défini par un certain nombre de caractéristiques parmi lesquelles :

- La capacité de résister à la modification de l'environnement du système (flux entrants d'énergie et de matière première) et d'emprunter des chemins de contournement afin de résoudre un problème. Dans la chimie du végétal, un tel système serait donc capable de s'adapter, sans intervention humaine, à la modification de la qualité ou de la composition du flux entrant de matières premières ;
- La capacité à évoluer et à s'autoréguler grâce à des boucles de rétroaction : une molécule issue d'une réaction influe sur les précurseurs de cette réaction afin de la modifier et de la faire évoluer vers un optimum ;
- La capacité à former des réseaux permettant l'échange d'informations rapide grâce à un minimum d'interactions entre molécules et grâce à la structuration et à la hiérarchisation de ces réseaux. Ainsi, en se conjuguant avec les propriétés de rétroaction au sein d'une chaîne (qui lui font atteindre un optimum local), la transmission d'informations au sein du réseau formé par l'ensemble des chaînes permettrait au système d'évoluer – au sens darwinien – vers un optimum global qui se traduirait par le choix de la chaîne la plus performante pour transformer les matières premières en produits recherchés.

Figure 2.15 - Schéma très simplifié d'une boucle de rétroaction dans un système complexe



Cependant, les limites actuelles de ce domaine de recherche, encore très fondamental, sont nombreuses :

- La lenteur de l'évolution propre du système contrairement à l'évolution dirigée d'un système via des sélections et des plans d'expérience. Ainsi, dans une logique industrielle, il est difficile d'envisager un système autonome qui évoluerait sans intervention humaine extérieure ;
- Des applications difficiles à définir à l'heure actuelle : "C'est tellement fondamental que je ne vois pas comment on peut l'appliquer à la chimie" ;
- La nécessité pour les industries en aval de la chimie d'accepter l'utilisation de molécules potentiellement différentes car issues de nouvelles réactions mais ayant des fonctionnalités semblables ;

- La capacité non démontrée à valoriser l'ensemble des produits issus du système : "Je ne crois pas au fait de tout valoriser ; il y aura toujours des déchets à destination de l'alimentation animale ou de l'énergie ; on peut néanmoins maximiser la valorisation des coproduits" ;
- Des recherches encore au niveau théorique : "Je suis sceptique sur l'analogie avec le microbiote du tube digestif ; je crois d'avantage à la biologie synthétique : l'étape suivante est déjà d'être capable de maîtriser le comportement d'un micro-organisme simple, ce qui est déjà extrêmement complexe".

2.4.4. La valorisation de la lignine

Hors voie thermochimique, les principales applications potentielles de la lignine sont les aromatiques. La structure de la lignine permet d'envisager deux principales voies :

- Une dépolymérisation non sélective (rupture de liaisons C-C et C-O) pour fabriquer des aromatiques dérivés du benzène (1,6 – diaminohexane) , du xylène (acide isophthalique, acide téréphtalique) et du toluène (acide benzoïque) ;
- Une dépolymérisation sélective permettant de produire de nombreux aromatiques difficilement atteignables par la voie pétrochimique avec l'idée de conserver la structure de la lignine. Cela nécessiterait des technologies capables de casser les liaisons entre les atomes de la lignine de façon sélective.

Les recherches actuelles pour valoriser la lignine, hors voie thermochimique, portent principalement sur les deux domaines suivants :

- La séparation de la lignine des autres molécules de la plante et du bois (cellulose et hémicellulose). Ce procédé est complexe du fait de la diversité de la lignine présente dans la nature. Par ailleurs, la lignine obtenue pourra avoir des propriétés différentes en termes de solubilité, de distribution du poids moléculaire, de réactivité... ;
- La transformation de la lignine par voie chimique ou biotechnologique. Il s'agit d'identifier des micro-organismes capables de transformer la lignine (par exemple, champignons filamenteux synthétisant des enzymes qui hydrolysent la lignine en petits polymères aromatiques).

Il est encore difficile d'estimer le potentiel de marché de la valorisation de la lignine, les technologies n'étant pas encore matures. En théorie, les applications potentielles sont importantes, les aromatiques dérivés du benzène et du toluène représentant une consommation mondiale de 65 MT de carbone, soit 17% de la consommation mondiale de l'industrie chimique. Une étude du US Department of Energy (2007) souligne que *"les applications industrielles des produits issus de la lignine devraient être développées. Cette voie est le plus long terme et n'est pas tirée par une demande du marché. L'industrie chimique étant habituée à des molécules simples et pures, l'utilisation de mélange de produits inhérente à la valorisation de la lignine est un défi"*.

2.5. La problématique de la disponibilité des ressources

Au-delà de la capacité technique à transformer le végétal en produits chimiques et de la viabilité économique de cette source de matières premières, se pose inévitablement la question de la disponibilité des sources. Au préalable, il convient également de rappeler que les besoins en matières premières pour l'industrie chimique ne représentent que 4% des tonnes de carbone consommées dans le monde, contre 35% pour les centrales d'électricité et de chaleur, 17% pour le transport, 23% pour l'industrie et 21% dans des secteurs divers.

Les experts rencontrés ont souvent des ordres de grandeur sur le stock de biomasse disponible mais les méthodes de calcul et les cultures prises en compte (grain ou plante entière, cultures céréalières ou forêts...) sont trop différentes pour donner une estimation précise.

Le groupe projet a donc choisi de réaliser ses propres analyses, en utilisant les statistiques sur le stock de biomasse disponible publiées par la FAO. Hors bois, fruits et légumes, 84% des cultures ont été prises en compte (en tonnage) dans les analyses présentées. La méthode de calcul est la suivante :

- Le point de départ est la collecte des statistiques de production pour 12 grandes cultures représentant 84% du poids des matières agricoles hors fruits et légumes ;
- Pour chaque culture, nous avons estimé la répartition entre le grain et les résidus (tige et feuilles) afin de prendre en considération les résidus. Les racines n'ont pas été considérées, leur arrachage semblant présenter des risques de dégradation des sols importants ;
- Pour chaque culture, nous avons estimé la composition du grain et des résidus entre les grands types de molécules présentes dans la matière végétale : sucres, cellulose, hémicellulose, lignine et autres ;
- Pour chaque type de molécule, nous avons calculé la part du carbone dans la masse totale : par exemple, pour l'amidon dont la formule est $C_6H_{12}O_6$, la part du carbone est égale à $6 \times 12 / (6 \times 12 + 12 \times 1 + 6 \times 16)$ soit 40% ;
- Pour chaque molécule, nous avons estimé la part du carbone transformable en sucres fermentescibles, qui servent de base à la fermentation. Avec les technologies actuelles, les sucres contenus dans la cellulose sont plus facilement utilisables que ceux de l'hémicellulose. Bien que non transformable en sucres fermentescibles, la lignine est incluse dans l'analyse afin de donner une vision complète de la disponibilité en ressources ;
- Toujours pour chaque molécule, nous avons estimé le rendement stœchiométrique et le taux d'atteinte de ce rendement à l'échelle industrielle.

Les hypothèses retenues sont présentées ci-dessous. Elles ont fait l'objet de discussions avec des experts (industriels et chercheurs) mais doivent bien entendu être interprétées avec précaution.

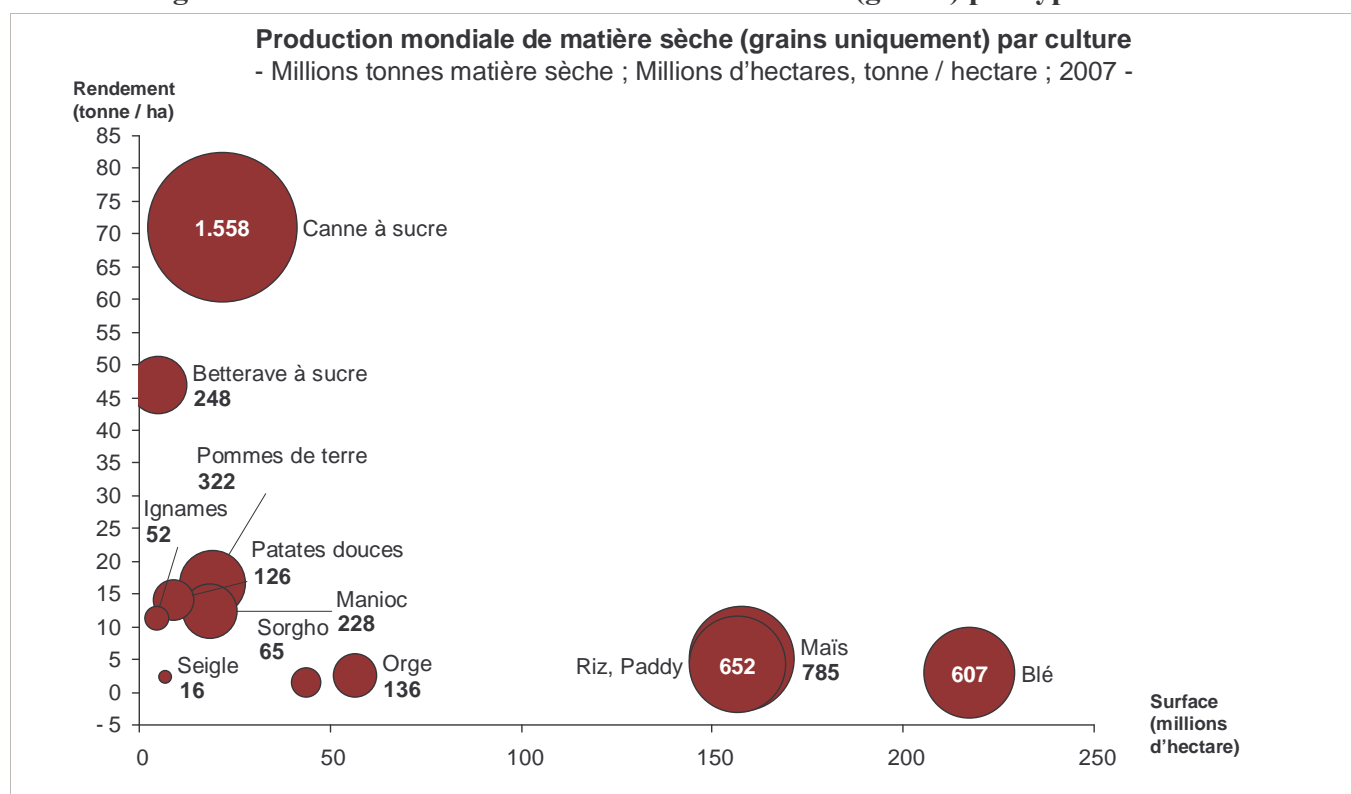
Figure 2.16 - Principales hypothèses du modèle de disponibilité des ressources basées sur le taux de carbone pur dans la ressource

Hypothèses rendements actuels	Sucres	Cellulose	Hémicellulose	Lignine	Autres
Part du carbone dans le poids	40%	44%	45%	67%	
Taux de transformation en sucres fermentescibles	90%	50%	30%	Non transformable actuellement (thermochimie au stade de pilote)	0%
Rendement stœchiométrique (carbone)	60%	60%	60%		
Rendement industriel	70%	70%	70%		

Cependant, il faut noter que dans certains cas, la chimie du végétal permet de remplacer des atomes de carbone par des atomes d'oxygène. Cette possibilité n'est pas prise en compte dans l'estimation suivante mais ne devrait pas en modifier l'ordre de grandeur.

Hors bois, fruits et légumes, les cultures agricoles représentent environ 11,8 milliards de tonnes qui se répartissent en 4,8 milliards de tonnes de grains et 7,0 milliards de tonnes de résidus. La canne à sucre a un rendement à l'hectare de 71 tonnes tandis que le blé ou le maïs ont des rendements respectifs de 3 et 5 tonnes à l'hectare. Si bien que, malgré une surface de production relativement faible (21 millions d'hectares) par rapport aux grandes cultures, la canne à sucre est la première production mondiale en termes de matière sèche.

Figure 2.17 - Production mondiale de matière sèche (grains) par type de culture

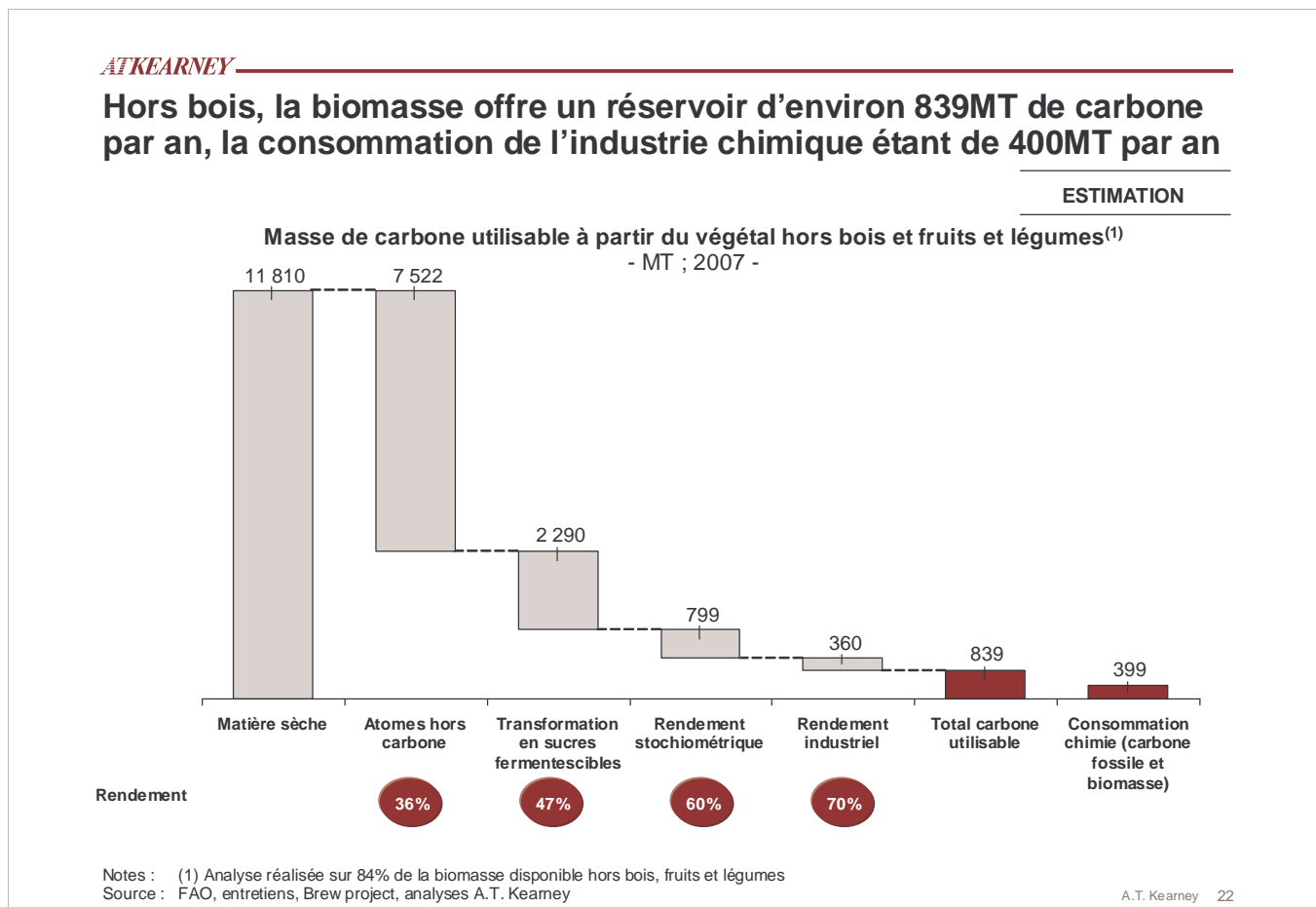


Les matières premières végétales ont une teneur en oxygène importante, à l'opposé des hydrocarbures. Ainsi, sur les 11,8 milliards de tonnes disponibles, 7,5 milliards sont des atomes autres que le carbone, principalement de l'hydrogène et de l'oxygène, soit 64%.

La capacité de transformation des matières premières végétales en sucres fermentescibles dépend des molécules qui les composent. Les grains des céréales, racines (pommes de terre) et cultures sucrières sont composés à 70-80% de sucres et de cellulose. En revanche, les résidus sont composés de cellulose et d'hémicellulose à hauteur d'environ 55%, de 20% de lignine et 25% d'autres molécules. Les technologies actuelles permettent d'envisager des taux de transformation en sucres fermentescibles élevés pour les sucres et la cellulose. En revanche, la dégradation de l'hémicellulose et de la lignine n'est pas encore au stade industriel. Avec les hypothèses de rendement actuel, le rendement carbone total (carbone utilisable / tonne matière sèche) est d'environ 6-9% pour les grandes cultures étudiées, l'analyse ne révélant pas de grandes différences d'une culture à une autre. Ainsi, la répartition des tonnes de carbone disponibles par type de culture est relativement proche de la répartition des tonnes de matière sèche.

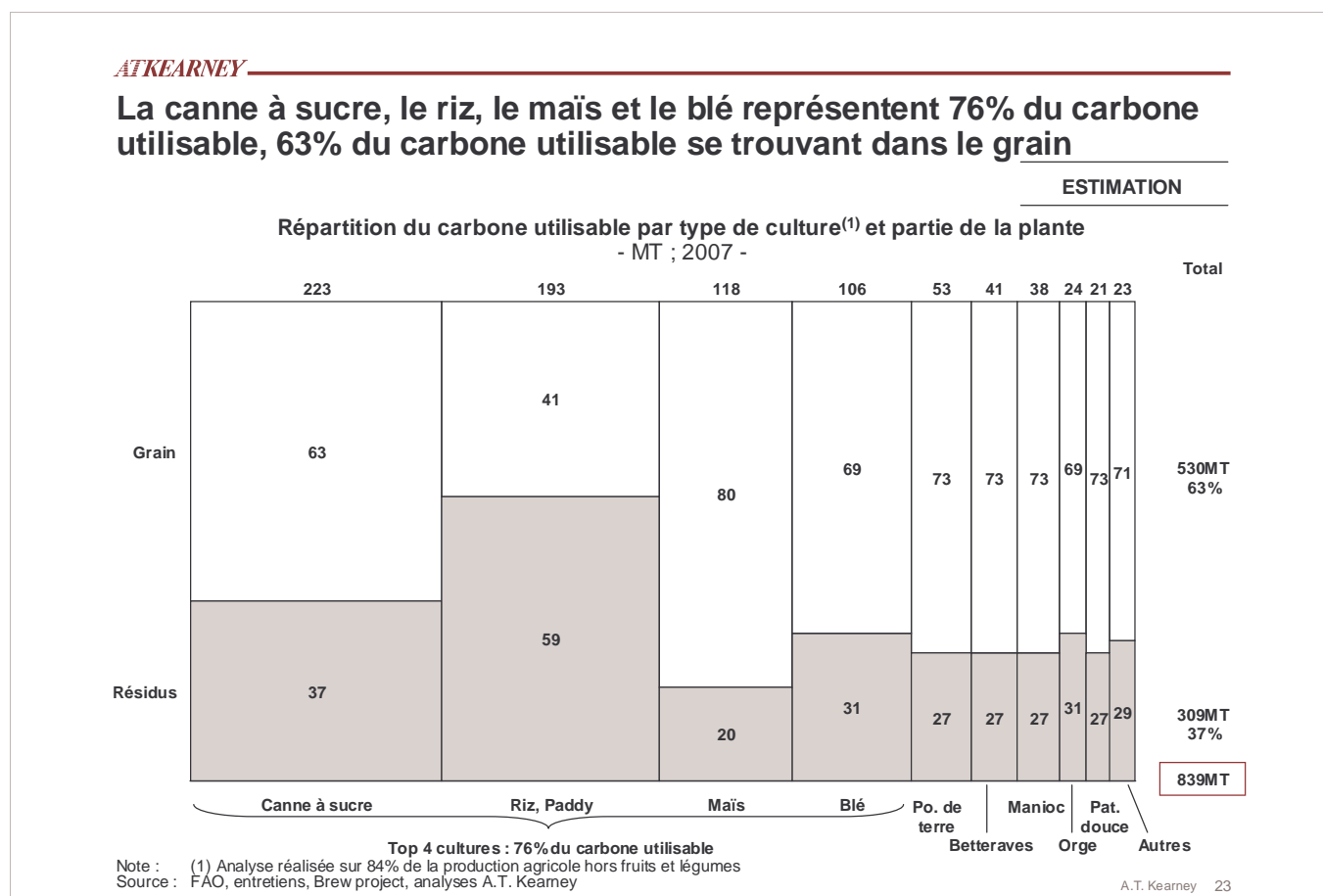
L'analyse révèle qu'avec les technologies actuelles, la biomasse (hors bois) offre un réservoir de 839 millions de tonnes de carbone utilisables en dédiant l'ensemble des cultures alimentaires pour la chimie. Ce chiffre semble relativement faible au regard des 399 millions de tonnes de carbone consommées par la chimie chaque année.

Figure 2.18 - Stock de biomasse et de carbone disponible



Sur les 839 millions de tonnes de carbone, 63% proviennent des graines et 37% des résidus. Ainsi, seules 309 millions de tonnes de carbone seraient disponibles sans concurrence avec les usages alimentaires, un nombre faible compte tenu des besoins futurs des biocarburants de seconde génération et de la nécessité d'utiliser une part des résidus pour la régénération des terres agricoles.

Figure 2.19 - Répartition du stock de carbone utilisable par type de culture et partie de la plante



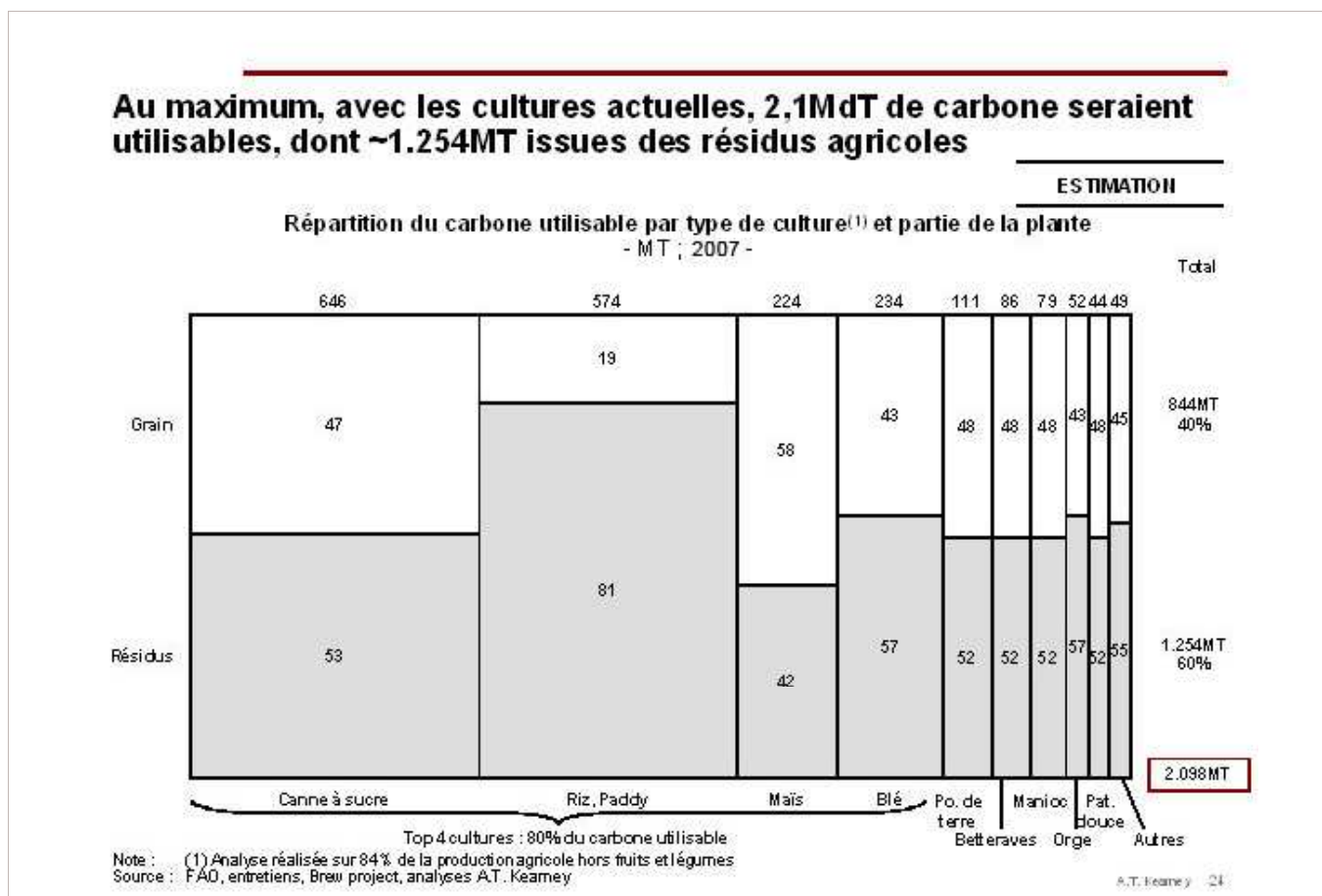
Une analyse de sensibilité peut être réalisée en estimant les rendements futurs, notamment pour l'hémicellulose et la lignine. Supposons par exemple que le taux de transformation en sucres fermentescibles soit de 90% pour la cellulose et l'hémicellulose. De même, supposons que les rendements industriels atteignent 90% du rendement stœchiométrique, comme c'est le cas pour l'éthanol. Enfin, supposons que la lignine soit valorisée par voie thermochimique avec un rendement global de 50%. Ainsi, on aurait alors 2 098 millions de tonnes de carbone utilisables, soit plus du double, avec une répartition différente puisque 1 254 millions de tonnes, soit 60%, proviendraient des résidus.

Cette analyse mondiale masque des différences fortes entre les pays, l'exemple du Brésil étant le plus connu. A l'échelle de la France, les mêmes analyses donnent les résultats suivants :

- 16 millions de tonnes de carbone utilisables avec les technologies actuelles, dont 5,3 MT issues de la betterave à sucre, 5,8 MT du blé, 2 MT du maïs et 1,1 MT de la pomme de terre ;
- 34 millions de tonnes de carbone potentiellement utilisables avec les technologies futures, dont 18 millions de tonnes issues des résidus.

Ainsi, la France, premier pays producteur agricole européen et second exportateur mondial, ne représente qu'environ 2% du tonnage de produits agricoles mondiaux et 2% du tonnage de carbone utilisables avec les rendements actuels. En considérant que l'industrie française chimique consomme environ 20 MT de carbone par an¹, on peut estimer que l'industrie chimique française aurait besoin de 1,25 fois la production nationale de produits agricoles pour répondre à la totalité des besoins de la chimie, soit plus que ce ratio à l'échelle du monde. En effet, l'industrie chimique est concentrée dans un nombre relativement faible de pays par comparaison avec la production de matières agricoles. Dans les principaux pays producteurs de produits chimiques, un fort développement de la chimie du végétal pourrait donc conduire à des importations de matières agricoles, avec un effet non neutre en termes d'émission de gaz à effet de serre. Cet élément pourrait constituer un frein significatif au développement de la chimie du végétal.

Figure 2.20 - Potentiel de carbone maximum utilisable à partir des cultures agricoles



Dès lors se pose naturellement la question de l'utilisation du bois comme source de matières premières pour la chimie du végétal, même si les procédés de fabrication actuels (dégradation de la lignine) sont peu avancés. Le bois utilisable pour la chimie du végétal provient soit des résidus de l'exploitation actuelle des forêts (branches, racines, feuillage...), soit d'une exploitation supplémentaire des forêts. La disponibilité de ces deux sources de matières premières doit être analysée sous contraintes. En effet, la chimie du végétal a pour objectif de contribuer au passage à une chimie plus durable et ne peut donc se traduire par des "dommages collatéraux" sur des aspects de la durabilité autres que l'émission de gaz à effet de serre (biodiversité...).

¹ Estimation très imparfaite basée sur la part de marché mondiale de la France dans le secteur de la chimie (en valeur).

En ce qui concerne les résidus issus de l'abattage et le bois mort, il faut donc considérer leurs fonctions environnementales suivantes :

- Préservation de la biodiversité : cette fonction nécessite une certaine quantité de bois mort par hectare, en particulier du bois de large diamètre ;
- Maintien de la fertilité des sites : les arbres, en particulier leur feuillage, contiennent des nutriments essentiels pour la productivité future des sites ;
- Prévention de l'érosion des sols : les résidus de l'abattage des arbres réduisent l'exposition des sols à la pluie, au soleil ou au vent ;
- Régulation des flux d'eau : les résidus issus de l'abattage des arbres et le bois mort jouent un rôle de filtre d'eau au sein de l'écosystème des forêts.

Par ailleurs, la capacité à exploiter les forêts davantage sans impact environnemental peut être appréhendée au travers du niveau maximum d'exploitation durable, défini par Heyer en 1841, et reconnu comme indicateur de développement durable par le "Forest Stewardship Council". Ce niveau maximum vise à maintenir à la fois un taux d'accroissement de la forêt constant et un niveau d'exploitation constant.

L'Agence européenne de l'environnement a conduit une étude en 2006 visant à estimer la quantité de biomasse issue des forêts disponible en respectant les conditions définies ci-dessus. Sans compétition avec les autres industries utilisatrices de bois, cette étude estime à environ 43 millions de tonnes équivalent pétrole la quantité de bois disponible en Europe (dont 15 millions de tonnes provenant des résidus non valorisés actuellement et 28 millions d'exploitation forestière additionnelle), soit environ 72 millions de tonnes de carbone¹. L'Europe représentant environ 6% du stock de bois dans le monde², on pourrait donc estimer à environ 1.194 millions de tonnes de carbone la quantité de carbone disponible à partir du bois sans pression environnementale supplémentaire. Par ailleurs, une autre étude du US Department of Agriculture (2005) sur les États-Unis – avec une moindre prise en compte de l'impact environnemental de l'exploitation de la biomasse forestière – estime à 184 millions de tonnes de carbone la biomasse disponible à partir du bois à horizon 2050, contre une consommation en biomasse de 71 millions en 2005, soit une réserve potentielle de 113 millions de tonnes de carbone. Appliquée à l'échelle mondiale, cela correspondrait à environ 1 400 millions de tonnes de carbone disponible.

Cependant, il est difficile d'extrapoler à l'échelle mondiale des analyses régionales. En effet, les forêts d'Europe sont moins exploitées que dans le reste du monde : le stock de bois européen a progressé de 22% entre 1990 et 2005 tandis que le stock de bois mondial diminuait de 3%. Dans une perspective de durabilité, peut-on dès lors envisager une exploitation des forêts supplémentaires bien que le taux exploitation actuel soit déjà supérieur à la croissance du stock de bois ? En ne considérant que les tonnes de carbone issues des résidus actuels (25 millions à l'échelle de l'Europe), cela ne représenterait plus que 417 millions de tonnes de carbone. Ainsi, selon les hypothèses retenues et en appliquant un rendement total de 50% (voie thermochimique ou voie biotechnologique), on obtiendrait entre 208 et 597 millions de tonnes de carbone utilisables (soit en moyenne 403³).

Enfin, les algues pourraient constituer une 3^{ème} source de biomasse. Elles sont aujourd'hui au cœur des recherches sur les biocarburants de 3^{ème} génération, même si les dépenses de recherche sont très faibles

¹ En considérant qu'une tonne de bois produit environ 0,3 TEP et contient 0,5 tonne de carbone

² Les principales réserves se trouvent en Russie (18%), en Amérique du Nord et centrale (17%) et en Amérique du Sud (30%)

³ En synthèse, la présente note retient donc le chiffre de 400 MT de carbone utilisables, sans concurrence avec les usages actuels (notamment industrie du bois)

par comparaison avec la 2^{ème} génération (en France, environ 40 chercheurs travaillent sur cette thématique). En effet, certaines algues ont une forte contenance en lipides (20-50% de leur poids sec) mais surtout une vitesse de reproduction bien supérieure aux oléagineux. Les lipides contenues, généralement des triglycérides, permettent l'obtention par transestérification de monoester méthylique (biodiesel) et de glycérol, ou de produits chimiques (oléochimie). L'utilisation d'algues pour produire des biocarburants est encore au stade du laboratoire ou du pilote industriel (Petrosun). Cependant, certains grands industriels (Shell, Boeing..) semblent s'intéresser à cette thématique et des start-up commencent à émerger (GreenFuel Tech et Valcent Products Inc., deux start-up en biotechnologies, développent des procédés pour la production de microalgues). En France, un projet ANR "Projet Shamash" a été lancé en décembre 2006, pour un budget total de 2.8 millions d'euros.

Les premières applications industrielles à grande échelle pourraient voir le jour d'ici 10 ans. La sélection des souches les plus performantes et les techniques d'extraction des huiles peuvent être améliorées. Enfin, le passage à l'échelle industrielle est difficile, compte tenu des besoins en surface au sol (bien qu'inférieurs aux oléagineux) et de la disponibilité du CO₂.

La présente note ne prétend pas conclure sur le potentiel de développement des algues pour la chimie. En première approche, il semble cependant que leur fort contenu énergétique (lipides) plaide davantage pour une utilisation énergétique (biocarburants) que chimique. Elles pourraient toutefois être utilisées par l'oléochimie, au même titre que les utilisations actuelles d'oléagineux.

En synthèse, la chimie du végétal ne saurait être l'unique levier pour évoluer vers une chimie plus durable. En effet, aussi bien aujourd'hui que demain (2030), le potentiel carbone de la biomasse est relativement faible au regard des besoins de la chimie et des transports, sans prendre en compte les besoins des autres usages, notamment l'énergie et le chauffage résidentiel (bois). Sans concurrence alimentaire¹, sans dégradation de l'environnement des forêts et en estimant que 25% des résidus doivent être laissés sur les terres cultivées et que 50% peuvent être collectés, le stock de carbone issu de la biomasse utilisable serait d'environ 120 millions de tonnes actuellement, soit 6% des besoins de la chimie et des transports en considérant que toute la biomasse est utilisée pour ces deux usages.

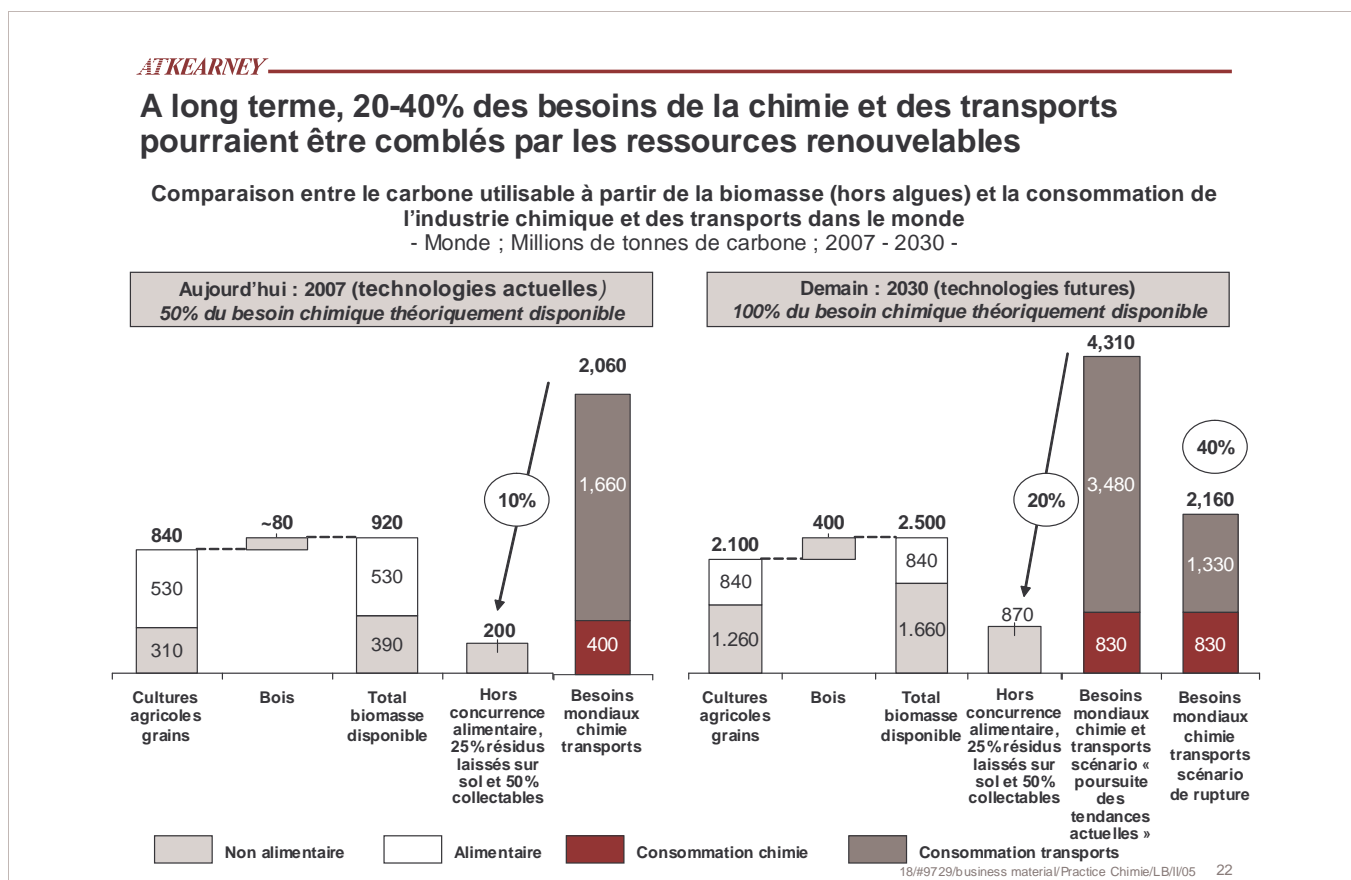
Avec les progrès technologiques envisageables (hypothèse haute), 870 millions de tonnes de carbone seraient utilisables en 2030. Dans un scénario de poursuite des tendances actuelles, avec une croissance annuelle de **3% du PIB mondial**, cette biomasse disponible représenterait **20%** des besoins de la chimie et des transports (hors concurrence de l'industrie de production d'énergie et des usages urbains).

Dans un scénario de rupture, avec des politiques publiques très volontaristes, où l'ensemble des pays s'engageraient et réussiraient à réduire les émissions de gaz à effet de serre liées aux transports de 20% à horizon 2030 (scénario très optimiste compte tenu de l'inertie du parc automobile et de la croissance des parcs automobiles des pays émergents)², la biomasse disponible représenterait **40%** des besoins de la chimie et des transports (hors concurrence de l'industrie de production d'énergie et des usages urbains).

¹ La FAO estime que la population mondiale sera de 8,3 milliards en 2030, soit une croissance de près de 40%

² La France s'est engagée à réduire les émissions de gaz à effet de serre liées aux transports de 20% à horizon 2020 dans le cadre du Grenelle de l'environnement

Figure 2.21 - Synthèse de la biomasse disponible



Enfin, on pourrait envisager une augmentation des terres arables. Cependant, celles-ci ont stagné dans le monde depuis 1990, ne progressant plus que de 0,1% par an. D'autre part, 60% des zones non cultivées actuellement et potentiellement cultivables sont des forêts, des zones protégées ou des zones habitées. Ainsi, la FAO estime que seules 1,2 million de kilomètres carrés de terres seront converties en terres arables d'ici 2030, soit 8% de la surface actuelle arable.

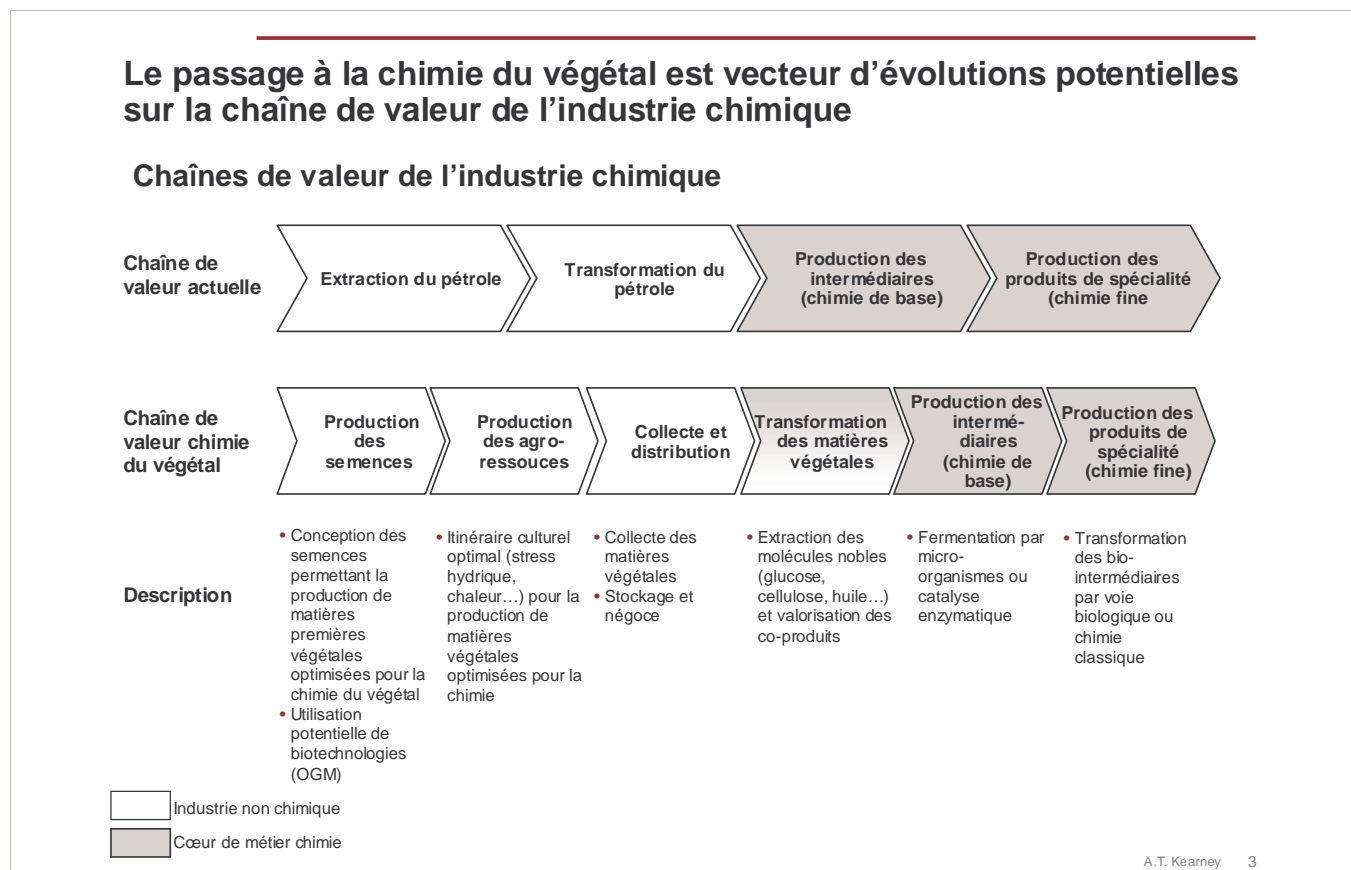
Ces résultats permettent de dresser le constat suivant :

- Environ 20-40% des besoins de la chimie pourraient être couverts par l'utilisation de biomasse selon le volontarisme des politiques publiques ;
- Le développement des voitures hybrides et électriques (qui nécessite des progrès majeurs sur les batteries avec une contribution forte de la chimie...) pourrait permettre de dédier davantage de biomasse à la chimie ;
- Les progrès technologiques sont essentiels pour améliorer la transformation de l'hémicellulose et de la lignine afin d'accroître le potentiel d'utilisation des résidus ;
- La question du recyclage semble clé pour accroître le stock de carbone disponible non issu de ressources fossiles (valorisation des déchets).

2.6. Le modèle économique

Le remplacement des matières fossiles par des matières d'origine végétale modifie la chaîne de valeur de l'industrie chimique et fait émerger de nouveaux acteurs.

Figure 2.22 - Chaînes de valeur de l'industrie chimique



La chimie du végétal fait apparaître cinq nouveaux types d'acteurs : les semenciers, les producteurs d'agroressources, les collecteurs et transformateurs de matières premières (extraction du sucre / trituration et raffinage de l'huile...) et les fabricants de biotechnologies (enzymes et micro-organismes). Le discours officiel, aussi bien du côté des industriels de la chimie que du côté des agro-industriels, est à un maintien de chaque acteur sur son cœur de métier : les transformateurs de matières premières en lien avec les producteurs fourniraient ainsi à l'industrie chimique les matières premières dont elle aurait besoin. Ce discours s'appuie sur l'idée que les industriels de la chimie n'ont pas toutes les compétences nécessaires pour transformer la matière première ("*c'est un autre métier, les chimistes ne maîtrisent pas l'extraction*") mais qu'en revanche, les agro-industriels n'ont ni la compréhension ni l'accès aux marchés aval (y compris le réseau de distribution). Si ces éléments sont fondés, il n'est pas certain qu'ils suffisent à justifier un statu quo des positions des différents acteurs de la chaîne de valeur. En effet, on ne peut ignorer deux forces opposées :

- D'un côté, si le potentiel de développement de la chimie du végétal se réalise grâce au progrès technologique, les quantités de matières agricoles nécessaires vont contraindre les industriels de la chimie à sécuriser leurs approvisionnements. Pour ce faire, plusieurs options sont envisageables, depuis les contrats d'approvisionnement de longue durée (comme en pétrochimie), jusqu'à la prise de contrôle d'agro-industries. Cette dernière option a également

le mérite de limiter les fluctuations de prix de marché (notamment liées aux biocarburants) et de permettre une spécialisation des cultures pour l'usage chimique ;

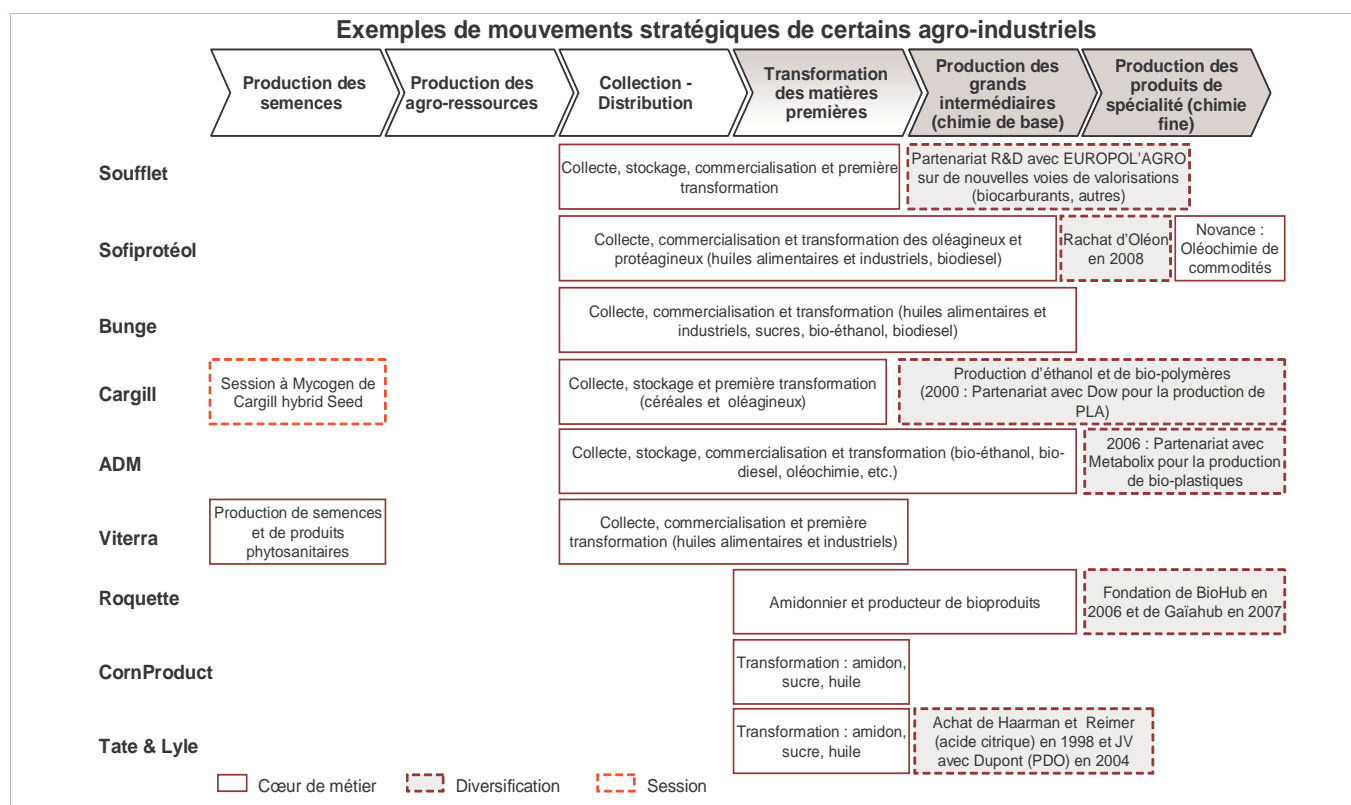
- De l'autre, des groupes agro-industriels, ayant une envergure financière significative, un accès aux ressources privilégié et des compétences dans la transformation de matières agricoles et en biotechnologies industrielles, descendent la chaîne de valeur pour se lancer dans la production de grands intermédiaires à travers des procédés de fermentation ou de catalyse enzymatique. En revanche, sur la voie thermo-chimique, les compétences nécessaires semblent trop éloignées de leur cœur de métier.

Plusieurs scénarios sont donc envisageables et ne sont d'ailleurs pas exclusifs les uns des autres, les stratégies des acteurs pouvant différer :

- des coopérations fortes entre l'ensemble des acteurs, à travers des recherches en commun et des contrats d'approvisionnement de longue durée ;
- une prise de contrôle des groupes industriels de la chimie de groupes agricoles possédant des capacités de transformation de matières végétales ;
- une concurrence entre les industriels de la chimie et les groupes agro-industriels sur la production de produits chimiques.

La présente note n'a pas vocation à émettre un jugement sur la probabilité de chaque scénario. Cependant, une étude très rapide des acquisitions d'entreprises, des partenariats ou des projets de recherche laisse penser que les agro-industriels mondiaux ont amorcé une diversification de leurs activités vers l'aval de la chaîne de valeur. Cependant, ces mouvements stratégiques seraient à analyser plus en détail pour en déduire une tendance de fond. Du côté des industriels de la chimie, il semble y avoir assez peu de mouvement vers l'amont de la chaîne de valeur, mais plutôt une logique de partenariat de recherche avec des agro-industriels : c'est notamment le cas du partenariat entre Dupont et Tate & Lyle ou entre DSM et Roquette. En France, plusieurs projets de recherche en partenariat sont actuellement lancés. Citons notamment Biohub, dont le chef de file – Roquette – est un agro-industriel, qui rassemble des industriels de la chimie (Arkema, Solvay), des agro-industriels (Roquette, Cognis) et leurs clients (Tergal, Eurovia), des entreprises de biotechnologies (Metabolic explorer) et des centres de recherche (INSA, IMMCL) au sein d'un projet de recherche collaboratif visant au développement de produits chimiques à partir de matières végétales.

Figure 2.23 - Mouvement des agro-industries sur la chaîne de valeur de la chimie du végétal



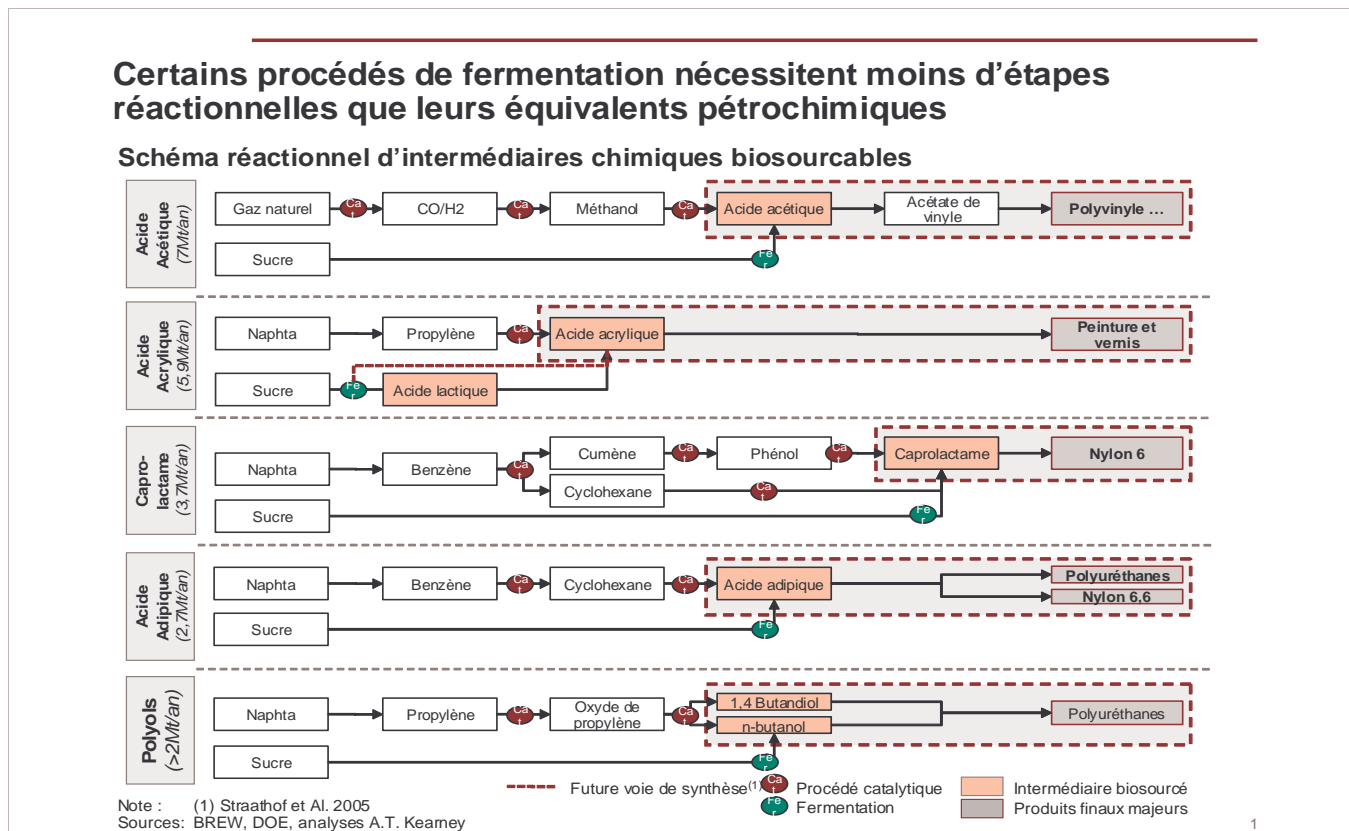
Plus surprenant, des industries clientes de l'industrie chimique, en particulier des constructeurs automobiles, sont en train de s'intégrer très en amont de la chaîne de valeur :

- C'est le cas de Toyota qui a investi dans des cultures indonésiennes de patates douces et dans une usine de distillation à partir de canne à sucre ou de patate douce. Toyota ambitionne, d'ici 2020, que "deux tiers des ressources en bioplastique sortiront de ses propres ateliers, soit un gain de 38 milliards de dollars". Il revendique aujourd'hui la deuxième position mondiale dans les bioplastiques et collabore avec d'autres industriels, notamment dans le secteur de l'emballage ;
- Mazda vient de signer un accord de recherche avec l'université d'Hiroshima sur la période 2008 - 2013 pour produire des bioplastiques à partir de cellulose issue de déchets agricoles et de bois. Il s'agit de convertir la cellulose en éthanol puis en éthylène et propylène. De même, Mitsubishi développe du polybutylène succinate (PBS) à partir du maïs ou de la canne à sucre, en coopération avec l'Aichi Industrial Technology Institute ;
- Pour Ford, les bioplastiques sont une idée ancienne puisqu'Henry Ford et George Carver avaient développé et incorporé dans la Ford T des plastiques à partir de matières végétales au début du XXème siècle, avant d'y renoncer pour des raisons économiques. En 2008, Ford a développé un siège automobile à partir du soja, siège qui utilise environ 1 000 tonnes de matière sèche de soja pour équiper certains de ses modèles.

Par ailleurs, pour certains produits, la chimie du végétal pourrait modifier la chaîne de production des intermédiaires (A donne B donne C...). En effet, pour certains intermédiaires, la voie biologique permet d'éliminer certaines étapes de production et donc d'atteindre "plus rapidement" l'intermédiaire recherché par comparaison avec la voie pétrochimique. Cela pourrait se traduire par une chimie moins

dépendante des grands "building blocks", même si la chimie du végétal aura vraisemblablement aussi ses propres building blocks. Par exemple, s'il n'existe pas encore aujourd'hui de voie directe de synthèse d'acide acrylique par fermentation (le procédé passe par l'acide lactique), des études envisagent cette possibilité au travers d'un nouveau chemin réactionnel par génie génétique.

Figure 2.24 - Comparaison des étapes de production d'intermédiaires entre la voie pétrochimique et la voie végétale



2.7. Conclusions et recommandations

La chimie du végétal est un concept complexe que la présente note a tenté de présenter sous ses multiples dimensions. En synthèse, on retiendra les points clés suivants :

- Parmi les différents modèles présentés, la chimie du sucre semble offrir le potentiel de développement le plus important. Elle permet de produire un éventail d'intermédiaires et de produits finaux plus large que l'oléochimie, dont les technologies sont matures, et l'approche mécanique ; elle offre un intérêt environnemental supérieur à la voie thermochimique ; elle est beaucoup plus avancée que la chimie des systèmes complexes ;
- Les applications de chimie de spécialité semblent être les meilleurs candidats à une valorisation chimique de la biomasse, compte tenu d'un niveau de valeur ajoutée supérieur. Plutôt que de reproduire des produits pétrochimiques existants et aux modes de production optimisés, la chimie du végétal doit viser de nouveaux produits chimiques, plus adaptés aux caractéristiques de la biomasse ;
- Le prix actuel des matières premières, à l'exception du Brésil, est un frein majeur au développement de la chimie du végétal. De plus, avec le développement des biocarburants,

une corrélation entre le prix des matières premières et celui du pétrole semble apparaître si bien qu'une hausse durable du prix du pétrole (vers les 200 \$) pourrait se traduire par une hausse du prix des matières premières. Cependant, ces phénomènes pourraient différer d'une géographie à une autre selon l'organisation des marchés et l'intervention des régulateurs. Plus que l'utilisation de la glycérine, la valorisation de la cellulose, de l'hémicellulose et de la lignine contenues dans les résidus et le bois est la priorité ;

- L'amélioration des rendements et des productivités actuelles nécessite un effort accru dans la recherche en biotechnologies, au travers de coopérations renforcées entre chimistes et biologistes ;
- Sans compétition avec les usages alimentaires et compte tenu du développement probable des biocarburants, environ 20-40% (selon le volontarisme des politiques publiques aussi bien en termes de réduction des gaz à effet de serre dans les transports que de soutien aux programmes de recherche en biotechnologies) des besoins en carbone de l'industrie chimique mondiale pourraient être satisfaits par la chimie du végétal, avec une amélioration très forte des rendements actuels, et sans rationalisation des usages du carbone par l'industrie chimique (notamment les emballages). Cependant, pour les grands pays producteurs de l'industrie chimique, ce taux de pénétration pourrait se traduire par des importations de matières végétales dont le bilan écologique serait alors à prendre en compte ;
- La chimie du végétal se traduit par l'apparition de nouveaux acteurs dans la chaîne de valeur de l'industrie chimique, avec une concurrence possible entre les agro-industries et les industriels de la chimie. Une mise en commun des compétences complémentaires de ces deux types d'acteurs semble souhaitable.

Ainsi, si le potentiel de la chimie du végétal semble réel, il doit cependant être relativisé au regard des autres leviers envisageables pour accélérer la mutation vers une chimie plus durable. En effet, il est peu probable que la chimie du végétal représente plus de 20-40% de la production chimique mondiale à horizon 2030 (hors éthanol utilisé comme biocarburant). Pour donner un ordre de grandeur, si 10% des produits chimiques étaient biosourcés, cela représenterait une diminution de l'ordre de 5-7% des émissions de gaz à effet de serre émises par l'industrie chimique. D'autre part, la chimie du végétal n'a a priori pas d'impact sur les émissions de gaz à effet de serre liées à l'utilisation des produits chimiques, en particulier dans l'automobile.

A long terme, seule une combinaison entre recyclage et chimie du végétal pourrait donc permettre d'affronter la fin des ressources fossiles.

3. LES PETITES ET MOYENNES ENTREPRISES DE LA CHIMIE

3.1. Introduction et objectif de ce document

L'anticipation des mutations économiques qui vont toucher l'industrie chimique requiert de s'intéresser de manière plus ciblée aux stratégies d'adaptation des entreprises, et plus particulièrement des PME.

Afin d'identifier de quelles manières les entreprises vont accompagner ces mutations et en tirer parti pour créer de la richesse et des emplois, il importe cependant de disposer d'une meilleure compréhension de la place des PME dans l'industrie chimique, et de leur dynamique de croissance et d'évolution. Plus spécifiquement, il s'agit de :

- dresser une cartographie des PME qui présente le poids économique des PME dans l'industrie et mette en lumière le rôle qu'elles pourraient jouer dans la transition vers la chimie durable ;
- préciser le rôle de l'accès au financement dans la croissance des PME et déterminer les moyens que les pouvoirs publics pourraient mettre en œuvre pour l'améliorer ;
- détailler les possibilités de diversification des PME et d'évolution de leurs modèles économiques pour accompagner les mutations économiques à venir.

La présente note traite des deux premiers points, que nous avons choisi de regrouper puisque l'accès au financement s'est avéré un déterminant majeur de la croissance des PME. Une seconde note détaillera plus avant la question des différentes modalités de diversification.

Enfin, afin de traiter de ces sujets de manière exhaustive, nous avons suivi une approche fondée à la fois sur :

- des analyses quantitatives que nous avons menées sur les bases de données publiques ;
- des entretiens obtenus auprès de dirigeants de PME chimiques, des organismes de crédit (Banques et OSEO) et des fonds d'investissements (liste en annexe).

3.2. Enjeux liés aux PME

De nombreux travaux académiques ont souligné le faible poids économique des petites et moyennes entreprises dans le paysage industriel français, comparativement à nos principaux partenaires européens (notamment l'Allemagne) et les conséquences fâcheuses de cette situation pour la compétitivité internationale de la France.

Les analyses menées pour l'ensemble de l'industrie¹ concluent généralement que les PME pourraient contribuer plus significativement à la croissance du PIB et à la création d'emplois si les conditions étaient réunies pour favoriser leur développement ; ainsi les constats suivants sont généralement tirés des études existantes :

- Les PME françaises contribuent significativement moins qu'ailleurs en Europe et dans le Monde à la croissance du PIB et des emplois ;

¹ Cf. les rapports "stratégie PME pour la France" de Betbèze et St Etienne (2006), "le financement des PME" de Chertok, Malleray et Pouletty, "les PME qui grandissent, qui sont-elles ?" KPMG 2008

- Les PME qu'il faut stimuler sont les "gazelles" à la croissance forte, susceptibles d'apporter de l'innovation et de se hisser au rang de leader mondial dans leur domaine ;
- La croissance des PME est aujourd'hui pénalisée par un effet de ciseau qui voit le besoin de financement croître (notamment à cause de l'augmentation du BFR) et les difficultés d'accéder à des sources de financement perdurer. Cette situation conduit généralement les PME performantes à s'adosser à de grands groupes internationaux pour financer leur croissance ;
- Le développement des PME innovantes est souvent lié à leur capacité d'exportation.

L'objet de ce document est de vérifier si le diagnostic général est pertinent dans le cas particulier de l'industrie chimique et de nous concentrer sur des aspects plus spécifiques de notre étude. Plus particulièrement, nous nous intéresserons aux sujets suivants :

- Importance des PME dans l'industrie chimique :
 - Economique : croissance du PIB, croissance de l'emploi, stimulation à la dynamique d'un secteur (notamment par l'innovation) ;
 - Durabilité : rôle des PME dans la transition de l'industrie chimique vers la durabilité.
- Facteurs explicatifs de la croissance des PME. Nous nous intéresserons particulièrement à déterminer en quels termes se pose "l'effet taille" dans l'industrie chimique, c'est-à-dire de quelle manière la faible taille des entreprises est un frein à leur développement, notamment en termes d'accès au financement.
- Pistes de politiques publiques adaptées pour accroître la contribution des PME au développement d'une "chimie durable".

3.3. Rappels sur l'Industrie chimique et les PME

3.3.1. Caractéristiques de l'industrie chimique

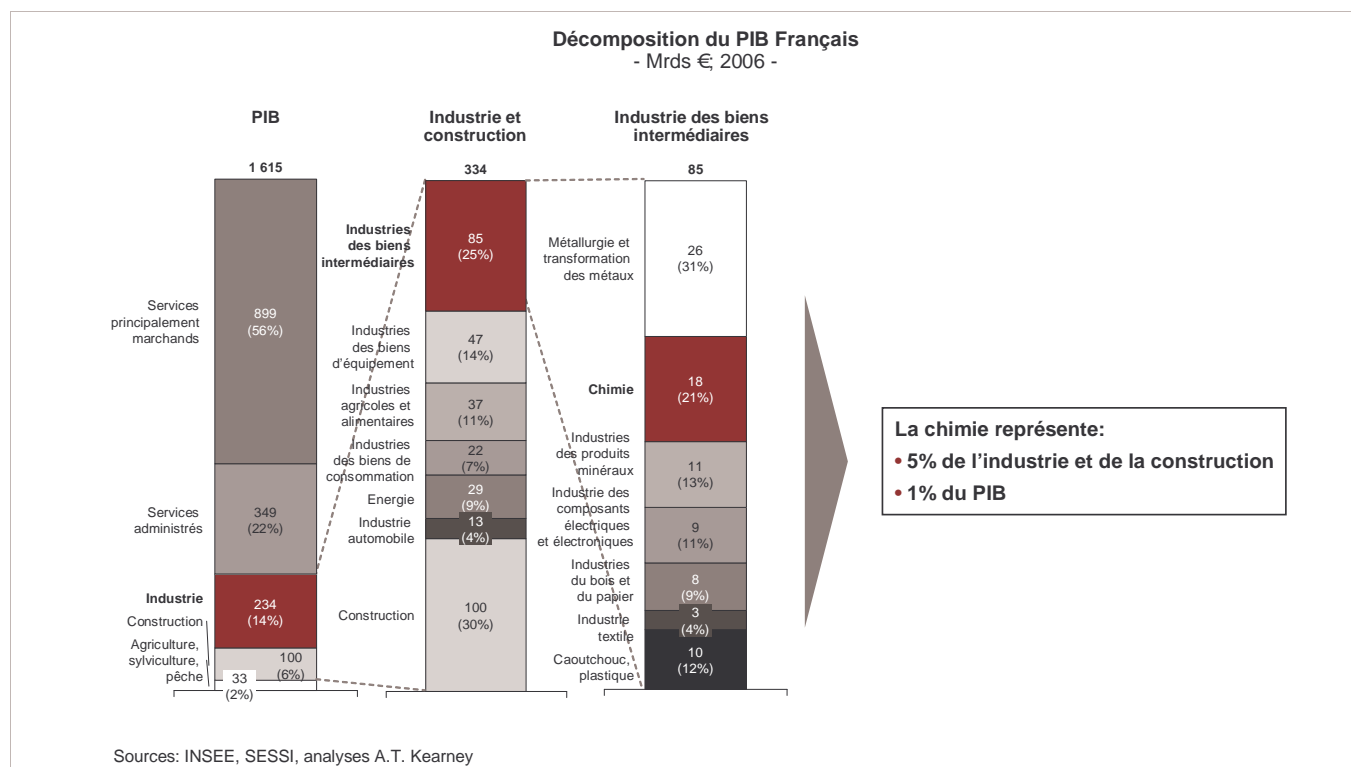
1) L'industrie chimique recouvre des activités très diverses et représente un poids économique d'environ 18 Mds€ de PIB pour 192 000 emplois directs

Le périmètre de l'industrie chimique que nous avons considéré correspond à la définition de l'UIC. Il regroupe l'ensemble des codes NAF 24 à l'exception de :

- fabrication des médicaments ;
- fabrication d'autres produits pharmaceutiques ;
- fabrication de fibres artificielles ou synthétiques.

Suivant cette définition, l'industrie chimique représente une contribution au PIB d'environ 18 Mds€ et 192 000 emplois, soit près de 5% du PIB Industriel. Cela confirme le caractère "diffus" de l'industrie chimique dont les produits sont utilisés dans de très nombreuses industries mais ne représentent qu'une part marginale de la VA finale (cf. figure 3.1).

Figure 3.1 – Décomposition du PIB français 2006

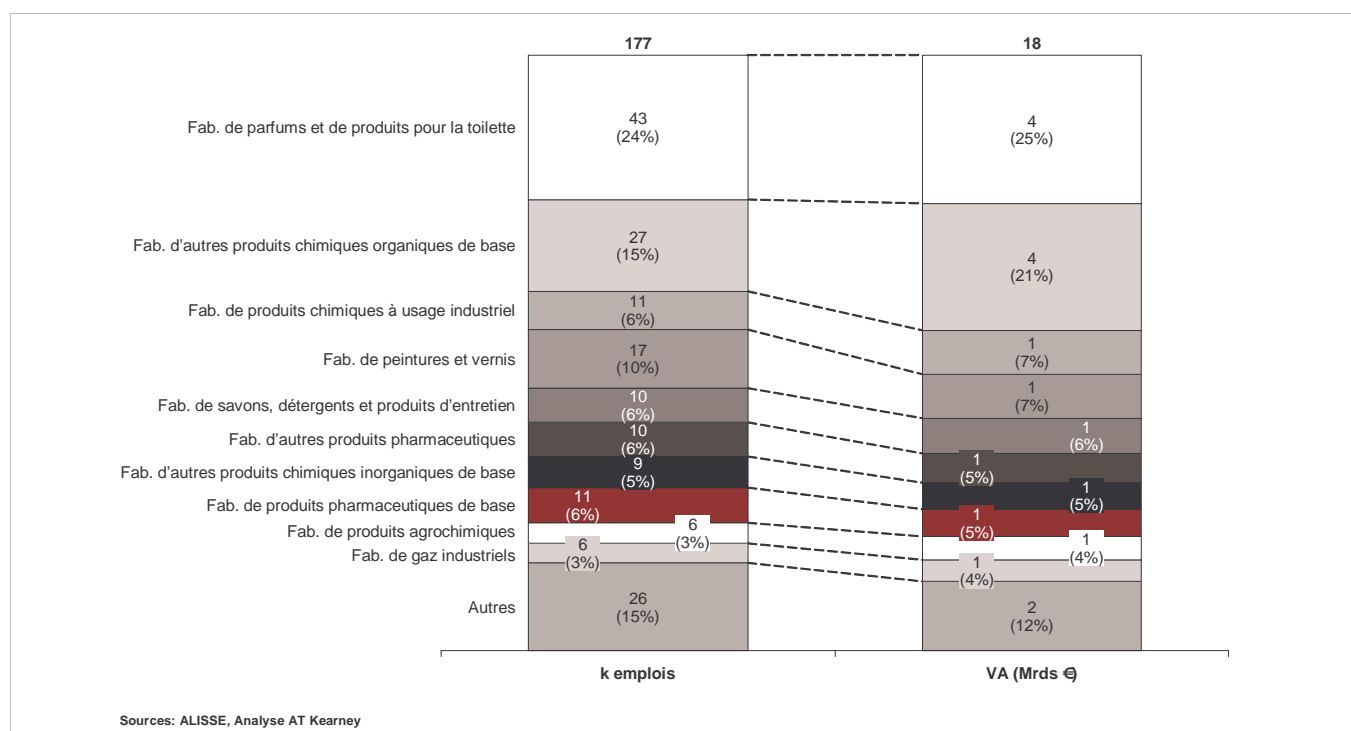


Les 18 Mds€ de VA de l'industrie chimique peuvent par suite être éclatés dans cinq grands segments cohérents qui correspondent aux différents branches d'activité (codes NES C31, C32, F41, F42, F43) :

- Chimie organique (correspondant essentiellement à des intermédiaires chimiques) ;
- Chimie minérale (correspondant essentiellement à des intermédiaires chimiques) ;
- Industrie pharmaceutique ;
- Parachimie ;
- Fabrication de savons, parfums et autres produits d'entretien.

Le partage de la VA entre les différents secteurs est présenté figure 3.2 ci-dessous. On peut noter que, à l'exception de la fabrication de produits chimiques de base, tous les segments de l'industrie ont une caractéristique capital / travail comparable et contribuent à l'emploi à peu près à hauteur de leur contribution au PIB.

Figure 3.2 – Emplois et VA par NAF



2) L'industrie chimique est structurellement cyclique

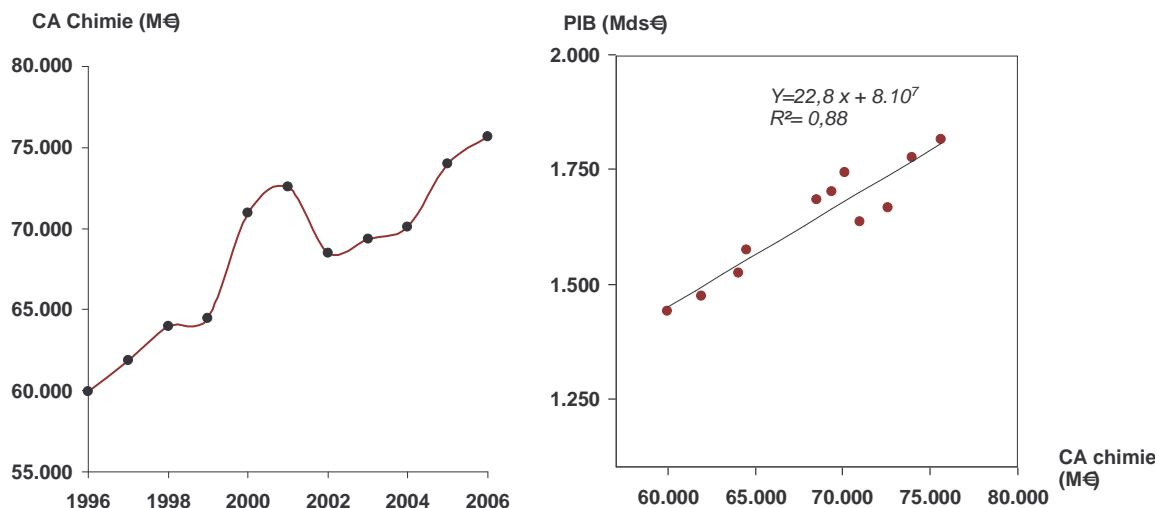
La cyclicité de l'industrie chimique (c'est-à-dire la variabilité des revenus et des profits de ses agents) est principalement due aux raisons suivantes :

- Les clients aval de l'industrie chimique sont les grands groupes industriels, les volumes sont sensibles aux évolutions de la production industrielle. Les cycles de l'industrie chimique sont donc naturellement corrélés aux évolutions du PIB (cf. figure 3.3) ;
- Les prix sont largement dépendants de l'évolution des matières premières qui peuvent faire l'objet de variations très importantes (cf. par exemple les variations du prix du Naphta, présentées figure 3.5). Les difficultés à répercuter immédiatement les variations de coûts en prix sont de nature à amplifier l'amplitude des cycles de profit des entreprises de ce secteur.

Ces deux critères conduisent à une évolution cyclique de la valeur ajoutée de l'industrie chimique, que l'on retrouve de manière plus ou moins marquée dans chacune des sous-industries chimiques (cf. figure 3.4).

Figure 3.3 – Evolution du chiffre d'affaires de l'industrie chimique

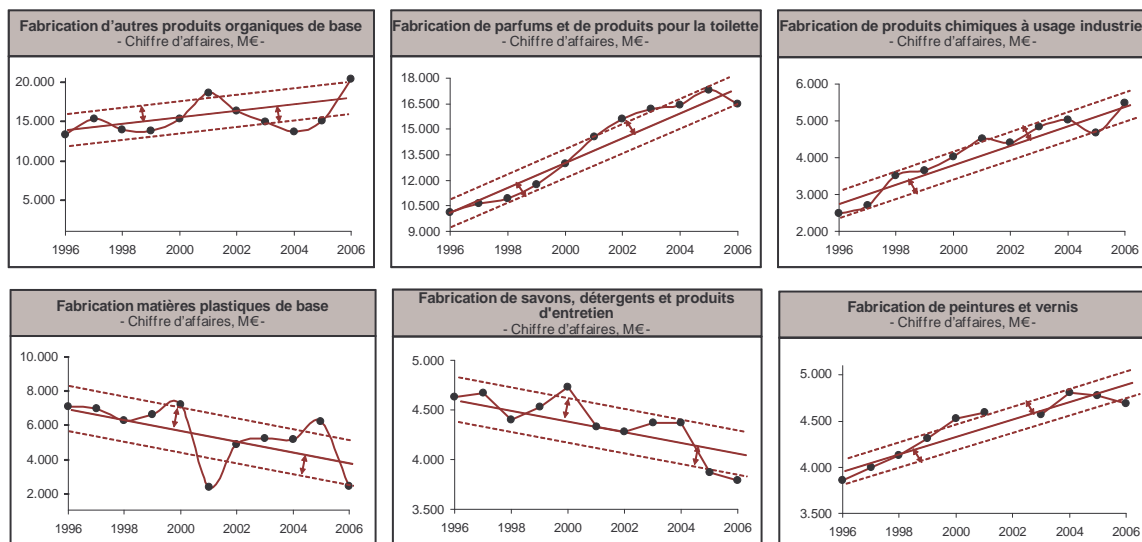
- Hors Pharmacie⁽¹⁾, M€, 1996-2006 -



Notes : (1) Code NAF : 241E, 241G, 244D, 241N, 246C, 241C, F44, 241A, 241L, 245C, 243Z, 242Z, 241J, 246L, 246G, 246A, 244A, 245A, 246J, 246E
Source : ALISSE, analyses A.T. Kearney

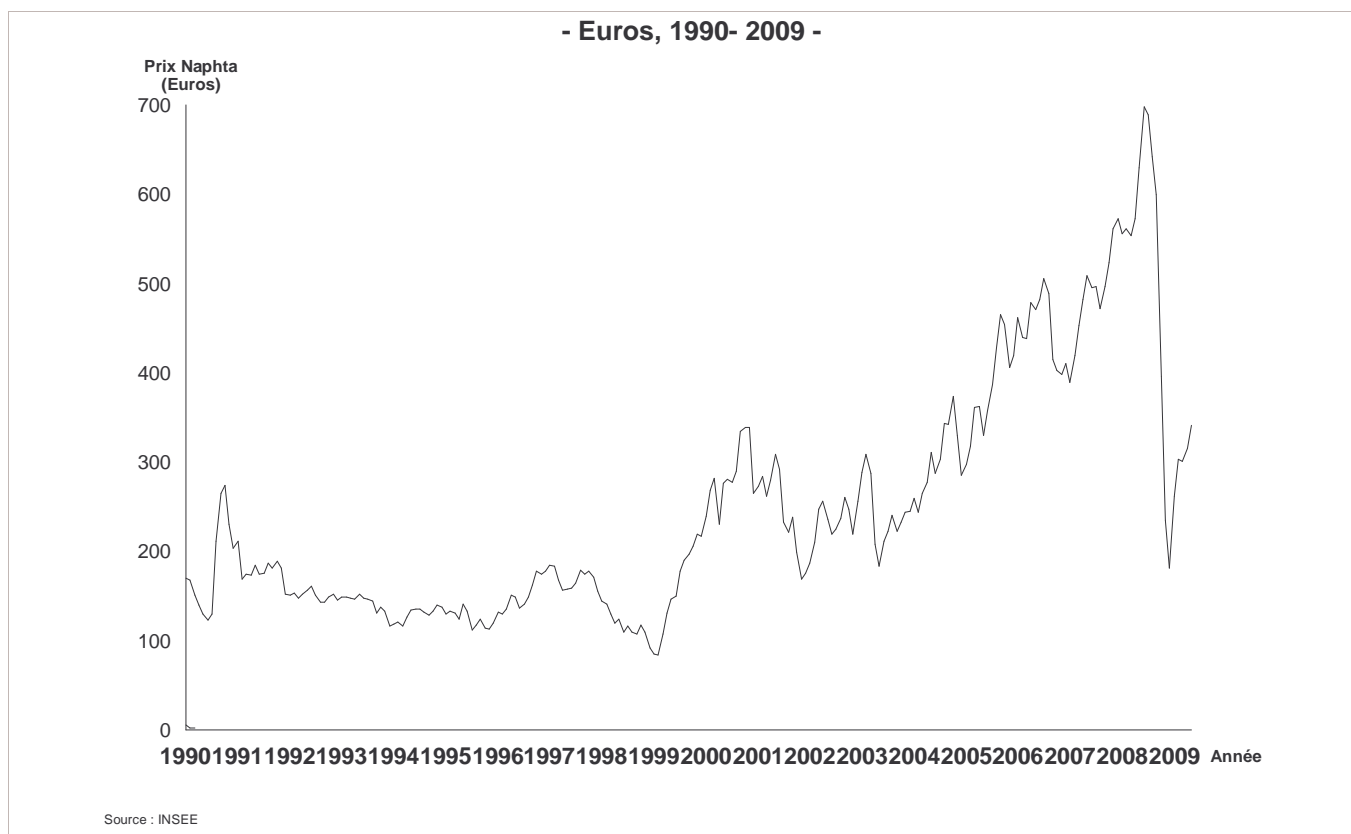
Figure 3.4 – Cyclicité de certaines activités de l'industrie chimique

- Code NAF, M€, 1996-2006 -



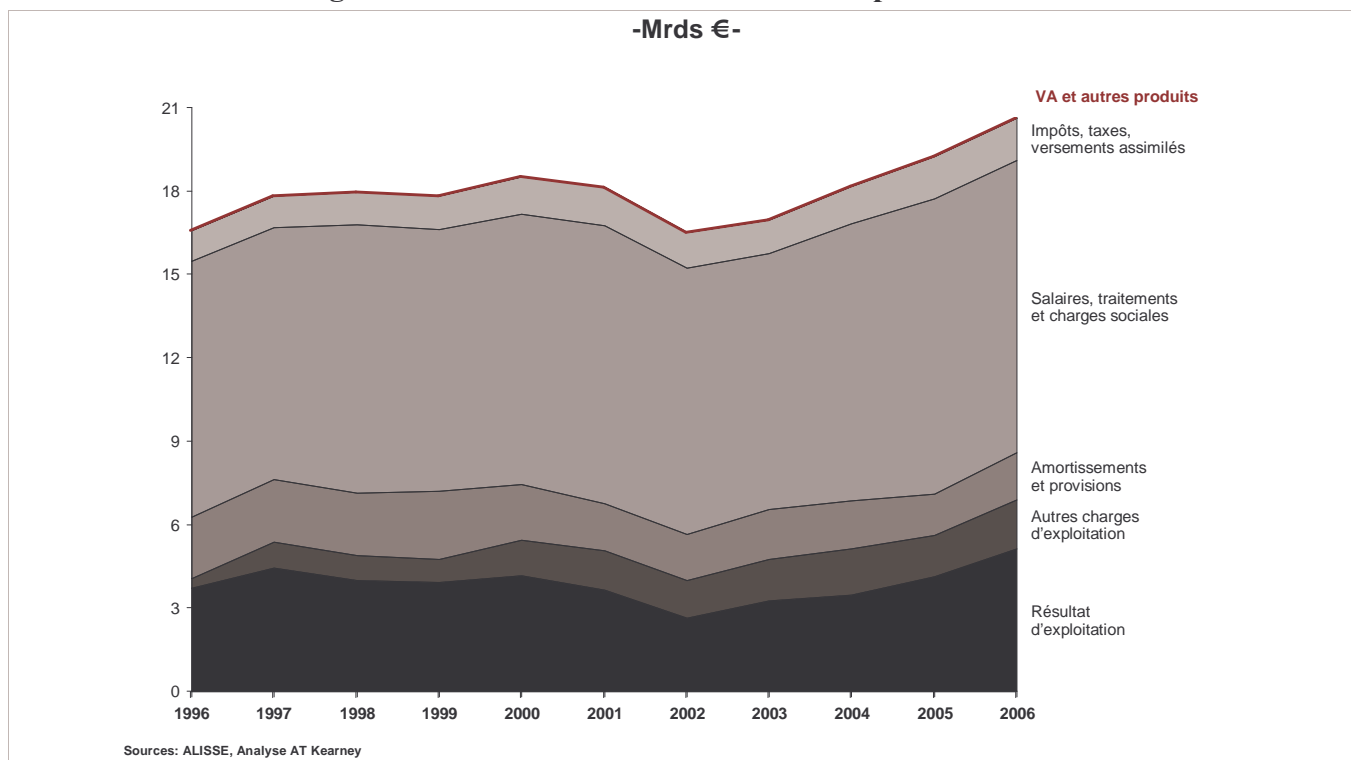
Source : ALISSE, analyses A.T. Kearney

Figure 3.5 – Evolution du prix du Naphta



En outre, comme on peut le constater figure 3.6, le partage de la VA reste à peu près stable entre la rémunération du travail, l'amortissement du capital et le profit.

Figure 3.6 – Evolution de la VA et du compte de résultat



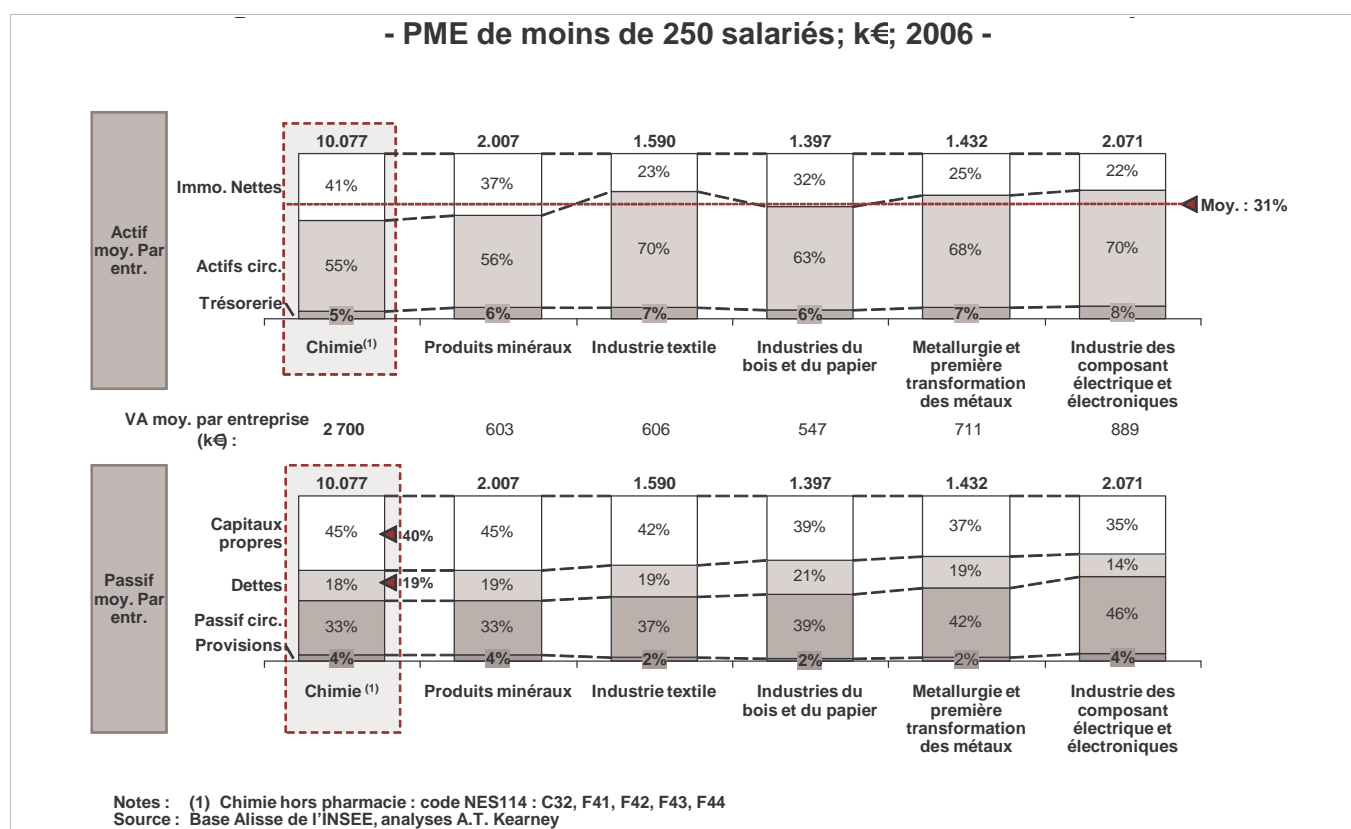
3) *L'industrie chimique est plus "capital intensive" que d'autres industries, pourtant ses acteurs sont moins endettés que dans les autres industries.*

Les investissements corporels (réacteurs, outil industriel) et incorporels (brevets, licences,...) généralement importants et nécessaires pour opérer une activité chimique contribuent naturellement à en faire l'une des industries les plus "capital intensive". Ainsi le montant moyen des actifs immobilisés par les PME de l'industrie chimique (7,5 M€) est le plus élevé de l'ensemble des secteurs de l'industrie des biens intermédiaires.

Par ailleurs, en termes de financement de ces immobilisations, il apparaît que le niveau d'endettement des PME chimiques est l'un des plus faibles de l'industrie (cf. figure 3.7). Cette situation peut s'expliquer par la forte cyclicité des revenus des entreprises chimiques qui limite la stabilité de leur capacité de remboursement et représente un risque considérable pour les banques et les organismes de crédit, qui montrent donc généralement une certaine réserve à financer des projets d'investissement dans cette industrie (ce qui nous a été confirmé par des entretiens menés auprès des banques et des PME chimiques).

L'effet de ciseau entre le besoin d'investissement et la difficulté d'accéder à des sources de financement apparaît donc ici comme une caractéristique structurelle du secteur de la chimie, de nature à limiter le développement des PME.

Figure 3.7 – Structure du bilan des PME de l'industrie chimique



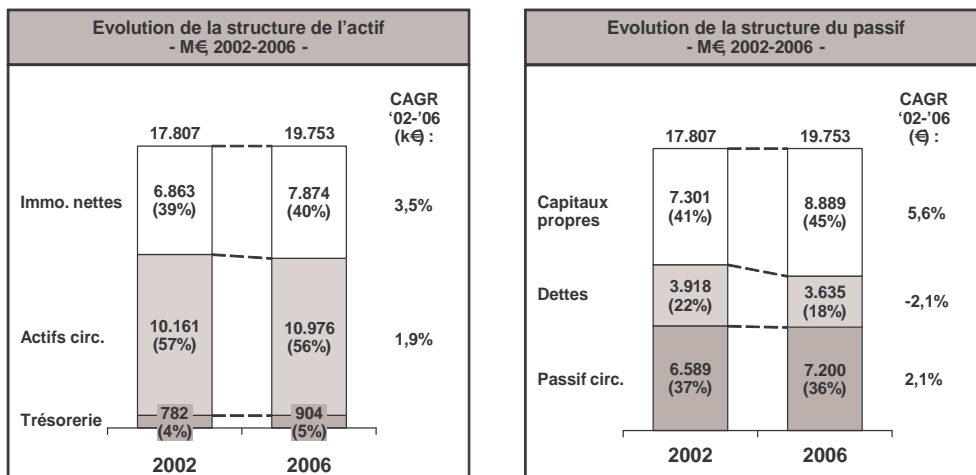
4) *La croissance moyenne du bilan des PME chimiques a été obtenue par augmentation des fonds propres, qui n'ont servi à financer des investissements productifs qu'à hauteur de 50%, le restant étant utilisé pour se désendetter et financer une augmentation de BFR*

Les entreprises du secteur ont depuis 2002 utilisé leurs capacités d'autofinancement pour réduire leur dette et financer l'accroissement du BFR (cf. figure 3.8). Ainsi, l'augmentation des capitaux propres de 1,7 Mds€ entre 2002 et 2006 a permis de réduire la dette de 300 M€, de financer l'accroissement du BFR à hauteur de 400 M€ et de n'augmenter les immobilisations que d'1 Md€.

- D'après les entretiens que nous avons menés, l'accroissement du BFR (cf. figure 3.9) d'environ 8 jours de CA entre 2002 et 2006 pourrait s'expliquer par l'action des grandes entreprises industrielles clientes des PME chimiques, qui utilisent leur pouvoir de négociation afin :
 - d'imposer des délais de paiement préférentiel, voire des schémas de portage de stocks ;
 - de limiter ou de décaler dans le temps la capacité des PME à faire passer des augmentations de prix des matières premières ;Dans ces conditions, l'augmentation de la trésorerie des PME doit être vue comme un moyen de faire face à une nouvelle dégradation des conditions commerciales.
- L'augmentation des fonds propres des PME semble provenir essentiellement de leur capacité d'autofinancement. Des statistiques précises d'investissement en capital dans l'industrie chimique manquent (on peut cependant estimer que sur les 600 M€ investis dans le secteur chimie et matériaux, cf. figure 3.10, moins de la moitié est dirigé vers le secteur de la chimie), les entretiens que nous avons menés ont confirmé que :
 - Les fonds de "private equity" s'intéressent peu au secteur chimique en général :
 - la cyclicité du secteur n'est en général pas compatible avec leur horizon d'investissement ;
 - sur des technologies matures, la durée de retour sur investissement d'un investissement chimique est trop longue (investissements lourds et rentabilité relativement faible) ;
 - il est nécessaire de disposer de compétences techniques assez poussées afin d'apprécier l'opportunité de réaliser une opération dans le secteur chimique, or ces compétences se retrouvent rarement dans des fonds de private equity.
 - Le financement public, notamment pour la recherche, est très peu utilisé par l'industrie chimique : seuls 50 M€ ont ainsi été investis par des fonds publics en 2005 (cf. figure 3.10).
 - Le portefeuille de produits de financement de l'OSEO semble mal connu des PME (notamment l'offre de financement en quasi capital : dettes long terme aux amortissements repoussés dans le temps).

Figure 3.8 – Evolution de la structure du bilan des PME de l'industrie chimique⁽¹⁾

- PME de moins de 250 salariés; M€; 2002-2006 -

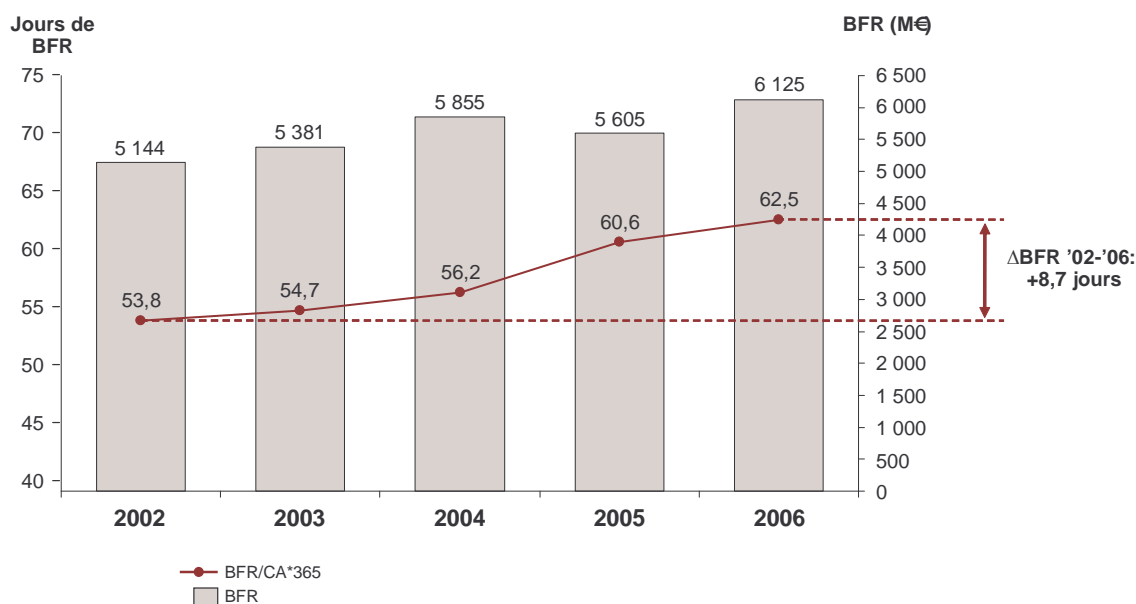


- Une forte réduction de la dette de -300 M€
- Un recapitalisation en fonds propres de +1,7 Mds€
- Un augmentation des immobilisations limitée à +1 Mds€

Notes : (1) Chimie hors pharmacie et commerce de gros
 Source : Base ALISSE de l'INSEE ; analyses A.T. Kearney

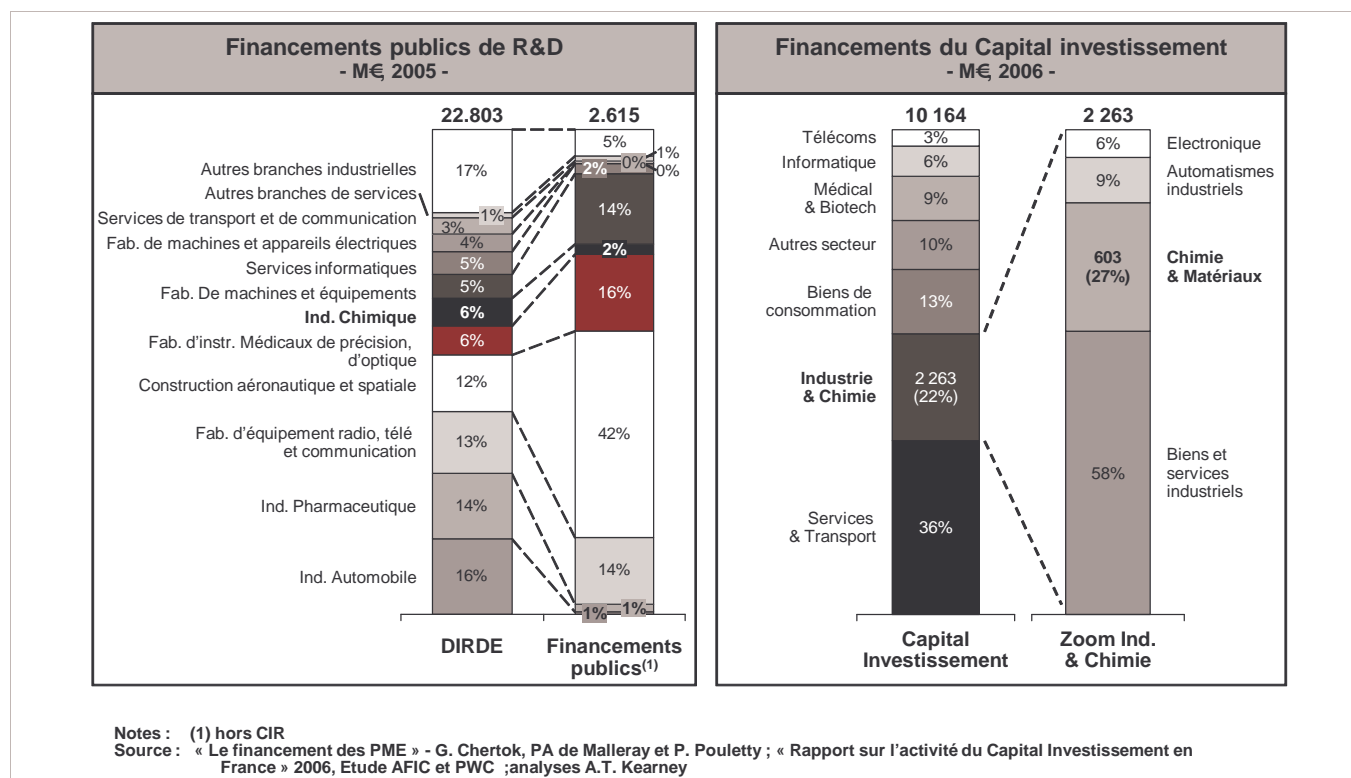
Figure 3.9 – Evolution du BFR des PME de l'industrie chimique⁽¹⁾

- PME de 10 à 250 employés, 2002-2006 -



Note : (1) hors pharmacie
 Source : ALISSE; analyses A.T. Kearney

Figure 3.10 – Répartition des financements par branche



Il semble donc, à la lumière des informations présentées ci-dessus, qu'un durcissement des conditions commerciales avec l'aval ainsi qu'un afflux de capitaux limité ont conduit les PME de l'industrie chimiques à n'utiliser leur capacité d'autofinancement qu'en partie pour financer des investissements productifs, ce qui est de nature à limiter leur potentiel de croissance sur le long terme.

3.3.2. Mise au point de notre échantillon de sociétés

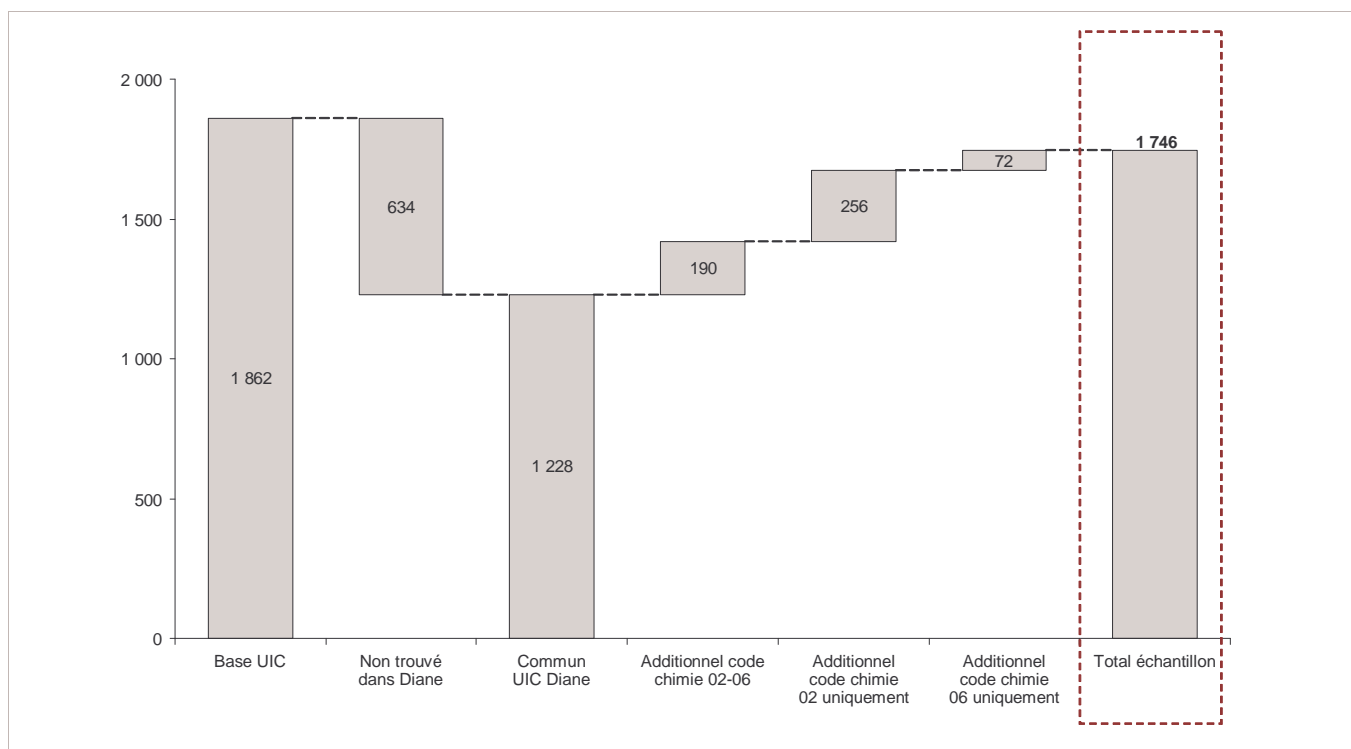
Afin de mener des analyses quantitatives plus précises que ce qui nous était permis en exploitant les bases de données de l'INSEE (notamment ALISSE), il nous a semblé nécessaire de descendre à un niveau de granularité plus fin : celui des entreprises. Nous avons donc souhaité construire un échantillon d'entreprises de l'industrie chimiques en utilisant les données comptables accessibles par le biais des liasses fiscales déposées au tribunal de commerce (issues de la base DIANE).

Afin de constituer l'échantillon d'entreprises sur lequel nous allons nous fonder, nous avons procédé de la manière suivante :

- Nous sommes partis de la base de données des adhérents de l'UIC 2008 ;
- Nous avons retenu les entreprises existantes dans Diane correspondant à des codes NAF 24 hors "fabrication de médicaments", spécifique de l'industrie pharmaceutique ;
- Nous avons procédé à des ajustements pour intégrer les entreprises ayant eu un code NAF 24 hors "fabrication de médicaments" pendant la période considérée (2002-2006) tout en ayant poursuivi une activité chimique.

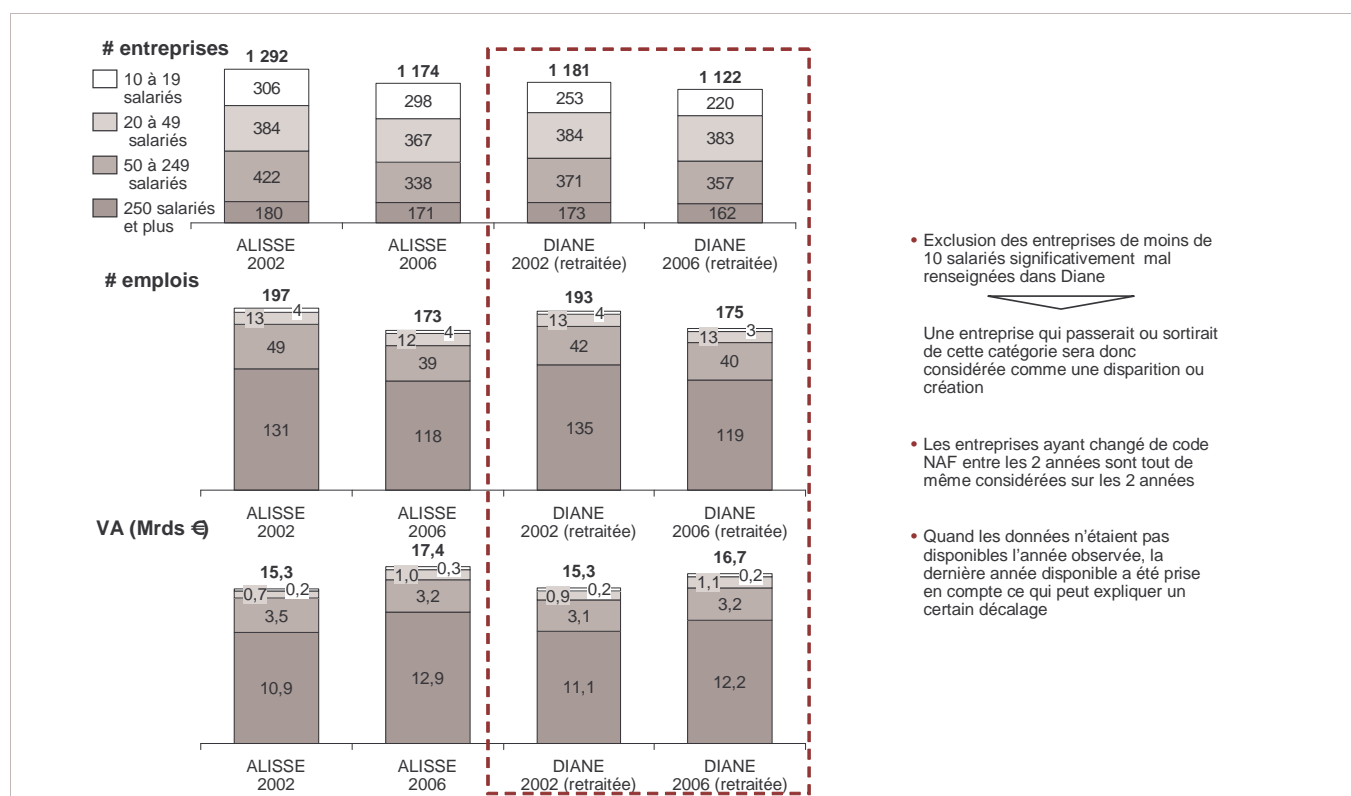
Au terme de ces opérations, nous avons donc abouti à un échantillon de 1748 entreprises qui serviront de base à notre analyse (cf. figure 3.11).

Figure 3.11 – Constitution de la base de données



Afin de déterminer la représentativité de cet échantillon, nous avons comparé ses caractéristiques avec les données issues de la base ALISSE de l'INSEE. Nous avons abouti à la conclusion que l'échantillon de sociétés retenues représentait environ 90% de la Valeur ajoutée du secteur et nous avons donc considéré que cet échantillon était représentatif de l'industrie chimique dans son ensemble (cf. figure 3.12).

Figure 3.12 – Base de données considérée



3.3.3. Définition des PME utilisée

Dans un second temps, nous avons identifié un groupe de "PME" dans l'échantillon constitué au paragraphe précédent. Le qualificatif de PME relevant de diverses définitions possibles, nous avons opéré le choix suivant :

Une PME est une [entreprise](#) dont la taille ne dépasse pas certains seuils réglementaires. Les critères de taille utilisés sont le nombre d'emplois, le [chiffre d'affaires](#) annuel et la valeur totale des actifs. On utilise en outre parfois un critère d'indépendance s'exprimant sous la forme de non-appartenance à un groupe trop important.

L'[Union européenne \(UE\)](#) a, dès avril 1996, adopté une recommandation sur la définition des petites et moyennes entreprises. Actualisée en mai 2003, cette recommandation (n° 2003/361/CE) stipule, en ce qui concerne le seuil d'effectif et les seuils financiers, que les PME sont constituées des entreprises qui occupent moins de 250 personnes et dont : soit le [chiffre d'affaires](#) n'excède pas 50 millions d'euros, soit le total du bilan annuel n'excède pas 43 millions d'euros. Nous avons pris en compte dans cette étude le seul critère d'emploi et considéré que les entreprises de notre échantillon comptant moins de 250 employés étaient des PME.

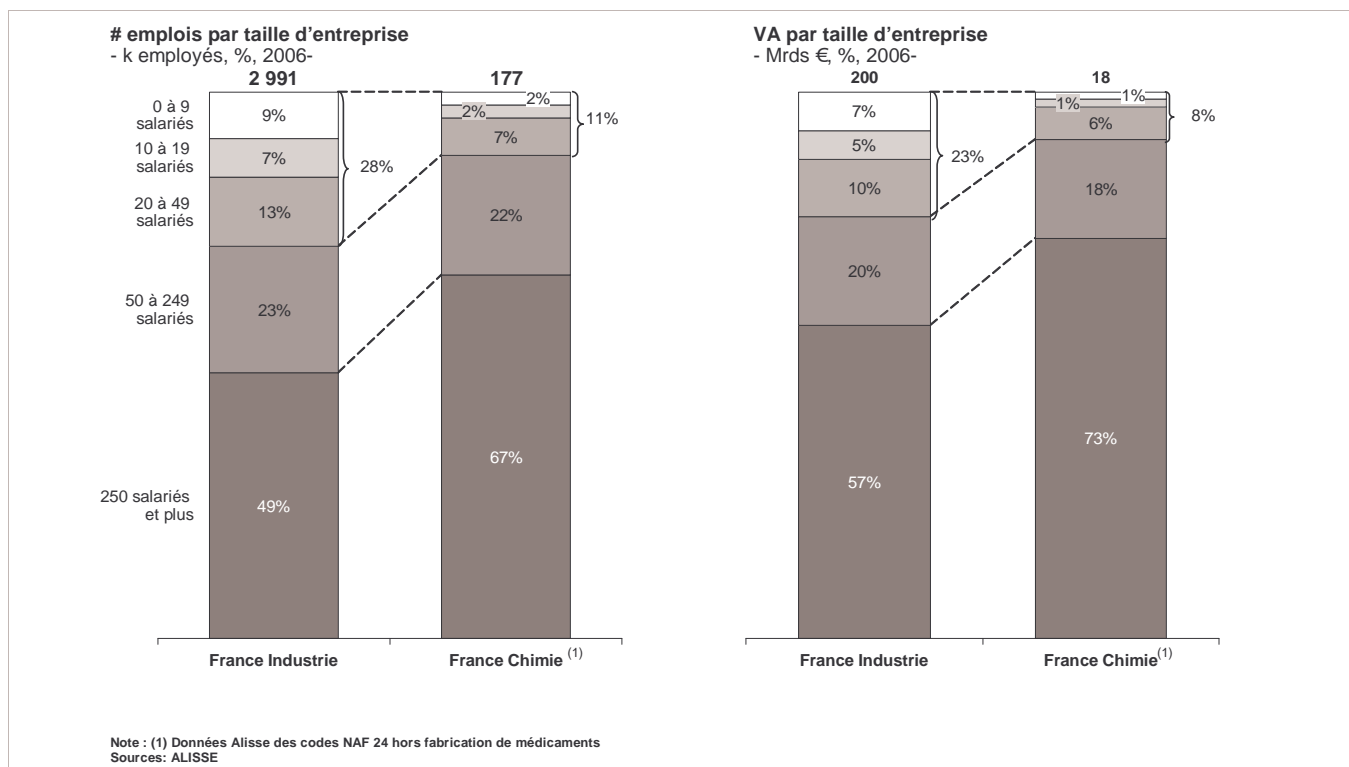
Quant au critère d'indépendance, s'il existe un accord général sur le fait qu'une PME ne doit pas appartenir à un grand groupe, il est toutefois difficile à mettre en œuvre au niveau des statistiques, nous avons donc considéré ici qu'une PME membre d'un groupe restait une PME.

3.4. Importance économique des PME

3.4.1. Vision statique : poids des PME dans la VA et l'emploi

Les PME représentent 33% des emplois et 27% de la VA (contre 51% des emplois et 43% de la VA dans le reste de l'industrie comme indiqué figure 3.13). La différence la plus notable concerne les petites et moyennes PME (<50 employés) dont le poids économique est deux fois plus faible que leurs équivalents des autres secteurs industriels.

Figure 3.13 – Répartition emplois / VA par taille

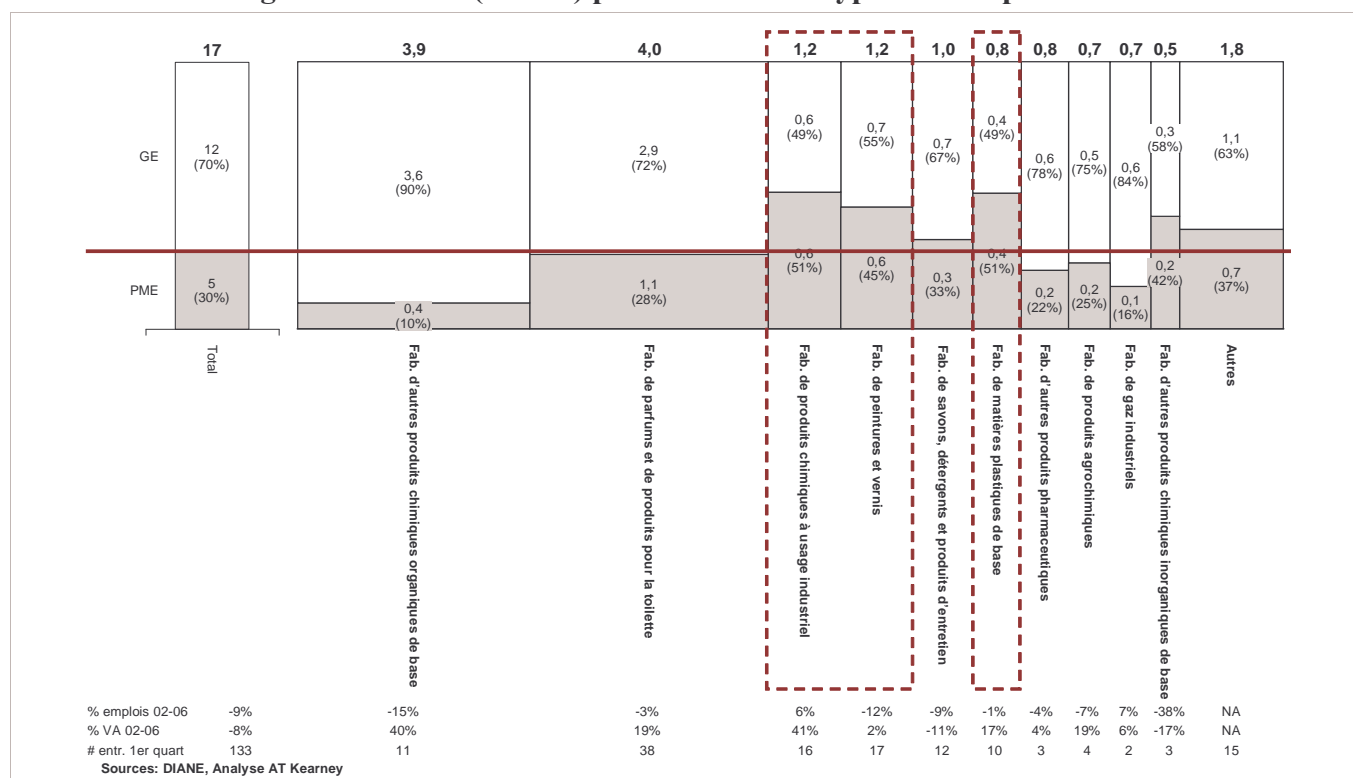


Cette faible importance des PME peut s'expliquer, comme on l'a vu, par le caractère fortement capital intensif de l'industrie et la nécessité d'investissements initiaux importants qui créent une barrière à l'entrée pour les plus petites entreprises. Cet argument est corroboré par une analyse de la distribution des PME par secteur d'activité. Les PME sont en effet représentées de manière à peu près uniforme selon le secteur d'activité, à l'exception de trois secteurs qui se distinguent par une sur représentation des PME (cf. figure 3.14) :

- Fabrication de peinture ;
- Fabrication de matières plastiques de base ;
- Fabrication d'autres produits chimiques à usage industriel (notamment détergents).

Or, ces secteurs intègrent justement tout un spectre d'activités de "mélange" qui ne nécessitent pas d'investissement en capital significatif. On peut notamment citer les activités de compounder pour les plastiques, qui consiste à mélanger des polymères avec des charges et des additifs, les activités de mélangeur pour les peintures, et des activités comparables pour la production de détergents.

Figure 3.14 – VA (Mrds€) par code NAF et types d'entreprise 2006



Au-delà de l'effet direct des PME dans la création de valeur ajoutée d'un secteur, nous avons cherché à valider la thèse selon laquelle les PME avaient un rôle indirect d'innovation qui permettait de dynamiser un secteur et par là même de contribuer indirectement à sa croissance.

Notre analyse ne nous permet cependant pas de conclure à une corrélation évidente entre le dynamisme d'un secteur (taux de croissance de sa VA) et le poids des PME dans ce secteur (cf. figure 3.15). En revanche, elle met l'accent sur la plus forte sensibilité à la conjoncture, en matière d'emploi, des segments qui comportent beaucoup de PME. Ainsi, les secteurs dans lesquels les PME ont un fort poids ont tendance à créer plus d'emplois quand la conjoncture est favorable et à en détruire plus quand elle est défavorable alors que les secteurs plus concentrés semblent plus résilients.

Figure 3.15 – Liens entre le poids des PME et le dynamisme d'un secteur

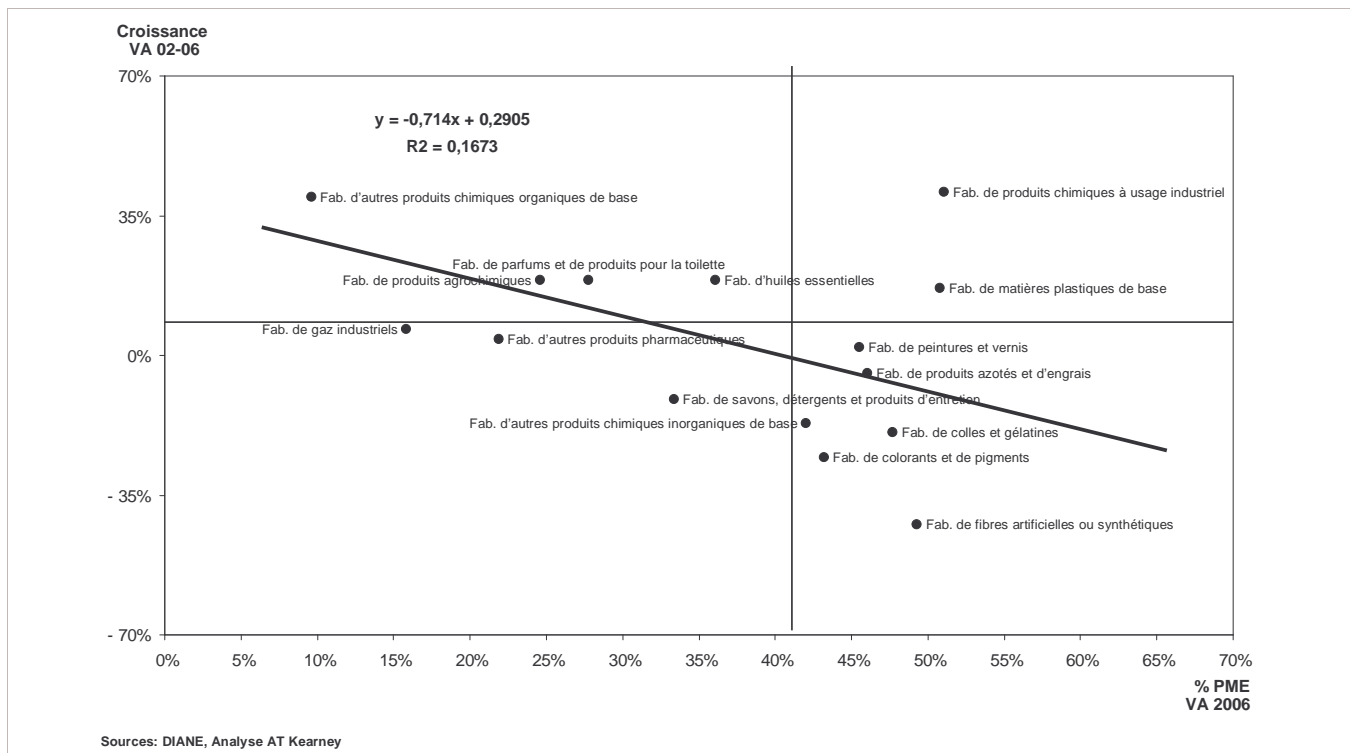
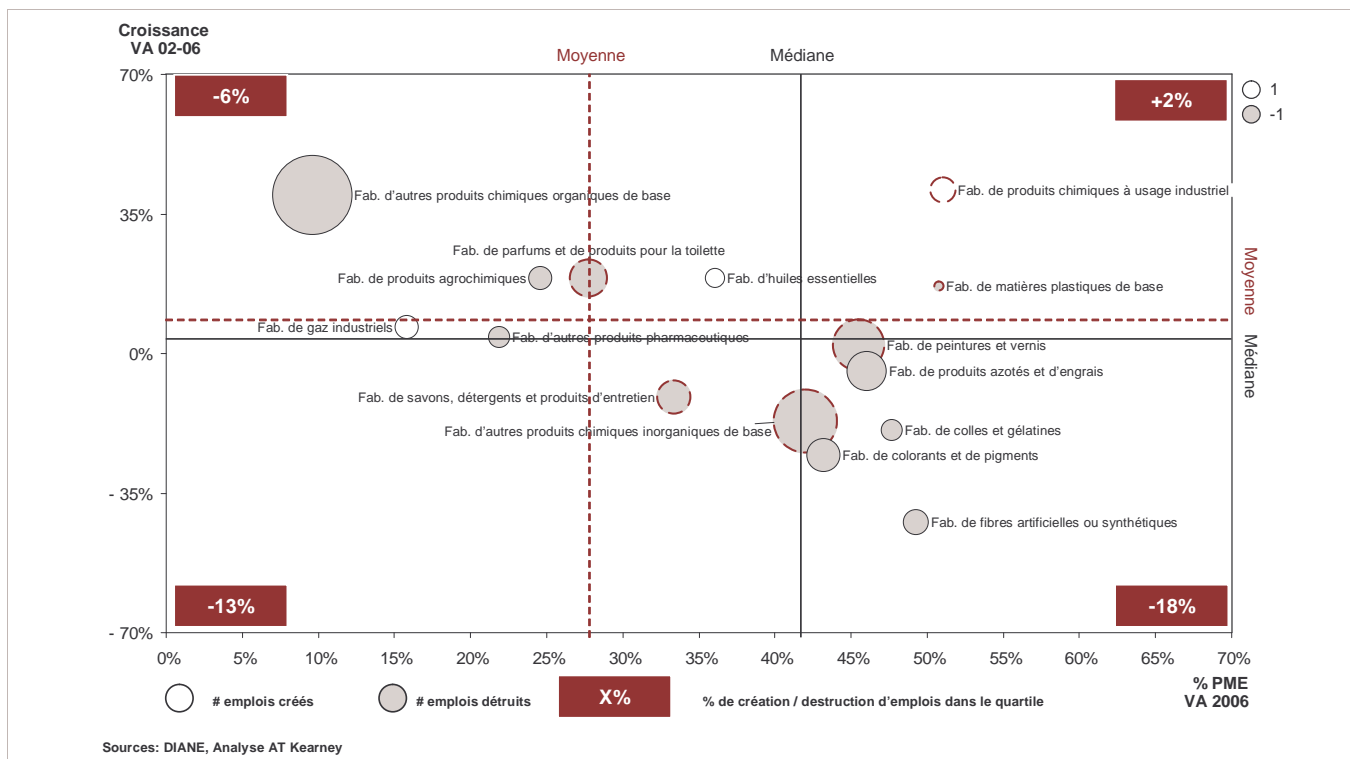


Figure 3.16 – Création d'emplois selon le poids des PME et le dynamisme d'un secteur



D'un point de vue statique, on peut donc conclure que les PME ne jouent qu'un rôle relativement marginal dans l'économie de la chimie en 2006, qui repose davantage sur la contribution des grandes entreprises.

3.4.2. Vision dynamique : croissance du secteur

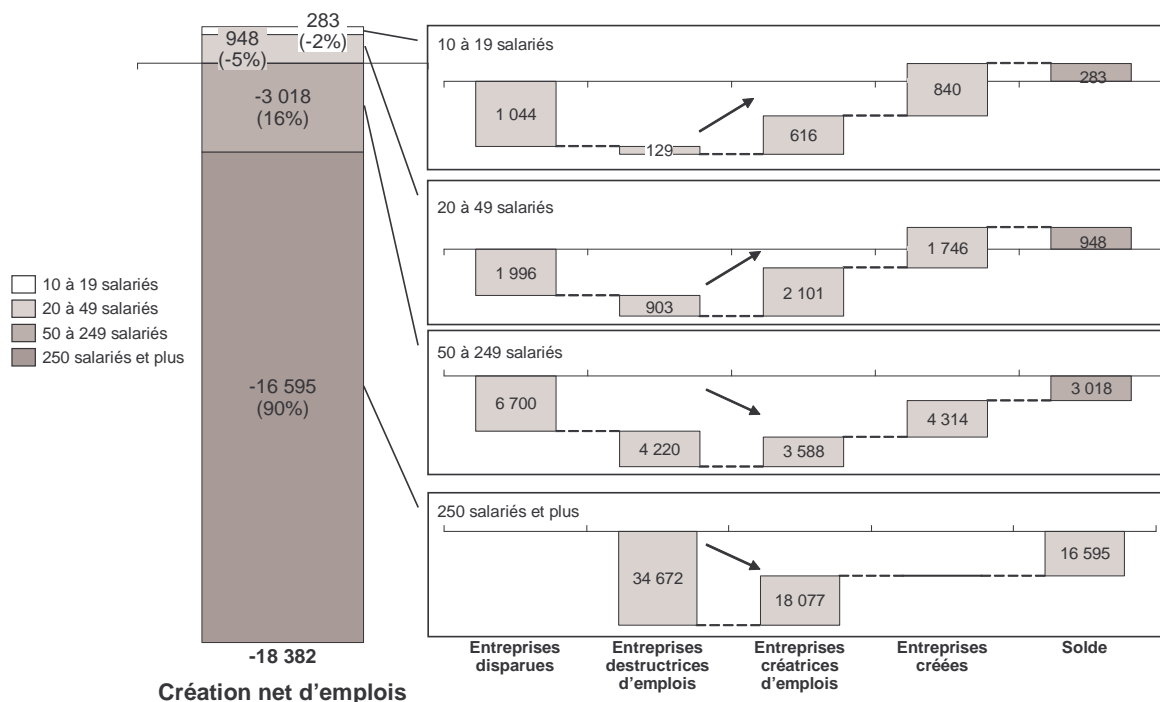
Au-delà de la vision statique, nous nous sommes intéressés d'un point de vue dynamique au rôle des PME dans la création d'emplois et la création de PIB dans l'industrie chimique entre 2002 et 2006. L'étude des évolutions de notre échantillon de sociétés (cf. figures 3.17 et 3.18) a montré que :

- La croissance de la valeur ajoutée provient majoritairement des grandes entreprises, même si les PME, et particulièrement les PME de moins de 50 employés, ont une contribution à la croissance qui dépasse largement leur poids dans l'industrie (elles représentent 30% de la croissance de la VA alors qu'elles ne représentent que 7% de la VA).
- Les petites et moyennes PME sont les seules à avoir une contribution nette positive à la création d'emplois :
 - Les petites et moyennes PME ont contribué à la création de 1 200 emplois entre 2002 et 2006 ;
 - Les grandes PME et les grandes entreprises ont détruit environ 19 000 emplois dans la même période (ce chiffre devrait naturellement être mis en perspective avec les emplois indirects créés dans d'autres secteurs, liés à l'outsourcing).
- La création d'emplois est réalisée de manière équilibrée entre création de nouvelles entreprises et croissance organique des PME existantes.

Les deux graphes suivants détaillent ce processus de création et de destruction d'emplois et de valeur ajoutée en le distinguant par type :

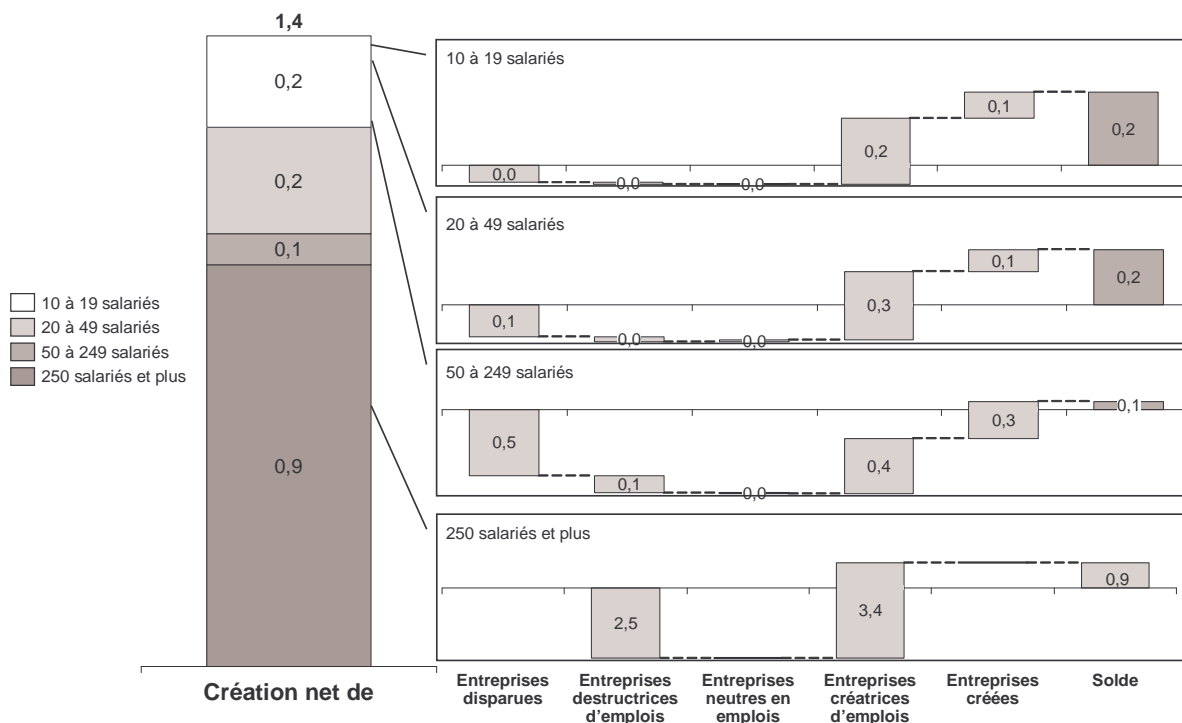
- Effets liés à la disparition d'entreprises au cours de la période 2002/2006 ;
- Destruction d'emplois et de VA par des entreprises qui sont restées en activité pendant cette période ;
- Création d'emplois et de VA par des entreprises qui sont restées en activité pendant cette période ;
- Effets liés à la création d'entreprises au cours de la période 2002/2006.

Figure 3.17 – Création d'emplois entre 2002 et 2006
- # d'emplois -



Sources: DIANE, Analyse AT Kearney

Figure 3.18 – Création de VA 2002 et 2006
- Mrds € -

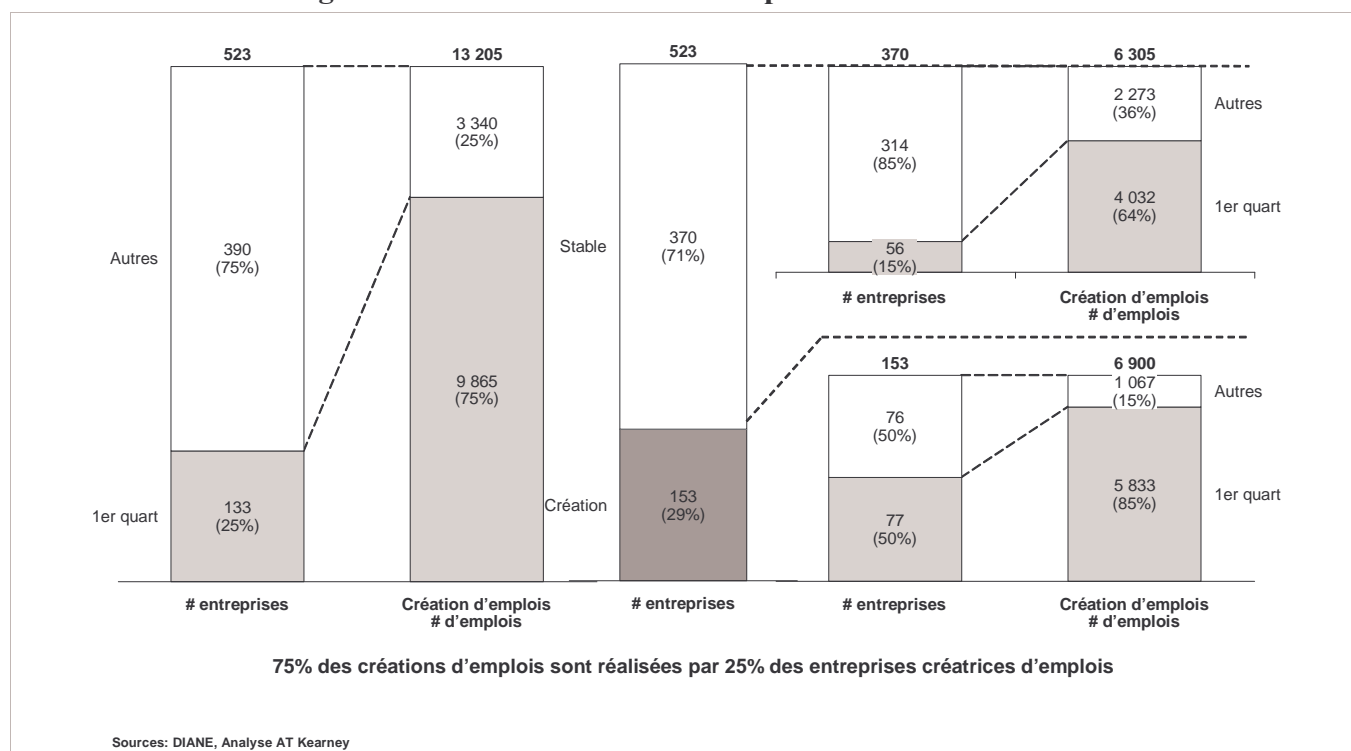


Sources: DIANE, Analyse AT Kearney

Dans un second temps, nous avons cherché à déterminer si les créations d'entreprises étaient uniformément réparties entre les PME du secteur, ou si l'on observait au contraire une répartition de type Paréto.

L'analyse des créations d'emplois a révélé qu'une centaine de "gazelles", 25% des PME, étaient à l'origine de 75% des créations d'emplois (cf. figure 3.19). Ces "gazelles" sont à peu près également réparties entre les nouvelles entreprises (c'est-à-dire créées durant la période 2002/2006) et les entreprises déjà existantes en 2002 (appelées *stables* ci-dessous) mais qui ont montré une croissance importante.

Figure 3.19 – PME créatrices d'emplois entre 2002 et 2006



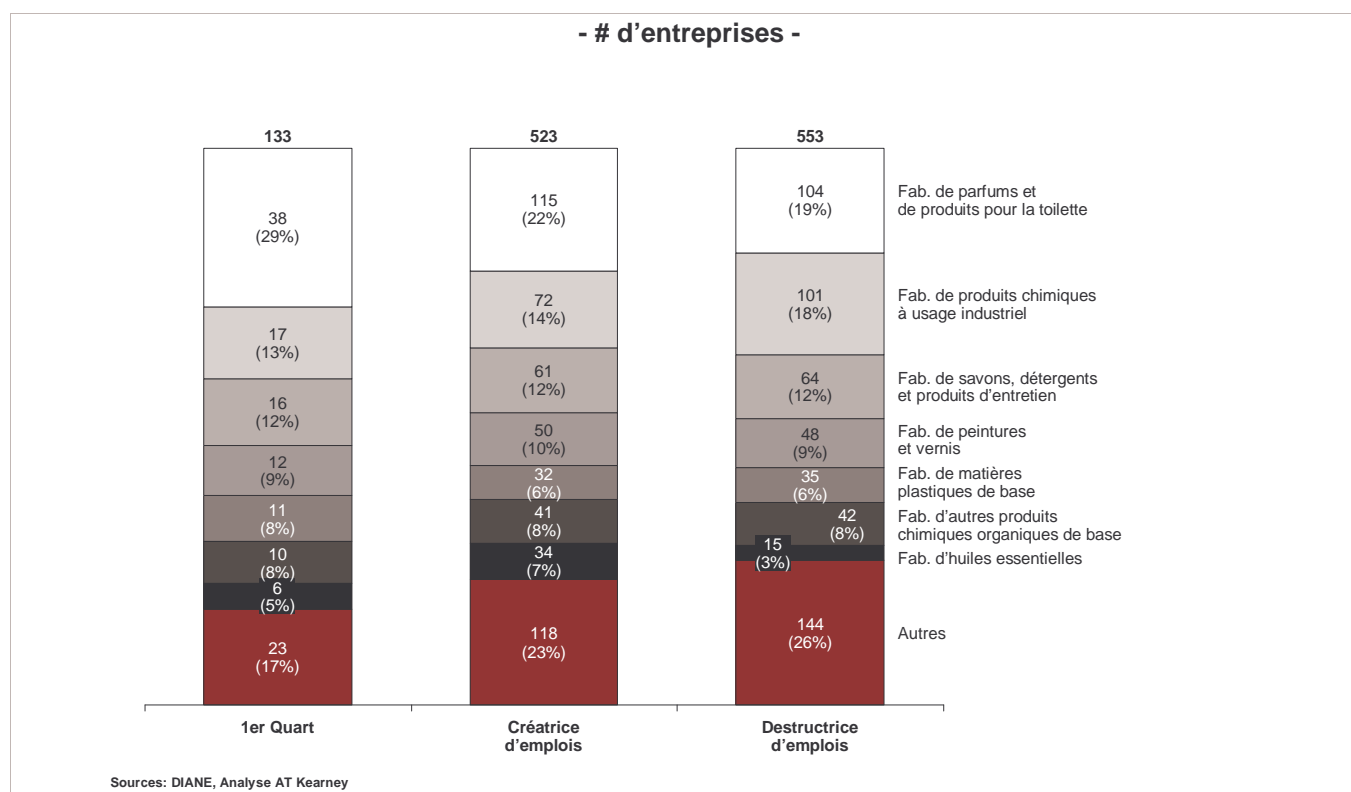
Nous avons souhaité étudier plus précisément les "gazelles", afin de déterminer les caractéristiques qui les distinguaient statistiquement des autres entreprises de l'industrie chimique. Notre objectif était ainsi d'identifier les déterminants de la performance des entreprises chimiques et donc, en creux, de souligner ce qui a manqué aux "autres" PME pour se développer.

Les axes d'analyse suivants ont été particulièrement étudiés :

Secteur d'activité

L'analyse du secteur d'activité (cf. figure 3.20) n'a rien révélé de particulier ; les entreprises performantes sont à peu près uniformément réparties dans les différents secteurs, à l'exception de la fabrication de parfum, dans laquelle les PME performantes sont légèrement surreprésentées.

Figure 3.20 – Analyse du premier quart des PME créatrices d'emplois par code NAF



Structure de bilan

L'étude des bilans des entreprises performantes (cf. figures 3.21 et 3.22) a en revanche révélé que les entreprises performantes, en moyenne :

- étaient davantage capitalisées que les autres entreprises
- finançaient leurs actifs
 - significativement plus par de la dette que la moyenne pour les petites PME
 - avec une structure de financement comparable à la moyenne pour les plus grandes PME
- disposaient de davantage d'immobilisations corporelles et incorporelles que les autres entreprises
- d'un point de vue dynamique, entre 2002 et 2006, les entreprises performantes ont beaucoup plus accru leur actif et particulièrement leurs immobilisations que les autres entreprises
 - Financé par de la dette pour les petites PME
 - Financé par des capitaux propres pour les grandes PME

La capitalisation plus importante des entreprises performantes confirme que la capacité d'investissement est un critère clef de succès. En outre, on peut également constater que le financement des petites PME performantes repose significativement plus sur les crédits bancaires que la moyenne, ceux-ci faisant peu à peu place à un financement à base de fonds propres pour les PME de taille moyenne.

A défaut d'une activité importante de capital risque, il semble donc que les fonds permettant aux petites PME performantes de se développer soient d'origine bancaire. Au vu des entretiens que nous avons menés, il semble que les PME ayant obtenu des financements bancaires dans une phase amont de leur développement se distinguent des autres, outre la qualité de leur projet, par l'existence de compétences financières / marketing au sein de la structure, capable de négocier un dossier de financement avec des établissements de crédit.

Figure 3.21 – Structure du bilan moyen des PME performantes⁽¹⁾ selon leur taille

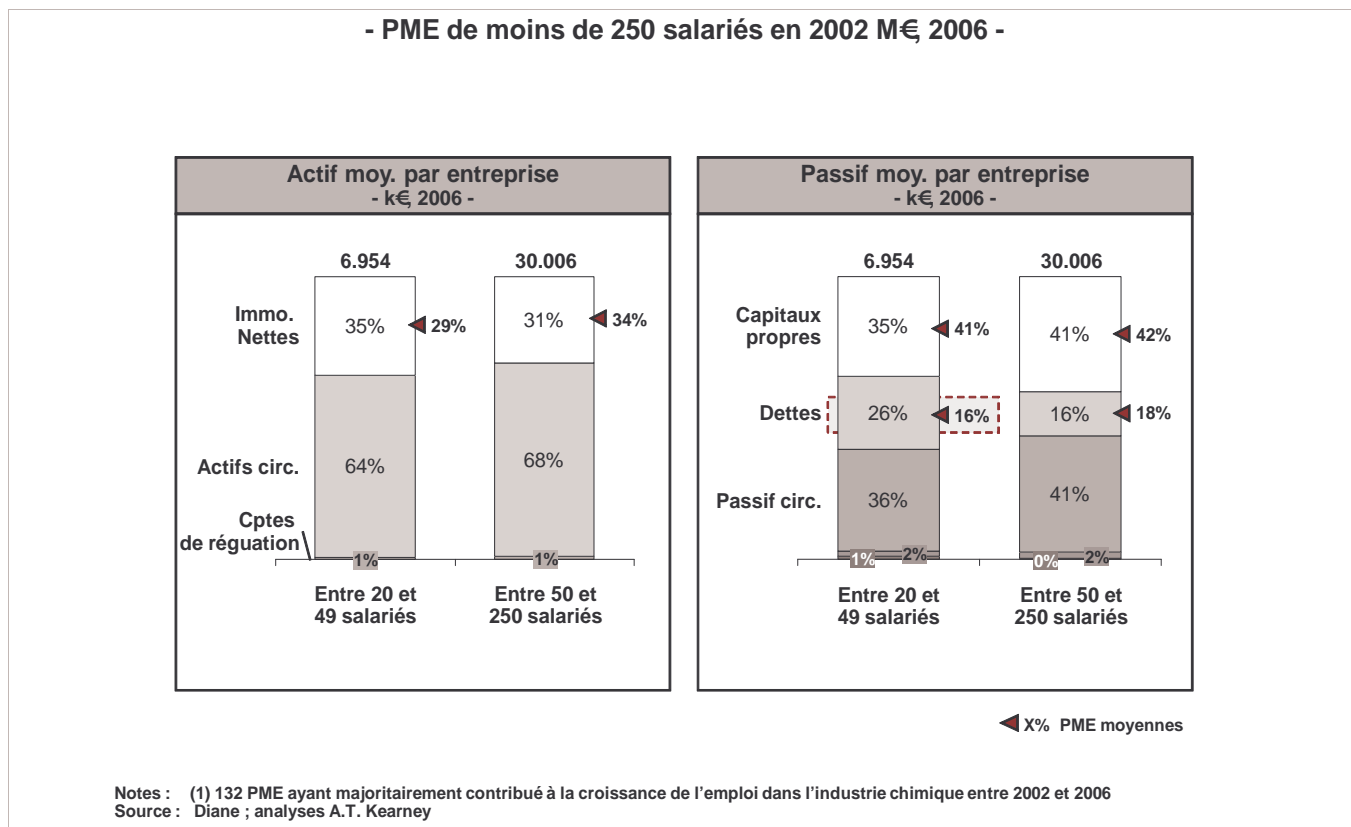
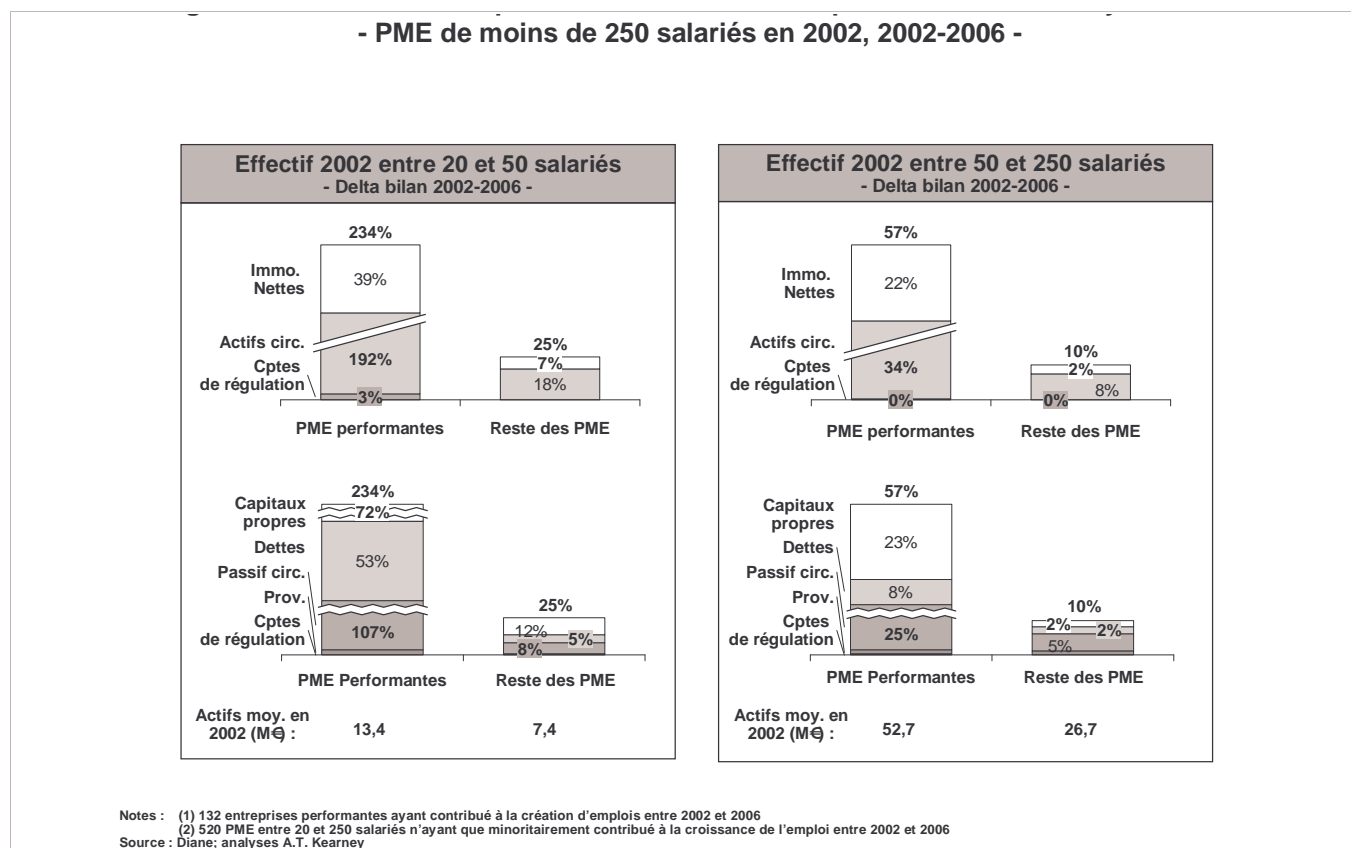


Figure 3.22 – Evolution comparée des bilans des PME performantes⁽¹⁾ et moyennes⁽²⁾

Par propriété du capital

L'analyse de notre échantillon (cf. figures 3.23 et 3.24) a montré que :

- Les entreprises performantes sont davantage filiales d'autres entreprises que le reste des entreprises du secteur.
- Les entreprises performantes ont davantage fait l'objet d'acquisition sur la période 2002/2006 par des groupes industriels que le reste des entreprises.

Figure 3.23 – Analyse du premier quart des PME créatrices d'emplois par type d'actionnaire

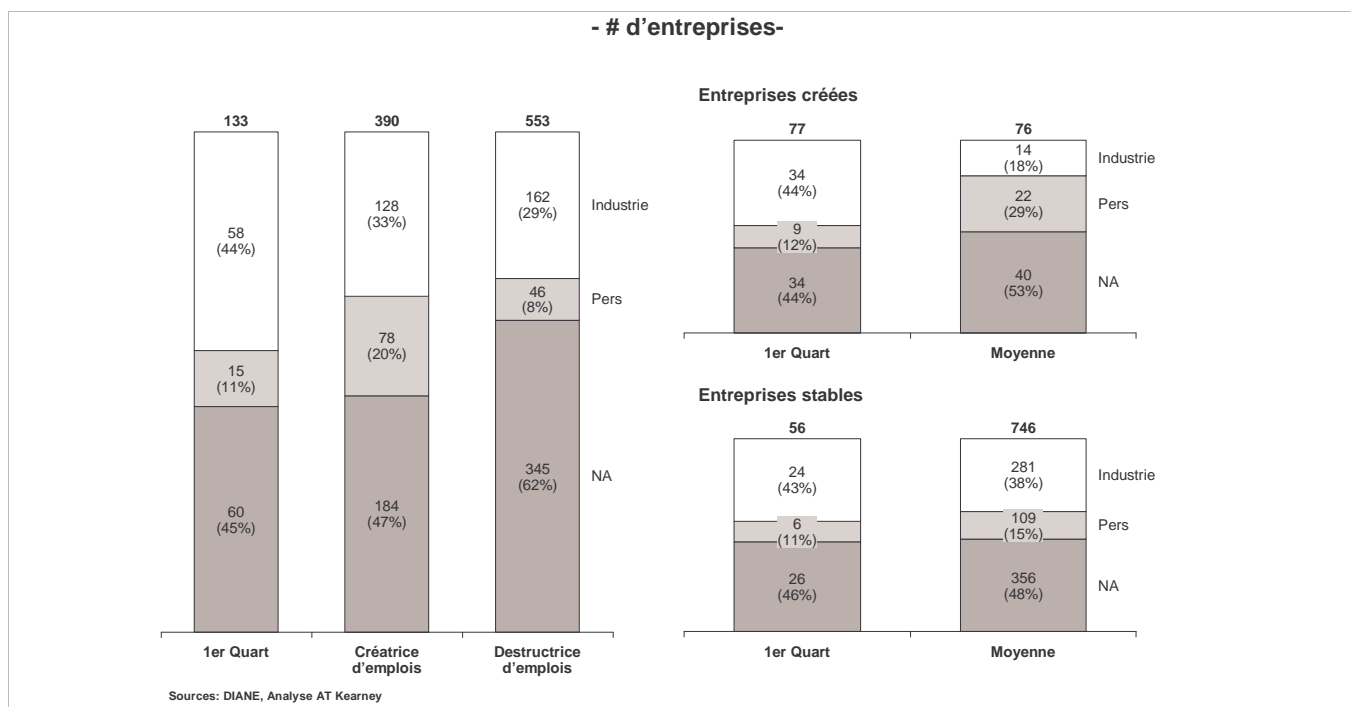
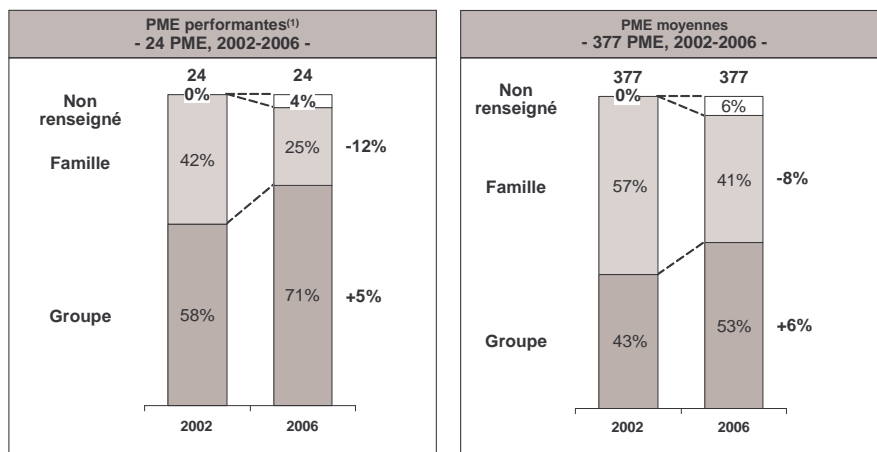


Figure 3.24 – Evolution de l'actionnariat de PME performances⁽¹⁾
- 24 PME, 2006 -



Notes : (1) 24 PME ayant majoritairement contribué à la croissance de l'emploi dans l'industrie chimique entre 2002 et 2006
Source : Diane; analyses A.T. Kearney

Cette surreprésentation des filiales de grands groupes parmi les gazelles peut s'expliquer par la difficulté, passé un certain stade, d'accéder à des sources de financement permettant de financer la croissance importante des gazelles. A défaut de pouvoir bénéficier d'un accès simple à l'épargne publique ou au marché des capitaux, les gazelles peuvent se tourner vers des groupes industriels qui,

outre du capital, peuvent leur fournir des compétences nouvelles ainsi qu'un réseau de distribution déjà structuré.

La question de savoir si ces acquisitions de gazelles par des sociétés industrielles devraient être favorisées comme possibilité d'apport ou si au contraire des sources de capital ou de quasi capital devraient être mises à leur disposition pour leur permettre de rester autonome doit être discutée plus avant :

Acquisition par des groupes :

Outre l'accès à une source de financement nécessaire à son développement, la prise de participation d'une entreprise industrielle va donner accès à la PME à des ressources qui lui font en général défaut en termes de :

- Compétences (finances, vente et marketing)
- Réseau de distribution (notamment à l'étranger)

Il serait donc opportun de distinguer :

- les acquisitions ou les prises de participation réalisées par des entreprises au statut de "partenaire industriel" qui ne seraient pas nécessairement des industriels de la chimie ou de très grandes entreprises et dont l'objet serait la réalisation de synergies industrielles (l'un des entretiens que nous avons menés entre une start-up productrice de détergents verts et un groupe de distribution de produits industriels semblait en effet tout à fait positif) ;
- les acquisitions réalisées par des grands groupes chimiques internationaux dont l'objectif est davantage de capturer une nouvelle technologie ou un accès à de nouveaux marchés.

Développement de sources de financement permettant aux PME de rester indépendantes :

- Comme on l'a vu plus haut, les PME constituent un enjeu important pour la croissance de la valeur ajoutée et la création d'emplois. Permettre aux PME de financer leur croissance tout en restant indépendantes a donc un sens d'un point de vue économique.
- Le modèle actuel d'acquisition des PME par de grands groupes fait peser le risque d'un insuffisant renouvellement du tissu industriel français. Ce renouvellement du tissu productif, qui n'est pas un objectif en lui-même, devient une condition déterminante de la croissance et de l'innovation dans des économies fondées sur le progrès technique¹. Dans les périodes de croissance stable au sein du même paradigme technologique, comme fut la période de croissance des "trente glorieuses", la fonction d'innovation peut être assurée par la R&D des grandes firmes. En revanche, en période de rupture technologique, l'entrepreneur de PME reprend son rôle d'innovateur face à une fonction R&D des grandes firmes qui se spécialise traditionnellement dans l'innovation incrémentale. Ce point nous semble particulièrement intéressant dans le cadre de l'évolution de l'industrie chimique vers la durabilité, qui suppose des changements majeurs de paradigme, notamment :
 - le développement du recyclage ;
 - le développement de nouvelles ressources renouvelables substituables aux hydrocarbures ;
 - l'évolution vers l'économie de la fonctionnalité, avec davantage d'intégration des entreprises chimiques dans les maillons aval de la chaîne.

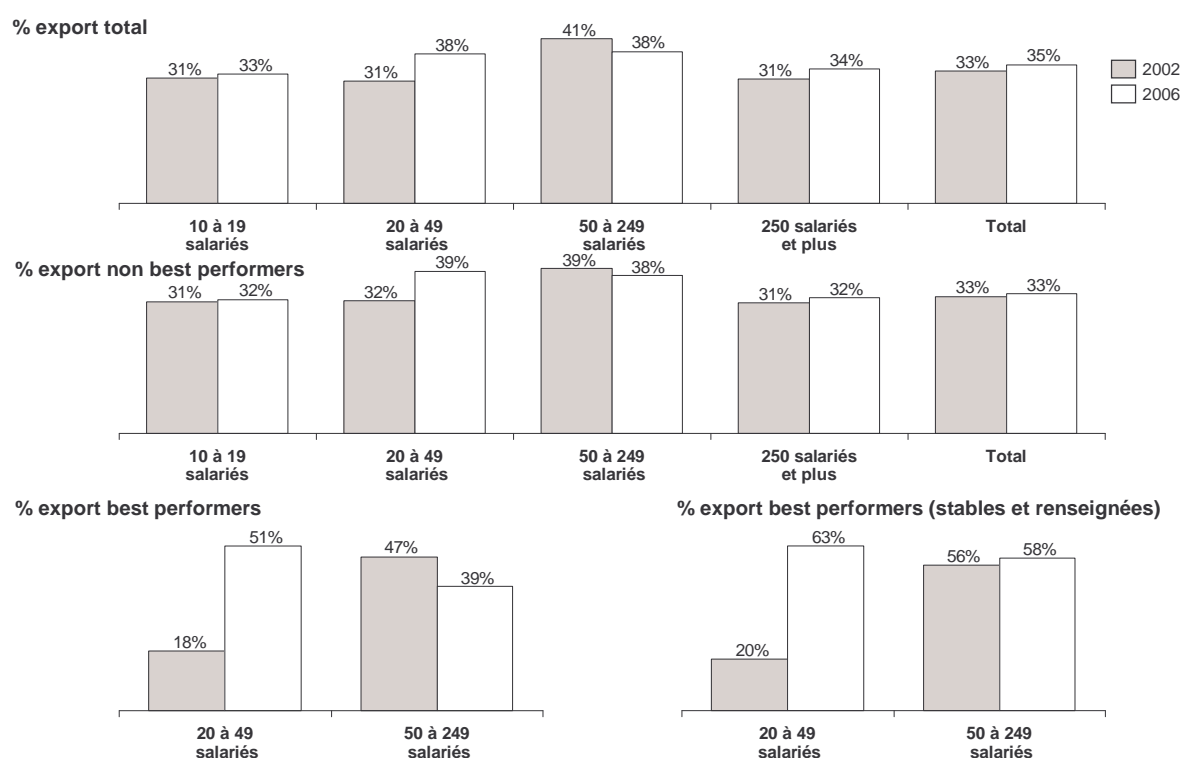
¹ Cf "the effects of entry on incumbent innovation and productivity" par Aghion, Blundell & Al (2006).

- Il faut cependant noter que, dans le domaine chimique, cette capacité d'innovation des PME est freinée par la nature de leurs relations avec leurs grands clients aval. Ceux-ci ont un processus d'homologation de leurs produits complexe et qui doit être repensé en cas de changement des matières premières. Ainsi, il est aujourd'hui difficile pour les PME de l'industrie chimique (particulièrement pour celles qui produisent des biens intermédiaires) de faire de l'innovation produit "push", car même en produit réellement innovant aurait de fortes chances de ne pas être accepté par ses clients traditionnels qui contrôlent le processus d'innovation global.

Par niveau d'export

Une analyse de la répartition géographique des ventes des PME de l'industrie chimique nous a également permis de réaliser que les entreprises performantes exportaient bien davantage que les autres entreprises de taille comparable (cf. figure 3.25).

Figure 3.25 – Part de l'exportation



Sources: Digne, Analyse AT Kearney

Par politique commerciale

Le rapport "les PME à forte croissance et l'emploi" de l'OCDE (2002) indique que les PME à forte croissance se distinguent des autres par le fait qu'elles sont plus fortement orientées vers le marché. Elles cultivent des stratégies de différenciation qui dépendent de l'existence de relations étroites avec leurs clients, notamment de contacts fréquents et personnalisés. Le rapport note en outre que les PME en forte croissance mettent plus largement en œuvre des stratégies commerciales proactives alors qu'elles ne sont pas nécessairement positionnées sur des marchés eux-mêmes en forte croissance.

L'applicabilité de ces remarques au secteur chimique nous a été confirmée par les entretiens que nous avons menés. Il semble en effet que la situation de "sous-traitance", c'est-à-dire la dépendance à un petit nombre de grands clients à qui l'on fournit des produits sans les valoriser, est susceptible de conduire à une situation très défavorable pour les PME : dégradation des marges, impossibilité de promouvoir de nouveaux produits innovants et conditions de BFR défavorables.

Les exemples que nous avons rencontrés de diversification de la base de clients (au-delà des grands groupes et au-delà du marché historique) ainsi que de différenciation des produits (par le marketing ou la R&D) semblent ainsi avoir été couronnés de succès.

3.5. Conclusions sur les facteurs de croissance des PME et pistes de politiques publiques

3.5.1. Conclusions

Les analyses précédentes ont contribué à montrer qu'une politique de soutien aux PME serait essentiellement une politique d'emploi, par opposition à une politique qui viserait la croissance du PIB.

Les analyses ont identifié certaines caractéristiques qui différencient les entreprises performantes des autres, on pourrait tenter d'identifier un éventuel phénomène de cointégration afin de déterminer si ces caractéristiques sont les causes du caractère performant de ces entreprises ou si au contraire elles n'en sont que les conséquences.

A ce stade, nous postulons que les caractéristiques des gazelles mettent en lumière, en creux, les difficultés des PME chimiques moins performantes :

- Nécessité d'investissements importants et difficultés de financement, aggravées par un accroissement de financement du BFR (imposé par le pouvoir de négociation des grands groupes acheteurs) qui consomme une partie importante de la capacité de financement ;
- Défaut de capacité d'exportation.

Les parties suivantes décrivent brièvement les voies que l'on pourrait emprunter pour résoudre ces difficultés :

3.5.2. Développement des sources de financement

- Le financement bancaire sera difficile à développer significativement en raison du caractère structurellement cyclique de l'industrie chimique. De la même manière, il est probable qu'hors effet d'aubaine lié à l'apparition de nouveaux marchés et de nouvelles technologies "durables", les fonds de private equity n'investissent pas significativement plus qu'aujourd'hui dans le futur.
- L'offre de quasi fonds propres (dettes à 10 ans avec amortissements différés) de l'OSEO pourrait donc être davantage mise en avant auprès des PME, notamment en étant relayée par les bureaux régionaux de l'UIC. Par ailleurs, l'accès aux PME de l'industrie chimique des produits de cette nature devrait être rendu plus aisé.

3.5.3. Réduction du BFR

- L'augmentation du BFR provient largement des politiques d'achat des grands groupes qui utilisent leur pouvoir de négociation pour imposer aux PME des délais de paiement avantageux pour eux, voire à leur imposer du portage de stock dans certains cas. Ces pratiques pourraient faire l'objet d'un moratoire, ou d'un code de bonnes pratiques au niveau national.
- L'utilisation de l'affacturage pourrait également être stimulée pour réduire le BFR des entreprises.

3.5.4. Formations à la finance pour bénéficier des aides publiques

- L'un des freins à l'utilisation des dispositifs publics d'aide aux PME précités est lié à l'accès aux compétences (financières et marketing) nécessaires pour bénéficier de ces aides. La mise à disposition de personnel dédié à l'aide des PME dans ces domaines (comme cela a été mis en œuvre en Israël dans le cadre du programme Yozma de développement du capital risque) devrait permettre d'augmenter le taux d'utilisation des dispositifs publics.

3.5.5. Encouragement au développement des partenariats avec d'autres entreprises

- En sus de l'accès à des sources de financement en capital, il pourrait également être opportun de développer les possibilités pour des entreprises industrielles de prendre des participations dans des PME chimiques. Ceci pourrait être réalisé via des actions de communication ciblée et l'animation d'un réseau industriel autour de l'industrie chimique.

3.5.6. Aide à l'export

- L'usage des offres d'Ubifrance par les PME de l'industrie chimique devra être analysé plus finement, et le cas échéant des actions de communication ciblées pourront être envisagées.

3.5.7. Valorisation des produits des PME

- Comme on l'a vu, les PME produisant actuellement des produits potentiellement touchés par REACH semblent dans une situation délicate, dans la mesure où leurs clients sont tentés de les substituer par des fournisseurs opérant dans des pays non touchés par REACH. Cela prive les PME des possibilités d'engager des investissements de R&D importants puisqu'elles risqueraient de ne pas avoir de débouchés significatifs.
- La mise au point d'un label national "chimie durable compatible avec REACH" donnerait une incitation aux clients de ces PME à se fournir auprès d'entreprises ayant précisément engagé ces recherches afin de bénéficier d'un effet d'image. Ainsi, un tel label serait de nature à améliorer les conditions de négociations des PME avec les grands acteurs.

3.5.8. Incitation à une stratégie commerciale plus agressive

- Les PME elles-mêmes pourraient être incitées à modifier leur stratégie commerciale vis-à-vis de leur clients, notamment :

- en diversifiant davantage leur base de clients afin de limiter l'exposition à un secteur (ce qui améliorera la capacité d'endettement) et leur niveau de BFR ;
- en adoptant une stratégie commerciale plus proactive vis-à-vis de leurs clients ;
- en développant des offres de services différenciantes.

3.5.9. Politiques générales de soutien aux PME

- Au-delà des points présentés plus haut qui sont spécifiques à l'industrie, chimique, on peut rappeler ici les termes de la politique de soutien aux PME menée par les États-Unis, le "Small Business Act" qui entre autres :
 - Crée la Small Business Administration, une agence fédérale indépendante ayant pour but d'aider, conseiller, assister et protéger les intérêts des petites entreprises ;
 - Facilite l'accès aux marchés publics en réservant entre 23% et 40% de l'achat public américain aux PME nationales, ce qui encourage l'innovation locale tout en permettant aux petits acteurs de concurrencer les grandes entreprises pour atteindre eux aussi des tailles internationales ;
 - Facilite l'accès au prêt bancaire au moyen d'une garantie de l'Administration de telle sorte que celle-ci se substitue à l'emprunteur défaillant pour le remboursement du prêt ;
 - Facilite l'accès à l'information via des guichets accessibles par téléphone et des centres d'information ;
 - Organise la défense des petites entreprises en créant un Office of Advocacy, chargé de se faire l'avocat de la petite entreprise américaine face au Congrès.
- La Commission européenne avait présenté le 25 juin 2008 ses propositions pour un "Small Business Act européen" avec 10 principes à "adopter au plus haut niveau" et 4 propositions législatives :
 - plus de facilités pour que les PME puissent bénéficier d'aides d'État pour la formation, la recherche, la protection environnementale ;
 - un nouveau statut de société privée européenne ;
 - des taux de TVA réduits sur les services fournis localement ;
 - modification de la directive sur les retards de paiement.

Menée sur la base de questionnaires auprès d'organisations membres ou affiliées de l'UEAPME une analyse montre l'existence d'un décalage entre les actions mises en œuvre et les effets concrets constatés par les PME.

TABLE DES MATIERES

SYNTHÈSE.....	9
1. "BASE STRATÉGIQUE INITIALE" DE LA CHIMIE DURABLE	23
1.1. Introduction	23
1.1.1. Objectif.....	23
1.1.2. Constat de départ.....	23
1.1.3. Précaution sémantique.....	25
1.1.4. Intention.....	25
1.2. Les enjeux de la chimie durable	26
1.2.1. Les exigences de durabilité pour la chimie	27
1.2.2. L'économie durable et la nouvelle donne économique	37
1.2.2.1. Le point de départ.....	37
1.2.2.2. Les enjeux de la production et de la consommation durable	38
1.2.2.3. La question internationale	43
1.2.2.4. Court terme contre moyen et long terme.....	43
1.2.3. Une question d'arbitrage.....	44
1.2.3.1. Les antagonismes du développement durable	44
1.2.3.2. Des pistes de résolution des antagonismes.....	45
1.3. Chimie durable – Base stratégique.....	49
1.3.1. Les voies d'accès à la durabilité pour la chimie	49
1.3.2. Les enjeux.....	53
1.3.2.1. Degré de maturité et horizon de déploiement	53
1.3.2.2. Ampleur des mutations.....	55
1.3.3. Les initiatives actuelles	56
1.3.4. Les contours de la chimie durable.....	58
1.4. Les conditions d'une accélération vers la durabilité.....	63
1.4.1. Stratégie économique et réglementaire (au regard des marchés)	63
1.4.2. Stratégie économique et réglementaire (au regard des acteurs et des structures)	65
1.4.3. Conditions sociologiques et organisationnelles	65
1.4.4. Education, formation et compétences	66
1.4.5. Prise en compte de la question internationale	67
2. PERSPECTIVES SUR LA CHIMIE DU VÉGÉTAL	69
2.1. Introduction	69
2.1.1. Objectifs proposés	69
2.1.2. Méthodologie proposée	70
2.2. La chimie du végétal	70
2.2.1. Le principe de la chimie du végétal.....	70
2.2.2. Les modèles de la chimie du végétal.....	72
2.2.2.1. L'oléochimie	73
2.2.2.2. La chimie du sucre	74
2.2.2.3. L'approche mécanique.....	75
2.2.2.4. La thermochimie.....	75
2.2.2.5. Les systèmes complexes.....	76
2.2.2.6. La valorisation de la lignine	76
2.3. La réalité industrielle actuelle	77
2.3.1. L'oléochimie	77
2.3.2. L'approche mécanique.....	77
2.3.3. La chimie du sucre	78

2.3.4. La valorisation de la lignine	80
2.4. Perspectives d'évolutions économiques et technologiques	81
2.4.1. La chimie du sucre	81
2.4.1.1. Les perspectives économiques de la chimie du sucre	81
2.4.1.2. Le prix des matières premières.....	82
2.4.1.3. L'amélioration des rendements et de la productivité.....	84
2.4.1.4. Les recherches actuelles	85
2.4.2. Les opportunités et les risques de la voie thermochimique.....	87
2.4.3. Les systèmes complexes, utopie ou réalité ?.....	89
2.4.4. La valorisation de la lignine	92
2.5. La problématique de la disponibilité des ressources	93
2.6 Le modèle économique	101
2.7. Conclusions et recommandations.....	104
3. LES PETITES ET MOYENNES ENTREPRISES DE LA CHIMIE	107
3.1. Introduction et objectif de ce document	107
3.2. Enjeux liés aux PME	107
3.3. Rappels sur l'Industrie chimique et les PME.....	108
3.3.1. Caractéristiques de l'industrie chimique.....	108
3.3.2. Mise au point de notre échantillon de sociétés.....	116
3.3.3. Définition des PME utilisée	118
3.4. Importance économique des PME.....	119
3.4.1. Vision statique : poids des PME dans la VA et l'emploi.....	119
3.4.2. Vision dynamique : croissance du secteur	122
3.5. Conclusions sur les facteurs de croissance des PME et pistes de politiques publiques	131
3.5.1. Conclusions	131
3.5.2. Développement des sources de financement.....	131
3.5.3. Réduction du BFR.....	132
3.5.4. Formations à la finance pour bénéficier des aides publiques.....	132
3.5.5. Encouragement au développement des partenariats avec d'autres entreprises.....	132
3.5.6. Aide à l'export	132
3.5.7. Valorisation des produits des PME	132
3.5.8. Incitation à une stratégie commerciale plus agressive	132
3.5.9. Politiques générales de soutien aux PME.....	133

Parus

Diffusion des nouvelles technologies de l'énergie (NTE) dans le bâtiment

Étude de la chaîne de valeur dans l'industrie aéronautique

La logistique en France : indicateurs territoriaux

Logistique mutualisée : la filière « fruits et légumes » du Marché d'Intérêt National de Rungis

Logistique et distribution urbaine

Logistique : compétences à développer dans les relations « donneur d'ordre - prestataire »

L'impact des technologies de l'information sur la logistique

Dimension économique et industrielle des cartes à puces

Le commerce du futur

Mutations économiques pour les industries de la santé

Réflexions prospectives autour des biomarqueurs

À paraître

Mutations économiques dans le secteur automobile : démarche méthodologique et synthèse

Mutations économiques dans le secteur automobile : contexte économique mondial

Mutations économiques dans le secteur automobile : technologies et prestations produit

Mutations économiques dans le secteur automobile : régulations UE et nationale

Mutations économiques dans le secteur automobile : régulation locale

Mutations économiques dans le secteur automobile : demande de transport et valeurs

Mutations économiques dans le secteur automobile : compétitivité et stratégie des acteurs

Aéronautique : Base des connaissances sur les acteurs de maintenance et réparation (MRO)
et leur évolution

Le pôle interministériel de prospective et d'anticipation des mutations économiques (PIPAME) a lancé une étude prospective sur les mutations économiques dans le domaine de la chimie. Cette étude, confiée au cabinet A.T.Kearney, a été pilotée par un groupe de travail interministériel associant des experts de l'administration, de l'Union des industries chimiques (UIC), des entreprises du secteur de la chimie et des représentants de l'enseignement supérieur de la chimie.

Les analyses menées mettent en évidence le potentiel d'une chimie durable en France et les pistes qu'il faut suivre pour capter ce potentiel : améliorer la durée intrinsèque de l'industrie chimique, utiliser tous les leviers pour faire face à la rareté de la ressource, intégrer la chimie dans des filières d'avenir.

Ces transformations impliquent des évolutions significatives, qu'il faut préparer dès maintenant, en termes de recherche, de compétences, de réglementation, de gouvernance, de politique internationale et d'accompagnement des PME.

Le présent document présente une synthèse de l'étude remise au PIPAME et la base de connaissances de la chimie durable. Sont plus particulièrement approfondis les thèmes liés à la chimie du végétal et à l'activité économique des petites et moyennes entreprises du secteur de la chimie.