

Polymères et développement durable

Intégration des questions environnementales dans la recherche et l'enseignement

Valérie Massardier-Nageotte et Vincent Verney

Résumé Légers, recyclables, faiblement consommateurs de ressources naturelles, les polymères ont de nombreux atouts vis-à-vis de notre environnement. On note des évolutions importantes ces dernières années, notamment dans le domaine de la valorisation des polymères végétaux, et au moins 15 % de la recherche mondiale sur les polymères sont en rapport avec l'environnement. Pour intégrer les exigences vis-à-vis de l'environnement, il semble que la recherche doit être menée sur la base d'une approche globale associant la synthèse et la formulation de polymères, les procédés de mise en œuvre et d'élaboration, ainsi que l'analyse de leur comportement. De façon similaire aux programmes de recherche, les formations en chimie et matériaux sont de plus en plus marquées par la problématique du développement durable.

Mots-clés Polymères, environnement, cycle de vie, recherche, enseignement.

Abstract **Polymers and sustainable development: integration of environmental questions in research and training courses**

As they are easy to recycle and consume little natural resources, polymers have been considered as environmentally friendly for a long time. Significant evolutions have been observed, in the field of polymers from biomass for example, and at least 15% of world research on polymers are connected with environmental questions. To address these questions, it seems that multidisciplinary research has to be carried out considering the synthesis, formulation, processing and the characterization of polymers. Similarly, training in chemistry and materials is more and more concerned by sustainable development.

Keywords Polymers, environment, life cycle analysis, research, education.

L'ONU définit le développement durable comme « la capacité des générations présentes à satisfaire leurs besoins, sans compromettre l'aptitude des générations futures à satisfaire leurs propres besoins ». Le développement durable fait désormais partie des enjeux de notre planète. C'est un vaste programme si l'on prend conscience des aspects économiques, sociaux, environnementaux... En matière d'environnement, on est amené à conduire des actions que l'on peut regrouper en trois grandes catégories, correspondant à la philosophie de l'éco-conception :

- minimisation des prélèvements sur les ressources naturelles (y compris énergétiques, en particulier fossiles),
- minimisation des impacts sur l'écosphère,
- maximalisation du réemploi et du recyclage.

Les façons d'y contribuer sont nombreuses et peuvent être très variables selon les structures qui doivent y répondre. Cet article montre comment les polymères contribuent au développement durable, en intégrant également ces questions environnementales dans la recherche et l'enseignement.

Dans le secteur des matériaux, les polymères présentent de nombreux avantages vis-à-vis de l'environnement : consommation modérée des ressources de la planète (pétrole en particulier), faible poids, recyclabilité. Leur production et leurs champs d'application sont en accroissement régulier,

ce qui peut avoir pour conséquence de générer un flux croissant de déchets en fin de vie [1].

Ainsi, leur faible densité en fait des constituants de choix dans les secteurs automobile et aéronautique où ils permettent des gains de consommation en carburant non négligeables.

La matière première correspondant à leur élaboration ne représente que quelques % du pétrole consommé dans nos pays développés et l'on a de plus en plus recours à des biopolymères élaborés à partir du règne végétal.

L'énergie nécessaire à leur transformation (et polymérisation dans le cas des thermodurcissables) est aussi bien moindre que celle requise par les métaux, le verre, les céramiques. Ils sont de plus en plus collectés, triés et recyclés.

L'intégration de plus en plus marquée des paramètres « choix des matières premières, gain de poids, énergie, recyclage » dans les programmes de recherche permet de les rendre encore plus performants. Ils sont utilisés en tant que matériaux, c'est-à-dire qu'ils subissent une chaîne d'étapes de transformation pour arriver à la forme finale d'un objet ou d'une pièce dotée des propriétés requises.

C'est pourquoi, dans une approche durable, il est important de considérer de façon globale la chaîne synthèse-procédé-usage, tant sur le plan de la recherche que de l'enseignement.



Figure 1 - Les polymères issus de végétaux trouvent une application notamment dans les barquettes alimentaires.

A gauche : contrôle qualité de barquettes en résine issue du végétal produites par l'entreprise Veriplast France (Mont de Marsan). © ADEME 2003/Christian Weiss ; à droite : barquettes alimentaires en PLA produites à partir de farine de maïs, © Cargill Dow (Nature Works®LLC).

Polymères et développement durable

D'après K. Mulder [2], si l'on s'intéresse au cycle de vie des matériaux, les polymères sont bien placés par rapport à des matières plus lourdes telles que verres et aciers, tant pour des usages lors d'une première vie que pour leur recyclage.

En effet, les études sur le cycle de vie des matériaux sont de plus en plus nombreuses et l'analyse du cycle de vie est devenue un outil de référence quand il s'agit de chercher à quantifier l'impact d'un polymère ou d'un procédé sur l'environnement. L'Ademe par exemple, en collaboration avec le cabinet Bio-Ingénierie Service, a publié une étude très complète sur la comparaison des filières de recyclage des grandes classes de matériaux.

Enfin, les analyses du cycle de vie deviennent un outil important de comparaison des polymères synthétiques et naturels par exemple [3]. Ainsi, même s'ils sont bio-renouvelables, que leur cycle de vie est intéressant vis-à-vis des émissions des gaz à effet de serre [4], les polymères naturels sont très souvent obtenus avec l'emploi d'engrais chimiques dont les impacts ne sont pas négligeables...

Ces nouvelles tendances contribuent à favoriser l'éco-conception, dont les objectifs peuvent être l'allègement des matériaux, l'augmentation des rendements, les économies d'énergie lors de l'élaboration, la durabilité, un recyclage facilité grâce à la conception et au choix des matériaux.

Polymères et ressources naturelles

L'industrie des polymères n'utilise qu'un faible pourcentage du pétrole consommé en France. Néanmoins, si l'on cherche à préserver les ressources naturelles non renouvelables telles que le pétrole, un intérêt non négligeable des polymères est qu'ils peuvent être totalement ou partiellement issus du règne végétal.

Les biopolymères

Outre les macromolécules végétales, le règne végétal représente un potentiel pour les domaines de la chimie, de l'énergie et des matériaux renouvelables. C'est pour favoriser l'émergence de produits agricoles non alimentaires, en particulier en soutenant des projets de recherche, que les pouvoirs publics et huit partenaires (Institut Français du Pétrole, Total Fina Elf, Aventis, Limagrain, EDF...) ont créé en 1994 le groupement d'intérêt scientifique AGRICE (agricul-

ture pour la chimie et l'énergie). Les polymères issus de végétaux peuvent être utilisés seuls (sacs sortie de caisse, barquettes alimentaires (voir figure 1), tensioactifs...) ou bien comme renforts (fibres de lin, chanvre, bois...).

Les cultures non alimentaires évitent l'importation annuelle de 600 000 tonnes de pétrole, et dans le domaine des macromolécules, elles peuvent fournir monomères, tensioactifs et polymères naturels...

On peut aussi obtenir directement des biopolymères [5] à partir d'hémicelluloses issues de son de maïs, d'amidon... L'amidon, polymère majeur issu des grandes cultures, est un bon candidat pour la production de matériaux d'emballage ou d'objets biodégradables. Associé à un composé de la paille de blé, il pourrait voir ses applications élargies.

Un autre exemple : le 1,3-propanediol ; ce monomère de base de l'industrie des polymères est utilisé pour la production de polyesters, polyuréthanes... Plusieurs procédés industriels ont étudié sa production par fermentation pour objectif de le produire directement à partir de matière première végétale peu chère (amidon et/ou saccharose).

Pour la synthèse de polyamides, polyesters..., on cherche aussi à produire des acides alpha omega dicarboxyliques par conversion biologique d'esters d'huiles végétales.

Ces dernières années ont vu une véritable évolution quant au passage à l'échelle industrielle de la production de polymères issus de ressources renouvelables. Ainsi, Cargill Dow est-il en train de démarrer une unité industrielle de production (350 000 t/an) d'acide polylactique (PLA) biodégradable de haut poids moléculaire (figure 1) [6]. Les grands groupes chimiques travaillent tous sur ce segment (polyester Ecoflex BASF, poly-ε-caprolactones Solvay...) [4], et certains industriels aval s'y intéressent également (Toyota par exemple, avec une unité pilote de 1 000 t/an).

Dans un marché principalement occupé par des produits d'origine pétrochimique, des tensioactifs comportant une partie d'origine végétale ont connu un développement significatif, correspondant à 60 000 t en 1998. Néanmoins, le développement des tensioactifs d'origine végétale est aujourd'hui freiné en raison d'une faible balance hydrophile/lipophile (HLB). Il serait intéressant d'élargir cette gamme HLB. Malgré ces problèmes, des tensioactifs non ioniques émulsifiants, tels que les polyglycérols et les esters de polyglycérol, trouvent des applications en formulation dans l'industrie cosmétique et agroalimentaire. Ces tensioactifs sont produits à partir du glycérol, un coproduit du procédé

de fabrication du diester, biocarburant produit à partir d'oléagineux pour les moteurs diesel.

On peut aussi produire des matériaux partiellement issus du règne végétal, comme les composites fibres végétales/PP où l'un des intérêts de ces fibres est leur faible coût comparé aux fibres synthétiques [7]. De 1996 à 2003, l'emploi de chanvre, de jute, de sisal ou de lin dans l'automobile en Allemagne est passé de 4 000 à 18 000 t/an. En Europe, les nouveaux matériaux à base de fibres naturelles représentent environ 70 000 t. Outre-Rhin, cela signifie qu'en moyenne 3,5 kg de fibres naturelles sont utilisés par passager automobile, principalement pour des pièces composites moulées à la presse [8].

De façon générale, de plus en plus de polymères naturels et de composites à base de bois sont commercialisés, ce qui, au moins dans certains cas, permet de concilier intérêt économique et réduction des gaz à effet de serre [4].

Polymères et impacts

Impacts sur les compartiments eau et sol

Si l'on s'intéresse aux impacts des polymères sur les milieux naturels (eau, air, sol), on peut *a priori* penser que ceux-ci sont assez limités. En effet, l'industrie des polymères est faiblement consommatrice de pétrole (environ 4 % du pétrole consommé) pour l'élaboration de pièces souvent plus légères que leurs homologues réalisées à partir d'autres matériaux. D'autre part, si l'on compare les « impacts environnementaux globaux » des emballages de boisson en polyéthylène (PE), verre ou aluminium, il apparaît que le PE est l'emballage le plus écologique [9].

Ces premières approches sont confirmées par quelques études visant à évaluer les impacts des polymères sur l'environnement.

En ce qui concerne les impacts sur l'eau, il existe quelques études montrant que les impacts des polymères sur l'eau sont faibles. Ce sont essentiellement les stabilisants [10-11] et les molécules de faibles masses molaires qui diffusent dans l'eau [12].

Une autre étude a montré que, bien qu'ils génèrent une pollution visuelle, les plastiques ne contaminent pratiquement pas l'eau de mer [13], mais qu'ils peuvent perturber la vie aquatique.

Pour ce qui est des sols, ce sont également les stabilisants (du PVC par exemple) qui ont tendance à diffuser.

Impacts sur le compartiment air

Pour ce qui est des impacts sur l'air, de nombreux travaux ont également été réalisés. Si l'on se réfère aux travaux de Patel [14], les émissions de composés organiques volatils des procédés de polymérisation sont inférieures aux valeurs limites tolérées concernant les thermoplastiques. Pour des thermoplastiques tels que PVC, nylon 6, acrylonitrile-butadiène-styrène, polystyrène choc, PE haute et basse densité, Forrest trouve que les procédés d'extrusion rejettent davantage de volatils que ceux par injection moulage [15].

Les procédés d'élaboration de thermodurcissables sont à l'origine de rejets de solvants réactifs, tels que le styrène présent dans les formulations à base de polyesters insaturés des « sheet molding compounds » (SMC) ou « bulk molding compounds » (BMC). Une solution est de réduire la teneur en solvant. Ainsi, abaisser la teneur en styrène de 42 à 36 % dans une formulation peut entraîner une diminution de 60 à 70 % des émissions gazeuses de ce solvant réactif [15].

Cette question reste néanmoins importante pour les acteurs R & D du secteur, du fait de la sévérisation croissante des normes.

En ce qui concerne la fin de vie des objets en matériaux polymères, les impacts sur l'air sont décroissants dans l'ordre incinération, dépolymérisation, recyclage matière, réutilisation [15].

Polymères et recyclage

C'est grâce à leurs nombreuses qualités que les matières plastiques se sont répandues rapidement dans tous les secteurs de l'industrie. Aussi, les gisements de matières plastiques usagées sont-ils très disséminés, formés de pièces de masses et de compositions très variables. Compte tenu de la diversité des matériaux, il n'y a pas de traitement universel, et plusieurs voies de valorisation peuvent être envisagées. Actuellement, entre 5 et 25 % des polymères sont recyclés [16], mais compte tenu des directives européennes, en particulier pour les véhicules hors d'usage (VHU), ce pourcentage devrait rapidement augmenter.

Il existe différents types de valorisation, et comme mentionné précédemment, c'est la valorisation matière qui génère le moins d'impacts négatifs sur l'environnement.

Valorisation matière

• Chutes de production

Ce mode de valorisation est couramment appliqué aux déchets industriels thermoplastiques non souillés et non mélangés ; c'est alors une voie couramment pratiquée et souvent économiquement viable.

Par contre, dans le cas des thermodurcissables, les déchets industriels non souillés posent un problème différent du fait de leur « non réversibilité ». L'expérience pilote menée en Rhône-Alpes, initiée par l'Agence Rhône-Alpes pour la Maîtrise des Matériaux (ARAMM) et le Centre de ressources Compositec (projet RECYCOMP), a dégagé des voies de progrès particulièrement intéressantes. Au plan européen, le regroupement des industriels de la filière (ECRC) est particulièrement actif.



Figure 2 - Cosmétique et éco-conception.

Cette année, la mention spéciale de l'ADEME a récompensé Yves Rocher pour sa gamme Inositol dont la démarche d'éco-conception concerne tant le produit lui-même (choix des matériaux, des assemblages) que le développement d'une éco-recharge (permettant de réduire de 80 % les déchets) et une information à destination des consommateurs adaptée pour permettre à chacun de contribuer à la diminution de nos impacts (<http://www.ademe.fr/htdocs/publications/lettre/110/actus.htm>).

Pour les produits en fin de vie, on trouve des exemples de polymères recyclés en mélange [17-18], mais souvent pour fabriquer des pièces massives. En effet, les polymères conduisent rarement à des mélanges miscibles, et un mélange de polymères non miscibles pour lequel on n'aura pas mené d'étude préalable sur le couple « formulation-mise en œuvre » a de fortes chances de conduire à des matériaux présentant de mauvaises propriétés mécaniques. De plus, se pose le problème de la constance du contenu et de la qualité de ces mélanges.

Notons aussi que, d'une façon générale, les problèmes (dégradations des chaînes, pollutions...) qui se posent pour les « n vies » des polymères recyclés semblent souvent mal anticipés, bien que certains scientifiques étudient le vieillissement UV et des formulations pour améliorer la durabilité. Pour pallier aux problèmes de dégradation des chaînes de polymères recyclés, le « remède » est généralement la dilution dans de la matière vierge et, dans le contexte industriel, on ne cherche quasiment jamais à « restaurer » les chaînes.

• Produits en fin de vie

Le traitement des produits en fin de vie est une question majeure du fait de l'évolution des normes européennes (cf. véhicules hors d'usage (VHU)), des déchets d'équipements électriques et électroniques (D3E)..., et de sa complexité.

La solution dépollution puis tout broyage avec tris magnétique et densimétrique pose le problème des résidus de broyage automobile (RBA), mélange complexe et fluctuant, actuellement mis en décharge ou traités comme déchets industriels spéciaux (DIS). Or ces RBA représentent plus de 10 % du volume et la baisse de ce pourcentage est indispensable si l'on veut atteindre les exigences des normes dépollution à 5 et 10 ans. La solution démontage partiel puis broyage offre une autre alternative, permettant en particulier un retour vers l'éco-conception.

Ces deux filières font l'objet de dossiers importants de R & D qui prennent en compte à la fois les augmentations de process et l'optimisation des coûts.

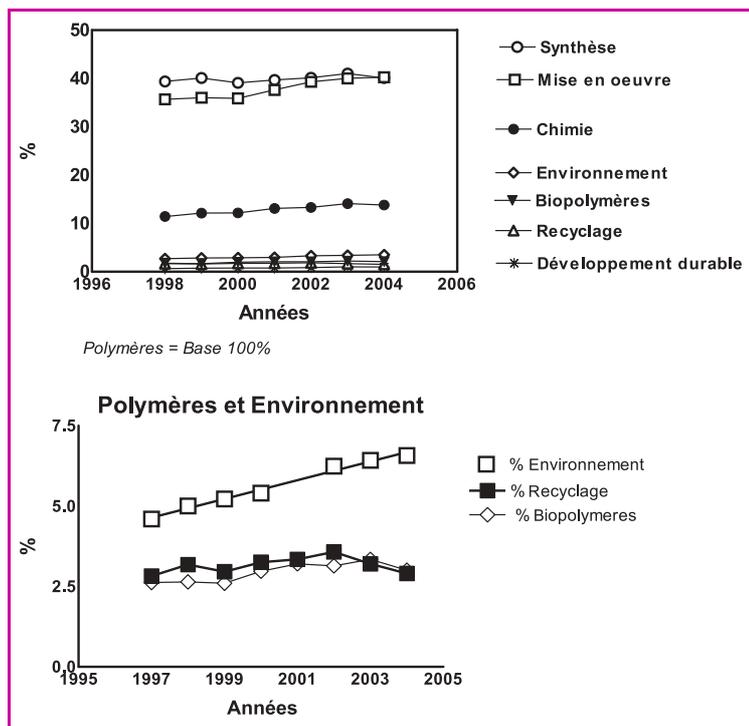


Figure 3.

Recyclage chimique

Certains polymères, comme les polyesters (PET...), les polyamides et le PMMA, peuvent être « dépolymérisés » par réaction inverse de celle de leur synthèse pour redonner les monomères de départ, qui sont les maillons élémentaires des chaînes macromoléculaires [19]. Certains procédés de dépolymérisation ont conduit au dépôt de brevets (Eastmann, Kodak...).

Mais ces méthodes ne s'appliquent pas à la grande majorité des polymères industriels courants qui devront subir des opérations plus brutales (pyrolyse...) pour donner des molécules facilement réutilisables. Le craquage thermique (pyrolyse) des matières plastiques mélangées permet d'obtenir un « pseudo pétrole » utilisable en raffinerie ou en pétrochimie. La gazéification, qui est une oxydation partielle à haute température, donne du « gaz de synthèse » utilisable en haut-fourneau pour l'élaboration de la fonte, ou en chimie pour la production de méthanol par exemple. Dans le cas particulier du PVC, les procédés en développement intègrent le recyclage du chlore dans la chaîne de production du chlorure de vinyl monomère.

Ces procédés se développent surtout en Allemagne, où ils sont largement financés par les conditionneurs et les consommateurs grâce à la redevance « Point vert ». Ils sont en général plus coûteux que le recyclage matière, mais disposent de débouchés importants en volume.

Valorisation énergétique

Les matériaux plastiques sont généralement issus du pétrole et à ce titre sont de bons combustibles. La valorisation énergétique est la méthode de choix pour les plastiques très souillés (par exemple, le pot de yaourt dans les déchets ménagers). Le fort pouvoir calorifique des plastiques permet de régulariser l'incinération des déchets ménagers, d'améliorer la qualité des effluents (moins de micropolluants et d'imbrûlés dans les mâchefers), et d'économiser une partie des 36 % du pétrole utilisé pour produire de la chaleur et de l'électricité. La plupart des grandes villes européennes sont équipées de réseaux de chauffage urbain fonctionnant en partie grâce à l'incinération des déchets municipaux.

Outre les collectivités locales, les cimenteries utilisent des combustibles de substitution correspondant à des fractions de déchets où la phase organique est suffisamment riche en pouvoir calorifique. C'est ainsi que les cimenteries ont agréé l'utilisation de composites therm durcissables (fibres de verre, par ailleurs porteuses de matières premières cimentières (charges, fibres)).

Polymères, développement durable et recherche ?

Il est certain que les innovations en recherche et développement ont des impacts sur la fabrication, le transport, l'utilisation et la post-utilisation des biens de consommation. Aussi, pour certains groupes industriels, les activités en R & D sont des indicateurs de la volonté de l'entreprise à intégrer le développement durable [20].

Quid du thème scientifique environnement ?

Pour quantifier l'importance scientifique de l'aspect environnement, nous avons interrogé la base de données bibliographique « Chemical Abstracts » sur la période 1997-2004. La figure 3 présente les résultats obtenus en

associant les mots-clés « synthesis, process, chemistry, biopolymers, recycling, sustainable development... » au mot-clé générique « polymères ». Sur cette période, le mot « environnement » n'est un mot-clé que dans 5 à 7 % du nombre total de publications consacrées aux polymères. Aucun des sous-thèmes choisis ne se distingue par une augmentation significative dans sa contribution au thème « polymère ».

Un zoom de la composante « environnement » de cette analyse bibliographique montre une égalité en nombre entre les publications traitant du recyclage (recycling) et celles consacrées aux biopolymères (biopolymers).

Néanmoins, ce type de comparaison est fortement influencé par les mots-clés choisis et il apparaît que la tendance vers davantage de thèmes de recherche en lien avec l'environnement et le développement durable s'accroît sur ces dernières années.

Alors qu'il y a quelques années, les appels d'offres concernaient des domaines bien précisés, ils replacent de plus en plus la science des polymères dans un contexte global et font appel à des compétences pluridisciplinaires. En ce qui concerne l'environnement, on trouve des projets associant polyméristes, mécaniciens, toxicologues... Les partenaires doivent apporter des réponses complémentaires non seulement sur les performances des nouveaux matériaux, mais aussi sur les impacts de leur mise en œuvre, de leur utilisation... sur la santé des opérateurs et utilisateurs.

Certains projets étudient différents volets du cycle de vie des matériaux polymères : chimie, mise en œuvre, performances et applications, recyclage...

En effet, pour répondre aux exigences environnementales, il semble que la recherche doit être menée sur la base d'une approche globale intégrant la synthèse et la formulation des polymères, les procédés de mise en œuvre et d'élaboration, ainsi que l'analyse du comportement (propriétés mécaniques, de transport/diffusion, évolutions bio-physico-chimiques, etc.). La conception d'un polymère, et plus précisément d'un objet intégrant un ou des polymères, implique donc la prise en compte du « cycle de vie » de celui (ou de ceux)-ci. Ainsi, les critères suivants peuvent-ils être intégrés :

- choix et synthèse de monomères, oligomères ou polymères ;
- choix des procédés de synthèse, de mise en œuvre et d'élaboration ;
- comportement du matériau (propriétés) ;
- durabilité (vieillesse, etc.) ;
- devenir du matériau (recyclabilité, etc.).

Plus précisément, on peut citer différents exemples d'axes de recherche visant à réduire les impacts négatifs des matériaux :

Formulations et procédés respectueux de l'environnement

Dans ce cadre, on peut s'intéresser à la conception de matériaux respectueux de l'environnement lors de leur élaboration (procédés propres). Ceci implique le développement de synthèses, formulations pour procédés propres, en particulier sans émission de composés organiques volatils (COV), avec des formulations sans solvant (revêtements UV, poudres...), des formulations de revêtements base aqueuse...

Au niveau des procédés, on peut développer des techniques en moule fermé, permettant de réduire fortement les émissions de monomère (styrène...).

On peut aussi mettre au point des formulations pour procédés d'élaboration faiblement consommateurs d'énergie

tels que le séchage réactif de revêtements par infrarouges, la polymérisation sous micro-ondes, ou développer des formulations pour procédés de polymérisation par irradiation. Certaines formulations ont pour objectif de réduire la masse des matériaux [2].

Par exemple, les composites polymères-nanotubes de carbone permettent d'obtenir des composites de faible densité avec d'excellentes propriétés multifonctionnelles (mécaniques, électriques, thermiques...) qui peuvent trouver des applications variées (automobile, aéronautique...), sous réserve de leur innocuité et d'un bilan technico-économique acceptable [21]. Les nanocomposites à base de nanofibres, nanotubes... pourraient aussi permettre le développement de films hautes performances [22].

De façon générale, les polymères multifonctionnels nanostructurés et les matériaux nano-composites font aussi l'objet de très nombreuses recherches. Les applications industrielles attendues sont très diverses : électronique, télécommunications, automobile, industrie spatiale, optique, agriculture...

Il convient aussi de prendre en compte, lors de la conception du produit, le devenir du matériau polymère en pensant au recyclage et à la substitution de certains matériaux par d'autres. Par exemple, il semble intéressant de développer des nanocomposites ou vernis pour packaging alimentaire souple (fonctions requises : propriétés mécaniques et barrière aux gaz et arômes) qui peuvent se substituer aux multicouches difficilement recyclables. Dans certaines applications (emballage alimentaire...), les polymères biodégradables semblent *a priori* intéressants. Les formulations trop complexes risquent de poser des problèmes de recyclage...

En résumé, on peut dire que la conception de matériaux polymères doit permettre de répondre aux fonctions demandées en respectant des critères liés à l'environnement dans les phases de synthèse, élaboration et devenir.

Traitement des déchets polymères

Comme nous l'avons dit précédemment, il peut être intéressant de développer des matériaux polymères recyclés sous forme de mélanges. Ceci fait appel à des connaissances de base sur les interactions aux interfaces et la génération de morphologies spécifiques.

Si l'on souhaite avoir une approche « mélanges de polymères », on devra généralement utiliser des compatibilisants afin de valoriser des déchets plastiques sous forme de matériaux présentant des propriétés originales par rapport aux polymères de départ.

On peut aussi étudier les effets de polluants sur les propriétés des polymères recyclés. Dans certains cas, des polluants (huiles...) peuvent avoir un effet bénéfique sur les propriétés des polymères recyclés [23].

Une autre voie est l'intégration de polymères issus des déchets dans d'autres matériaux. Par exemple, on peut modifier des polyoléfines pour les intégrer dans des bitumes. Les composites polyesters de type « sheet molding compounds » (SMC) peuvent être broyés et réintégrés comme charges, soit dans les mêmes types de composites, soit dans des thermoplastiques nobles ou recyclés. Les déchets de polyoléfines peuvent aussi servir à inerte d'autres déchets plus dangereux [24].

Comportement des matériaux polymères dans divers milieux

La connaissance du comportement et plus particulièrement de l'évolution des propriétés (viscoélastiques-

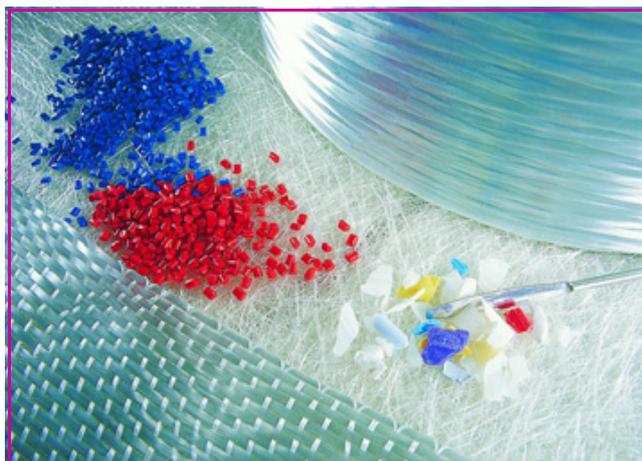


Figure 4 - A l'INSA de Lyon, recherche et enseignement se préoccupent de l'impact des polymères sur l'environnement. © B. Meudic.

mécaniques, transport, électriques-diélectriques, de surface, etc.) au cours du temps dans divers milieux (hydrothermique, biologiquement actifs, etc.) est essentielle pour le développement de matériaux polymères dans des systèmes. Pour cela, il est nécessaire de développer des méthodologies de suivi du vieillissement [25].

Et l'Europe ?

S'il est un lieu d'expression des préoccupations environnementales en matière de recherche, c'est bien de l'Europe de la recherche qu'il faut parler. La communauté européenne attend des résultats de la recherche des éléments et des indications pour faire évoluer les réglementations et législations, en particulier dans le domaine des déchets polymères. Au cours du 5^e PCRD (programme cadre de recherche et développement), à côté des grands programmes environnementaux comme GROWTH ou LIFE qui étaient plutôt réservés à des actions de démonstration (faisabilité), il faut noter une « target research action » (TRA) (cluster 4 du TRA Network group) qui a rendu compte chaque année de ses travaux dans des colloques annuels et remis un rapport final de ses activités à la clôture du 5^e PCRD [26].

Un outil extrêmement intéressant de la conjecture scientifique sur ces problématiques a vu le jour avec les « Eol » (expression of interest) de la phase de prospective du 6^e PCRD [27]. Là encore, une analyse par « mots-clés » montre qu'environ 190 Eol ont été exprimées sur le grand thème générique « polymers ou plastics ». Sur ces 190 Eol, on peut en dénombrier 57 en relation directe avec la thématique développement durable dont 13 « NE » (network of excellence) et 44 « IP » (integrated projects). Un point très remarquable est la très forte représentation (environ 60 %) du thème « bio » (biopolymères, biodégradables...) dans ces réponses.

Bien sûr, il faut se garder de conclusions hâtives car il est vrai que l'Europe a fléchi vers le haut ces thèmes dans la définition du 6^e PCRD et de ses programmes ! Il sera intéressant de voir combien de ces Eol se transformeront réellement en projets lors des différents appels d'offre du 6^e PCRD !

Polymères, enseignement et développement durable

Pour progresser en matière d'environnement, il est certain que chaque métier doit être impliqué, mais ce sont certainement les avancées technologiques et scientifiques qui apporteront les clés permettant de progresser en matière d'environnement. Dans la charte du CNISF (Conseil national des ingénieurs et scientifiques de France), il est clairement écrit que « l'ingénieur a conscience et fait prendre conscience de l'impact des réalisations techniques sur l'environnement. L'ingénieur inscrit ses actes dans une démarche de « développement durable ». »

Par rapport à ces questions, les politiques de formation dans le domaine de la chimie et des matériaux sont assez variables. Il semble cependant que les problèmes liés à l'environnement soient toujours traités dans les cursus « chimie », « génie chimique » et « matériaux ». Les quelques exemples ci-après donnent une idée de ce qui peut être entrepris pour intégrer le développement durable dans ces cursus.

A l'INSA de Lyon, la recherche et l'enseignement liés aux impacts environnementaux des polymères se font au sein du département « Science et génie des matériaux ». Les élèves reçoivent une formation généraliste, dans le domaine des sciences de l'ingénieur mais aussi des sciences humaines. Celle-ci a pour but de les préparer à la complexité des problèmes qu'ils auront à résoudre, dont ceux liés au développement durable.

La formation aux problèmes d'environnement commence dès les travaux pratiques qui permettent de faire acquérir des comportements plus responsables vis-à-vis de l'environnement. En particulier, on peut s'attacher à minimiser les quantités d'échantillons à préparer, rationaliser l'utilisation des appareils (bains chauffants, appareils d'analyse...), traiter les déchets méthodiquement...

Les séances de travaux pratiques sont aussi des moments très favorables pour discuter des différents types d'élaboration et de procédés étudiés en fonction de leurs impacts environnementaux. A une problématique donnée correspondent plusieurs réponses possibles et on doit essayer de choisir celles qui ont le moins d'impacts négatifs. A l'occasion des comptes-rendus, les élèves discutent des différents types d'élaboration et de procédés étudiés en fonction de cette notion.

Ces premières approches sont complétées par une formation plus spécifique « Matériaux et environnement » qui intervient en dernière année. Celle-ci comprend l'acquisition de connaissances relatives à la veille réglementaire, aux impacts des activités industrielles, aux filières de traitement des déchets solides, aux analyses de cycle de vie... Des conférences sur de grandes familles de matériaux (polymères, aciers, aluminium...) illustrent de manière concrète comment les différents métiers de l'ingénieur (recherche, études, production...) doivent contribuer à des objectifs de respect de l'environnement et de développement durable. Elles font ressortir les problèmes environnementaux liés aux matériaux et les solutions développées par de grands groupes industriels. L'INSA de Lyon co-organise et accueille le congrès « Engineering education and sustainable development » (EESD 06) du 4 au 6 octobre 2006 [28].

Le département « Matériaux » de l'École polytechnique de l'Université de Nantes propose un cours « Matériaux et environnement », ainsi que des projets liés à l'environnement.

A l'École supérieure de chimie physique électronique de Lyon (ESCPE), les premiers éléments liés au développement durable sont donnés dès la première année du cycle ingénieur. Ils sont complétés par une option de 3^e année « Chimie et procédés appliqués à l'environnement ». Celle-ci a pour objectifs de faire acquérir la capacité d'agir au niveau de l'amélioration et/ou de la modification du procédé, du traitement des déchets et effluents, de l'analyse des polluants, de mettre en place des systèmes de management environnemental.

Les problèmes liés à l'environnement sont également pris en compte dans les séances de travaux pratiques tout au long du cursus.

A Clermont-Ferrand, la thématique « Durabilité et cycle de vie des polymères » est un axe prioritaire du pôle Chimie de l'Université Blaise Pascal soutenu par l'État et la Région Auvergne. L'École nationale supérieure de chimie de Clermont-Ferrand a inclus un module développement durable dans le cursus des étudiants de l'option « Matériaux organiques ». En parallèle de ce module d'enseignement, une journée spécialisée sur le thème « polymères et développement durable », à laquelle participent des industriels et des universitaires, est programmée chaque année. En 2004, le thème de la journée était « Polymères et développement durable – le recyclage des matières plastiques » et en 2005, l'éco-conception. Ces journées consistent en une série de présentations tant d'origine industrielle qu'académique sur ces thèmes à destination des étudiants de 3^e année option « Matériaux organiques ».

De façon plus générale, l'ENSAM de Chambéry réalise des actions très pratiques sur le recyclage de polymères tels que les résidus de broyage automobile (RBA), les déchets d'équipements électriques et électroniques (D3E)..., dispense des cours sur l'éco-conception, les analyses de cycle de vie (ACV)...

Chez nos voisins suisses, l'Institut des Matériaux de l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) dispense un cours sur le cycle de vie des polymères ainsi qu'un cours plus particulièrement axé sur le recyclage.

A Cambridge, dans le département « Génie chimique », il existe un cours intitulé « L'ingénieur et l'environnement » qui traite les aspects réglementation, impacts environnementaux, analyses des cycles de vie, en soulignant que le génie chimique a un impact important sur les ressources naturelles et le développement durable.

Ces quelques exemples non exhaustifs montrent bien que les problèmes environnementaux sont quasiment toujours abordés et permettent de sensibiliser les futurs acteurs du monde de la chimie, du génie chimique et des matériaux.

Conclusion

Faiblement consommateurs de matières premières et d'énergie, légers, recyclables, les polymères sont des matériaux de choix vis-à-vis des enjeux du développement durable. Ils le seront encore davantage demain grâce aux efforts de recherche et à l'intégration des problèmes de développement durable dans les formations d'ingénieurs en particulier. En effet, la recherche s'oriente de plus en plus vers la mise au point de formulations et procédés « propres » (photopolymérisation...) en intégrant le cycle de vie des matériaux (élaboration, usage, recyclage...). Parallèlement, les futurs ingénieurs et chercheurs sont de plus en plus sensibilisés aux problèmes environnementaux au cours de leur formation.

Dans cet article, nous avons eu une vision européenne du développement durable, mais malheureusement, tous les pays n'ont pas les moyens et la volonté de répondre à ses enjeux. Souhaitons que l'Europe soit un « exemple » et un « moteur » pour le développement durable !

Références

- [1] Ulbrich D., Vollmer M., Trends in industrial macromolecular chemistry, *Macromol. Mat. Enging.*, 2002, 287(7), p. 431.
- [2] Mulder K., *Sustainable production and consumption of plastics*, Technological Forecasting and Social Change, 1998, 58, p. 105.
- [3] http://www.chem.uu.nl/nws/www/general/personal/patel_a.htm
- [4] Dornburn V., Faaij A., Patel M., Turkenburg W.C., *Resources, Conservation and Recycling*, 2006, 46, p. 377.
- [5] Kobayashi S., Uyama H., Biomacromolecules and bio-related macromolecules, *Macromol. Chem. Phys.*, 2003, 204, p. 2.
- [6] Drumright R.E., Grüber P.R., Henton D.E., Poly(lactic acid) technology, *Adv. Materials*, 2000, 12(23), p. 1841.
- [7] Mohanty A.K., Misra M., Hinrichsen G., *Macromol. Mater. Eng.*, 2000, 276/277, p. 1.
- [8] Moncel C., *Recyclage Récupération Magazine*, 2005, 15, p. 12.
- [9] Rousseaux P., Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 1993.
- [10] Takashi Y., Yasuhara A., Quantities of bisphenol A leached from plastic waste samples, *Chemosphere*, 1999, 38(11), p. 2569.
- [11] Sakai S., Urano S., Takatsuki H., Leaching behavior of persistent organic pollutants (POPs) in shredder residues, *Chemosphere*, 1998, 37(9-12), p. 2047.
- [12] Camino G., Polishchuk A.Y., Luda M.P., Revellino M., Blancon R., Martinez-Vega J.J., Water ageing of SMC composite materials: a tool for material characterisation, *Polymer Degradation and Stability*, 1998, 61(1), p. 53.
- [13] Xie K.Y., Locke D.C., Habib D., Judge M., Kriss C., Environmental chemical impact of recycled plastic timbers used in the Tiffany Street Pier, South Bronx, New York, *Resources, Conservation and Recycling*, 1997, 21(3), p. 199.
- [14] Patel S.H., Xanthos M., *Advances in Polymer Technology*, 2001, 20(1), p. 22.
- [15] Forrest M.J., Jolly A.M., Holding S.R., Richards S.J., *Ann. Occup. Hyg.*, 1995, 39(1), p. 35.
- [16] *Polymer Recycling*, Series in Polymer Science, J. Scheirs (ed), Wiley, Australie, 2001.
- [17] Massardier V., *C. R. Chimie*, 2002, 5(6-7), p. 507.
- [18] Scaffaro R., Tzankova Dintcheva N., Nocilla M.A., La Mantia F.P., *Polymer Degradation and Stability*, 2005, 90, p. 281.
- [19] Tersac G., Billiau-Loreau M., Durand G., *Polymer*, 2002, 43(1), p. 21.
- [20] 10^e Entretiens européens de la technologie, Technologies pour un développement Durable (DD), Paris La Villette, 20-21 nov. 2001.
- [21] Breuer O., Sundararaj U., *Polymer Composites*, 2004, 25(6), p. 630.
- [22] Friedman M., Walsh G., *Polymer Engineering and Science*, 2002, 42(8), p. 1756.
- [23] Kallel T., Massardier-Nageotte V., Jaziri M., Gérard J.F., Elleuch B., *J. Appl. Polym. Sci.*, 2003, 90(9), p. 2475.
- [24] Massardier V., Moszkowicz P., Taha M., *European Polymer Journal*, 1997, 33(7), p. 1081.
- [25] Grossetête T., Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal, Clermont Ferrand, 2001.
- [26] <http://www.tra-pm.org/>
- [27] http://eoi.cordis.lu/search_form.cfm
- [28] <http://www.insa-lyon.fr/pg/index.php?Rub=93&L=1>



V. Massardier-Nageotte

Valérie Massardier-Nageotte est maître de conférences à l'INSA de Lyon*.

Vincent Verney est chargé de recherche au CNRS à l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand**.



V. Verney

* Laboratoire des matériaux macromoléculaires, INSA Lyon - UMR 5627 CNRS, Bât. J. Verne, 69621 Villeurbanne Cedex. Courriel : valerie.massardier-nageotte@insa-lyon.fr

** Laboratoire de photochimie moléculaire et macromoléculaire, Université Blaise Pascal, UMR 6505 CNRS, Les Cézeaux, 63177 Aubière Cedex. Courriel : vincent.verney@univ-bpclermont.fr