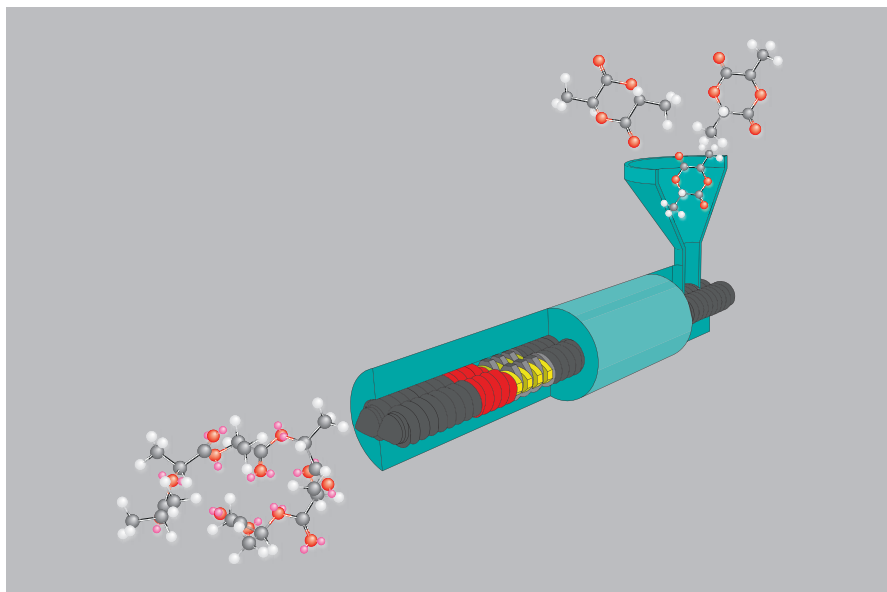


Coordonneurs

Philippe Cassagnau
Véronique Bounor-Legaré

Extrusion réactive

Des aspects fondamentaux
aux développements industriels



Extrusion réactive

**Des aspects fondamentaux
aux développements industriels**

Dans la même collection

Ingénierie de la structure des produits alimentaires (2019)

ALMEIDA G., PANOUILLÉ M., coord.

Composites polymères et fibres lignocellulosiques

Propriétés, transformation et caractérisation (2017)

BERZIN F., coord.

Mécanique des solides indéformables (2014)

BOUZIDI R., LE VAN A., THOMAS J.-C.

Systèmes diphasiques

Éléments fondamentaux et applications industrielles (2014)

WOILLEZ J.

Pour plus d'informations sur nos publications :



newsletters.lavoisier.fr/9782746248717

Philippe Cassagnau,
Véronique Bounor-Legaré
Coordonnateurs

Extrusion réactive

Des aspects fondamentaux
aux développements industriels



Collection
Sciences et ingénierie des matériaux

dirigée par Bruno Vergnes

Directeur de recherches émérite, MINES ParisTech
CEMEF (Sophia Antipolis)

Les conflits d'intérêt sont consultables chez l'éditeur

Direction éditoriale : Jean-Marc Bocabeille
Édition et fabrication : Solène Le Gabellec
Couverture et composition : Nord Compo, Villeneuve d'Ascq
Image de couverture : Frédéric Becquart

© 2020, Lavoisier, Paris
ISBN : 978-2-7462-4871-7

Auteurs

Coordonnateurs

Bounor-Legaré Véronique, Directrice de recherche au CNRS, Laboratoire Ingénierie des Matériaux Polymères (IMP), CNRS, UMR 5223, Université Lyon 1, France.

Cassagnau Philippe, Professeur des Universités, Laboratoire Ingénierie des Matériaux Polymères (IMP), CNRS, UMR 5223, Université Claude-Bernard Lyon 1, Lyon, France.

Collaborateurs

Becquart Frédéric, Maître de conférences, Laboratoire Ingénierie des Matériaux Polymères (IMP), CNRS, UMR 5223, Université Jean-Monnet, Saint-Étienne, France.

Benali Samira, Assistante de recherche, Service des Matériaux Polymères et Composites, Université de Mons, Belgique.

Berzin Françoise, Professeur des Universités, UMR FARE, Université de Reims Champagne Ardenne, Reims, France.

Beyou Emmanuel, Professeur des Universités, Laboratoire Ingénierie des Matériaux Polymères (IMP), CNRS, UMR 5223, Université Lyon 1, France.

Bouilloux Alain, Ingénieur, ARKEMA CERDATO, Serquigny, France.

Chalamet Yvan, Professeur, Laboratoire Ingénierie des Matériaux Polymères (IMP), CNRS, UMR 5223, Université Jean-Monnet, Saint-Étienne, France.

Chaunier Laurent, Ingénieur d'études, Unité BIA, INRA, Centre Angers-Nantes, Nantes, France.

Couenne Françoise, Chargée de recherche CNRS, LAGEPP UMR CNRS 5007, Université Claude-Bernard Lyon 1 (UCBL), Lyon, France.

Covas José, Professeur, Département Polymer Engineering, Université du Minho, Guimarães, Portugal.

Della Valle Guy, Ingénieur de recherche, UR 1268 Biopolymères, Interactions & Assemblages (BIA), INRA, Nantes, France.

Fenouillot-Rimlinger Françoise, Maître de conférences HDR, Laboratoire Ingénierie des Matériaux Polymères (IMP), CNRS, UMR 5223, INSA de Lyon, France.

Flat Jean-Jacques, Ingénieur, ARKEMA CERDATO, Serquigny, France.

Garois Nicolas, Vice-Président Research & Innovation, Hutchinson SA, Chalette-sur-Loisy, France.

Gimenez Jérôme, Directeur scientifique, SETUP Performance, Frontonas, France.

Goujard Laurent, Chef de projet senior, SETUP Performance, Frontonas, France.

Hoppe Sandrine, Chargée de recherche CNRS, Laboratoire Réactions et Génie des Procédés – LRGP UMR CNRS 7274, Nancy, France.

Hu Guo-Hua, Professeur des Universités, Laboratoire Réactions et Génie des Procédés – LRGP UMR CNRS 7274, Université de Lorraine, Nancy, France.

Jallut Christian, Professeur des Universités, Laboratoire d'Automatique, de Génie des procédés et de Génie pharmaceutique, UMR CNRS/UCBL 5007, Université Claude-Bernard Lyon 1 (UCBL), Lyon, France.

Kristiawan Magdalena, Chargée de recherche, Unité Biopolymères Interactions Assemblages (BIA), Institut national de la recherche agronomique (INRA), Centre Angers-Nantes, Nantes, France.

Marchal Philippe, Ingénieur de recherche CNRS, Laboratoire Réactions et Génie des Procédés – LRGP UMR CNRS 7274, Nancy, France.

Martin Grégory, Chef de projet, Hutchinson SA, Chalette-sur-Loisy, France.

Massardier Valérie, Maître de conférences, Laboratoire Ingénierie des Matériaux Polymères (IMP), CNRS, UMR 5223, INSA de Lyon, France.

Mincheva Rosica, Assistante de recherche, Service des Matériaux Polymères et Composites, Université de Mons, Belgique.

Odent Jérémie, Chargé de cours, Service des Matériaux Polymères et Composites, Université de Mons, Belgique.

Raquez Jean-Marie, Chercheur Qualifié FRS-FNRS, Service des Matériaux Polymères et Composites, Université de Mons, Belgique.

Vergnes Bruno, Directeur de Recherche émérite, CEMEF, MINES ParisTech, PSL Research University, Sophia Antipolis, France.

Viot Frédéric, Plastic Omnium, CdP Innovation, Ecodesign Supervisor Intelligent Exterior Systems, Sigmatech, Sainte-Julie, France.

Sommaire

Auteurs	V
Préface	XIII
Avant-propos.....	XV
Abréviations et acronymes	XVII

Chapitre 1 Aspects fondamentaux

1. Chimie des systèmes réactifs (Véronique Bounor-Legaré et Emmanuel Beyou)	1
1.1. Introduction.....	1
1.2. Synthèse <i>in situ</i> d'homopolymères et de copolymères par polymérisation par ouverture de cycle.....	2
1.3. Synthèse et modification chimique de polymères biosourcés.....	7
1.4. Synthèse de copolymères greffés par voie radicalaire.....	9
1.5. Synthèse de copolymères par réaction d'hydrosilylation catalytique de groupements carbonyles.....	13
1.6. Génération de charge <i>in situ</i> en matrice polymère par la voie sol-gel.....	14

1.7. Conclusion	18
2. Diffusion, réaction et mélange dans les milieux polymères fondus (Philippe Cassagnau, Françoise Fenouillot-Rimlinger)	18
2.1. Introduction.....	19
2.2. Fluides miscibles.....	21
2.3. Fluides réactifs non miscibles	29
2.4. Conclusion	31
3. Écoulements et comportement rhéologique. Lois de rhéologie prédictives appliquées à la polymérisation ou à la dépolymérisation en masse (Françoise Berzin, Philippe Cassagnau)	32
3.1. Introduction.....	32
3.2. Les systèmes réactifs.....	33
3.3. Les équations fondamentales de la rhéologie	39
3.4. Rhéocinétique : modélisation	40
3.5. Applications à la polymérisation de l'ε-caprolactone en extrudeuse baxis.....	45
3.6. Conclusion	46
4. Extraction des composés volatils présents dans les polymères (Yvan Chalamet)	47
4.1. Introduction.....	47
4.2. Processus de transfert de matière	48
4.3. Procédés	58
4.4. Conclusions	67

Chapitre 2

Contrôle du procédé : instrumentation et modélisation

1. Instrumentation (José Covas)	75
---------------------------------	----

1.1. Introduction.....	75
1.2. Instrumentation standard d'une extrudeuse.....	76
1.3. Prélèvements le long du fourreau.....	78
1.4. Mesures en ligne.....	80
1.5. Conclusion	89
2. Simulation et modélisation thermomécanique des opérations d'extrusion réactive (Françoise Berzin, Bruno Vergnes)	89
2.1. Introduction.....	90
2.2. Principes et défis de la modélisation des procédés d'extrusion réactive.....	91
2.3. Exemples de modélisations.....	96
2.4. Conclusion	116
3. Modélisation dynamique et commande (Françoise Couenne, Christian Jallut)	117
3.1. Situation du sujet : la problématique de l'automatique continue.....	118
3.2. Modélisation dynamique des procédés d'extrusion.....	119
3.3. Commande des extrudeuses.....	127
3.4. Conclusion	132

Chapitre 3

Applications

1. Transformation de l'amidon (Françoise Berzin, Frédéric Becquart)	143
1.1. Généralités.....	144
1.2. Les différents types de chimie transposables en extrusion réactive de l'amidon.....	148
1.3. Exemples d'applications	152

2. Extrusion réactive des polymères biosourcés (Samira Benali, Rosica Mincheva, Jérémy Odent, Jean-Marie Raquez)	156
2.1. Généralités et aspects critiques.....	156
2.2. (Co)polymérisation par ouverture de cycle.....	157
2.3. Modification et fonctionnalisation réactive.....	160
2.4. La compatibilisation réactive.....	163
2.5. Conclusion	166
3. Développement de matériaux fonctionnels par extrusion réactive (Véronique Bounor-Legaré, Philippe Cassagnau)	166
3.1. Introduction.....	167
3.2. Synthèse <i>in situ</i> de nanocomposites PP/TiO ₂ : propriétés antibactériennes	168
3.3. Synthèse <i>in situ</i> de nanocomposites PA/SiO ₂ fonctionnels : polymères ignifugés.....	171
3.4. Synthèse <i>in situ</i> de nanocomposites PVDF/SiO ₂ : conductivité protonique..	174
3.5. Matériaux hybrides organiques-inorganiques : propriétés mécaniques.....	176
3.6. Conclusion	178
4. Compatibilisation réactive des mélanges de polymères (Guo-Hua Hu, Sandrine Hoppe, Philippe Marchal)	179
4.1. Compatibilisation des mélanges de polymères immiscibles	179
4.2. Compatibilisation réactive des mélanges de polymères immiscibles	180
4.3. Développement de la morphologie de mélanges de polymères réactifs dans une extrudeuse baxis.....	187
4.4. Mélange réactif en une étape ou en deux étapes.....	190
5. Texturation de matières premières protéiques végétales par cuisson-extrusion (Magdalena Kristiawan, Laurent Chaunier, Guy Della Valle)	193
5.1. Contexte : la transition protéique	193

5.2. La réactivité des protéines végétales.....	194
5.3. Modifications des protéines et des protéagineux par (cuisson)-extrusion	197
5.4. Apports de la modélisation et de la rhéométrie au développement des applications	202
5.5. Conclusion : vers le développement d'aliments enrichis en protéines végétales	207

Chapitre 4

Développements industriels

1. Polyoléfines fonctionnelles (Alain Bouilloux, Jean-Jacques Flat)	217
1.1. Introduction.....	217
1.2. Liants de coextrusion et extrusion-couchage	218
1.3. Application des polyoléfines fonctionnalisées dans la modification au choc des polyesters thermoplastiques et dans les mélanges PET/PE recyclés	225
1.4. Les polyoléfines fonctionnelles comme agents de couplage dans les composites renforcés de fibres naturelles.....	230
2. Les thermoplastiques vulcanisés (Philippe Cassagnau, Grégory Martin, Nicolas Garois)	235
2.1. Introduction.....	235
2.2. Mise œuvre des TPV : morphologie.....	237
2.3. Mise en œuvre des TPV : procédés.....	239
2.4. Conclusion	241
3. Polycondensation par extrusion réactive : synthèse de polyamides (Jérôme Gimenez, Laurent Goujard)	242
3.1. Introduction.....	242
3.2. Des monomères aux polymères : trois contraintes techniques pour un procédé continu stable.....	244
3.3. Les principes de la polycondensation par extrusion réactive.....	245

3.4. Design du procédé en fonction du système de monomères.....	246
3.5. Configuration permettant la production de polyamide AB.....	247
3.6. Configuration permettant la production de polyamide A_2B_2	248
3.7. Les avantages de l'extrusion réactive par rapport au réacteur batch.....	250
4. Recyclage des polymères thermoplastiques. Exemple de recyclage industriel de polyoléfines et perspectives (Valérie Massardier, Philippe Cassagnau, Frédéric Viot)	251
4.1. Introduction.....	251
4.2. La filière automobile en fin de vie	252
4.3. Recyclage isofonction de boucliers : le cahier des charges.....	253
4.4. Formulation par extrusion réactive	255
4.5. Perspectives de « recyclage universel » à l'aide de réactions radicalaires.....	258
4.6. Conclusion	259
Index.....	263

Préface

Quelle peut être la meilleure approche d'association des mondes de l'ingénieur et du chimiste si ce n'est l'extrusion réactive ? Combiner l'outil de mise en œuvre de l'ingénieur que représente l'extrudeuse au réacteur du chimiste de synthèse représente sans nul doute l'une des innovations les plus marquantes de ces dernières décennies en science et ingénierie des matériaux polymères et (nano)composites. Le présent ouvrage, initié par Bruno Vergnes et proposé par Philippe Cassagnau et Véronique Bounor-Legaré, met clairement en lumière l'intérêt de cette nouvelle technologie, aussi bien au niveau de ses aspects fondamentaux que de la variété de ses applications actuelles et à venir.

L'extrusion réactive est actuellement considérée comme une des technologies les plus attractives, conduisant à la production d'un vaste panorama de matériaux organiques ou nanocomposites présentant des propriétés innovantes. La viabilité industrielle de l'extrusion réactive repose sur son potentiel remarquable en mélange à l'état fondu et compatibilisation interfaciale, ses capacités de parfaire l'homogénéisation, la distribution et la dispersion de (nano)charges en matrices polymères thermoplastiques ou élastomères (préalablement à leur réticulation), mais aussi et surtout la versatilité des réactions chimiques pouvant y être réalisées. Parmi ces dernières, citons une large panoplie de réactions de polymérisation procédant par exemple par voie radicalaire, par polycondensation ou encore par ouverture de cycle catalysée, des réactions de greffage, de branchement, de couplage ou de fonctionnalisation chimique. Contrôler le processus d'extrusion réactive requiert l'optimisation : i) des paramètres de l'extrudeuse, fréquemment du type baxis corotatives ou contrarotatives, c'est-à-dire le profil des vis, le choix des conditions d'extrusion, en ce inclus la température, la pression, le temps de résidence, le tout en adéquation avec la viscosité de la matière fondue, ii) mais aussi le mode et la chronologie d'introduction/injection des agents réactifs, qu'ils soient solides, liquides ou encore gazeux, aux points les plus adaptés dans la séquence du processus réactionnel.

Face aux problématiques de développement durable, l'extrusion réactive constitue une technique d'avenir à même de remplacer nombre de modes de synthèse traditionnellement conduite en réacteur, continu ou discontinu, et nécessitant des durées de réaction longues et onéreuses. Ainsi, en extrusion réactive, les polymérisations

et/ou modifications chimiques sont réalisées en masse, en l'absence de solvants, *via* des processus réactionnels rapides et continus ; le temps de séjour dans l'extrudeuse est de l'ordre de quelques minutes. Le plus souvent, aucun sous-produit n'est à extraire du matériau sortant de la filière d'extrusion mais, au besoin, la dévolatilisation s'avère efficace pour l'élimination continue et contrôlée de sous-produits réactionnels tels les monomères résiduels ou encore la vapeur d'eau de condensation. Un intérêt supplémentaire repose sur le caractère modulaire de l'extrusion réactive, ouvrant la voie à la conception de formulations hautement complexes. Citons la compatibilisation (réactive) des mélanges polymères (nano)additivés ou non, la production de matériaux thermoplastiques vulcanisés, la nanostructuration/texturation de polymères, non seulement par dispersion de nanoparticules mais également par leur organisation spatiale à l'échelle nanométrique, le recyclage par dépolymérisation catalysée et contrôlée visant la revalorisation des produits ainsi collectés en mode continu, ou encore le recours à l'extrusion réactive sous conditions supercritiques, par exemple sous CO₂ supercritique, pour la production de (nano)mousses à haute performance. Toujours en lien avec les préoccupations environnementales légitimes du moment, l'extrusion réactive est aussi de plus en plus exploitée en conception de matériaux d'origine naturelle « biosourcée ». Citons les différentes approches de transformation de l'amidon, la production et la fonctionnalisation chimique de polyesters, polyamides et autres polyuréthanes au départ de matières premières d'origine végétale renouvelable.

Nous devons être reconnaissants aux auteurs de cet ouvrage. Ils nous font voyager tout au long des chapitres à la découverte des multiples facettes de l'extrusion réactive : des aspects fondamentaux alliant comportements rhéologiques, concepts diffusionnels en milieu polymère fondu et chimie des systèmes réactifs, à l'instrumentation et la modélisation de l'outil d'extrusion sans oublier les nombreuses applications ainsi offertes. Ces dernières sont remarquablement illustrées et s'échelonnent entre recherche à l'échelle laboratoire et développements industriels effectifs. Il est fort à parier que cet ouvrage soulèvera la curiosité de nombreux ingénieurs et scientifiques et sera à la source de nombreuses innovations, tant en matière d'ingénierie et de design en extrusion (réactive) que de conception et production de nouveaux matériaux combinant chimie organique, catalyse, chimie macromoléculaire et inorganique, et science des matériaux.

Professeur Philippe DUBOIS

Université de Mons – UMONS, Belgique

Membre de l'Académie royale de Belgique (classe des Sciences)

Avant-propos

Le procédé d'extrusion est extrêmement utilisé dans le monde industriel. Il est en fait utilisé depuis Archimède et sa découverte de la vis sans fin pour le transport de l'eau. Il a été développé au cours de la première moitié du siècle dernier dans la production des produits agro-alimentaires (pâtes, biscuits apéritifs, saucisses, surimi, etc.). Avec l'essor des matériaux polymères, ce procédé s'est donc naturellement imposé comme un procédé incontournable pour la mise en œuvre des formulations polymères, avec en particulier un développement de la technologie double vis (corotatives ou contrarotatives interpénétrées). Les années 1980 ont vu un changement de paradigme avec les premiers travaux de recherche portant sur la modification chimique des polymères à l'état fondu : l'extrusion réactive était née et allait faire l'objet de nombreux travaux académiques, associés bien souvent à des réussites industrielles. En France, deux chercheurs ont été pionniers et visionnaires dans le développement du procédé d'extrusion réactive : Alain Michel, Directeur de recherche au CNRS à Lyon et Morand Lambla, Professeur à l'Université de Strasbourg. Nous tenons à saluer la mémoire de Morand Lambla, malheureusement trop tôt disparu. Il fut le cofondateur en 1985 de la *Polymer Processing Society* dont le congrès annuel regroupe généralement près de huit cents participants issus des mondes académique et industriel. Nous remercions vivement Alain Michel qui a tout au long de sa carrière scientifique rassemblé et dynamisé une communauté interdisciplinaire aussi bien académique qu'industrielle autour de la thématique « extrusion réactive ». Il nous a insufflé et transmis sa passion, sa vision de la recherche et donné les moyens de mener une recherche originale au début de nos carrières respectives. Désormais à la retraite, il exerce sa deuxième passion de toujours qui est l'élevage de bovins en pleine campagne de son Allier natal. Nous lui dédions cet ouvrage en témoignage de notre reconnaissance et nous espérons avoir su valoriser et faire fructifier son héritage. Plusieurs auteurs ont contribué à la rédaction des quatre chapitres constituant ce livre, nous n'en citerons aucun en particulier, mais nous les remercions tous pour la qualité de leur contribution et leur investissement dans ce domaine de recherche. Nous sommes reconnaissants à Philippe Dubois, professeur à l'Université de Mons, qui a préfacé avec enthousiasme cet ouvrage. Nous terminerons par remercier Bruno Vergnes pour son aide, ses encouragements et la relecture du manuscrit. Mais au

fait, pour quelles raisons Bruno Vergnes nous a-t-il proposé d'éditer un livre en français sur l'extrusion réactive ? Sûrement parce que notre coopération depuis près de trente ans dans ce domaine a été en tout point exemplaire, tant du point de vue de la complémentarité de nos expertises scientifiques que de la qualité conviviale de nos différentes collaborations.

Nous espérons que les lecteurs, des mondes industriel ou académique, trouveront une réponse, ou tout au moins des pistes de réponse à leurs problématiques dans la formulation des matériaux polymères par extrusion réactive mais aussi de nouvelles idées à développer dans le futur.

Véronique BOUNOR-LEGARÉ

Directrice de Recherche au CNRS de Lyon

Philippe CASSAGNAU

Professeur à l'Université de Lyon

Abréviations et acronymes

AM (ou MA)	Anhydride maléique
BHECA	N,N-bis(2-hydroxyéthyl)cinnamide
BUR	Taux de gonflage
CBP	Composite bois-polymère
CE	Allongeur de chaîne
CEI	Capacité d'échange ionique
CL	ϵ -caprolactone
CR	Taux de conversion
DBTDL	Dilaurate de dibutyl-étain
DCP	Peroxyde de dicumyle
DG	Entrefer à la filière
DGL	Entrefer à la filière
DHBP	2,5-diméthyl-2,5-di(tert-butyl peroxy)hexane
DMAP	4-diméthylaminopyridine
DR	Taux d'étirage
DS	Degré de substitution
DTE	Dithioérythritol
DTS	Distribution de temps de séjour
EMS	Énergie mécanique spécifique
EPDM	Copolymère éthylène-propylène-diène monomère
EPM	Copolymère éthylène/propylène
EVA	Copolymère éthylène-acétate de vinyle
EVOH	Copolymère éthylène-alcool vinylique
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i>
FLH	Hauteur de la ligne de figeage
GMA	Méthacrylate de glycidyle
HR	Humidité relative
HRR	<i>Heat Release Rate</i>
$(\text{HS}-(\text{CH}_2)_3-\text{Si}(\text{OEt})_3$	Mercaptopropyltriéthoxysilane
IR	Infrarouge
IRTF	Infrarouge à transformée de Fourier

KB	Éléments malaxeurs
LA	Lactide
LS	Vitesse de la ligne
(M)APEG	(Méth)acrylate de poly(éthylène glycol) méthyléther
MEB	Microscope électronique en balayage
MFI	Indice de fluidité (<i>melt-index</i>)
MIMO	<i>Multiple Inputs – Multiple Outputs</i>
MMF	Matériau à mémoire de forme
NIR	Proche infrarouge
NMA	N-méthylacétamide
OBLAI	Oligo(butylène succinate-co-lactate-co-itaconate)
PA	Polyamide
PBAT	Poly(butylène adipate-co-téréphtalate)
PBS	Poly(butylène succinate)
PBT	Poly(butylène téréphtalate)
PC14	Poly(acide de ω -hydroxytétradécanoïque)
PCL	Poly(ϵ -caprolactone)
PDL	ω -pentadecalactone
PDMOS	Polydiméthoxysilane
PDX	1,4-dioxan-2-one
PE	Polyéthylène
PEBD	Polyéthylène basse densité
PEG	Poly(éthylène glycol)
PEHD	Polyéthylène haute densité
PET	Poly(éthylène téréphtalate)
PI	Proportionnel intégral
PID	Proportionnel intégrale dérivée
PINO	N-oxyl phthalimide
PLA	Poly lactide
PLA	Poly(acide lactique)
PMMA-co-TMI	Copolymère statistique de méthacrylate de méthyle et d'isocyanate de 3-isopropenyl- α , α' -diméthylbenzyle
PO	Polyoléfines
POC	Polymérisation par ouverture de cycle
POF	Polyoléfine fonctionnelle
PP	Polypropylène
PPDL	Poly(ω -pentadecalactone)
PPDX	Poly(1,4-dioxan-2-one)
PPh ₃	Triphénylphosphine
PSOH	Polystyrène porteur d'hydroxyle terminal
PT	Pression/température
PTMEG	Poly(tétraméthylène éther) glycol
PU	Polyuréthane
PUR	Poly(ester-uréthane)
PVDF-HFP	Poly(vinylidène-co-hexafluoropropylène)
RBA	Résidus de broyage automobile

RCPA	Réacteurs continus parfaitement agités
R & D	Recherche et développement
REP	Réacteurs à écoulement piston
SALS	Diffusion de lumière aux petits angles
SAOS	Cisaillement oscillatoire de faible amplitude
SEC	Chromatographie d'exclusion stérique
SE-HPLC	Chromatographie d'exclusion stérique à haute performance
SiP	Diéthylphosphatoéthyltriéthoxysilane
SISO	<i>Single Input – Single Output</i>
TEOS	Tétraéthoxysilane
Ti(OBu) ₄	Tétrabutoxyde de titane
TPOS	Tétrapropoxysilane
TPV	Thermoplastiques vulcanisés
TTI	Diminution du temps d'initiation
UFC	Unité formant des colonies
UV-vis	Ultraviolet visible
VHU	Véhicule hors d'usage

L'extrusion réactive, procédé continu et n'utilisant pas de solvants organiques, qui permet la transformation de la biomasse et des polymères synthétiques, fait partie d'un domaine d'innovation et de développements industriels en forte croissance.

Seul ouvrage rédigé en français par des spécialistes français et européens reconnus internationalement pour leurs activités de recherche, *Extrusion réactive* propose une approche pluridisciplinaire alliant les aspects chimie, procédés et matériaux.

Quatre grands chapitres présentent les aspects fondamentaux (la chimie, la rhéologie et la mise en œuvre), le contrôle des procédés, les applications et les développements industriels en cours et à venir.

Extrusion réactive s'adresse aux chercheurs, ingénieurs, étudiants en 2^e et 3^e cycles ou écoles d'ingénieurs dans le domaine de la chimie, de la formulation et de la transformation de polymères synthétiques et biosourcés, ainsi que tous les professionnels et cadres des domaines industriels précités.

Philippe Cassagnau, *Professeur des Universités*, et Véronique Bounor-Legaré, *Directrice de recherche*, sont tous deux rattachés au Laboratoire Ingénierie des Matériaux Polymères (IMP) (UMR CNRS 5223), à l'Université Claude-Bernard, Lyon I.

Ils se sont entourés, pour rédiger cet ouvrage, d'auteurs reconnus internationalement et faisant référence dans le domaine de la transformation des polymères synthétiques et biosourcés.

