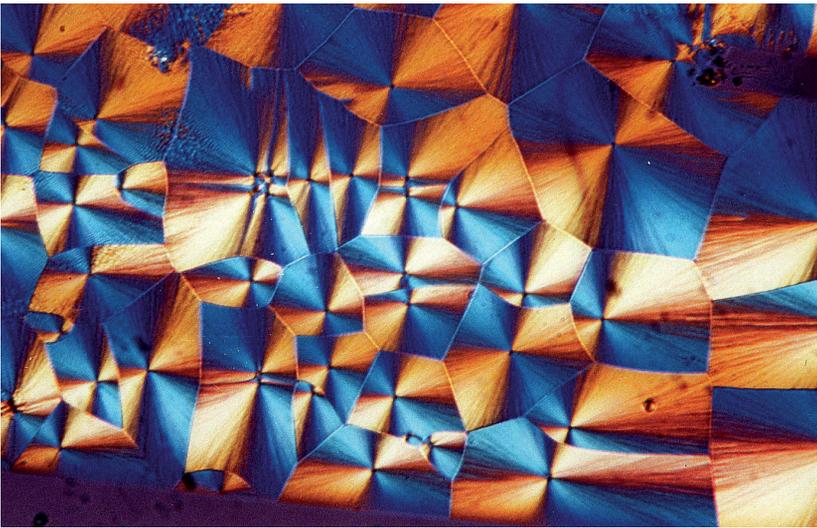


SCIENCE ET INGÉNIE
DES MATÉRIAUX

Jean-Marc Haudin

Structure et morphologie des polymères

De la macromolécule au sphérolite



Lavoisier
hermes

Structure et morphologie des polymères

De la macromolécule au sphérolite

Dans la même collection

Extrusion réactive

Des aspects fondamentaux aux développements industriels (2019)

CASSAGNAU P., BOUNOR-LEGARE V., coord.

Ingénierie de la structure des produits alimentaires (2019)

ALMEIDA G., PANOUILLE 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)

WOILLIEZ J.

Pour plus d'informations sur nos publications :



newsletters.lavoisier.fr/9782746249141

Jean-Marc Haudin

Structure et morphologie des polymères

De la macromolécule au sphérolite

Lavoisier
hermes

Collection
Sciences et ingénierie des matériaux

dirigée par Bruno Vergnes

Directeur de recherches, MINES ParisTech
CEMEF (Sophia Antipolis)

Direction éditoriale : Jean-Marc Bocabeille

Édition et fabrication : Solène Le Gabellec

Couverture et composition : Nord Compo, Villeneuve d'Ascq

© 2020, Lavoisier, Paris
ISBN : 978-2-7462-4914-1

Sommaire

| | |
|---------------------------------|------|
| Préface | XV |
| Avant-propos | XVII |
| Remerciements | XIX |
| Abréviations et acronymes | XXI |

Chapitre 1 Structure moléculaire des polymères

| | |
|---------------------------------|---|
| 1. Bref historique | 1 |
| <hr/> | |
| 2. Concept de polymère | 2 |
| <hr/> | |
| 2.1. Définition | 2 |
| 2.2. Liaison covalente | 3 |
| 2.3. Liaisons secondaires | 5 |
| <hr/> | |
| 3. Synthèse des polymères | 6 |
| <hr/> | |
| 3.1. Modes de synthèse | 6 |

| | |
|--|----|
| 3.2. Homopolymères et copolymères | 11 |
| 3.3. Nomenclature des homopolymères | 11 |
| 4. Longueur de chaîne – Masse molaire | 13 |
| <hr/> | |
| 5. Dimensionnalité des macromolécules | 17 |
| <hr/> | |
| 5.1. Macromolécules monodimensionnelles..... | 17 |
| 5.2. Macromolécules bidimensionnelles ou lamellaires | 20 |
| 5.3. Macromolécules tridimensionnelles | 20 |
| 6. Enchaînement des unités de répétition | 22 |
| <hr/> | |
| 6.1. Cas des homopolymères | 22 |
| 6.2. Cas des copolymères..... | 23 |
| 7. Stéréo-isomérie des polymères | 25 |
| <hr/> | |
| 7.1. Isomères cis-trans | 25 |
| 7.2. Énantiomères | 26 |
| 8. Conclusion | 29 |
| <hr/> | |

Chapitre 2

Structure conformationnelle des polymères. L'état amorphe

| | |
|--|----|
| 1. Notion de conformation | 31 |
| <hr/> | |
| 2. Conformations d'une chaîne isolée | 32 |
| <hr/> | |
| 2.1. Des conformations locales à la conformation globale..... | 32 |
| 2.2. Conformation globale désordonnée : la pelote statistique..... | 35 |
| 2.3. Conformations globales régulières : le zigzag planaire et l'hélice..... | 39 |

| | |
|--|----|
| 3. L'état amorphe | 42 |
| 3.1. Conformations à l'état amorphe | 42 |
| 3.2. Manifestations expérimentales de la transition vitreuse | 43 |
| 3.3. Interprétations moléculaires du comportement mécanique d'un polymère amorphe | 46 |
| 3.4. Paramètres moléculaires influençant la température de transition vitreuse | 53 |
| 3.5. Polymères réticulés..... | 55 |
| 4. Conclusion | 56 |

Chapitre 3

L'état cristallin

| | |
|--|----|
| 1. État cristallin – Symétries | 59 |
| 2. Périodicité de l'état cristallin – Réseau et motif | 61 |
| 2.1. Le réseau cristallin | 61 |
| 2.2. Le motif | 63 |
| 2.3. Masse volumique d'une structure cristalline | 64 |
| 3. Symétries des réseaux – Réseaux de Bravais | 64 |
| 4. Rangées et plans réticulaires – Indices de Miller | 67 |
| 4.1. Rangées réticulaires | 67 |
| 4.2. Plans réticulaires | 69 |
| 4.3. Directions et plans équivalents | 71 |
| 5. Réseau réciproque | 71 |
| 5.1. Définition | 71 |

| | |
|---|----|
| 5.2. Propriétés..... | 72 |
| 5.3. Théorèmes fondamentaux | 72 |
| 5.4. Le problème des réseaux de Bravais | 73 |
| 5.5. Approche mathématique du réseau réciproque : la transformée de Fourier..... | 77 |
| 6. Calculs cristallographiques | 79 |
| 6.1. Formules générales..... | 79 |
| 6.2. Application à une maille orthorhombique | 81 |
| 6.3. Application à une maille monoclinique..... | 82 |
| 7. Conclusion | 84 |

Chapitre 4

Diffraction des rayons X et des électrons

| | |
|--|----|
| 1. Le phénomène de diffraction des rayons X | 87 |
| 1. Les lois générales de la diffraction des rayons X | 88 |
| 1.1. La diffusion élastique | 88 |
| 1.2. Interaction avec des cristaux | 90 |
| 1.3. Calcul du facteur de forme – Les conditions de Laue | 91 |
| 1.4. Calcul du facteur de structure | 93 |
| 1. Les lois classiques de la diffraction des rayons X – L'importance du facteur de structure | 94 |
| 1.1. La règle de Wulff et la loi de Bragg à partir des lois générales de la diffraction | 94 |
| 1.2. Démonstration classique de la loi de Bragg | 95 |
| 1.3. Le rôle du facteur de structure | 95 |
| 1.4. Indexation des raies de diffraction | 99 |

| | |
|--|-----|
| 2. Détermination des structures cristallines | 100 |
| 2.1. Principes de la détermination des structures..... | 100 |
| 2.2. Détermination du réseau et de la maille..... | 101 |
| 2.3. Détermination du groupe d'espace..... | 102 |
| 2.4. Résolution de la structure..... | 102 |
| 3. Taille des cristaux et désordre | 106 |
| 3.1. Influence de la taille des cristaux..... | 106 |
| 3.2. Influence du désordre..... | 107 |
| 4. La diffraction des électrons | 110 |
| 4.1. Onde associée aux électrons..... | 110 |
| 4.2. Principe de fonctionnement du microscope électronique en transmission.... | 110 |
| 4.3. Caractéristiques de la diffraction électronique..... | 111 |
| 4.4. Interprétation des diagrammes de diffraction électronique..... | 115 |
| 5. Conclusion | 118 |

Chapitre 5

L'état cristallin des polymères

| | |
|---|-----|
| 1. Généralités | 121 |
| 2. Mise en évidence expérimentale de la cristallinité des polymères | 122 |
| 2.1. Diffraction des rayons X..... | 122 |
| 2.2. Calorimétrie..... | 128 |
| 2.3. Mesures de volume spécifique..... | 130 |
| 2.4. Bilan..... | 131 |

| | |
|--|------------|
| 3. Structures cristallines des polymères | 131 |
| <hr/> | |
| 3.1. Caractéristiques des structures cristallines des polymères à partir de l'exemple du polyéthylène..... | 131 |
| 3.2. Généralisation..... | 134 |
| 3.3. Polymorphisme : l'exemple du polypropylène isotactique | 135 |
| 3.4. Anisotropie des cristaux..... | 139 |
| | |
| 4. Taux de cristallinité | 141 |
| <hr/> | |
| 4.1. Le concept de taux de cristallinité | 141 |
| 4.2. Détermination par diffraction des rayons X..... | 141 |
| 4.3. Détermination par mesures de masse volumique | 145 |
| 4.4. Détermination par calorimétrie | 146 |
| | |
| 5. Dosage de phases cristallines : l'exemple du polypropylène isotactique | 147 |
| <hr/> | |
| 6. Conclusion | 150 |
| <hr/> | |

Chapitre 6

Cristaux polymères

| | |
|--|-----|
| 1. Comparaison entre polymères naturels et polymères synthétiques – La lamelle cristalline | 155 |
| <hr/> | |
| 2. Cristallisation à partir de solutions diluées : les monocristaux | 156 |
| <hr/> | |
| 2.1. Préparation des monocristaux | 156 |
| 2.2. Observation des monocristaux | 157 |
| 2.3. Structure et morphologie des monocristaux – Résultats classiques | 160 |

| | |
|---|-----|
| 3. Replissements de chaîne | 163 |
| 3.1. Évidence du phénomène de repliement | 163 |
| 3.2. Existence de plans de repliement | 164 |
| 3.3. Existence de replissements réguliers serrés – Nature de la surface de repliement..... | 165 |
| 3.4. Modèles de repliement..... | 167 |
| 4. Morphologie des monocristaux – Résultats complémentaires | 170 |
| 4.1. Évolution des faciès de croissance | 170 |
| 4.2. Macles..... | 171 |
| 4.3. Cristaux multicouches..... | 173 |
| 4.4. Quadrites de polypropylène | 174 |
| 5. Morphologies lamellaires à partir de l'état fondu | 177 |
| 5.1. Mise en évidence..... | 177 |
| 5.2. Modèle à deux phases..... | 178 |
| 5.3. Améliorations du modèle | 182 |
| 6. Conclusion | 183 |

Chapitre 7

Sphérolites de polymères

| | |
|---|-----|
| 1. Description générale | 189 |
| 2. Particularités morphologiques | 193 |
| 2.1. Caractérisation de la texture sphérolitique..... | 193 |
| 2.2. Branchements | 194 |
| 2.3. Torsades des lamelles..... | 196 |
| 2.4. Types de lamelles..... | 197 |

| | |
|--|-----|
| 3. Développement des sphérolites | 198 |
| 3.1. Géométrie de la croissance..... | 198 |
| 3.2. Frontières | 200 |
| 3.3. Interrogation sur la vitesse de croissance des cristaux..... | 202 |
| 4. Conclusion | 202 |
| Annexe 7.1 : Modélisation par champ de phase de la cristallisation sphérolitique..... | 205 |

Chapitre 8

Propriétés optiques des sphérolites de polymères

| | |
|--|-----|
| 1. Description des faits expérimentaux | 209 |
| 2. Propagation de la lumière dans un milieu diélectrique anisotrope | 211 |
| 2.1. L'onde incidente..... | 211 |
| 2.2. Polarisation des diélectriques..... | 212 |
| 2.3. Propagation d'une onde lumineuse dans un milieu diélectrique..... | 213 |
| 2.4. Indices de réfraction..... | 214 |
| 2.5. Conditions générales pour qu'une onde plane polarisée linéairement se propage sans déformation dans un diélectrique anisotrope | 215 |
| 2.6. Ellipsoïde des indices..... | 216 |
| 2.7. Milieux uniaxes..... | 217 |
| 3. Application aux polymères – Interprétation de la croix de Malte et des annelures | 217 |
| 3.1. Polymères uniaxes – L'exemple du polyéthylène..... | 217 |

| | |
|---|-----|
| 3.2. Interprétation de la croix de Malte | 219 |
| 3.3. Interprétation des annelures | 220 |
| 3.4. Lumière blanche..... | 222 |
| 4. Détermination expérimentale du signe des sphérolites | 222 |
| 4.1. Effet d'une lame biréfringente sur l'intensité de la lumière transmise | 222 |
| 4.2. Application au sphérolite de polymère..... | 224 |
| 4.3. Lumière blanche..... | 225 |
| 4.4. Utilisation d'une lame de gypse..... | 226 |
| 4.5. Quelques cas typiques ou atypiques de biréfringence des sphérolites | 228 |
| 5. Diffusion de la lumière | 232 |
| 5.1. Les phénomènes élémentaires..... | 232 |
| 5.2. Le rôle des déphasages..... | 233 |
| 5.3. Analyse du rayonnement diffusé..... | 234 |
| 5.4. Application aux polymères semi-cristallins..... | 236 |
| 6. Conclusion | 239 |
| Annexe 8.1 : Démonstration de $\text{rot}(\text{rot}E) = \text{grad}(\text{div}E) - \Delta E$ | 242 |
| Annexe 8.2 : Onde plane polarisée se propageant sans déformation | 244 |

Préface

À la fin des années 1960, l'École des Mines de Paris a voulu diversifier ses recherches sur les matériaux. Elle a ainsi chargé un jeune ingénieur du Corps des Mines, Pierre Avenas, de créer une activité de recherche sur les polymères. De nombreux contacts industriels, des missions à l'étranger, ainsi que la recherche du maximum de synergie avec les autres activités de l'École des Mines, l'amènèrent à définir deux voies de recherche qui n'existaient pas encore en France :

- appliquer la Mécanique des Milieux Continus à l'étude de la thermomécanique des procédés de mise en forme des polymères ;
- appliquer les concepts et les méthodes de la Métallurgie Physique à l'étude des relations entre mise en forme, structure et propriétés des polymères semi-cristallins.

Le groupe de recherche sur les polymères naquit en 1971. Rattaché au Centre des Matériaux de l'École des Mines de Paris, il était hébergé dans les locaux de l'École Nationale Supérieure des Techniques Avancées (ENSTA) et jouissait dans les faits d'une large autonomie.

1974 est une autre étape importante dans la réorganisation de la recherche en matériaux à l'École des Mines de Paris : le groupe en Mise en Forme des Métaux (Responsable Pierre Baqué) et le groupe Polymères (Responsable Pierre Avenas) sont regroupés avec le Laboratoire historique de Métallurgie de l'École, pour constituer un nouveau Centre de Recherche dédié à la Mise en Forme des Matériaux, le CEMEF (Centre de Mise en Forme des Matériaux), avec Pierre Baqué comme Directeur et Pierre Avenas comme Directeur-adjoint (il deviendra Directeur en 1976 et conduira le déménagement à Sophia-Antipolis).

Dans le nouveau CEMEF, deux groupes de recherche, correspondant respectivement aux deux voies présentées ci-dessus, étaient dédiés aux polymères :

- le groupe EVE (Écoulements ViscoÉlastiques) d'abord piloté par Pierre Avenas lui-même, puis pris en charge par Jean-François Agassant ;
- le groupe CES (ce qui signifiait à l'origine Cristallisation sous Écoulement ou Statique, puis est devenu Cristallisation et Études Structurales) sous la responsabilité de Jean-Marc Haudin.

Au-delà de ses activités de recherche sur les deux thèmes évoqués ci-dessus, un des objectifs du jeune CEMEF était d'offrir à l'industrie des séminaires de formation continue d'une semaine sur des sujets pointus. Ainsi, le groupe de Jean-Marc organise son premier

séminaire industriel sur la Cristallisation des Polymères en 1975, puis un second sur la Cristallisation et la Mise en Forme des Polymères en 1978. Ces deux séminaires produisirent des centaines de pages de photocopies. Alors que le groupe EVE réussit à valoriser les photocopies de ses séminaires sous forme de livre (*La Mise en Forme des Matières Plastiques*, trois éditions en 1982, 1986, 1996, puis *La Mise en Forme des Polymères, Approche thermomécanique de la Plasturgie*, en 2014, toutes éditées chez Lavoisier), ce ne fut pas le cas pour le groupe CES. Une des raisons était sans doute la diversité des sujets abordés qui rendait difficile une synthèse en un seul volume. En revanche, ce trésor fut en partie exploité pour de nombreux chapitres dans différents ouvrages pédagogiques. Bien des années après, le présent livre répare en partie ce manque. Pour éviter l'écueil signalé ci-dessus, il se concentre sur la structure et la morphologie des polymères semi-cristallins, en décrivant leur construction, de l'atome au sphérolite. Les chapitres sur l'état cristallin des polymères, les cristaux polymères, les sphérolites de polymères et les propriétés optiques des sphérolites de polymères ont pour origine les séminaires originels mais les sujets ont été largement revisités à la lumière des travaux publiés depuis cette époque. Ainsi, nos connaissances sur les phases cristallines du polypropylène isotactique ont radicalement évolué dans les années 1990, en particulier avec l'élucidation de la structure fascinante de la phase gamma. On simule maintenant la croissance des sphérolites par des méthodes de champ de phase.

Cet ouvrage a pris le parti d'une description rigoureuse de l'état cristallin et de ses méthodes d'investigation (diffraction des rayons X, microscopie électronique en transmission). Deux chapitres y sont consacrés. Ils ont été influencés par le passé de métallurgiste de Jean-Marc et ont été enrichis par ses nombreux enseignements en Matériaux, jusque récemment dans le cadre du cours Matériaux pour l'Ingénieur de l'École des Mines de Paris. C'est pourquoi ces deux chapitres peuvent intéresser un public plus large que les seuls polyméristes.

Les polymères sont formés de macromolécules, ce qui conditionne fortement leur structure et leurs propriétés. Tout naturellement, l'ouvrage s'ouvre par un chapitre sur leur structure moléculaire, suivi d'un chapitre sur leurs conformations, en particulier dans l'état amorphe. Ces chapitres se sont construits au fur et mesure de l'enseignement de la Physique des Polymères à l'École des Mines, en particulier dans le cadre du Mastère MATMEF (Matériaux et Mise en Forme). Ils ont été largement inspirés par les ouvrages pédagogiques du GFP (Groupe français d'études et d'applications des polymères), et par ceux d'éminents collègues, cités dans la bibliographie. Finalement, ces différents apports arrivent à un ensemble harmonieux, qui emmène le lecteur de l'atome au sphérolite. L'ouvrage permettra aux étudiants, chercheurs, ingénieurs dans le domaine des polymères d'acquérir des connaissances générales sur les polymères semi-cristallins, dans un esprit Science des Matériaux, mais également d'approfondir certains thèmes tels les propriétés optiques des sphérolites. Il sera également utile pour les métallurgistes souhaitant élargir leur champ de compétences, en pratiquant la « fertilisation croisée » chère à Pierre Laffitte, fondateur de la recherche à l'École des Mines de Paris et créateur de Sophia Antipolis.

Jean-François Agassant
Professeur Émérite MINES ParisTech
Président de la « Polymer Processing Society »

Avant-propos

Le terme de structure est bien commode en science des matériaux, car il permet de recouvrir sous un même vocable des aspects bien différents. Ainsi, dans le cas des polymères, il convient de distinguer différentes structures.

- La **structure moléculaire** est héritée de la synthèse chimique. Cette synthèse consiste à unir des petites molécules par des liaisons covalentes pour former des macromolécules, éléments constitutifs des polymères. Elle fixe la **configuration** de la chaîne macromoléculaire, c'est-à-dire les enchaînements covalents (agencement des atomes et des substituants, longueurs de liaison et angles de valence).
- La **structure conformationnelle** est l'organisation spatiale de la macromolécule. À configuration fixée, une même macromolécule peut adopter de nombreuses positions dans l'espace du fait des possibilités de rotation autour des liaisons covalentes.
- La **structure des états amorphe et cristallin** correspond respectivement à l'absence d'ordre à grande distance ou au contraire à une organisation périodique de la matière dans les trois directions de l'espace. L'**état amorphe** est constitué par des macromolécules imbriquées et enchevêtrées, ayant la conformation de la chaîne isolée. L'activation de différents mouvements moléculaires en fonction de la température donne lieu à des changements de comportement ou transitions, le plus important étant la **transition vitreuse**. Dans tout matériau, l'étude de l'**état cristallin** repose à la fois sur les concepts théoriques de la **crystallographie** et sur des techniques expérimentales appropriées, tout particulièrement la **diffraction des rayons X et des électrons**. Dans le cas des polymères, une configuration régulière permet aux chaînes d'adopter des conformations régulières et l'empilement de chaînes à conformation régulière crée la ou les structures cristallines du polymère. La cristallinité n'est jamais totale, d'où le nom de **polymère semi-cristallin**, pour exprimer que le polymère est un mélange d'une ou plusieurs phases cristallines et de phase amorphe.
- La **structure morphologique** ou **morphologie** (du grec morphé : forme), qui concerne la description d'entités morphologiques ou **morphologies** : cristaux et arrangements de cristaux et de phase amorphe. En 1957 intervint une découverte

fondamentale : les polymères en solution fortement diluée cristallisent sous la forme de **monocristaux**, qui sont des lamelles à contours géométriques, dans lesquelles les chaînes moléculaires sont repliées sur elles-mêmes. La **morphologie lamellaire** est également présente dans les polymères synthétiques cristallisés à partir de l'état fondu. Dans ce cas, il faut concevoir des modèles intégrant la coexistence de la phase cristalline et de la phase amorphe, sur le plan local et à plus grande distance. Le **sphérolite**, formé de lamelles radiales séparées par de la phase amorphe, peut être considéré comme la morphologie de référence. Son organisation interne lui confère des propriétés optiques particulières. De la présentation générale du domaine, esquissée ci-dessus, découle l'enchaînement des différents chapitres, détaillé dans le sommaire.

Jean-Marc Haudin

Remerciements

Cet ouvrage ayant bénéficié de multiples apports, les personnes ayant apporté leur contribution à des titres divers sont nombreuses.

En tout premier lieu, je pense avec gratitude à Gilbert Frade, qui m'a initié à la microscopie électronique en transmission et m'a fait participer très jeune, avec mon ami Frank Montheillet, à des enseignements de cristallographie et de diffraction des rayons X et des électrons. Par la suite, Frank et moi avons enseigné les matériaux à la Faculté de Chirurgie Dentaire de Nice, et le présent ouvrage porte la trace de cet enseignement. Tous mes remerciements, Frank.

Ma très grande gratitude à Pierre Avenas qui m'a fait passer des métaux aux polymères et avec lequel j'ai organisé les deux séminaires de formation continue, dont l'ouvrage est le lointain héritier. Les chercheurs qui ont contribué à ces séminaires étaient : Jean-Bernard Berhaut, José Domenech, Gérard Krotkine, Bernard Monasse, Bernard Plantamura, Jean-Philippe Sergent, Eric Weynant. Ils ont droit à toute ma reconnaissance, avec une pensée particulière pour Bernard Plantamura, prématurément disparu. Seule une partie du trésor constitué par les photocopiés des séminaires a été utilisée ici.

Bien sûr, cette mise de départ a grandement évolué lors de nombreux enseignements de physique des polymères à l'École des Mines de Paris. Je tiens à remercier les collègues avec lesquels, au cours du temps, j'ai assuré ces enseignements : Bernard Monasse, Patrick Navard, Noëlle Billon, Édith Peuvrel-Disdier, Séverine Boyer.

Retour aux sources : le cours Matériaux pour l'Ingénieur de l'École des Mines de Paris m'a permis de me ressourcer en cristallographie, et cela a été mis à profit dans le présent ouvrage. Grand merci à Anne-Françoise Gourgues-Lorenzon et à Loïc Nazé.

Je n'oublie pas dans mes remerciements :

- tous mes étudiants (doctorants, étudiants de mastère, DEA et master, stagiaires) qui, par leur travail, ont enrichi notre connaissance de la cristallisation des polymères et illustré les concepts présentés dans ce livre ;
- mes bons collègues du groupe EVE (Écoulements ViscoÉlastiques) – Jean-François Agassant, Yves Demay, Bruno Vergnes, Michel Vincent – avec qui j'ai tant de fois collaboré ;

– Gabriel Monge, avec qui je travaille depuis plus de quarante ans sur les rayons X, et Lionel Freire, arrivé plus récemment, avec qui je « traque les sphérolites ».

Je remercie Bruno Vergnes de m'avoir incité à écrire cet ouvrage, Jean-François Agassant d'en avoir écrit la préface et Hermès-Lavoisier d'avoir accepté de le publier. Enfin, je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mon épouse, Marie-Christine, pour son constant soutien.

Jean-Marc Haudin

Abréviations et acronymes

| | |
|-------------------|--|
| AFM | Microscopie à force atomique |
| CC, cc | Cubique centré |
| CFC, cfc | Cubique à faces centrées |
| DOP | Diocylphtalate |
| DSC | <i>Differential Scanning Calorimetry</i> |
| GPC | <i>Gel Permeation Chromatography</i> |
| ICI | <i>Imperial Chemical Industries</i> |
| IUPAC | <i>International Union of Pure and Applied Chemistry</i> |
| MAF | <i>Mobile Amorphous Fraction</i> |
| MET | Microscopie électronique en transmission |
| PA 6, 6-6, 11, 12 | Polyamides 6, 6-6, 11, 12 |
| PC | Polycarbonate |
| PDMS | Poly(diméthylsiloxane) |
| PE | Polyéthylène |
| PEBD | Polyéthylène basse densité |
| PEBDL | Polyéthylène basse densité linéaire |
| PEHD | Polyéthylène haute densité |
| PEO | Poly(oxyde d'éthylène) |
| PET | Poly(éthylène téréphtalate) |
| PLA | Poly(acide lactique) |
| PP | Polypropylène |
| PPa | Polypropylène atactique |
| PPi | Polypropylène isotactique |
| PVC | Poly(chlorure de vinyle) |
| PVDF | Poly(fluorure de vinylidène) |
| RAF | <i>Rigid Amorphous Fraction</i> |
| SALS | <i>Small-angle Light Scattering</i> |
| SEC | <i>Size Exclusion Chromatography</i> |
| SMFS | <i>Single-Molecule Force Spectroscopy</i> |
| SMD | <i>Steered Molecular Dynamics</i> |

Il est courant de dire que les propriétés d'un matériau dépendent de sa structure. Le but de l'ouvrage est d'expliciter le concept de structure dans le cas d'un polymère semi-cristallin. Ainsi sont décrites **la structure moléculaire**, héritée de la synthèse chimique, **la structure conformationnelle**, organisation spatiale de la macromolécule, la structure des états amorphe et cristallin, avec respectivement absence d'ordre à grande distance ou au contraire organisation périodique de la matière dans les trois directions de l'espace, et enfin la structure morphologique ou morphologie, description des cristaux et arrangements de cristaux et de phase amorphe. Le lecteur est ainsi emmené de l'atome au sphérolite.

Sans méconnaître les apports de la chimie et de la physico-chimie, l'ouvrage a été rédigé dans un esprit Science des Matériaux. Les aspects concernant l'état cristallin y sont présentés de façon soignée et rigoureuse. L'ouvrage permettra aux étudiants, chercheurs, ingénieurs dans le domaine des polymères d'acquérir des connaissances générales sur les polymères semi-cristallins, mais également d'approfondir certains thèmes tels les propriétés optiques des sphérolites. Il sera également utile pour les métallurgistes ou les spécialistes d'autres matériaux souhaitant élargir leur champ de compétences, en pratiquant la « fertilisation croisée ».

Jean-Marc Haudin, est Professeur émérite à l'École des Mines de Paris. De 1974 à 2006, il a dirigé le groupe de recherche «Cristallisation et Etudes Structurales des Polymères» du Centre de Mise en Forme des Matériaux (CEMEF) de l'École des Mines de Paris. Il a été responsable du Mastère Spécialisé en Matériaux et mise en forme et de la Spécialité Doctorale Sciences et génie des matériaux.

