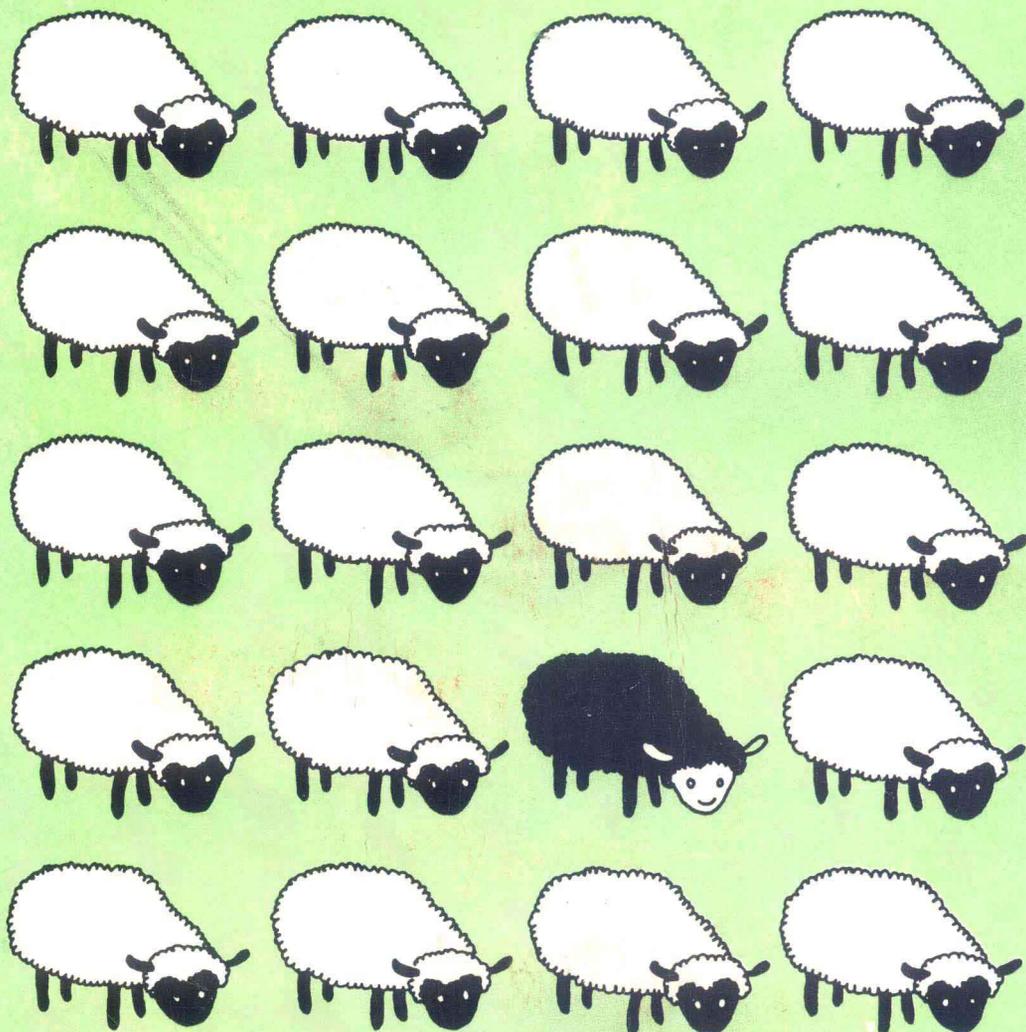


DEFAUTS PONCTUELS DANS LES SOLIDES

Confolant 1977



les éditions

de physique
subventionnées par le C.N.R.S.

DÉFAUTS PONCTUELS DANS LES SOLIDES

Ecole d'été en Auvergne 5 au 16 sept. 1977

LES ÉDITIONS DE PHYSIQUE
Z.I. de Courtabœuf, B.P. 112
91402 ORSAY, France

Organisateurs

G. BREBEC C.E.N. Saclay
J. CASTAING — C. MONTY C.N.R.S. Bellevue
C.-H. de NOVION — L. ZUPPIROLI C.E.N. Fontenay-aux-Roses

PRÉFACE

L'école d'été 1977 de Confolant sur les défauts ponctuels renoue avec une tradition maintenant déjà longue et, je pense, particulière à la France, des écoles d'été de *métallurgie physique* au sens large, qui réunissent des chercheurs appliqués comme fundamentalistes autour d'un grand thème de recherche des matériaux. On peut regretter que la collection des écoles précédentes ait été publiée de façon fort diverse, et qu'elles soient de ce fait pratiquement introuvables maintenant. Il faut souhaiter que cette publication par les Editions de Physique soit un franc succès qui permette à une nouvelle tradition de se créer.

J. FRIEDEL

AVANT-PROPOS

Les chapitres de ce livre sont issus des textes des conférences faites dans le cadre d'une Ecole d'Eté qui a eu lieu à Confolant (Puy-de-Dôme) du 5 au 16 septembre 1977 et a réuni 120 participants. Outre les conférences, plusieurs tables rondes et de nombreux séminaires ont porté sur des sujets aussi divers que l'avenir des « groupes Monétier », le processus photographique, les matériaux amorphes, les super-conducteurs ioniques, la méthode des déphasages... sans oublier un débat ardent sur les problèmes de choix nationaux en matière énergétique qui a resurgi sous des formes diverses tout au long de cette école. Le soleil, l'exotisme de Miremont, la poésie, l'humour ont heureusement permis de réconcilier les esprits parfois divergents.

Organisée en moins de neuf mois, cette Ecole d'Eté n'a pu voir le jour que grâce au soutien de nombreuses personnalités et de nombreux organismes. Nous remercions en particulier la Société française de Physique qui a accordé son patronage, la Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique et la Direction des Recherches et Moyens d'Essais qui ont participé directement au financement, le Commissariat à l'Energie Atomique et le Centre National de la Recherche Scientifique auxquels appartiennent les organisateurs.

G. BREBEC, J. CASTAING, C.-H. de NOVION, C. MONTY,
A. SOLLACARO, L. ZUPPIROLI.

12 janvier 1978

SOMMAIRE

INTRODUCTION (J. Philibert) page 1

PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DES DÉFAUTS PONCTUELS

CHAPITRE I : THERMODYNAMIQUE (J. Castaing) page 7

1. *Introduction.*
2. *Rappels de mécanique statistique.*
 - 2.1 *Ensemble microcanonique.*
 - 2.2 *Ensemble canonique.*
 - 2.3 *Ensemble grand canonique.*
3. *Relations entre grandeurs thermodynamiques.*
4. *Description d'un solide parfait monoatomique.*
5. *Solution de défauts ponctuels.*
6. *Désordre thermique dans un solide élémentaire.*
 - 6.1 *Concentration d'équilibre des défauts.*
 - 6.2 *Influence de la pression ; volume de formation.*
 - 6.3 *Influence des défauts sur les propriétés thermodynamiques.*
7. *Défauts ponctuels dans un composé défini.*
 - 7.1 *Concentration d'équilibre des défauts.*
 - 7.2 *Potentiels chimiques des défauts.*
8. *Défauts ponctuels dans un composé présentant des écarts à la stœchiométrie.*
9. *Interaction entre défauts.*
 - 9.1 *Bilacunes dans un réseau de coordinence z.*
 - 9.2 *Interaction entre défauts dans un composé ionique.*

CHAPITRE II : STRUCTURE ÉLECTRONIQUE (M. Gerl et M. Lannoo) page 29

A. RAPPELS SUR LA LIAISON CHIMIQUE DANS LES SOLIDES (M. Gerl) page 29

1. *Introduction.*
2. *Cohésion des solides.*
 - 2.1 *Solides de gaz rares.*
 - 2.2 *Solides ioniques.*
 - 2.3 *Solides covalents.*
 - 2.4 *Liaison métallique.*
 - 2.4.1 *Métaux normaux.*
 - 2.4.2 *Métaux de transition.*

B. DÉFAUTS PONCTUELS DANS LES SOLIDES DE GAZ RARES. LES MÉTAUX NORMAUX ET DE TRANSITION (M. Gerl)

page 38

3. *Lacunes dans les cristaux de gaz rares.*
 - 3.1 *Définitions.*
 - 3.1.1 *Formation.*
 - 3.1.2 *Migration.*
 - 3.2 *Formation de lacune.*
 - 3.2.1 *Explication des termes $H_0 + \sum_{n \geq 3} - (n - 2) E_n$.*
 - 3.2.2 ΔE_{vib} et ΔE_{relax} .
4. *Défauts ponctuels dans les métaux normaux.*
 - 4.1 *Modèle de Mukherjee.*
 - 4.2 *Calculs détaillés de E_{IV}^F .*
 - 4.2.1 *Méthode de Fumi.*
 - 4.2.2 *Perfectionnements du modèle de Fumi.*
 - 4.2.3 *Modèle de Faber.*
 - 4.2.4 *Modèle de Ho [21] et Popović [22].*
5. *Défauts ponctuels dans les métaux de transition.*
 - 5.1 *Calculs semi-empiriques.*
 - 5.1.1 *Choix du potentiel de paires.*
 - 5.1.2 *Calcul de E_{IV}^F et E_{IV}^M .*
 - 5.2 *Calculs en liaisons fortes.*
 - 5.2.1 *Détermination des paramètres.*
 - 5.2.2 *Méthode des moments.*
 - 5.2.3 *Méthode des fonctions de Green.*
 - 5.2.3.1 *Energie de formation d'une monolacune.*
 - 5.2.3.2 *Energie d'interaction de 2 impuretés, ou d'une lacune et d'une impureté.*

C. DÉFAUTS DANS LES SOLIDES COVALENTS ET IONIQUES (M. Lannoo)

page 70

6. *Défauts dans les solides covalents.*
 - 6.1 *Molécule lacunaire.*
 - 6.1.1 *Approximation à un électron.*

- 6.1.2 *Influence des interactions entre électrons.*
- 6.1.3 *Validité du modèle et limitations.*
- 6.2 *Amélioration des modèles à une particule.*
 - 6.2.1 *Méthodes de fonctions de Green (ou des déphasages).*
 - 6.2.2 *Calcul approché des fonctions de Green (méthodes de moments).*
 - 6.2.3 *Molécule lacunaire étendue.*
- 6.3 *Distorsion par effet Jahn-Teller.*
- 6.4 *Approximation de la masse effective.*
- 7. *Défauts dans les solides ioniques.*
 - 7.1 *Centres F.*
 - 7.1.1 *Modèles de type hydrogénoïde.*
 - 7.1.2 *Modèles de type semi-continu.*
 - 7.1.3 *Méthode CLOA.*
 - 7.1.4 *L'approximation des ions ponctuels.*
 - 7.1.5 *Influence de la taille des ions.*
 - 7.1.6 *Remarques diverses.*
 - 7.2 *Ions de transition.*

D. PHONONS-MODES LOCALISÉS ET ENTROPIE DE VIBRATION (M. Lannoo)

page 93

- 8.1 *Matrice dynamique.*
- 8.2 *Cristal parfait : chaîne linéaire.*
- 8.3 *Défaut de masse : chaîne linéaire.*
- 8.4 *Extension à des cas plus réalistes.*
- 8.5 *Calcul des entropies de vibration.*

CHAPITRE III : INTERACTIONS AVEC LES DÉFAUTS ÉTENDUS (G. Edelin)

page 107

- 1. *Introduction.*
- 2. *Energie d'interaction entre défauts ponctuels et dislocations.*
 - 2.1 *Interaction à grande distance.*
 - 2.1.1 *Effet de taille.*
 - 2.1.2 *Effet de constantes élastiques.*
 - 2.1.3 *Effets électriques.*
 - 2.1.3.1 *Cas des cristaux ioniques.*
 - 2.1.3.2 *Cas des semiconducteurs.*
 - 2.2 *Interaction à courte distance.*
- 3. *Les dislocations comme sources et puits pour les défauts ponctuels.*
 - 3.1 *Considérations géométriques.*
 - 3.2 *Considérations thermodynamiques.*
 - 3.3 *Cinétique de la montée.*
 - 3.4 *Concentration de crans.*

- 3.5 *Quelques complications pouvant intervenir dans les cas réels.*
 - 3.5.1 *Rôle de la structure cristallographique.*
 - 3.5.2 *Rôle d'une dissociation.*
 - 3.5.3 *Montée dans les cristaux ioniques.*
- 4. *Quelques modes de précipitation des défauts ponctuels.*
 - 4.1 *Précipitation sous forme de boucles prismatiques.*
 - 4.1.1 *Considérations cristallographiques.*
 - 4.1.2 *Considérations énergétiques.*
 - 4.1.3 *Forme des boucles.*
 - 4.2 *Sources de Bardeen-Herring.*
 - 4.3 *Structures de cisaillement.*

CHAPITRE IV : PRODUCTION PAR IRRADIATION

(L. Zuppiroli)

page 149

- 1. *Introduction.*
- 2. *Irradiation aux électrons.*
 - 2.1 *Les sections efficaces de collision.*
 - 2.2 *Energie de seuil de déplacement.*
 - 2.3 *Volume de recombinaison et diffusion induite par l'irradiation.*
 - 2.4 *Effets thermiques limitant les taux de production des défauts.*
- 3. *Irradiations aux ions (et aux neutrons rapides).*
 - 3.1 *Le ralentissement des ions par la cible et l'énergie cédée au réseau sous forme de chocs atomiques.*
 - 3.2 *Nombre de défauts créés dans les cascades de déplacements.*
 - 3.3 *La distribution des défauts dans une cascade de déplacements.*
 - 3.4 *Pointes « thermiques » accompagnant les cascades de déplacements.*
- 4. *La conversion d'une excitation électronique en défauts ponctuels.*
 - 4.1 *La radiolyse des cristaux ioniques.*
 - 4.2 *La production des traces dans les isolants.*
- 5. *Tableau des taux d'endommagement produits dans les dispositifs d'irradiation les plus courants.*

QUELQUES MÉTHODES D'ÉTUDE DES DÉFAUTS PONCTUELS

CHAPITRE V : DIFFUSION ATOMIQUE (G. Brebec)

page 181

- 1. *La diffusion en relation avec les défauts ponctuels.*
 - 1.1 *Les mécanismes d'échanges.*
 - 1.2 *Les mécanismes mettant en jeu des défauts ponctuels.*

2. *Description macroscopique de la diffusion.*
 - 2.1 *Le problème des flux.*
 - 2.2 *Les équations phénoménologiques.*
 - 2.3 *Etude de quelques cas particuliers.*
 - 2.3.1 *La diffusion chimique.*
 - 2.3.2 *L'hétérodiffusion à dilution infinie.*
 - 2.3.3 *L'autodiffusion.*
 - 2.3.4 *L'électromigration.*
 - 2.3.5 *La thermomigration.*
3. *Description atomique de la diffusion.*
 - 3.1 *Le coefficient de diffusion dans les systèmes homogènes ou très dilués (auto et hétérodiffusion).*
 - 3.2 *La diffusion chimique.*
 - 3.3 *La valence efficace en électromigration.*
 - 3.4 *La chaleur de transport en thermomigration.*
 - 3.5 *Expressions cinétiques des coefficients phénoménologiques.*
4. *Les méthodes expérimentales.*
 - 4.1 *Détermination du coefficient de diffusion D.*
 - 4.1.1 *Méthodes directes.*
 - 4.1.2 *Méthodes indirectes.*
 - 4.2 *Détermination de la valence efficace.*
 - 4.3 *Détermination de la chaleur de transport.*
 - 4.4 *Détermination de la vitesse du réseau.*
 - 4.5 *Détermination de l'effet isotopique.*
5. *Dépendance du coefficient de diffusion avec la température, la pression et la masse.*
 - 5.1 *Variation de D avec T.*
 - 5.2 *Variation de D avec la pression.*
 - 5.3 *Variation de D avec la masse M.*
6. *La diffusion hors d'équilibre.*
7. *La diffusion en fonction de la liaison.*
 - 7.1 *Les cristaux ioniques.*
 - 7.2 *Les semiconducteurs.*
 - 7.3 *Les oxydes.*
 - 7.4 *Les métaux.*

CHAPITRE VI : MÉTHODES SPECTROSCOPIQUES

(A. WASIELA)

page 213

1. *Introduction.*
2. *Absorption et émission d'un centre localisé.*
 - 2.1 *Techniques expérimentales.*
 - 2.2 *Modèle de la coordonnée de configuration.*
 - 2.2.1 *Absorption.*
 - 2.2.2 *Emission.*

3. *Détermination de la structure des défauts par les techniques optiques.*
 - 3.1 *Absorption et émission en lumière polarisée.*
 - 3.2 *Dichroïsme linéaire.*
 - 3.3 *Perturbation sur la raie zéro-phonon.*
 - 3.3.1 *Contrainte uniaxiale.*
 - 3.3.2 *Effet Stark.*
 - 3.3.3 *Effet Zeeman.*
 - 3.4 *Perturbation sur la bande large.*
4. *Résonances magnétiques (R.P.E.-E.N.D.O.R.).*
 - 4.1 *Principe.*
 - 4.2 *Détermination de l'Hamiltonien de spin à partir du spectre de résonance.*
 - 4.3 *Détermination des modèles microscopiques.*
5. *Spectroscopie des états excités.*
 - 5.1 *Principe de la détection optique de la R.P.E.*
 - 5.2 *Le centre F dans CaO.*

CHAPITRE VII : DIFFUSION DIFFUSE DE NEUTRONS ET DE RAYONS X (C.-H. de Novion) page 233

1. *Introduction.*
2. *Théorie.*
 - 2.1 *Rappels généraux sur la diffusion des rayons X et des neutrons thermiques.*
 - 2.2 *Distribution de défauts ponctuels sans effet de taille. Ordre à courte distance.*
 - 2.3 *Défauts ponctuels sans interaction. Déformation du réseau cristallin.*
 - 2.4 *Diffusion au voisinage des réflexions de Bragg (diffusion Huang).*
 - 2.5 *Diffusion par les amas de défauts ponctuels.*
 - 2.6 *Concentrations élevées de défauts ponctuels avec déformation du réseau cristallin et ordre à courte distance.*
3. *Méthodes expérimentales.*
4. *Exemples d'application.*
 - 4.1 *Une étude par diffraction sur poudres : nature des défauts ponctuels dans CeO_{2-x} .*
 - 4.2 *Une étude d'ordre à courte distance par diffusion diffuse de rayons X sur monocristal : $\text{Cu}_{0,75}\text{Au}_{0,25}$.*
 - 4.3 *Une étude d'ordre à courte distance par diffusion diffuse de neutrons sur polycristal : $^{65}\text{Cu}_{0,435}\text{Ni}_{0,565}$.*
 - 4.4 *Une étude d'ordre à courte distance entre défauts ponctuels par diffusion diffuse d'électrons : TiO_x .*

- 4.5 *Une étude de champ de déformation par les défauts ponctuels : les auto-interstitiels produits par irradiation dans l'aluminium.*
 - 4.5.1 *Etude par diffusion Huang à 4 K de l'auto-interstitiel isolé dans l'aluminium.*
 - 4.5.2 *Identification de l'auto-interstitiel par diffusion diffuse entre pics de Bragg.*
 - 4.5.3 *Etude par diffusion Huang des amas de défauts formés lors des recuits thermiques.*
 - 4.6 *Une étude par diffusion de neutrons aux petits angles : les cavités créées par irradiation de neutrons dans l'aluminium.*
5. *Conclusion.*

CHAPITRE VIII : ANNIHILATION DE POSITONS

(R. Paulin) page 257

- 1. *Sensibilité du positon à la présence de défauts dans les solides métalliques.*
 - 1.1 *Paramètres caractéristiques de l'annihilation libre.*
 - 1.2 *Affinités du positon pour les défauts.*
 - 1.3 *Annihilation du positon piégé.*
 - 1.4 *Analyse quantitative du piégeage.*
 - 1.5 *Propriétés des défauts ponctuels accessibles par annihilation du positon dans les métaux.*
 - 1.5.1 *Concentration de défauts.*
 - 1.5.2 *Energie de formation des lacunes.*
 - 1.5.3 *Energie de liaison lacune-impureté.*
 - 1.5.4 *Volume de formation des lacunes.*
 - 1.5.5 *Dynamique de formation des amas lacunaires.*
 - 1.5.6 *Profil d'implantation de défauts.*
 - 1.6 *Limites de la méthode dans les métaux.*
 - 1.6.1 *Métaux purs.*
 - 1.6.2 *Alliages.*
- 2. *Défauts révélés par les positons dans les solides non métalliques.*
 - 2.1 *Semiconducteurs.*
 - 2.2 *Halogénures alcalins.*
 - 2.2.1 *Annihilation en l'absence de défauts.*
 - 2.2.2 *Annihilation en présence de défauts.*
 - 2.3 *Autres solides.*
 - 2.3.1 *Oxydes des métaux de transition.*
 - 2.3.2 *Quartz et glace.*

CHAPITRE IX : DYNAMIQUE MOLÉCULAIRE (N.V. Doan)

..... page 285

- 1. *Introduction.*

2. *Description de la méthode.*
3. *Limitations de la méthode.*
 - 3.1 *Potentiel d'interaction.*
 - 3.2 *Taille du microcristallite.*
4. *Paramètres et fonctions calculées.*
 - 4.1 *Température.*
 - 4.2 *Pression.*
 - 4.3 *Energie potentielle.*
 - 4.4 *Fonction de corrélation de paires ou de distribution radiale $g(r)$.*
 - 4.5 *Déplacement carré moyen.*
 - 4.6 *Fonction d'autocorrélation de la vitesse.*
 - 4.7 *Fonction de corrélation de Van-Hove $G_s(r, t)$.*
 - 4.8 *Fonction de diffusion (scattering) $F_s(k, t)$.*
 - 4.9 *Fonction de corrélation de paires dépendant du temps $G_d(r, t)$.*
5. *Quelques exemples d'application.*
 - 5.1 *Diffusion des auto-interstitiels.*
 - 5.2 *Diffusion des lacunes dans Na, Al.*
 - 5.3 *Effet isotopique.*
 - 5.4 *Effets d'irradiation.*
 - 5.4.1 *Migration induite des lacunes.*
 - 5.4.2 *Energie de seuil de déplacement E_d et de mécanismes de création des paires de Frenkel.*
6. *Conclusion.*

LES DÉFAUTS PONCTUELS DANS DIFFÉRENTS TYPES DE MATÉRIAUX

CHAPITRE X : CRISTAUX IONIQUES : DÉFAUTS ATOMIQUES (F. Bénére)

page 305

1. *Propriétés caractéristiques des solides ioniques.*
 - 1.1 *Introduction.*
 - 1.2 *Relation de Nernst-Einstein.*
 - 1.3 *Nombres de transport.*
 - 1.4 *Contrôle des concentrations de défauts par dopage.*
 - 1.4.1 *Halogénures alcalins.*
 - 1.4.2 *Halogénures d'argent.*
 - 1.4.3 *Cristaux ioniques à structure fluoritique.*
2. *Méthodes expérimentales.*
 - 2.1 *Coefficients d'autodiffusion.*
 - 2.2 *Conductivité ionique.*

3. *Méthodes de calcul des paramètres thermodynamiques.*
 - 3.1 *Calcul des enthalpies.*
 - 3.2 *Calcul des entropies.*
 - 3.2.1 *Entropie de formation de lacunes.*
 - 3.2.2 *Entropie de formation de paire de lacunes.*
 - 3.2.3 *Entropie de formation d'un complexe impureté-lacune à partir d'une impureté substitutionnelle et d'une lacune isolées.*
4. *Résultats actuels sur les défauts atomiques des cristaux ioniques.*
 - 4.1 *Halogénures alcalins.*
 - 4.1.1 *Lacunes libres.*
 - 4.1.2 *Paires de lacunes.*
 - 4.1.3 *Complexes impureté-lacune.*
 - 4.2 *Halogénures d'argent.*
 - 4.3 *Solides ioniques à structure fluoritique.*
 - 4.4 *Superconducteurs ioniques.*

**CHAPITRE XI : CRISTAUX IONIQUES : CENTRES COLO-
RÉS (A. Wasiela)**

page 331

A. CENTRES A ÉLECTRONS.

1. *Le centre F dans les halogénures alcalins.*
 - 1.1 *Spectre d'absorption — bande F.*
 - 1.2 *Autres états excités.*
 - 1.3 *Emission.*
 - 1.4 *Dichroïsme circulaire.*
 - 1.5 *R.P.E. et E.N.D.O.R.*
 - 1.6 *Le centre F_A .*
2. *Agrégats de centres F.*
 - 2.1 *Centre F_2 .*
 - 2.2 *Centres F_3 .*
3. *Centres à électrons dans d'autres matériaux.*

B. CENTRES A TROU.

4. *Le centre V_K dans les halogénures alcalins.*
 - 4.1 *Structure électronique du centre V_K et absorption.*
 - 4.2 *Dichroïsme linéaire et réorientation thermique.*
 - 4.3 *Résonances magnétiques.*
 - 4.4 *Recombinaison électron-trou.*
5. *Le centre H.*
6. *Centres associés aux centres V_K et H.*

Introduction.

1. *Description des populations de défauts ponctuels dans un oxyde.*
 - 1.1 *Différents types de défauts, réactions de formation.*
 - 1.2 *Equilibres entre défauts — Diagrammes de Brouwer.*
 - 1.3 *Caractérisation des défauts.*
 - 1.3.1 *Défauts neutres.*
 - 1.3.2 *Défauts chargés majoritaires dans un oxyde à caractère semiconducteur.*
 - 1.3.3 *Défauts chargés majoritaires dans un oxyde à caractère ionique.*
 - 1.3.4 *Défauts chargés minoritaires.*
2. *Méthodes expérimentales d'étude des défauts ponctuels dans les oxydes.*
 - 2.1 *Mesure de la composition.*
 - 2.2 *Mesures électriques et électrochimiques.*
 - 2.3 *Diffusion.*
 - 2.3.1 *Autodiffusion.*
 - 2.3.2 *Diffusion chimique.*
 - 2.4 *Autres méthodes de caractérisation.*
3. *Propriétés des défauts ponctuels dans les oxydes binaires.*
 - 3.1 *Série MgO, CaO, SrO, BaO.*
 - 3.2 *Série NiO, CoO, MnO, FeO.*
 - 3.3 *Série TiO, NbO, VO.*
 - 3.4 *Série Al₂O₃, Cr₂O₃, ... Fe₂O₃, Ti₂O₃, V₂O₃...*
 - 3.5 *Série ZrO₂, ThO₂, HfO₂, CeO₂, UO₂, PuO₂.*
 - 3.6 *Série Nb₂O₅, MoO₃, WO₃, V₂O₅... TiO₂...*
4. *Conclusion.*

1. *Introduction.*
2. *Théorie.*
 - 2.1 *Structure électronique.*
 - 2.2 *Paramètres thermodynamiques.*
 - 2.2.1 *Enthalpie de formation.*
 - 2.2.2 *Enthalpie de migration.*
3. *Les propriétés électroniques et de transport atomique.*
 - 3.1 *Propriétés électroniques.*
 - 3.1.1 *Propriétés électriques.*
 - 3.1.2 *Photoconductivité.*
 - 3.1.3 *Recombinaison non radiative.*
 - 3.2 *Propriétés de transport atomique.*

4. *Comportement des défauts.*
 - 4.1 *Défauts hors d'équilibre thermodynamique.*
 - 4.1.1 *La paire lacune-interstitiel.*
 - 4.1.2 *L'interstitiel.*
 - 4.1.3 *La lacune.*
 - 4.1.4 *Défauts complexes.*
 - 4.2 *Diffusion.*

CHAPITRE XIV : MÉTAUX (J. Hillairet) page 417

Introduction.

1. *Caractéristiques de formation des lacunes.*
 - 1.1 *Mise en évidence expérimentale des lacunes.*
 - 1.2 *Concentrations d'équilibre de défauts.*
 - 1.3 *Enthalpie et entropie de formation des monolacunes.*
 - 1.3.1 *Mesures dilatométriques couplées.*
 - 1.3.2 *Annihilation de positons.*
 - 1.3.3 *Expériences de trempé.*
 - 1.3.4 *Résumé.*
 - 1.4 *Volume de formation d'une lacune et relaxation du réseau au voisinage d'un site lacunaire.*
 - 1.4.1 *Mesures directes.*
 - 1.4.2 *Méthodes indirectes.*
2. *Caractéristiques de migration des lacunes.*
 - 2.1 *Etude expérimentale de l'élimination d'une sursaturation de lacunes.*
 - 2.2 *Monolacunes : énergie de migration.*
 - 2.3 *Multilacunes : configuration et mobilité.*
 - 2.4 *Interactions lacunes-impuretés.*
 - 2.5 *Agglomération.*
3. *Défauts d'irradiation.*
 - 3.1 *L'auto-interstitiel.*
 - 3.1.1 *Structure et symétrie.*
 - 3.1.2 *Saut élémentaire et migration libre de l'interstitiel. dissocié.*
 - 3.1.3 *Multi-interstitiels.*
 - 3.1.4 *Interactions interstitiels-impuretés.*
 - 3.2 *Mobilité atomique sous irradiation.*
 - 3.2.1 *La dynamique des populations de défauts sous flux : généralités.*
 - 3.2.2 *Moyens d'étude et résultats.*
 - 3.3 *Effets macroscopiques de l'élimination et de l'agglomération des défauts ponctuels.*
4. *Conclusion.*

CHAPITRE XV : INTERMÉTALLIQUES (P. Lesbats) page 483

1. *Formation.*
 - 1.1 *Lacunes de structure.*
 - 1.2 *Lacunes thermiques.*
 - 1.3 *Interstitiels.*
2. *Migration des lacunes.*
 - 2.1 *Élimination des lacunes après trempe.*
 - 2.2 *Expériences d'auto-diffusion.*
 - 2.3 *Mécanismes de diffusion.*
 - 2.4 *Effet isotopique.*
 - 2.5 *Nouveaux modèles pour la migration d'une lacune.*

CHAPITRE XVI : CARBURES, NITRURES (C.-H. de Novion) page 501

1. *Introduction.*
2. *Propriétés des monolacunes de métalloïde dans les carbures et nitrures.*
 - 2.1 *Structure électronique des lacunes de métalloïde.*
 - 2.2 *Influence des lacunes de métalloïde sur les propriétés physiques des matériaux.*
 - 2.3 *Propriétés élastiques des lacunes de métalloïde.*
 - 2.4 *Propriétés thermodynamiques des lacunes de métalloïde.*
 - 2.5 *Migration des lacunes de métalloïde.*
3. *Ordre et désordre des lacunes de métalloïde dans les carbures et nitrures.*
 - 3.1 *Surstructures.*
 - 3.2 *Étude de l'ordre à courte distance par résonance magnétique nucléaire.*
 - 3.3 *Étude de l'ordre à courte distance par diffusion diffuse d'électrons et de neutrons.*
 - 3.4 *Étude de l'ordre à courte distance par résonance Mössbauer.*
4. *Propriétés des interstitiels de carbone dans les monocarbures.*
5. *Propriétés des défauts ponctuels métalliques dans les carbures et nitrures.*
6. *Conclusion.*