



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Comptes Rendus Physique

www.sciencedirect.com

Physique de la matière condensée au XXI^e siècle : l'héritage de Jacques Friedel

Métallurgie fondamentale et métallurgie numérique : l'héritage de Jacques Friedel dans la théorie de la plasticité des métaux et alliages



Fundamental metallurgy and numerical metallurgy: The legacy of Jacques Friedel in the theory of plasticity of metals and alloy

Yves Bréchet

SIMAP, Grenoble-INP, Domaine universitaire, 38402 Saint-Martin-d'Hères cedex, France

I N F O A R T I C L E

Historique de l'article :

Disponible sur Internet le 21 décembre 2015

*Keywords :*Physical metallurgy
Dislocations
Plasticity
Simulations

R É S U M É

La contribution de Jacques Friedel à la théorie de la plasticité des métaux et alliages est mise en perspective avec son héritage. Les évolutions de la discipline vers la « métallurgie numérique » sont discutées, en les plaçant sous un éclairage « friedélien ».

© 2016 The Author. Publié par Elsevier Masson SAS pour l'Académie des sciences. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

A B S T R A C T

Jacques Friedel's contribution to the theory of plasticity is described, as well as the more recent developments it inspired. It involves the microscopic properties of dislocations as well as macroscopic effects. The evolution of fundamental metallurgy toward numerical metallurgy is discussed, and Friedel's point of view on numerical methods is analyzed.

© 2016 The Author. Publié par Elsevier Masson SAS pour l'Académie des sciences. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introduction : le contexte historique

La métallurgie est, à l'évidence, une discipline ouverte sur les applications. Jacques Friedel en était pleinement et entièrement convaincu, et toute sa vie il s'est intéressé aux aspects industriels de cette discipline, reprochant souvent avec vigueur aux industriels de se désengager de la recherche. Il a revendiqué pour la métallurgie physique le double statut de science de la nature et de science de l'ingénieur.

Si la métallurgie est une science de l'ingénieur, il n'en résulte pas pour autant qu'elle se réduit à « comprendre pour faire ». Empruntant ses concepts, ses méthodes, ses outils à la physique, à la chimie, à la mécanique, elle génère elle-même des concepts et des questions fondamentales qui lui sont propres et qui ne se poseraient pas, au moins pas de la même façon, au physicien, au chimiste et au mécanicien. Il s'agit donc d'une véritable discipline, soulevant des questions fondamentales

Adresse e-mail : yves.brechet@cea.fr.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.crhy.2015.12.004>

1631-0705/© 2016 The Author. Publié par Elsevier Masson SAS pour l'Académie des sciences. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

qui sont abordées tant du point de vue expérimental que théorique et, plus récemment, numérique. Jacques Friedel a été l'un des « pères fondateurs » de cette « métallurgie fondamentale ».

Avec son *alter ego* britannique Allan Cottrell, son mentor Nevil Mott, ses collègues Charles Frank et Frank Nabarro, il a pour ainsi dire fondé la métallurgie physique et mécanique, en l'adossant à une théorie électronique des métaux et alliages, ainsi qu'à une théorie des défauts. Cette naissance de la métallurgie mécanique entre 1940 et 1960 avait son pendant à la même époque, du côté de la genèse des microstructures, avec les travaux fondateurs de John Cahn et Mats Hillert. Ce domaine ne s'est pas autant développé en France, montrant comme par contraste l'importance de l'influence de Jacques Friedel sur le domaine. Cette double décennie a donc vu naître essentiellement tous les outils permettant de relier les « procédés de transformation », les « caractéristiques des microstructures » et les « propriétés macroscopiques ».

Dans une première partie de cette contribution, nous esquisserons un panorama des contributions de Jacques Friedel à la modélisation de la plasticité des métaux et alliages. Dans une seconde partie, nous dresserons le portrait de la « métallurgie numérique ».

2. La contribution de Jacques Friedel à la théorie de la plasticité des métaux

Si l'accès à la métallurgie a marqué un tournant de l'histoire de l'Humanité, c'est parce que les métaux sont des matériaux ductiles, c'est-à-dire malléables (par exemple, l'or, l'étain...) et que leur résistance à la déformation peut être modifiée par des traitements thermiques (bronzes) et thermomécaniques (aciers). Le passage de la chimie de la cohésion du métal à ses propriétés thermomécaniques n'est cependant pas direct. Du fait des particularités de la liaison métallique, le cristal métallique contient des défauts dans l'empilement atomique (défauts ponctuels – lacunes ou interstitiels, linéaires – dislocations, et surfaciques – joints de grains, parois diverses). Même si ces défauts sont en faible concentration, la grande mobilité des dislocations (défauts de croissance des métaux) et leur capacité à se multiplier sont à l'origine de la malléabilité des métaux ; la grande mobilité des défauts ponctuels (défauts d'équilibre) est à l'origine de la rapidité des cinétiques à l'état solide à des températures pas trop proches du point de fusion, etc. Ainsi, comprendre le comportement des métaux et de leurs alliages (par simple curiosité scientifique ou pour mieux en maîtriser l'élaboration et la mise en œuvre, ou pour en prédire l'évolution à long terme) implique plusieurs niveaux d'analyse profondément imbriqués : comment expliquer le comportement observé par la dynamique de la population des défauts qui en sont responsables ? Comment cette dynamique, qui est contrainte par la cristallinité des métaux (systèmes de glissement des dislocations, nature des sources et puits de défauts ponctuels...) et soumise aux sollicitations appliquées, est-elle *in fine* régie par les propriétés intrinsèques des défauts impliqués ? Comment ces propriétés dérivent-elles de la structure électronique du métal ou de l'alliage étudié ? Autant de questions de métallurgie fondamentale. La métallurgie fondamentale est donc par essence une démarche « multi-échelle », passant de la structure électronique au comportement macroscopique, par l'intermédiaire des défauts cristallins, de leur cinétique individuelle et de leur comportement collectif, en particulier de leur arrangement spatial : la microstructure. On peut dire que cette microstructure pilote le comportement du matériau : produire une microstructure voulue, en assurer la stabilité ou en prédire l'évolution en service sont les enjeux de la métallurgie pratique moderne.

Très tôt dans sa carrière scientifique, Jacques Friedel a perçu la nécessité de mener de front une recherche sur la cohésion électronique des métaux, et une analyse des propriétés individuelles et collectives des défauts. Son premier travail publié, sous la direction de son cousin Charles Crussard, portait sur l'énergie des joints de grains et sur une estimation, rudimentaire certes, mais capturant l'essentiel de la physique, de la dépendance de cette énergie avec la désorientation, à partir d'un calcul d'interactions entre atomes.

Mais le domaine où Jacques Friedel se tailla la part du lion est la théorie des dislocations et ses applications à la compréhension de la plasticité des métaux et alliages. Ses travaux personnels dans le domaine courent sur la période 1950–1966, et culminent dans le monumental traité *Dislocations*, qui reste une référence majeure dans la discipline. Mais son influence sur le domaine est perceptible jusqu'à l'extrême fin de sa vie. Nous allons brosser à la fois un tableau de ses contributions, mais aussi des développements ultérieurs.

Les dislocations sont un concept emblématique de la métallurgie physique : défauts dans les structures ordonnées, elles jouent un rôle fondamental dans leur comportement macroscopique. Ce sont des défauts hors équilibre thermodynamique (la composante entropique ne saurait stabiliser le terme énergétique), qui ne doivent leur présence et leur pérennité qu'à l'existence d'un frottement solide (Jacques Friedel le répétait inlassablement à ceux qui avaient tendance, par commodité, à oublier ce point fondamental). Enfin, elles sont associées à des champs élastiques à longue distance, ce qui rend encore plus délicat leur traitement dans le cadre d'un formalisme conduisant à minimiser une fonctionnelle énergétique. C'est là le cœur du désaccord entre le formalisme « thermodynamique » de la plasticité proposé par la mécanique et l'interprétation physique des phénomènes sous-jacents.

Les dislocations sont des défauts associés à des champs continus, mais dans une structure cristalline : se pose alors la question de l'influence du cœur des dislocations et, en particulier, de sa structure atomique, à la fois sur leur mobilité, sur le choix du plan de glissement et sur leurs interactions à courte distances (jonctions). Jacques Friedel encouragea de toute son influence, qui était grande, les études sur les structures électroniques des cœurs de dislocation, études qui permirent à Bernard Legrand, dans les années 1980, de comprendre le passage des plans de glissement basaux ou pyramidaux dans les métaux de structure hexagonale. L'héritage de ces approches permet aujourd'hui de comprendre les cœurs dissociés dans les métaux cubiques centrés, point essentiel pour la compréhension du comportement des aciers ferritiques. Toujours en ce qui concerne les structures de cœur des dislocations, la situation, malgré des travaux importants et des avancées récentes,

demande des développements nouveaux : cela concerne le vieux problème de la plasticité des structures cubiques centrées ou hexagonales compactes. En particulier, la succession de divers états du cœur des dislocations en cours de migration, conduisant à des mouvements saccadés, nécessite des études approfondies. Dans ses dernières années, Friedel suivait de près les travaux de Daniel Caillard à ce sujet.

Contrairement à ce qu'on pourrait croire, le comportement des dislocations et autres défauts linéaires en tant qu'entités individuelles est loin d'être parfaitement compris. La théorie élastique des dislocations est établie de longue date et les améliorations de ce point de vue se font « à la marge ». On a vu toutefois, dans les récentes années, en particulier par des traitements par simulation numérique à l'échelle atomique, l'incroyable robustesse des approches « continues » pour le traitement de problèmes qui pourraient relever davantage de la structure fine du cœur des dislocations. Les travaux de l'école de Friedel sur les jonctions, commençant par la théorie de Saada–Friedel et s'achevant par les simulations numériques à l'échelle atomique de Rodney–Fivel, ainsi que le traitement du durcissement latent par Devincré–Kubin sont emblématiques de cette variété d'approches.

La compréhension du comportement des dislocations dans les alliages métalliques est loin de ce degré d'achèvement. Si le changement de plan de glissement des dislocations vis, connu sous le nom de « glissement dévié », est bien décrit dans les métaux purs par le modèle classique de Escaig–Friedel, l'influence de tel ou tel élément d'alliage sur des grandeurs « élémentaires », comme les distances d'annihilation ou la facilité du glissement dévié, est souvent traitée de façon purement empirique. Il en résulte une compréhension très imparfaite, quand on s'intéresse à d'autres problèmes que la simple limite d'élasticité, de l'effet des éléments d'alliage sur le comportement mécanique.

Sur le problème même de la limite d'élasticité des solutions solides, Jacques Friedel apporta une contribution essentielle, en proposant une solution particulièrement élégante au problème d'ancrage collectif : la force d'ancrage d'une dislocation dans un potentiel d'ancrage issu d'une distribution de centres de distorsion du réseau cristallin (atomes de soluté, précipités...) dépend non seulement de la force individuelle d'interaction, mais aussi du nombre de points d'ancrage le long de la ligne de dislocations. Entre les deux cas limites évidents d'une raideur de ligne infinie et d'une raideur de ligne nulle, qui peuvent être traités purement géométriquement, la situation réaliste résulte d'une compétition entre le gain énergétique obtenu en se « rapprochant » des points d'ancrage, et le coût associé à l'allongement de la ligne. La solution proposée par Friedel (dite « statistique de Friedel ») dans son traité des dislocations a ouvert la voie aux théories du durcissement structural associé à des précipitations cohérentes avec le réseau. Les idées issues de cette approche ont permis de développer les théories d'ancrage des réseaux de vortex, des ondes de densité de charge (Friedel signa dans les années 1990 un article avec Denis Feinberg sur ce sujet, témoignant de la persistance de son intérêt pour les problèmes d'ancrage collectif). Il semble bien que l'image classique – une ligne élastique forcée à se déplacer dans un paysage de potentiel « gelé », doive être nuancée quand il s'agit du durcissement de solution solide : au niveau atomique, des simulations en dynamique moléculaire montrent – ce qui est assez intuitif – que les atomes de soluté ne ressentent pas « passivement » le passage de la dislocation et que la composante de modification de l'environnement chimique (en mettant en premiers voisins des atomes fortement répulsifs par exemple) ne puisse être passée sous silence. Une mention particulière doit être faite concernant les interactions des dislocations avec l'hydrogène : c'est un problème important par ses conséquences pratiques (fragilisation par l'hydrogène) comme du point de vue fondamental (l'hydrogène, diffusant très rapidement, « accompagne » les dislocations dans leur mouvement). La variété et les contradictions de la littérature sur les effets de l'hydrogène demandent des études de fond.

Le comportement des dislocations dans des milieux « confinés » comme les multicouches métalliques est une question ancienne qui a été remise au goût du jour par l'émergence des structures à très petite échelle dans la microélectronique (les « puits quantiques », par exemple), mais aussi par la possibilité d'effectuer des essais sur des échantillons de taille très faible (*nanopillars* en particulier), ou de développer des structures nanocristallines. Cette thématique fait actuellement l'objet d'une importante activité, aussi bien du point de vue expérimental que du point de vue des simulations numériques, mais elle est aussi à l'origine de controverses très vigoureuses. Jacques Friedel s'y était intéressé dans ses dernières années, et il rappelait avec justesse le rôle essentiel des interfaces dans de telles situations.

Jacques Friedel s'est très tôt intéressé au comportement collectif des dislocations, en particulier au cours d'un recuit. On lui doit la première dérivation simple de la cinétique de restauration d'un matériau déformé, cinétique logarithmique. Il était plus sceptique sur la capacité de la théorie des dislocations à rendre compte de l'écroutissement des métaux (ce qui était leur objectif initial) et il partageait ce scepticisme avec Alan Cottrell. Les modèles multiples de « variables internes » décrivant la dynamique d'une population de dislocations lui semblaient plus, dans le meilleur des cas, une « phénoménologie intelligente » qu'une véritable théorie de l'écroutissement.

Ce bref panorama des contributions de Jacques Friedel à la théorie de la plasticité des métaux n'épuise pas tous ses centres d'intérêt dans le domaine, mais s'efforce de donner la filiation directe entre ses contributions propres et les études qu'elles ont générées. Ces développements théoriques s'appuyaient sur une expérimentation simple sur des *matériaux modèles*, bénéficiant de *progrès instrumentaux exceptionnels* tels que la diffusion des rayons X (puis des neutrons) ou la microscopie électronique (en transmission et en réflexion). Les modèles développés par Jacques Friedel étaient analytiques : il aimait à parler des vertus de la caricature, du modèle qui capture l'essentiel de la physique, pour donner le premier ordre du phénomène. Son analyse de la cohésion des métaux au travers de la série des métaux de transition, de l'ancrage par une population de précipités, du durcissement par une forêt de dislocations, de la formation d'hélices par l'absorption de lacunes par des dislocations sont autant d'illustrations du « style Friedel » dans le domaine de la métallurgie physique.

Les dernières décennies de la vie de Jacques Friedel ont vu émerger ce que l'on peut appeler « la métallurgie numérique ». Par goût, Friedel avait une nette préférence pour les modèles analytiques, mais il suivait avec beaucoup d'intérêt le développement de ces approches, rendu possible par la puissance grandissante des ordinateurs. La lucidité du regard qu'il portait sur ces nouveaux outils mérite de rester dans nos mémoires, comme une sage recommandation de prudence.

3. Les simulations numériques et les dislocations

Le développement relativement récent d'une « métallurgie numérique » nous a paru mériter une discussion spécifique, car elle modifie de façon substantielle le paysage de la discipline, et appelait chez Jacques Friedel des commentaires plus nuancés que ceux qui lui ont été prêtés. Je crois qu'il faisait très clairement la part des choses entre un choix esthétique qui le poussait aux modèles simples et analytiques, un appel à la prudence pour ne pas se laisser griser par la puissance des ordinateurs, et enfin une idée claire de leur apport en tant que moyens pour tester des idées. Le développement des simulations numériques est particulièrement spectaculaire dans le domaine des transformations de phase, qui n'est pas celui de prédilection de Jacques Friedel. Il suivait toutefois avec intérêt les développements des simulations à l'échelle atomistique, en particulier dans le domaine de la métallurgie nucléaire. De même, les simulations de structures de cœur des dislocations, calculées avec des potentiels de plus en plus réalistes, lui semblaient intéressantes, et répondaient en quelque sorte à ses premières interrogations sur la structure des joints de grains. Mais il regardait avec plus de scepticisme la simulation du comportement collectif des dislocations, non pas qu'il doutât de l'intérêt de la mener à bien, mais il craignait que, par commodité, on s'affranchît de composantes essentielles du problème physique, comme le réseau de Frank comme point d'ancrage des sources, et les conditions de frottement solide agissant sur les dislocations. Dans une certaine mesure, c'est un peu malgré lui que la simulation numérique des populations de dislocations est aujourd'hui un sujet très actif au niveau international, et « l'école de Friedel » y joue un rôle majeur. Mais c'est aussi grâce à lui qu'elle ne s'est pas laissée emporter par l'élan de l'enthousiasme et qu'elle a gardé les ingrédients essentiels « à bord », quelque encombrants qu'ils soient !

Reprenons deux problèmes fondamentaux de la théorie des dislocations sur lesquels les simulations numériques ont permis un regard nouveau : les structures auto-organisées et l'anisotropie des matrices d'érouissage. L'analyse que Jacques Friedel faisait de ces simulations est emblématique de sa vision du rôle des simulations numériques.

Au cours d'une déformation importante (comme en laminage ou en forgeage) les densités de dislocations augmentent considérablement (de 10^{12} à 10^{16} m^{-2}). Dans le même temps, leur répartition dans l'espace cesse d'être homogène : elles s'organisent souvent en « cellules », dont la taille caractéristique est liée à la contrainte d'écoulement. Cette organisation est associée à un écrantage mutuel du champ des dislocations et à une diminution de leur énergie de ligne apparente. Elle est aussi associée au développement de désorientations locales conduisant à la formation de « sous-grains ». Ces organisations de dislocations peuvent avoir des aspects très réguliers (c'est ce qu'on observe dans les structures résultant de la fatigue de monocristaux, très étudiées dans les années 1970–1980 ; elles peuvent aussi présenter différents niveaux d'organisation (comme ce qui est observé après laminage, avec des « bandes de cellules »). Cette « auto-organisation » des dislocations a été expérimentalement étudiée dans de nombreux systèmes métalliques. Elle a conduit à une littérature de modélisation très vaste et variée ; elle reste pour autant mystérieuse. Le problème est extrêmement difficile : les dislocations sont des défauts hors d'équilibre ; elles sont soumises à une friction de réseau ; elles interagissent à longue distance ; elles sont non conservatives, peuvent s'annihiler par paires ou se multiplier à partir de sources. Ces spécificités du problème ont disqualifié successivement toutes les interprétations proposées (minimisation d'un potentiel thermodynamique, instabilité de type réaction/diffusion, percolation dans un réseau d'obstacles...). Au cours des vingt dernières années, des simulations numériques du comportement collectif des dislocations ont vu le jour ; l'école française a été pionnière dans ce domaine (Bréchet, Canova, Kubin) et demeure très en pointe (Kubin, Devincere, Fivel, Verdier). Ces simulations ont permis d'identifier certains des ingrédients indispensables à la formation de telles structures (par exemple le glissement dévié, ce qui n'était pas évident *a priori*, ou la nécessité de ne pas tronquer artificiellement les interactions à longue distance) ; elles ont permis de simuler des « débuts de formation de structures ordonnées », mais elles sont encore trop limitées en taille de « boîte de simulation » et en déformation accessible pour pouvoir réellement simuler la formation des cellules.

Les mêmes simulations sont aussi intéressantes pour relier les caractéristiques des interactions et jonctions entre dislocations au comportement macroscopique d'érouissage du monocristal, offrant un exemple assez rare de « changement d'échelle » réussi avec une analyse détaillée et inédite de l'anisotropie de comportement.

Un autre exemple d'application de ces simulations est la modélisation de l'indentation à partir de la dynamique des dislocations, en utilisant des approches au niveau atomique pour obtenir un critère de germination de boucles sous l'indenteur. Ces simulations sont tout particulièrement intéressantes pour analyser la nano-indentation dans des matériaux confinés, ou pour prendre en compte des aspects microscopiques, comme la présence d'obstacles au mouvement des dislocations.

Ainsi était Jacques Friedel vis-à-vis des simulations numériques : il n'était pas spontanément attiré par ce mode de compréhension du réel, mais il savait en discerner la valeur, comme moyen pour tester des hypothèses par leurs conséquences. Sans jamais pour autant se laisser leurrer par la production de jolies images qui seraient une fin en soi.

4. Conclusion : vers une métallurgie numérique ?

Le recours de la métallurgie au numérique a profondément changé de nature au cours des dernières décennies. Une discipline nouvelle s'est développée aux côtés du calcul traditionnel de grandeurs théoriques (thermodynamiques et ciné-

tiques, mécaniques ou électroniques) et de l'évaluation numérique du résultat de théories diverses. Du fait de l'explosion de la puissance des ordinateurs, on peut aujourd'hui *simuler la dynamique de la microstructure* d'un métal sous des sollicitations diverses (ou en cours de solidification) et en *déduire* le comportement du matériau : celui-ci est décrit par ses caractéristiques élémentaires à l'échelle appropriée. Il s'agit donc d'études de comportements de *matériaux virtuels*, parfois (mais pas toujours !) modèles de matériaux réels. L'étude numérique de matériaux virtuels connaît un développement extraordinaire, qui attire vers la métallurgie des esprits brillants, souvent familiers de la physique moderne, et qui ouvre des voies entièrement nouvelles pour aborder, entre autres, le comportement de métaux et alliages complexes, en conditions extrêmes.

Mais la métallurgie numérique ne peut pas remplacer la métallurgie expérimentale. En revanche, elle peut suggérer des expériences nouvelles ou des paramètres pertinents à mesurer. La métallurgie numérique n'est pas, non plus, la métallurgie théorique ; les simulations révèlent des comportements dont on peut rechercher s'ils sont explicables par les théories existantes ou s'ils appellent des développements originaux ; certaines simulations peuvent être considérées comme des expériences de pensée très sophistiquées.

Il n'en reste pas moins vrai que les progrès de la métallurgie reposent dorénavant sur trois types d'activités : expérimentales, numériques et théoriques. Chacun d'eux est d'une telle technicité que très rares sont les individus qui maîtrisent ces trois compétences. Une attention particulière devrait être portée à l'enseignement de ces trois volets pour favoriser la communication entre chercheurs et équipes aux compétences complémentaires. La complexité même des processus à l'origine du comportement d'un métal impose que l'on ne perde pas de vue l'intérêt et l'efficacité des « petits modèles » qui donnent parfois l'explication d'ordre zéro des phénomènes observés.

Ceci nous amène à conclure cet article en rappelant l'attachement profond de Jacques Friedel à l'alliance enseignement-recherche. Ainsi soutint-il pleinement les « écoles de métallurgie physique » qu'il eut le bonheur de voir renaître, et qui peuvent de nouveau irriguer toute une communauté encore riche de problèmes et fertile en méthodes nouvelles.

5. Bibliographie

Le parti de cet article ayant été de présenter l'héritage de Jacques Friedel dans le domaine de la théorie de la plasticité des métaux et alliages, la bibliographie qui suit est une voie d'entrée vers une documentation plus détaillée.

Sur l'ensemble de la carrière scientifique de Jacques Friedel, on pourra consulter avec profit la notice nécrologique de la Royal Society, qui montre à quel point la métallurgie physique a été un intérêt constant pour lui, même si les grands travaux sur les dislocations ont été publiés dans une période limitée. Le site de la Royal Society offre comme matériau complémentaire la liste complète des publications de Jacques Friedel :

A.P. Sutton, O. Hardouin-Duparc, *Jacques Friedel. 11 February 1921–27 August 2014*, Biogr. Mem. Fell. R. Soc. 61 (2015) 123–143.

Les mémoires de Jacques Friedel donnent une perspective historique sur cette période de « construction de la physique des matériaux solides », et sur toute la dynastie Friedel :

J. Friedel, *Graine de Mandarin*, Éditions Odile Jacob, 1994.

L'essentiel des résultats originaux de Friedel et de son école sur la théorie des dislocations se trouve dans son livre de 1964, qui reste un classique du domaine. Il donne les références des articles originaux avec G. Saada, B. Escaig, J. Grilhé :

J. Friedel, *Dislocations*, 1964, Oxford University Press, Oxford, UK.

Les développements des vingt dernières années dans le domaine de la simulation numérique des populations de dislocations ont été magistralement synthétisés par le livre de L. Kubin :

L. Kubin, *Dislocations, Mesoscale, Simulation and Plastic Flow*, Oxford University Press, Oxford, UK, 2013.

Enfin, les mémoires d'habilitation à diriger des recherches sont des occasions de faire le point sur un domaine et d'en dégager les perspectives. C'est un juste retour des choses, puisque Friedel fut à l'origine de ce diplôme après la disparition de la thèse d'État. Ces mémoires sont trop peu connus. Les habilitations de B. Devincre, M. Fivel, D. Rodney et M. Verdier sont ainsi une très efficace voie d'entrée vers les développements récents du domaine avec des bibliographies quasi exhaustives :

B. Devincre, *Étude de la plasticité des solides cristallins par dynamique des dislocations à l'échelle mesoscopique*, mémoire d'habilitation, université Paris-11, 2005.

D. Rodney, *Apport de la simulation à la physique de la déformation*, mémoire d'habilitation, Grenoble-INP, 2006.

M. Fivel, *Simulation de la plasticité cristalline et changement d'échelle*, mémoire d'habilitation, université Grenoble-Alpes, 2008.

M. Verdier, *Effets de taille sur les propriétés mécaniques, liés à des confinements microstructuraux et dimensionnels*, mémoire d'habilitation, université Grenoble-Alpes, 2012.