
**Evolution des déformations/contraintes dans la cémentite -
approche directe**

Sommaire

IV. Evolution des déformations/contraintes dans la cémentite - approche directe.....	103
Introduction	105
IV.1. Analyse par diffraction des neutrons	106
IV.2. Mesure des déformations élastiques par rayonnement synchrotron.....	108
IV.2.1 Acier 2C40.....	110
IV.2.2 Acier 16MND5	115
IV.2.3 Détermination des coefficients de Poisson	119
IV.3. Distribution des contraintes par phase.....	121
IV.3.1 Estimation du module d'Young relatif à chaque phase	122
IV.3.2 Evolution des contraintes dans la cémentite	123
IV.3.3 Approche numérique.....	127
IV.4. Discussion.....	132

Introduction

Les essais de traction in situ effectués par DRX de laboratoire ont permis de déterminer indirectement les contraintes dans la cémentite. Ces estimations présentées au chapitre précédent ont souligné la nécessité d'analyser directement ces contraintes dans la phase dure.

L'utilisation de la loi des mélanges revient à considérer la fraction volumique comme seul paramètre microstructural pertinent. L'analyse présentée dans le chapitre précédent a montré que la taille et la répartition des précipités de cémentite jouent également un rôle primordial. Une détermination directe de l'état de contrainte dans cette phase est donc nécessaire. La fraction volumique de cémentite étant très faible, les mesures ont été réalisées en ayant recours aux grands instruments.

Ce chapitre est consacré à la détermination de la distribution des contraintes internes dans les deux phases présentes dans les aciers bainitiques étudiés. Nous nous sommes intéressés tout particulièrement au comportement de la cémentite. Les résultats des analyses de déformations/contraintes réalisées « in situ », soit directement sous charge, sont ici effectués par diffraction des neutrons et en utilisant le rayonnement synchrotron.

IV.1. Analyse par diffraction des neutrons

Les différents travaux effectués afin d'étudier directement les propriétés de la cémentite présente dans les aciers faiblement alliés recommandent d'utiliser la diffraction des neutrons [(Bonner, 1997)] ou le rayonnement synchrotron [(Belassel, 1994)] : ces instruments permettent d'augmenter le volume diffractant de la cémentite, comme expliqué dans le chapitre II, et par conséquent offrent la possibilité d'analyser les contraintes de manière directe et avec précision dans la cémentite, contrairement à la DRX de laboratoire où le volume diffractant est trop faible.

Nous avons utilisé la diffraction des neutrons dans nos travaux afin de déterminer le profil des contraintes dans la cémentite pour les deux aciers étudiés. Les analyses ont été effectuées sur la ligne D20. Cette ligne, située à la sortie du réacteur, dispose d'un flux de neutrons très intense adapté à l'étude des phases de faible fraction volumique. De plus, afin d'optimiser nos chances de réussite, nous avons décidé de travailler sur l'acier 2C40, car il contient une fraction volumique de cémentite trois fois plus importante que celle contenue dans l'acier de cuve.

Etant donné le temps de faisceau accordé pour cette expérience (24 heures) et le temps nécessaire pour chaque mesure (8 heures/mesure), l'accent a été mis sur l'état initial et seulement deux charges (2 % et 8 %), l'objectif étant d'avoir au moins deux valeurs de contrainte dans la cémentite au cours d'un essai de traction. Un exemple de diffractogramme obtenu à l'état initial est présenté sur la figure IV-1 ; la longueur d'onde utilisée est 1,86739 Å. Bien que certaines familles de plans de cémentite diffractent à des positions 2θ très proches, on arrive tout de même à isoler un certain nombre de pics. A l'état initial (sans chargement), le spectre montre qu'il est possible d'effectuer des analyses pour chaque phase (ferrite et cémentite), sur plusieurs plans {hkl} (tableau IV-1).

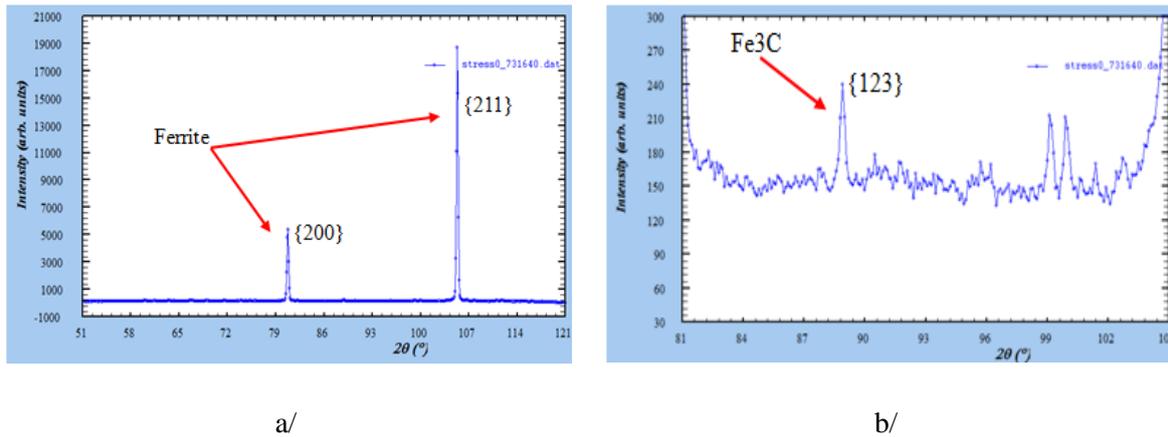


Figure IV-1. Diffractogramme obtenu sur l'acier 2C40 à l'état non chargé (ligne D20) -
a/ Ferrite - b/ Cémentite

Plans {hkl} - ferrite	Position 2θ °	Plans {hkl} - cémentite	Position 2θ °
{200}	81,44	{122}	63,96
{211}	106,07	{123}	89,23
{220}	134,24	{401}	89,29
		{133}	100,27
		{332}	106,91
		{341}	107,70

Tableau IV-1. Familles de plans {hkl} sélectionnées pour les deux phases - acier 2C40

Après l'acquisition des données, lorsqu'on superpose l'état initial et les deux niveaux de chargement (0 %, 2 % et 8 %) comme le montre la figure IV-2, on peut observer le déplacement des pics sous l'effet de la contrainte pour les déformations appliquées ε_0 , ε_1 , et ε_2 . Même si ce déplacement est visible, la définition de chaque pic de cémentite n'est pas « optimale ». La résolution instrumentale de la ligne D20 ne permet pas en effet d'avoir plus de 3 ou 4 points de mesure pour chaque pic ; le traitement de chaque pic est ainsi rendu délicat. De plus, pour la déformation appliquée ε_2 , le pic est totalement atténué.

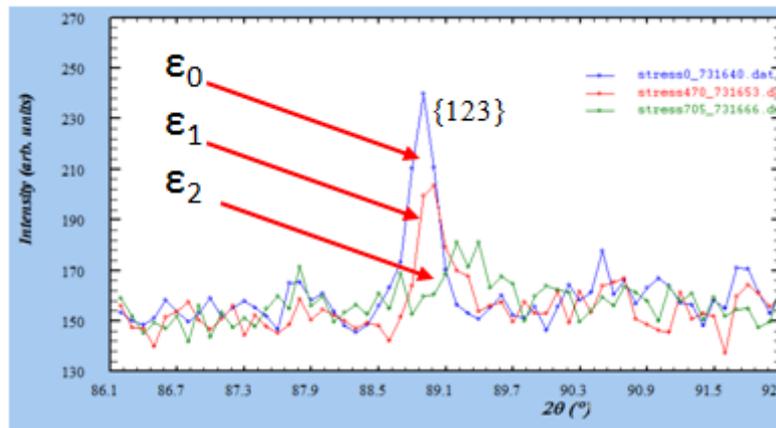


Figure IV-2. Diffractogrammes obtenus pour l'état initial et deux déformations appliquées - acier 2C40

La campagne d'essais réalisée sur la ligne D20 ne nous a pas permis d'estimer un niveau de contrainte dans la cémentite. A ce stade, la nécessité d'utiliser un autre type de rayonnement présentant un flux plus important est mise en évidence.

IV.2. Mesure des déformations élastiques par rayonnement synchrotron

Les rayons X de haute résolution délivrés par la ligne ID11 du synchrotron (ESRF de Grenoble) nous ont permis de déterminer l'évolution des déformations/contraintes sous chargement mécanique dans les deux phases présentes dans les aciers étudiés et notamment dans la cémentite, malgré sa faible fraction volumique : les pics obtenus sont suffisamment intenses.

Afin de mettre en évidence le niveau maximal de contrainte atteint par la cémentite lors du chargement, les points de mesure ont été choisis dans le domaine plastique et les points au-delà de la résistance mécanique R_m , pendant la striction, ne sont pas pris en considération. Les mesures des déformations élastiques ont été réalisées in situ (pendant le chargement) à température ambiante et à -150 °C . La figure IV-3 et le tableau IV-2 mettent en évidence les points de mesure relatifs à chaque acier : les déformations appliquées maximales (charge maximale) sont différentes pour chaque cas de chargement.

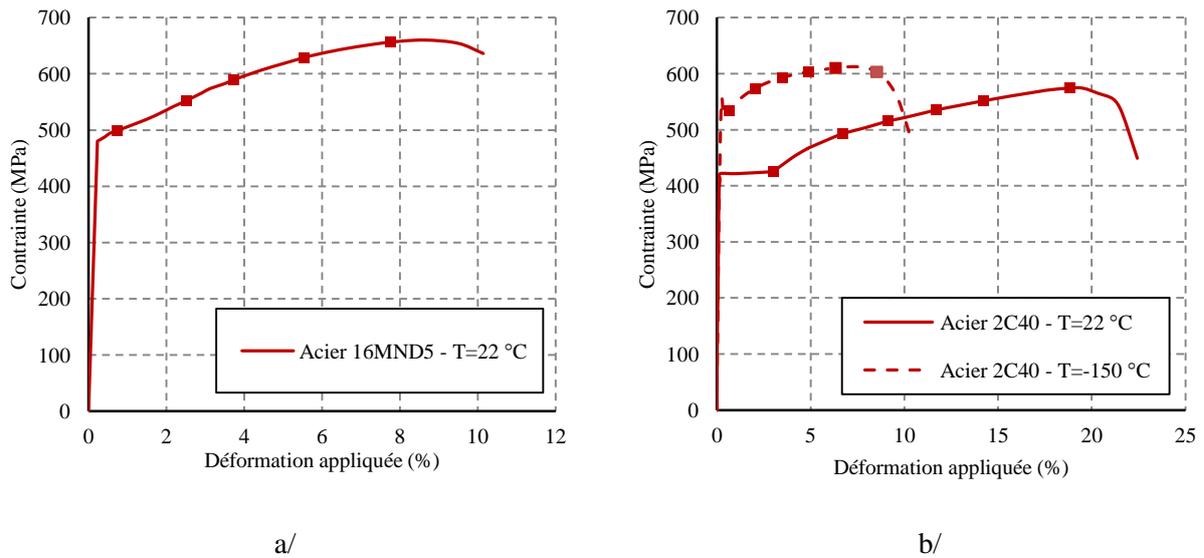


Figure IV-3. Points de mesure relatifs à chaque acier - a/ Acier 16MND5 - b/ Acier 2C40

	Acier 16MND5	Acier 2C40	Acier 2C40
	<u>T=22 °C</u>	<u>T=22 °C</u>	<u>T=-150 °C</u>
ε %	0,75	3	0,6
	2,5	5,7	2
	3,75	8,1	3,5
	5,5	10,4	5
	7,75	14,3	6,3
	**	18,1	7,7

Tableau IV-2. Déformations appliquées pour les différents points analysés au rayonnement synchrotron - aciers 16MND5 et 2C40

Les conditions expérimentales appliquées pour la réalisation de ce travail ainsi que la méthode adoptée pour l'exploitation des clichés de diffraction ont été détaillées dans le chapitre II. Les résultats obtenus sont présentés dans les paragraphes suivants.

IV.2.1 Acier 2C40

L'acquisition des clichés de diffraction a été réalisée par la méthode des anneaux (anneaux de Debye Scherrer). Le traitement des anneaux permet d'obtenir l'évolution des déformations élastiques dans le sens de la traction $\varepsilon_{11}^{\{hkl\}}$ et le sens transverse $\varepsilon_{22}^{\{hkl\}}$ pour les deux phases en utilisant la loi de Bragg (voir chapitre II). Les familles de plans considérées sont les suivantes : {110} pour la ferrite et {122} pour la cémentite.

a) T=22 °C

La superposition des profils des pics de diffraction enregistrés pour les différentes déformations macroscopiques appliquées montre un déplacement des pics sous chargement mécanique pour les deux phases. L'accent est mis sur les pics de la cémentite car il s'agit de la phase visée par ces travaux (figure IV-4).

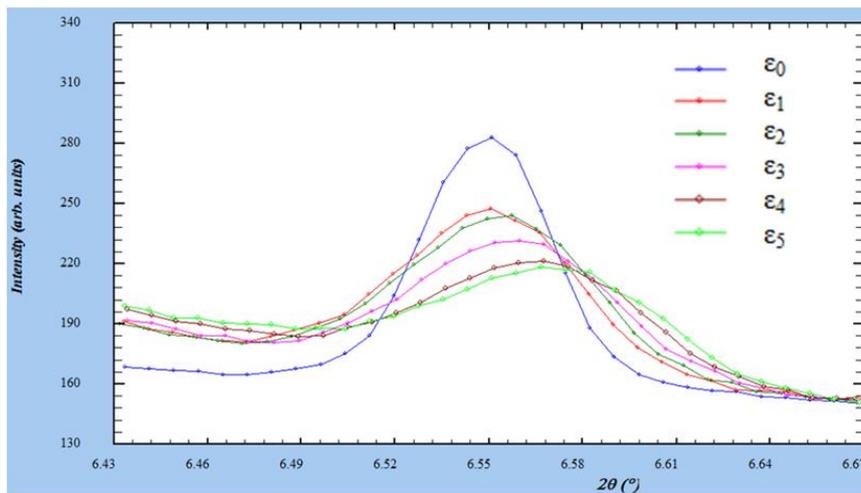


Figure IV-4. Déplacement et élargissement des pics {122} de la cémentite à T=22 °C sous chargement - acier 2C40

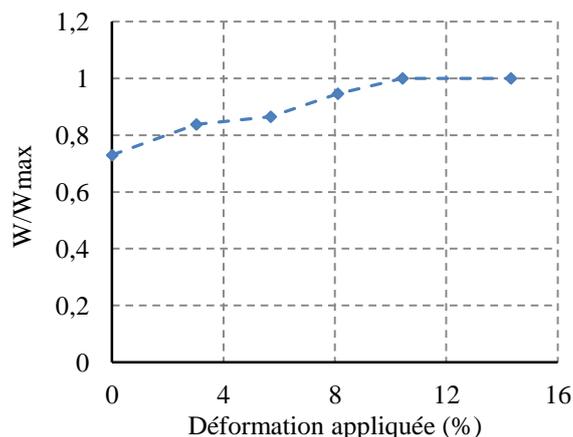


Figure IV-5. Elargissement des pics de diffraction de la cémentite au cours du chargement à T=22 °C

Sur la Figure IV-5, la variation de la largeur W des pics est représentée. Un élargissement de ces derniers est observé. Il peut traduire la présence d'une densité de dislocations et/ou une hétérogénéité des déformations au sein de cette phase [(Weisser, 2011)] : différentes déformations pour les particules présentes dans le volume diffractant.

Considérons à présent les courbes des déformations calculées $\epsilon_{11}^{\{hkl\}}$ et $\epsilon_{22}^{\{hkl\}}$ relatives à chaque phase, tracées en fonction des déformations macroscopiques appliquées (Figure IV-6). L'incertitude de mesure est directement liée à la qualité des pics obtenus : elle est de l'ordre de $\pm 0,05 \cdot 10^{-3}$ pour la ferrite et $\pm 0,4 \cdot 10^{-3}$ pour la cémentite.

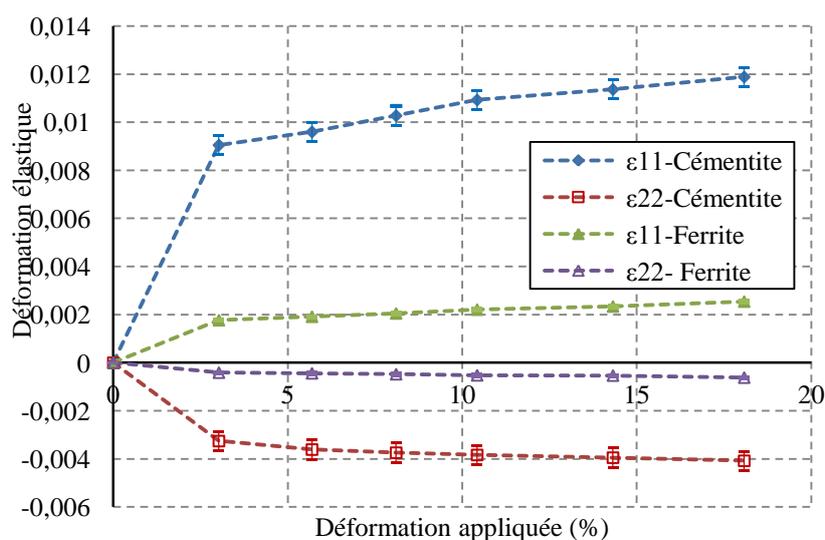


Figure IV-6. Evolution des déformations $\epsilon_{11}^{\{hkl\}}$ et $\epsilon_{22}^{\{hkl\}}$ dans la ferrite et la cémentite à 22 °C sous chargement de traction - acier 2C40

Les résultats montrent que les déformations $\varepsilon_{11}^{\{hkl\}}$ et $\varepsilon_{22}^{\{hkl\}}$ du réseau cristallin augmentent avec la déformation appliquée dans les deux directions et pour les deux phases. Pour les plans $\{110\}$ de la ferrite, l'augmentation des déformations est régulière jusqu'à la fin du chargement. L'allure de la courbe dans le sens transverse est comparable au sens de traction. Toutefois, les déformations mesurées sont moins importantes, un rapport de l'ordre de 0,25 est relevé. Pour la cémentite, on constate que les déformations élastiques calculées sont beaucoup plus élevées que celles de la ferrite : un facteur de l'ordre de 4 est relevé quand la charge est maximale.

En observant l'allure des courbes, on remarque qu'une fois de plus, le comportement purement élastique de la cémentite est difficilement mis en évidence à partir du moment où c'est la déformation macroscopique appliquée qui est tracée en abscisses. Si les déformations des plans réticulaires représentées dans la figure IV-6 sont relatives à chacune des deux phases considérées séparément, les déformations macroscopiques appliquées sont une moyenne des déformations appliquées aux deux phases et mettent en évidence une accommodation plastique de la déformation par la ferrite dès l'entrée en plasticité.

Le tableau IV-3 résume les valeurs des déformations élastiques minimales et maximales dans les sens axial et transverse et pour les deux phases.

Ferrite ($\pm 0,05 \cdot 10^{-3}$)	$\varepsilon_{11}^{\{110\}} \text{ min}$	$\varepsilon_{11}^{\{110\}} \text{ max}$	$\varepsilon_{22}^{\{110\}} \text{ min}$	$\varepsilon_{22}^{\{110\}} \text{ max}$
	$1,75 \cdot 10^{-3}$	$2,55 \cdot 10^{-3}$	$-0,45 \cdot 10^{-3}$	$-0,65 \cdot 10^{-3}$
Cémentite ($\pm 0,4 \cdot 10^{-3}$)	$\varepsilon_{11}^{\{122\}} \text{ min}$	$\varepsilon_{11}^{\{122\}} \text{ max}$	$\varepsilon_{22}^{\{122\}} \text{ min}$	$\varepsilon_{22}^{\{122\}} \text{ max}$
	$9,0 \cdot 10^{-3}$	$11,2 \cdot 10^{-3}$	$-3,5 \cdot 10^{-3}$	$-4,0 \cdot 10^{-3}$

Tableau IV-3. Déformations élastiques minimales et maximales atteintes à T=22 °C - acier 2C40

En comparaison avec les travaux de Young et al. [(Young, 2007)] et ceux de Weisser et al. [(Weisser, 2011)], les valeurs des déformations élastiques mesurées lors de notre campagne d'essais s'avèrent du même ordre de grandeur que celles annoncées dans la littérature. Cela confirme le choix judicieux des conditions expérimentales appliquées.

b) T=-150 °C

Pour la campagne d'essais effectuée sur l'acier 2C40 à basse température (-150 °C), la formation des cristaux de glace sur les éprouvettes pendant le refroidissement a rendu le traitement des clichés de diffraction encore plus difficile en comparaison avec les clichés obtenus à température ambiante. Les résultats obtenus sont présentés ci-dessous (figure IV-7).

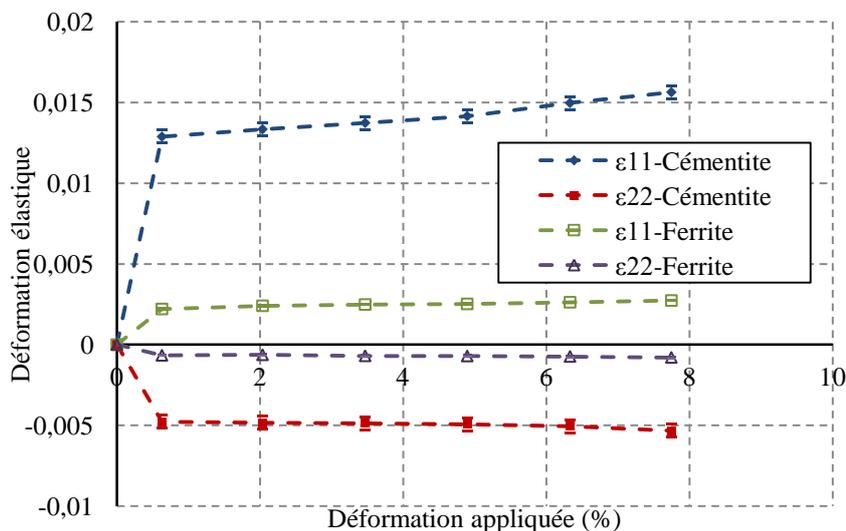


Figure IV-7. Evolution des composantes $\epsilon_{11}^{\{hkl\}}$ et $\epsilon_{22}^{\{hkl\}}$ dans la ferrite et la cémentite sous chargement à -150 °C - acier 2C40

L'allure des courbes obtenues dans le sens de traction et le sens transverse reste comparable à celle obtenue à 22 °C. L'effet de la baisse de la température se traduit par des valeurs de déformations élastiques $\epsilon_{11}^{\{hkl\}}$ et $\epsilon_{22}^{\{hkl\}}$ plus importantes. Les valeurs minimales et maximales atteintes dans les deux phases de l'acier sont récapitulées dans le tableau IV-4.

Ferrite ($\pm 0,05 \cdot 10^{-3}$)	$\epsilon_{11}^{\{110\}} \text{ min}$	$\epsilon_{11}^{\{110\}} \text{ max}$	$\epsilon_{22}^{\{110\}} \text{ min}$	$\epsilon_{22}^{\{110\}} \text{ max}$
	$2,20 \cdot 10^{-3}$	$2,75 \cdot 10^{-3}$	$-0,65 \cdot 10^{-3}$	$-0,80 \cdot 10^{-3}$
Cémentite ($\pm 0,4 \cdot 10^{-3}$)	$\epsilon_{11}^{\{122\}} \text{ min}$	$\epsilon_{11}^{\{122\}} \text{ max}$	$\epsilon_{22}^{\{122\}} \text{ min}$	$\epsilon_{22}^{\{122\}} \text{ max}$
	$13,0 \cdot 10^{-3}$	$15,5 \cdot 10^{-3}$	$-5,0 \cdot 10^{-3}$	$-5,5 \cdot 10^{-3}$

Tableau IV-4. Déformations élastiques minimales et maximales atteintes à T=-150 °C - acier 2C40

Les déformations élastiques obtenues dans le sens de traction pour chacune des phases ont été tracées dans la figure IV-8 en fonction de la déformation appliquée. Il est ainsi possible de comparer l'évolution du comportement des deux phases de l'acier 2C40 quand la température passe de 22 °C à -150 °C.

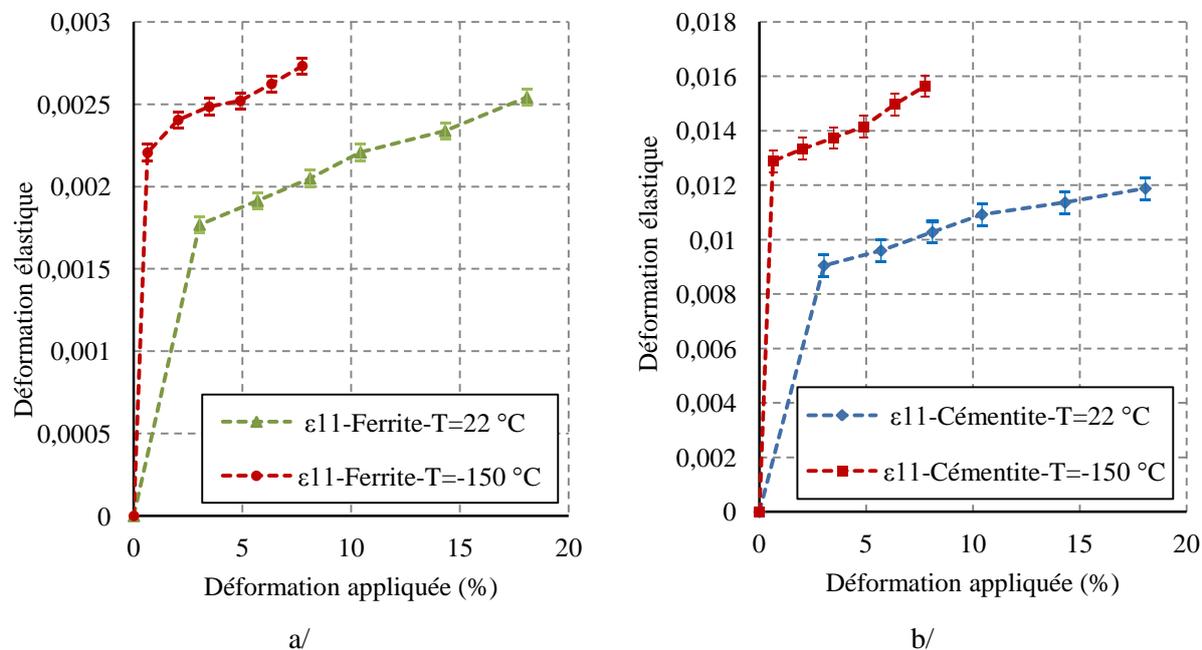


Figure IV-8. Evolution des déformations $\epsilon_{11}^{\{hkl\}}$ dans l'acier 2C40 -
a/ Ferrite - b/ Cémentite

Dans le sens de traction, une augmentation de l'ordre de 10 % est enregistrée au niveau des déformations élastiques $\epsilon_{11}^{\{hkl\}}$ dans la phase ferritique, à déformation appliquée maximale. Pour la cémentite, l'augmentation est plus importante : elle est d'environ 30 %. Dans le sens transverse, l'augmentation est de l'ordre de 20 % et 45 % pour la ferrite et la cémentite, respectivement. Le tableau IV-5 résume les déformations élastiques $\epsilon_{11}^{\{hkl\}}$ et $\epsilon_{22}^{\{hkl\}}$ mesurées à déformation appliquée proche et/ou identique et à différentes températures : le durcissement de la ferrite et de la cémentite à basse température est ainsi mis en évidence.

		Acier 2C40 - T=22 °C			Acier 2C40 - T=-150 °C		
		ε %	$\varepsilon_{11}^{\{110\}}$	$\varepsilon_{22}^{\{110\}}$	ε %	$\varepsilon_{11}^{\{110\}}$	$\varepsilon_{22}^{\{110\}}$
Ferrite ($\pm 0,05 \cdot 10^{-3}$)	3 %	1,75.10 ⁻³	-0,40.10 ⁻³	3,5 %	2,50.10 ⁻³	-0,70.10 ⁻³	
	5,7 %	1,95.10 ⁻³	-0,45.10 ⁻³	5 %	2,55.10 ⁻³	-0,72.10 ⁻³	
	8,1 %	2,05.10 ⁻³	-0,50.10 ⁻³	7,7 %	2,75.10 ⁻³	-0,80.10 ⁻³	
		ε %	$\varepsilon_{11}^{\{122\}}$	$\varepsilon_{22}^{\{122\}}$	ε %	$\varepsilon_{11}^{\{122\}}$	$\varepsilon_{22}^{\{122\}}$
Cémentite ($\pm 0,4 \cdot 10^{-3}$)	3 %	9,0.10 ⁻³	-3,5.10 ⁻³	3,5 %	13,2.10 ⁻³	-5,0.10 ⁻³	
	5,7 %	9,6.10 ⁻³	-3,6.10 ⁻³	5 %	14,0.10 ⁻³	-5,2.10 ⁻³	
	8,1 %	10,5.10 ⁻³	-4,1.10 ⁻³	7,7 %	15,5.10 ⁻³	-5,5.10 ⁻³	

Tableau IV-5. Evolution des déformations $\varepsilon_{11}^{\{hkl\}}$ et $\varepsilon_{22}^{\{hkl\}}$ dans les deux phases de l'acier 2C40

A charge identique, les deux phases de l'acier 2C40 présentent des déformations élastiques plus importantes à basse température qu'à température ambiante : un rapport de l'ordre de 1,5 est relevé en moyenne.

IV.2.2 Acier 16MND5

Des essais similaires ont été réalisés sur l'acier 16MND5. Compte tenu des difficultés rencontrées lors des traitements des clichés obtenus à -150 °C (cristaux de glace diffractant aux mêmes positions que la cémentite), nous n'avons pas pu aboutir à un résultat concluant sur l'acier de cuve à basse température. Par conséquent, nous présentons ci-dessous seulement les résultats obtenus à température ambiante.

La superposition des profils des pics de cémentite obtenus à différents chargements est montrée dans la figure IV-9. Leurs largeurs W restent identiques (figure IV-10) contrairement aux pics de cémentite de l'acier 2C40, pour lesquels un élargissement a été observé.

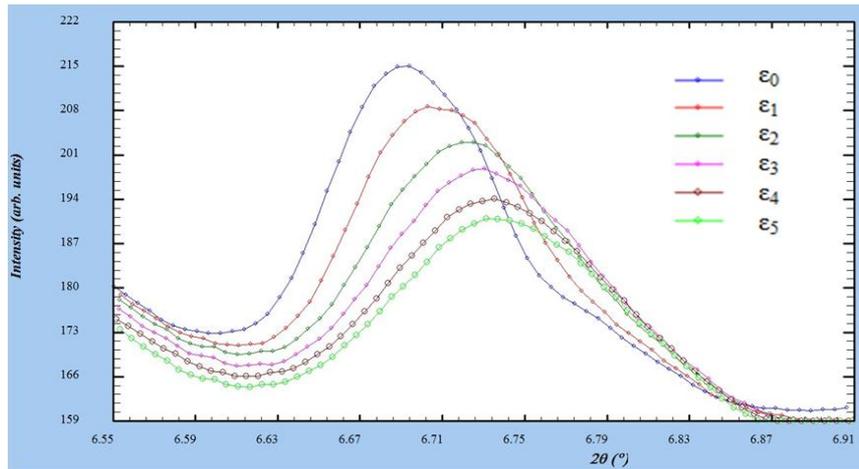


Figure IV-9. Déplacement des pics {122} de cémentite à T=22 °C sous chargement - acier 16MND5

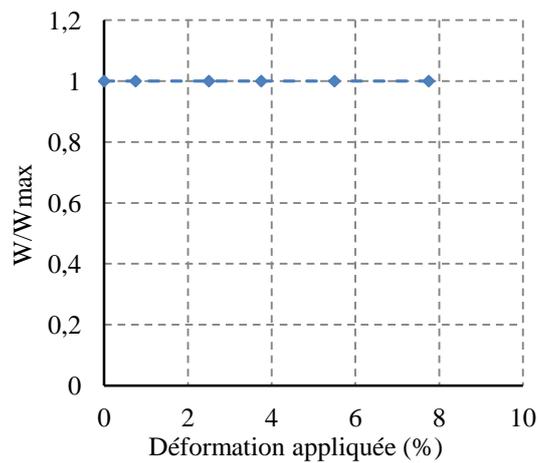


Figure IV-10. Elargissement des pics de diffraction de la cémentite sous chargement à T=22 °C - acier 16MND5

L'évolution des déformations élastiques est présentée sur la figure IV-11, pour différentes déformations appliquées à température ambiante.

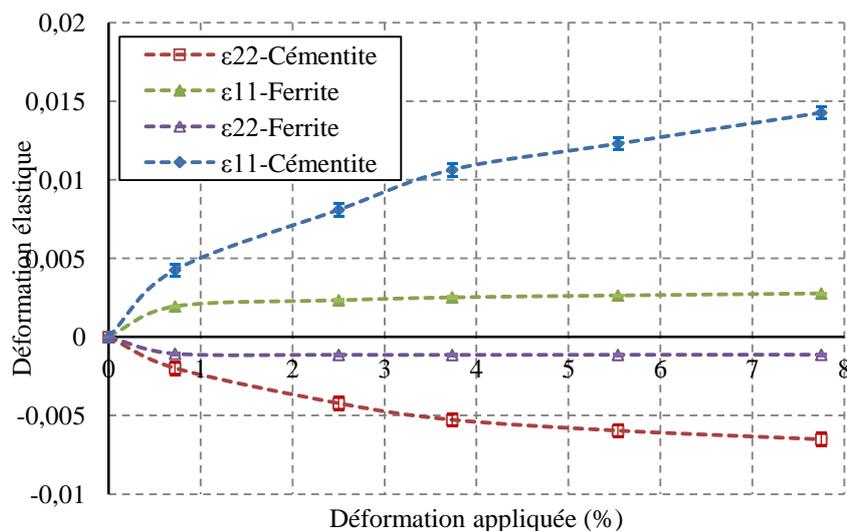


Figure IV-11. Evolution des déformations $\epsilon_{11}^{\{hkl\}}$ et $\epsilon_{22}^{\{hkl\}}$ au cours du chargement à $T=22\text{ °C}$ - acier 16MND5

Pour la ferrite, l'allure de la courbe dans le sens transverse est comparable à celle observée dans le sens de traction. Toutefois, les déformations mesurées sont deux fois moins importantes que dans le sens de traction, un facteur de l'ordre de 2,5 est relevé. Comme attendu, le comportement de la cémentite est très différent de celui de la ferrite : les déformations élastiques de la cémentite sont 2 à 5 fois plus grandes que les déformations de la ferrite. De la même façon, l'augmentation des déformations élastiques dans la cémentite semble régulier jusqu'à la rupture. Les valeurs minimale et maximale relevées dans les sens axial et transverse pour les deux phases sont présentées dans le tableau IV-6.

Ferrite ($\pm 0,05 \cdot 10^{-3}$)	$\epsilon_{11}^{\{110\}}$ min	$\epsilon_{11}^{\{110\}}$ max	$\epsilon_{22}^{\{110\}}$ min	$\epsilon_{22}^{\{110\}}$ max
	$1,95 \cdot 10^{-3}$	$2,80 \cdot 10^{-3}$	$-1,05 \cdot 10^{-3}$	$-1,15 \cdot 10^{-3}$
Cémentite ($\pm 0,4 \cdot 10^{-3}$)	$\epsilon_{11}^{\{122\}}$ min	$\epsilon_{11}^{\{122\}}$ max	$\epsilon_{22}^{\{122\}}$ min	$\epsilon_{22}^{\{122\}}$ max
	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$14,2 \cdot 10^{-3}$	$-2,0 \cdot 10^{-3}$	$-6,5 \cdot 10^{-3}$

Tableau IV-6. Déformations élastiques minimales et maximales atteintes à $T=22\text{ °C}$ - acier 16MND5

Afin de mieux cerner le comportement de chaque phase dans les deux matériaux étudiés, la figure IV-12 montre une comparaison des courbes obtenues pour les aciers 16MND5 et 2C40 à température ambiante, dans le sens de traction.

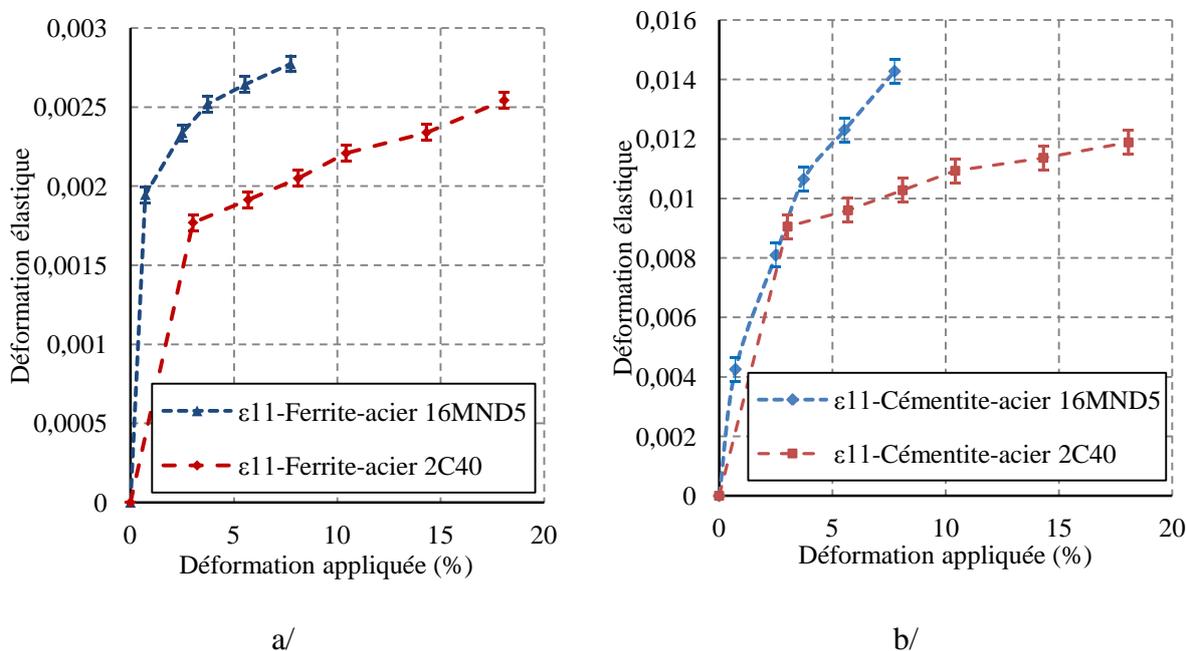


Figure IV-12. Evolution des déformations $\epsilon_{11}^{\{hkl\}}$ dans les aciers 16MND5 et 2C40 à $T=22^\circ\text{C}$ -
a/ Ferrite - b/ Cémentite

Les plans ferritiques de l'acier 16MND5 présentent des déformations élastiques légèrement plus importantes que celles de l'acier 2C40 : un rapport de l'ordre de 10 % est relevé. Les déformations à rupture (déformation élastique enregistrée à déformation appliquée maximale) relevées respectivement pour les aciers 16MND5 et 2C40 sont $2,80 \cdot 10^{-3} \pm 0,05 \cdot 10^{-3}$ et $2,55 \cdot 10^{-3} \pm 0,05 \cdot 10^{-3}$.

Pour la cémentite, les déformations élastiques du plan $\{122\}$ n'évoluent pas avec la même allure dans les deux aciers : elles sont légèrement plus faibles dans l'acier 2C40. Pour l'acier 16MND5, un rapport de 3,3 est relevé entre le premier et le dernier point de mesure alors que ce rapport est seulement de 1,3 pour la cémentite de l'acier 2C40 ; cette remarque est valable dans les sens axial et transverse.

Le tableau IV-7 montre l'évolution des déformations élastiques dans les deux aciers pour des déformations macroscopiques identiques et/ou proches. La ferrite de l'acier de cuve est 30 % à 40 % plus chargée que la ferrite de l'acier 2C40.

		Acier 16MND5			Acier 2C40		
		ε %	$\varepsilon_{11}^{\{110\}}$	$\varepsilon_{22}^{\{110\}}$	ε %	$\varepsilon_{11}^{\{110\}}$	$\varepsilon_{22}^{\{110\}}$
Ferrite ($\pm 0,05.10^{-3}$)	2,5 %	2,35.10 ⁻³	-1,13.10 ⁻³	3,0 %	1,75.10 ⁻³	-0,40.10 ⁻³	
	5,5 %	2,65.10 ⁻³	-1,14.10 ⁻³	5,7 %	1,95.10 ⁻³	-0,45.10 ⁻³	
	7,7 %	2,80.10 ⁻³	-1,15.10 ⁻³	8,1 %	2,05.10 ⁻³	-0,50.10 ⁻³	
		ε %	$\varepsilon_{11}^{\{122\}}$	$\varepsilon_{22}^{\{122\}}$	ε %	$\varepsilon_{11}^{\{122\}}$	$\varepsilon_{22}^{\{122\}}$
Cémentite ($\pm 0,4.10^{-3}$)	2,5 %	8,0.10 ⁻³	-4,2.10 ⁻³	3 %	9,0.10 ⁻³	-3,3.10 ⁻³	
	5,5 %	12,5.10 ⁻³	-6,0.10 ⁻³	5,7 %	9,6.10 ⁻³	-3,6.10 ⁻³	
	7,7 %	14,2.10 ⁻³	-6,5.10 ⁻³	8,1 %	10,5.10 ⁻³	-4,0.10 ⁻³	

Tableau IV-7. Evolution des déformations $\varepsilon_{11}^{\{hkl\}}$ et $\varepsilon_{22}^{\{hkl\}}$ dans les deux aciers de l'étude à $T=22$ °C

A 3 % de déformation appliquée, les déformations élastiques de la cémentite sont similaires dans les deux aciers (figure IV-12-b). Avec l'augmentation des sollicitations, à 6 % et 8 % de déformation appliquée, la cémentite de l'acier 16MND5 montre des déformations élastiques nettement plus importantes que celle de l'acier 2C40 : une différence de 30 % à 40 % est enregistrée.

L'interprétation de ces résultats est liée d'une part à la différence de fraction volumique de cémentite présente dans les deux aciers (2,1 % pour l'acier de cuve 16MND5 et 5,7 % pour l'acier 2C40) et d'autre part à la taille et la distribution des carbures contenus dans chaque acier : les carbures présents dans l'acier 2C40 sont 10 fois plus gros et sont intragranulaires à 60 % alors que ceux de l'acier 16MND5 sont majoritairement intragranulaires (93 %) et se présentent groupés en amas/cluster au niveau des paquets bainitiques. L'influence de ces paramètres est discutée dans le §.IV.4.

IV.2.3 Détermination des coefficients de Poisson

A partir des déformations mesurées, le coefficient de Poisson ν relatif à chaque phase a été déterminé en considérant le rapport entre les déformations transverses et axiales à chaque point de mesure (équation IV.1). Le tableau IV-8 en donne un bilan récapitulatif.

$$\nu = -\frac{\varepsilon_{22}}{\varepsilon_{11}} \quad (\text{IV.1})$$

		Acier 2C40		Acier 2C40		Acier 16MND5	
		T=22 °C		T=-150 °C		T=22 °C	
		ε %	ν	ε %	ν	ε %	ν
<u>Ferrite</u>		3 %	0,22	2 %	0,26	0,75 %	0,54
		5,7 %	0,23	3,5 %	0,28	2,5 %	0,52
		8,1 %	0,24	5 %	0,27	3,75 %	0,45
		10,4 %	0,23	6,3 %	0,28	5,5 %	0,48
		14,3 %	0,22	7,7 %	0,29	7,75 %	0,45
<u>Cémentite</u>		3 %	0,38	2 %	0,36	0,75 %	0,46
		5,7 %	0,37	3,5 %	0,37	2,5 %	0,48
		8,1 %	0,39	5 %	0,37	3,75 %	0,49
		10,4 %	0,35	6,3 %	0,33	5,5 %	0,43
		14,3 %	0,34	7,7 %	0,35	7,75 %	0,41

Tableau IV-8. Coefficients de Poisson ν calculés à chaque point de mesure pour les aciers de l'étude

Classiquement, le coefficient de Poisson macroscopique annoncé pour les deux aciers est proche de celui de la ferrite ($\nu=0,29$). A l'échelle de la phase, le coefficient de Poisson varie d'une famille de plans à une autre traduisant l'anisotropie de la ferrite [(Dakhlaoui, 2010)] ainsi que celle de la cémentite [(Nikolussi, 2008)]. Le coefficient de Poisson annoncé dans la littérature pour les plans {110} de la ferrite est de l'ordre de 0,28 [(Bonner, 1997)]. Pour les plans {122} de la cémentite, Hassel et al. [(Hassel, 2010)] estiment que le coefficient de Poisson varie classiquement entre 0,29 et 0,35 alors que Weisser et al. [(Weisser, 2011)] l'estime à 0,33.

Selon nos résultats, les valeurs de ν restent sensiblement constantes et proches des valeurs de la littérature pour l'acier 2C40. Les résultats relatifs à chacune des phases sont en moyenne

$\nu=0,23$ pour la ferrite et $\nu=0,36$ pour la cémentite, à température ambiante. Une faible variation est relevée à basse température ($-150\text{ }^{\circ}\text{C}$) pour la ferrite : $\nu=0,28$.

Pour l'acier 16MND5, les coefficients ν déterminés à température ambiante paraissent plus sensibles la déformation macroscopique appliquée. La valeur moyenne de ν est de 0,48 pour la cémentite et 0,47 pour la ferrite.

IV.3. Distribution des contraintes par phase

En diffraction, les techniques de détermination de contrainte sont toutes basées sur la mesure des déformations élastiques à partir des distances interréticulaires. La méthode des $\sin^2\psi$ reste la plus utilisée pour l'analyse de contrainte. Quand la configuration de l'outil de mesure ne le permet pas, ce qui est le cas des analyses menées au synchrotron, il reste toujours possible de relier les déformations élastiques aux contraintes en se basant sur les lois de l'élasticité linéaire homogène et isotrope « loi de Hooke » [(Hauk, 1997)]. Pour un état de traction uniaxiale, les contraintes relatives à chaque phase sont estimées selon les équations I.2 et I.3 présentées dans le chapitre I.

Cémentite		[(Weisser, 2011)]	E=160 GPa	$\nu=0,33$
Ferrite		[(Martinez-Perez, 2005)]	E=205 GPa	$\nu=0,29$
		[(Weisser, 2011)]	E=220 GPa	$\nu=0,29$

Tableau IV-9. Caractéristiques E et ν relatives au plan (122) de la cémentite et au plan (110) de la ferrite

Contrairement à la ferrite qui a fait l'objet de nombreuses analyses (tableau IV-9), les travaux qui concernent la cémentite sont rares dans la littérature, d'autant plus quand il s'agit du plan (122) : à notre connaissance, il n'y a que les récents travaux de Weisser et al. [(Weisser, 2011)] qui les abordent. Par conséquent, nous avons proposé une méthode inverse pour la détermination du module d'Young.

IV.3.1 Estimation du module d'Young relatif à chaque phase

La démarche utilisée combine les essais réalisés par DRX et par rayonnement synchrotron. A partir des essais de traction in situ effectués par DRX de laboratoire et la loi des mélanges mentionnée dans le chapitre I (équation I.1), nous avons pu établir la répartition des contraintes par phase avec une approche indirecte. Les résultats ont été présentés au chapitre III.

Pour l'approche directe, l'identification des modules d'Young relatifs à chacune des phases est réalisée à partir des résultats de l'acier 2C40 obtenus à température ambiante. La démarche proposée est résumée dans le diagramme suivant (figure IV-13) :

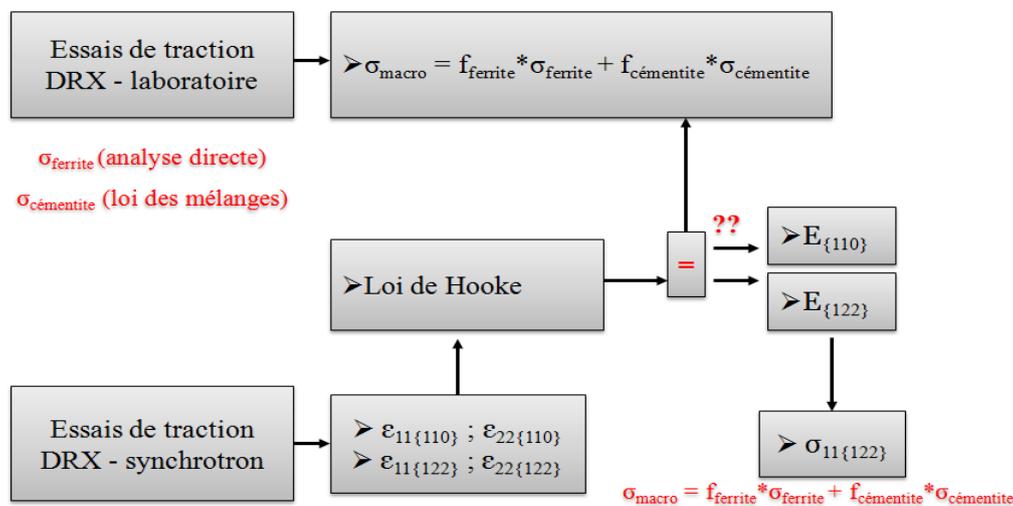


Figure IV-13. Identification inverse des modules d'Young relatif à la cémentite

Une régression linéaire est réalisée sur les analyses de contrainte effectuées directement dans la ferrite (DRX de laboratoire) : on obtient ainsi une fonction $\sigma = f(\epsilon)$ représentative de l'évolution des contraintes ferritiques.

Cette fonction est utilisée ensuite avec les essais de traction effectués par rayonnement synchrotron dans le but d'identifier les contraintes dans la ferrite. A ce stade, en appliquant la loi de Hooke pour un cas de traction uniaxiale (équations I.2 et I.3), pour que les valeurs de contraintes calculées soient en accord avec celles obtenues par DRX, on obtient alors un module d'Young relatif aux plans {110}.

Pour la cémentite, il suffit de résoudre le système d'équations formé par la loi des mélanges (équation I.1) et la loi de Hooke généralisée appliquée aux plans {122} (équations I.2 et I.3,

chapitre I), pour que les valeurs de contraintes macroscopiques soient identiques à celles données par la micromachine de traction.

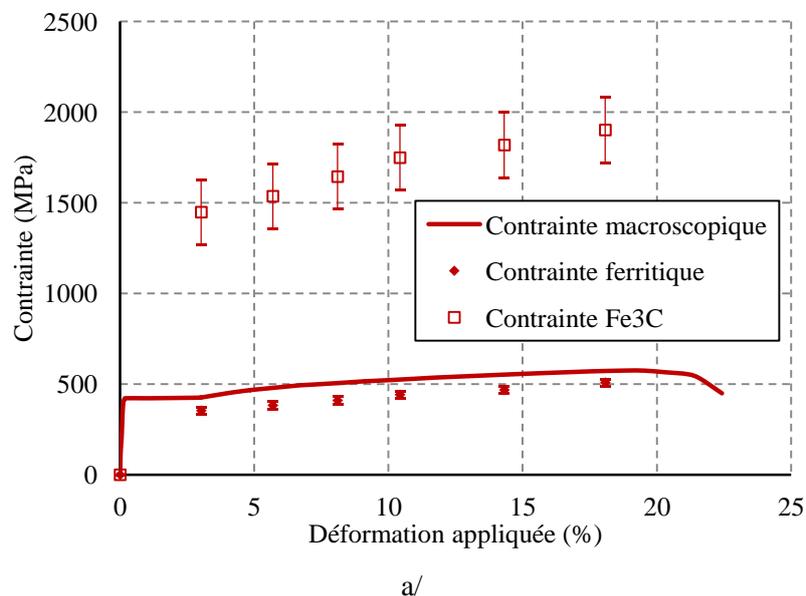
Pour cette démarche, nous considérons un coefficient de Poisson $\nu=0,23$ pour les plans $\{110\}$ de la ferrite et $\nu=0,36$ pour la cémentite. Les valeurs identifiées ainsi sont : $E^{110}=200 \pm 1$ GPa pour la ferrite et $E^{122}=160 \pm 3$ GPa pour la cémentite. Elles sont comparables aux modules d'Young annoncé dans les travaux de Weisser et al. [(Weisser, 2011)].

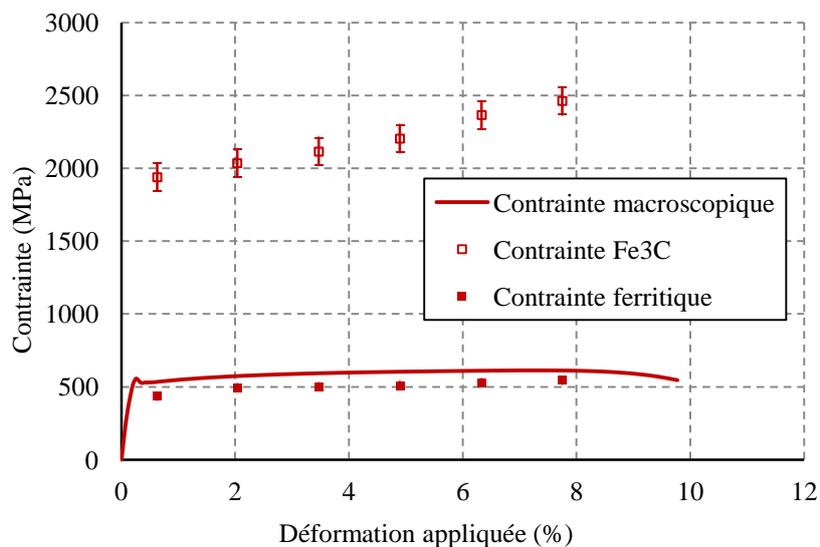
IV.3.2 Evolution des contraintes dans la cémentite

A partir des déformations élastiques et les équations I.2 et I.3, l'évolution des contraintes par phase a été déterminée pour les deux aciers de l'étude, à température ambiante et à -150 °C.

a) Acier 2C40

Les résultats obtenus à température ambiante ainsi qu'à -150 °C sont présentés ci-dessous (figure IV-14).





b/

Figure IV-14. Répartition des contraintes par phase dans l'acier 2C40 -

a/ T = 22 °C - b/ T = -150 °C

A température ambiante, la ferrite présente une contrainte maximale de 510 ± 20 MPa. L'écart ferrite-bainite ne dépasse pas les 100 MPa : il est de 60 MPa en moyenne. Ces résultats confirment ceux obtenus par DRX de laboratoire sur l'acier 2C40, où un écart maxi de 60 MPa a été observé. Pour la cémentite, la contrainte maximale atteinte est de l'ordre de 1900 ± 170 MPa alors que la valeur maximale estimée indirectement, par la loi des mélanges lors des travaux effectués par DRX de laboratoire (chapitre III) était plus autour de 1500 ± 340 MPa.

A -150 °C, les contraintes maximales atteintes dans les deux phases augmentent en comparaison avec celles atteintes à température ambiante. L'écart ferrite-bainite est maintenu à une valeur inférieure à 100 MPa : il est aussi de l'ordre de 60 MPa. La contrainte maximale dans la ferrite est de 550 ± 20 MPa et celle de la cémentite est de 2500 ± 170 MPa. Cette dernière semble légèrement inférieure à la contrainte maximale estimée par la loi des mélanges (chapitre III) : 3000 ± 340 MPa.

b) Acier 16MND5

Considérons à présent l'acier 16MND5 à température ambiante (figure IV-15). La ferrite atteint une valeur de contrainte maximale de l'ordre de 650 ± 20 MPa ; l'écart ferrite-bainite est de 170 ± 20 MPa en moyenne, soit légèrement supérieur à l'écart observé par DRX de

laboratoire (130 ± 20 MPa). La cémentite de l'acier 16MND5 atteint une valeur de contrainte maximale de l'ordre de 1900 ± 170 MPa. Ces résultats restent bien inférieurs aux contraintes estimées par la loi des mélanges, qui sont de l'ordre 5000 ± 930 MPa (chapitre III).

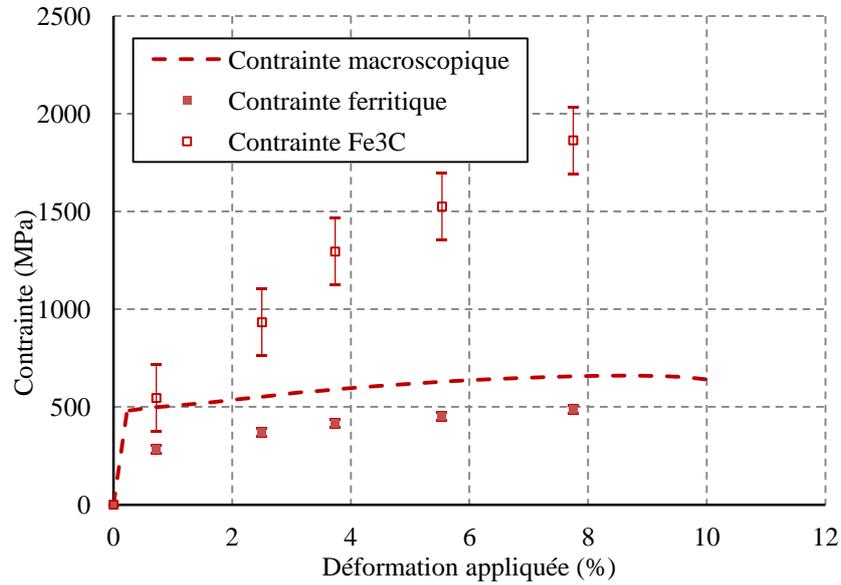


Figure IV-15. Répartition des contraintes par phase à température ambiante - acier 16MND5

Aussi, afin de mieux cerner le comportement de chaque phase des aciers étudiés, nous avons réalisé une étude comparative des contraintes atteintes pour des déformations appliquées proches (tableau IV-10).

	ε %	$\sigma_{\text{bainite}} \pm 20$ MPa	$\sigma_{\text{ferrite}} \pm 20$ MPa	$\sigma_{\text{Fe}_3\text{C}} \pm 170$ MPa
Acier 2C40 à T=22 °C	3	430	360	1450
	5,7	480	390	1550
	8,1	500	410	1650
	18,1	570	510	1900
	ε %	$\sigma_{\text{bainite}} \pm 20$ MPa	$\sigma_{\text{ferrite}} \pm 20$ MPa	$\sigma_{\text{Fe}_3\text{C}} \pm 170$ MPa
Acier 2C40 à T=-150 °C	3,5	590	500	2100
	5	600	510	2200
	7,7	610	550	2500
	ε %	$\sigma_{\text{bainite}} \pm 20$ MPa	$\sigma_{\text{ferrite}} \pm 20$ MPa	$\sigma_{\text{Fe}_3\text{C}} \pm 170$ MPa
Acier 16MND5 à T=22 °C	2,5	540	350	950
	5,5	620	450	1550
	7,75	650	490	1900

Tableau IV-10. Evolution des contraintes par phase dans les deux aciers de l'étude

T=22 °C

A déformation appliquée identique, la ferrite de l'acier 16MND5 est plus chargée que celle de l'acier 2C40. Toutefois, la contrainte de rupture pour la ferrite est identique pour les deux aciers : elle est de 510 MPa pour l'acier 2C40 et 500 MPa pour l'acier 16MND5.

L'évolution de la contrainte dans la cémentite présente une allure différente pour chaque acier. Dans l'acier 16MND5, les contraintes augmentent régulièrement jusqu'à la rupture. Dans l'acier 2C40, les contraintes augmentent moins rapidement : la courbe est moins raide : particulièrement au début du domaine plastique (à $\varepsilon=3$ % et $\varepsilon=5,7$ %). Par la suite, une augmentation régulière des contraintes a lieu avec la déformation appliquée. A charge maximale, les contraintes atteintes sont du même ordre de grandeur dans les deux aciers.

T=-150 °C

L'évolution des contraintes dans les deux phases de l'acier 2C40 présente des allures semblables quand la température passe de 22 °C à -150 °C. Le durcissement engendré par la baisse de température se traduit par l'augmentation des contraintes bainitiques, ferritiques

ainsi que celles de la cémentite. A charge maximale, les contraintes 510 MPa et 550 MPa sont relevées dans la ferrite respectivement, à 22 °C et -150 °C. Pour la cémentite, l'augmentation est beaucoup plus importante : elle passe de 1900 MPa à 2500 MPa quand la température passe de l'ambiante à -150 °C.

Globalement, l'influence de la taille et la répartition des carbures sur le comportement mécanique des deux aciers est ainsi mise en évidence par nos résultats. L'utilisation de la loi des mélanges pour l'estimation des contraintes dans le cas de la cémentite de l'acier 2C40 a donné des résultats relativement comparables à ceux obtenus par analyse directe. Cela reste valable aux deux températures testées. Par contre, dans le cas de la cémentite de l'acier 16MND5, l'utilisation de la loi des mélanges a engendré une surestimation des contraintes. A température ambiante, elles atteignent 5000 MPa alors que l'approche directe donne une contrainte maximale de l'ordre de 1900 MPa.

IV.3.3 Approche numérique

En parallèle de nos travaux expérimentaux, une approche numérique a été conduite en collaboration avec d'autres chercheurs du laboratoire LEM3. Son objectif principal était de déterminer la contrainte maximale que la cémentite peut atteindre à pleine charge. Deux approches ont été utilisées pour cela :

- modèle micromécanique avec transition d'échelle (ANR SAKE)
- modèle incrémental à trois phases (ANR CAT SIZE)

Seul l'acier 2C40 a été considéré pour les travaux numériques, car il représente un matériau modèle commun entre les deux projets de recherche (ANR CAT SIZE et ANR SAKE). Pour rappel, ses principales caractéristiques sont : 5,7 % de fraction volumique de cémentite et 0,73 µm pour le diamètre moyen des particules de cémentite. Les deux modèles utilisés ont été calibrés sur les résultats des essais de traction in situ combinés au rayonnement synchrotron présentés aux paragraphes §.IV.2.1 et §.IV.3.2. Nous présentons ici brièvement les principaux paramètres pris en compte pour chaque modèle ainsi que les résultats obtenus.

a) Modèle micromécanique avec transition d'échelle

Un modèle micromécanique avec transition d'échelle a été utilisé pour déterminer la répartition des déformations/contraintes entre la ferrite (comportement élastoplastique) et la cémentite (comportement purement élastique). Il s'agit du modèle développé lors des travaux de thèse de Pesci [(Pesci, 2004)] pour décrire le comportement de l'acier 16MND5 à différentes températures. Ce modèle considère que le matériau est constitué d'un assemblage de grains bainitiques dont la fraction volumique de cémentite peut varier.

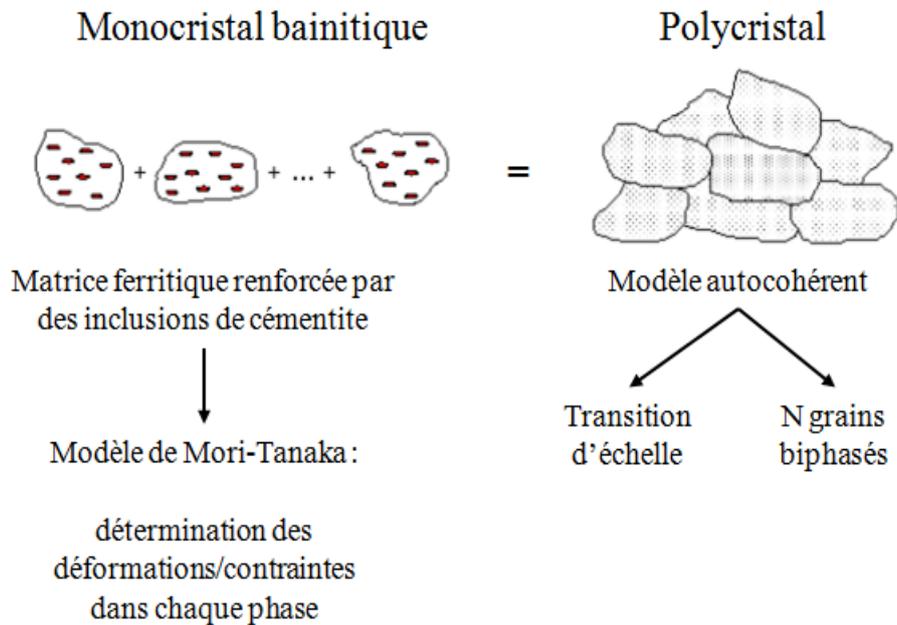


Figure IV-16. Schématisation du modèle micromécanique avec transition d'échelle - [(Pesci, 2009)]

Comme montré dans la figure ci-dessus (figure IV-16), le modèle utilisé prend en compte deux approches :

- le modèle de Mori-Tanaka est utilisé pour décrire le comportement du monocristal bainitique (grain biphasé). Il considère que le grain est constitué de la matrice ferritique (phase a) renforcée par une seule famille d'inclusions sphériques de cémentite (phase b). L'élasticité des deux phases est supposée et le comportement de la cémentite est parfaitement élastique.
- le modèle autocohérent a été utilisé, par la suite, pour décrire le comportement du polycristal, constitué d'un assemblage de N grains bainitiques.

Constantes élastiques (GPa)			Cission critique (MPa)	Coefficient d'érouissage (MPa)	
C_{11}	C_{12}	C_{44}	τ_c^g	h_1	h_2
237,4	134,7	116,4	230	220	264

Tableau IV-11. Liste des paramètres utilisés dans le modèle micromécanique avec transition d'échelle

L'intégralité de cette approche (modèle micromécanique avec transition d'échelle) est détaillée dans les travaux de Pesci et al. [(Pesci, 2009)] et les différents paramètres utilisés dans la modélisation sont listés dans le tableau ci-dessus (tableau IV-11).

b) Résultats du modèle micromécanique avec transition d'échelle

La modélisation de la répartition des contraintes par phase obtenue dans l'acier 2C40 à température ambiante est montrée dans la figure IV-17.

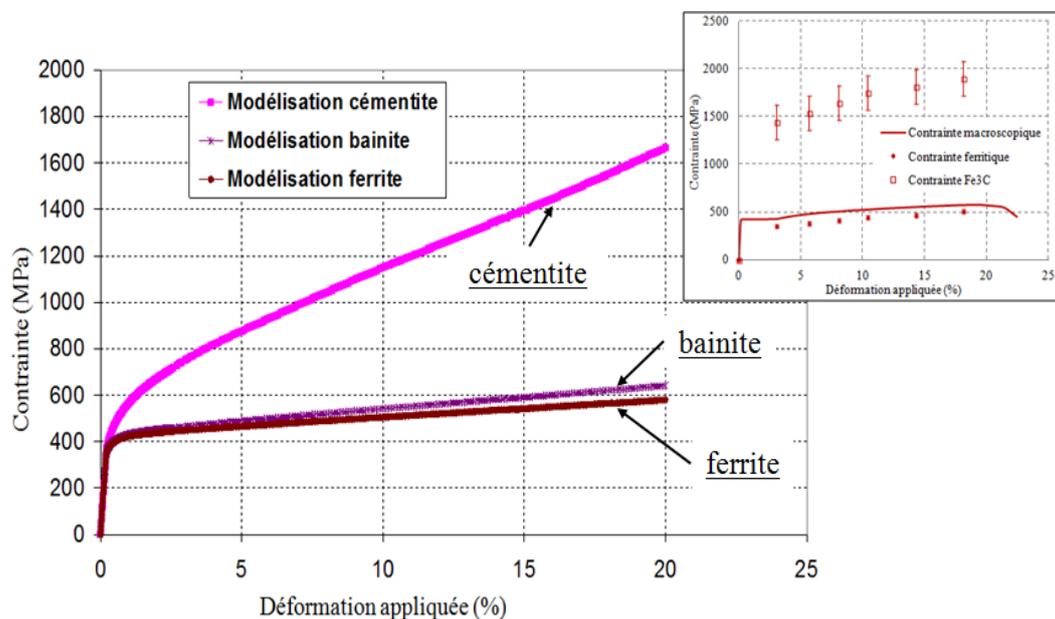


Figure IV-17. Répartition des contraintes par phase à température ambiante - acier 2C40

Le modèle décrit des niveaux des contraintes pour les deux phases semblables aux résultats expérimentaux présentés dans la figure IV-14 (§.IV.3.2). Les contraintes ferritiques sont inférieures aux contraintes macroscopiques et leurs courbes restent proches, avec un écart

ferrite-bainite qui augmente avec l'augmentation de la déformation appliquée : il ne dépasse pas 100 MPa à charge maximale. La cémentite est beaucoup plus chargée en comparaison avec la ferrite : elle atteint une contrainte de l'ordre de 1700 MPa à pleine charge. Cette valeur est légèrement inférieure à la valeur déterminée expérimentalement (1900 MPa), mais reste toutefois dans le même ordre de grandeur. Cela peut s'expliquer par le fait que l'acier 2C40 contient 2 populations de cémentite différentes (inter et intragranulaires) qui ne sont pas prises en compte dans le modèle.

c) Modèle à trois phases

Il s'agit d'un modèle utilisé pour décrire le comportement des aciers faiblement alliés, où la matrice ferritique présente un comportement élastoplastique et les inclusions de cémentite sont supposées purement élastiques. Puisque la taille des carbures est infiniment petite par rapport à la taille des grains, l'aspect polycristallin n'est pas pris en considération.

Le modèle considère trois phases (figure IV-18) : la matrice qui se déforme plastiquement et s'écroute par la formation d'une densité de SSD (Dislocations Statiquement Stockées), représente la première phase et les inclusions, de forme sphérique, représentent la deuxième phase. L'accumulation des dislocations à l'interface matrice-inclusion est considérée comme une troisième phase qui est constituée d'une couche sphérique d'épaisseur λ et qui contient une densité de GND (Dislocations Géométriquement Nécessaires).

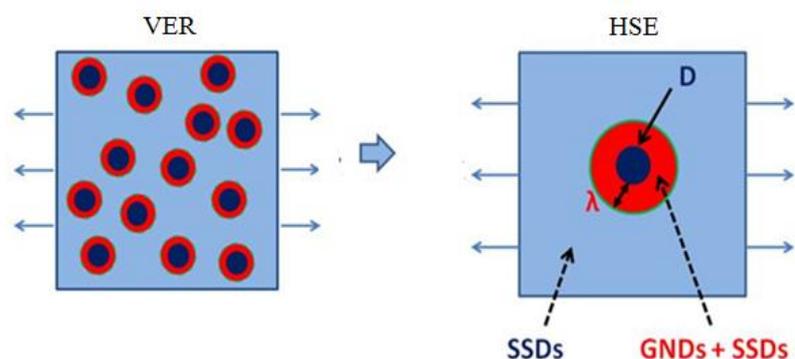


Figure IV-18. Schématisation du modèle à trois phases - [(Taupin, 2010)]

La densité initiale des GND dans la couche qui enrobe l'inclusion est équivalente à celle des SSD soit 10^{10} m^{-1} . Les détails de ce modèle sont précisés dans les travaux de Pipard et al.

[(Pipard, 2008)] ainsi que dans ceux de Taupin et al. [(Taupin, 2010)] et le tableau IV-12 résume les principaux paramètres utilisés dans la modélisation.

Paramètres de la couche			Modules d'Young (GPa)	
α	$b(\text{Fe}\alpha)$ (m)	λ (μm)	$E^{\text{Fe}\alpha}$	$E^{\text{Fe}_3\text{C}}$
0,4	$2,5 \cdot 10^{-10}$	0,3	210	230
Coefficients de Poisson		Paramètres d'érouissage		Facteur de Taylor
$\nu^{\text{Fe}\alpha}$	$\nu^{\text{Fe}_3\text{C}}$	k	f	M
0,29	0,29	0,03	14	3

Tableau IV-12. Liste des paramètres utilisés dans le modèle à trois phases

d) Résultats du modèle à trois phases

La figure IV-19 montre une prédiction de la distribution de contrainte par phase dans l'acier 2C40 obtenue à température ambiante. La contrainte dans la phase ferritique prend en considération les contraintes ferritiques ainsi que les contraintes de la couche autour de l'inclusion.

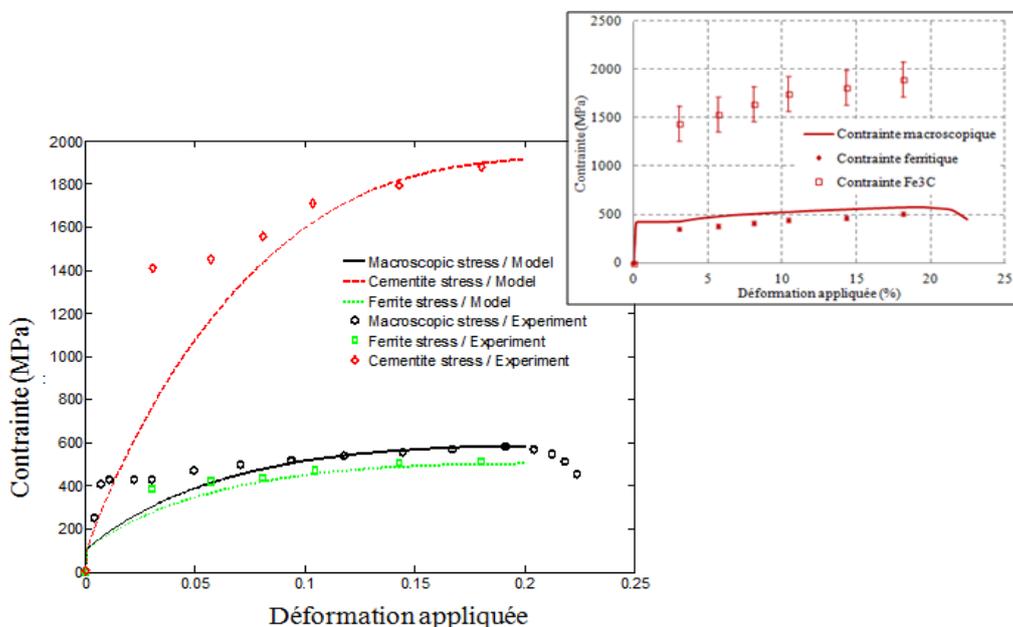


Figure IV-19. Répartition des contraintes par phase obtenue par le modèle à trois phases - acier 2C40

Les courbes obtenues par simulation montrent que le modèle reproduit des résultats proches de ceux des travaux expérimentaux : les contraintes ferritiques sont inférieures aux contraintes macroscopiques. L'écart relevé entre les deux contraintes est de l'ordre de 100 MPa à pleine charge. Les contraintes dans la cémentite ne dépassent pas 2000 MPa rejoignant ainsi les résultats expérimentaux présentés dans la figure IV-14 (§.IV.3.2).

Toutefois, ce résultat numérique a été obtenu en considérant l'épaisseur de la couche équivalente à la moitié de la taille moyenne des inclusions de cémentite ($\lambda=0,3 \mu\text{m}$), ce qui reste d'un point de vue physique légèrement surestimé et à vérifier expérimentalement par EBSD. L'influence des longueurs internes (épaisseur de la couche) dans l'estimation des contraintes internes est discutée dans les travaux de Taupin et al. [(Taupin, 2010)].

IV.4. Discussion

Nous avons déterminé l'évolution des déformations élastiques et des contraintes lors d'essai de traction in situ, dans les deux phases, ferrite et cémentite, contenues dans les aciers bainitiques étudiés. Les plans {110} de la ferrite et les plans {122} de la cémentite ont été systématiquement analysés. L'acier de cuve a fait l'objet d'analyses réalisées à température ambiante alors que l'acier 2C40 a été analysé aux deux températures 22 °C et -150 °C.

a) Comportement de la ferrite

Les aciers étudiés se composent d'une matrice ferritique renforcée par des inclusions de cémentite. Dans le domaine élastique, les deux aciers sont supposés obéir à la loi de Hooke généralisée. En conséquence, le comportement élastique (E et ν) des deux ferrites doit être identique, c'est pour cette raison que nous avons choisi de ne pas réaliser des mesures de déformation dans le domaine élastique [(Young, 2007)]. Toutefois, les travaux de Daymond et al. [(Daymond, 2002)] ont souligné le comportement anisotrope de la ferrite en mettant en évidence l'hétérogénéité des déformations mesurées pour différentes familles de plans cristallographiques. Même si cette anisotropie reste faible dans le domaine élastique, nos travaux auraient mérité quelques points de mesure dans ce domaine, surtout pour une identification précise des modules d'Young relatifs à chaque phase.

Dans le domaine plastique, les déformations élastiques de la ferrite augmentent avec la déformation appliquée. La ferrite de l'acier 16MND5 présente des contraintes légèrement plus

hautes que la ferrite de l'acier 2C40. Cela peut être lié à la morphologie de la matrice relative à chaque acier (notamment la localisation des carbures au sein des grains). La différence des compositions chimiques et traitements thermiques de chaque acier, a pu aussi influencer le comportement de chaque acier. Néanmoins, les résultats montrent que les contraintes dans les deux ferrites sont comparables à pleine charge (la différence est inférieure à 50 ± 20 MPa).

b) Comportement de la cémentite

Dans le domaine plastique, un transfert de charge a lieu de la matrice vers les inclusions de cémentite. C'est ainsi qu'on explique les hautes valeurs de contraintes relevées dans la phase dure [(Bonner, 1997)]. L'analyse de contrainte réalisée directement dans la cémentite montre que le comportement des inclusions n'est pas identique dans les deux aciers. A déformation appliquée proche, la cémentite de l'acier de cuve 16MND5 est ainsi plus chargée que celle de l'acier 2C40, mais on ne retrouve pas un facteur 3 entre les deux aciers, qui est le rapport entre leurs fractions volumiques. En effet, les valeurs de contraintes sont aussi impactées par l'effet de taille/répartition des carbures dans la matrice. Toutefois, à pleine charge, la cémentite des deux aciers présente des contraintes du même ordre de grandeur.

On remarque également que l'évolution de la déformation dans la cémentite dans l'acier 16MND5 ne semble pas autant « freinée » lorsque la ferrite entre en plasticité comme c'est le cas pour l'acier 2C40 : les allures des deux courbes associées à chaque acier ne sont pas les mêmes. La taille/répartition des particules de cémentite semble donc également jouer un rôle très important, avec un effet durcissant différent pour chaque acier : les mécanismes mis en jeu sont différents, avec éventuellement une déformation élastoplastique et/ou un endommagement de la cémentite de l'acier 2C40. Toutefois, et comme précisé dans le chapitre III, les observations effectuées en surface des échantillons issus des essais, n'ont montré aucun carbure déformé, endommagé ou décollé.

c) Elargissement des pics de cémentite

Contrairement aux pics de cémentite de l'acier de cuve, on remarque que les pics de cémentite de l'acier 2C40 présentent un élargissement qui traduit soit une densité de dislocations engendrée par une activité plastique soit des champs de déformations hétérogènes dans les différentes particules de cémentite contenues dans le volume diffractant. La

cémentite a pu contribuer à l'accommodation plastique : Van-Acker et al. [(Van-Acker, 1996)] ont avancé cette hypothèse pour expliquer l'élargissement des pics de diffraction obtenus sur de la cémentite lamellaire. Bonner et al. [(Bonner, 1997)] ont annoncé dans leurs travaux sur des aciers perlitiques que les deux phases, ferrite et cémentite, présentent un comportement élastoplastique et contribuent à l'accommodation plastique en ce déformant.

L'élargissement des pics peut être attribué aux hétérogénéités de déformations qui existent entre les différents carbures présents dans le volume diffractant avec une localisation au niveau de certains carbures. Cette localisation peut être associée à la forme, la taille et/ou la répartition des carbures dans la matrice. Il en résulte un comportement élastoplastique des particules de cémentite [(Weisser, 2011)]. Il se peut aussi que tous ces mécanismes aient lieu dans la cémentite de l'acier 2C40 ; cependant, il est difficile de définir la contribution de chacune de ces raisons dans l'élargissement observé. Des analyses complémentaires réalisées tout au long du chargement et notamment dès le début du domaine élastique permettraient de suivre le profil des déformations/contraintes dans la cémentite. Cela donnera des éléments supplémentaires qui aideront à mieux comprendre le comportement des carbures : notamment une meilleure identification des modules d'Young par plan.

Le comportement anisotrope de la cémentite a été démontré expérimentalement dans les travaux de Nikolussi et al. [(Nikolussi, 2008)] et il est important de vérifier, en utilisant un rayonnement adapté, si l'élargissement des pics de cémentite de l'acier 2C40 caractérise toutes ces familles de plans cristallographiques ou se résume seulement à quelques un. De même façon, pour la cémentite de l'acier de cuve, il faut comparer le comportement de plusieurs plans.

d) Anisotropie de l'acier 16MND5

Si l'on observe le profil des déformations dans le sens transverse, on remarque que la cémentite et la ferrite de l'acier de cuve présentent des déformations élastiques plus importantes que celles relevées pour l'acier 2C40 : les coefficients de Poisson déterminés expérimentalement pour l'acier 16MND5 (0,47 pour la ferrite et 0,48 pour la cémentite) sont plus grands que ceux déterminés pour l'acier 2C40 (0,23 pour la ferrite et 0,36 pour la cémentite). L'évolution des déformations élastiques transverses ne présente pas la même allure pour les deux aciers :

$$\rightarrow \text{pour l'acier 16MND5, } \varepsilon_{22}^{\text{ferrite}} = 0,47 * \varepsilon_{11}^{\text{ferrite}} \text{ et } \varepsilon_{22}^{\text{cémentite}} = 0,48 * \varepsilon_{11}^{\text{cémentite}}$$

→ pour l'acier 2C40 $\varepsilon_{22}^{\text{ferrite}}=0,23 * \varepsilon_{11}^{\text{ferrite}}$ et $\varepsilon_{22}^{\text{cémentite}}=0,36 * \varepsilon_{11}^{\text{Cémentite}}$.

A ce sujet, les travaux d'Oliver et al. [(Oliver, 2004)] suggèrent qu'il subsiste dans les aciers biphasés une anisotropie élastique (cémentite) et plastique (ferrite) entre les deux phases de l'acier, qui peut réduire les déformations dans le sens de la traction et/ou augmenter celles du sens transverse : ce phénomène d'anisotropie semble, dans nos résultats, plus marqué pour l'acier de cuve. Puisqu'il s'agit des mêmes familles de plans pour les deux aciers ({110} pour la ferrite et {122} pour la cémentite), ce comportement peut être lié à la taille/distribution des carbures.

e) Approche numérique

Pour la cémentite de l'acier 16MND5, les contraintes déterminées indirectement par la loi des mélanges (résultats présentés dans le chapitre III) sont surestimées en comparaison avec les contraintes déterminées directement par rayonnement synchrotron (résultats présentés dans ce chapitre). La loi des mélanges semble par conséquent insuffisante pour prédire correctement les états de déformation/contrainte dans la cémentite pour ce type de matériau : la sensibilité de celle-ci à la fraction volumique de cémentite reste un paramètre clé pour la détermination des contraintes. La moindre sur/sous-estimation de celle-ci engendre automatiquement une sur/sous-estimation des contraintes dans la cémentite [(Che, 2007)] ; il est montré dans nos travaux qu'une incertitude de $\pm 0,2$ % peut engendrer jusqu'à ± 1000 MPa de contrainte. Il faut aussi préciser que le dosage de phase dans le cas des matériaux métalliques (faible fraction volumique de la seconde phase) nécessite le recours aux grands instruments (diffraction des neutrons) dont l'accès reste difficile. D'un autre côté, la loi des mélanges combinée à la DRX de laboratoire donne une estimation des contraintes en surface de l'échantillon alors que l'utilisation du rayonnement synchrotron permet d'étudier les contraintes dans toute l'épaisseur de l'échantillon analysé. Cela peut influencer les contraintes déterminées par les deux méthodes.

Il existe, d'autres outils qui permettent de prédire les niveaux maximaux de contrainte atteints dans la cémentite, comme le modèle Mori-Tanaka/autocohérent développé par Pesci et al. [(Pesci, 2009)], qui prend en compte la microstructure à deux échelle. Nous avons aussi vu le modèle développé par Taupin et al. [(Taupin, 2010)] dans le cadre l'ANR CAT SIZE, avec prise en compte de l'effet de taille de particules et de l'existence d'une couche autour de

chacune d'elles (couche avec des propriétés mécaniques bien particulières : densité de dislocations géométriquement nécessaires). Ces deux modèles font l'hypothèse que le comportement de la cémentite reste purement élastique et présentent la capacité de reproduire les résultats expérimentaux des deux phases.

Même si le choix de l'approche numérique s'est avéré judicieux, les codes de calculs utilisés ont été appliqués seulement à l'acier 2C40. Des simulations complémentaires sont donc nécessaires afin de bien comprendre le comportement des deux phases de l'acier 16MND5 et notamment la cémentite. Aussi, de futures analyses effectuées à basse température (-150 °C) sur l'acier de cuve montreront si la tendance des résultats reste la même sous l'effet de la température.

