

### III.4.2. Effet combiné du chrome, du nickel et du niobium

#### III.4.2.1. Analyse microstructurale

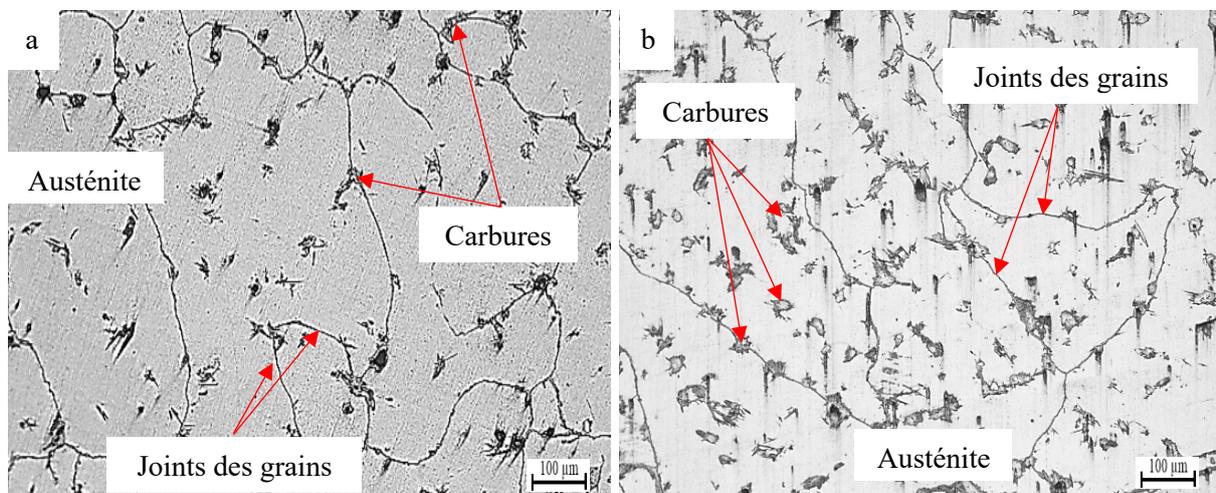
Cette partie traite l'effet combiné du chrome, du nickel et du niobium sur la microstructure et les propriétés tribologiques de l'acier A6. Comparativement à l'acier B1 (acier Hadfield), l'acier A6 contient des proportions relativement élevées en chrome, en nickel et en niobium. Les compositions chimiques de ces aciers sont données par le tableau III.27.

**Tableau III.27.** Compositions chimiques des aciers B1 et A6

Aciers	Eléments chimiques (en pourcentage massique, %)							
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Nb
B1	1.266	11.88	0.434	0.051	0.008	1.05	0.17	/
A6	1.339	11.35	0.409	0.049	0.011	1.27	0.89	0.102

De manière analogue aux alliages A4 et A5, l'augmentation de la teneur en chrome dans l'acier A6 à des teneurs inférieures à 3% ne forme pas des carbures de chrome, néanmoins elle favorise la formation d'une cémentite riche, en plus du manganèse, en chrome. De même, l'augmentation en faibles teneurs en nickel (de 0.17% à 0.89%) ne provoque pas un changement microstructurale perceptible dans l'acier A6. Par contre, une quantité de carbures a été observée dans la microstructure de l'acier A6 comparativement à l'acier B1. Ceci est dû à la présence du chrome et du niobium. Ce dernier est connu par son effet fortement carburigène par rapport au chrome. L'ajout de cet élément favorise la formation des carbures de niobium même à des teneurs inférieures à 1%.

Les carbures secondaires présents dans la microstructure de l'acier A6 sont repartis d'une manière uniforme dans la matrice (figure III.95).



**Figure III.96.** Micrographies optiques à l'état brut de coulée des aciers B1 (a) et A6 (b)

## Résultats et discussions

L'analyse des carbures intergranulaires de l'acier B1 a montré que ces derniers sont de la cémentite alliée au manganèse et au chrome. Les carbures intergranulaires présents dans la microstructure de l'acier A6 pourraient contenir probablement les mêmes éléments chimiques que ceux de l'acier B1. Les carbures intergranulaires des deux aciers (figure III.96) montre que ceux présents dans l'acier A6 sont de grosseur plus importante par rapport à ceux de l'acier B1. Ceci pourrait être expliqué par l'enrichissement de la cémentite de l'acier A6 en chrome.

Quant aux carbures intragranulaires C2, ces derniers peuvent être des carbures simples de niobium et/ou de la cémentite alliée au manganèse, chrome et niobium. Ils ont des formes hétérogènes variant de formes de bâtonnet à des formes plus ou moins arrondies (figure III.96.b). L'acier A6 contient une quantité considérable des carbures intragranulaires qui sont liés aux éléments carburigènes ajoutés.

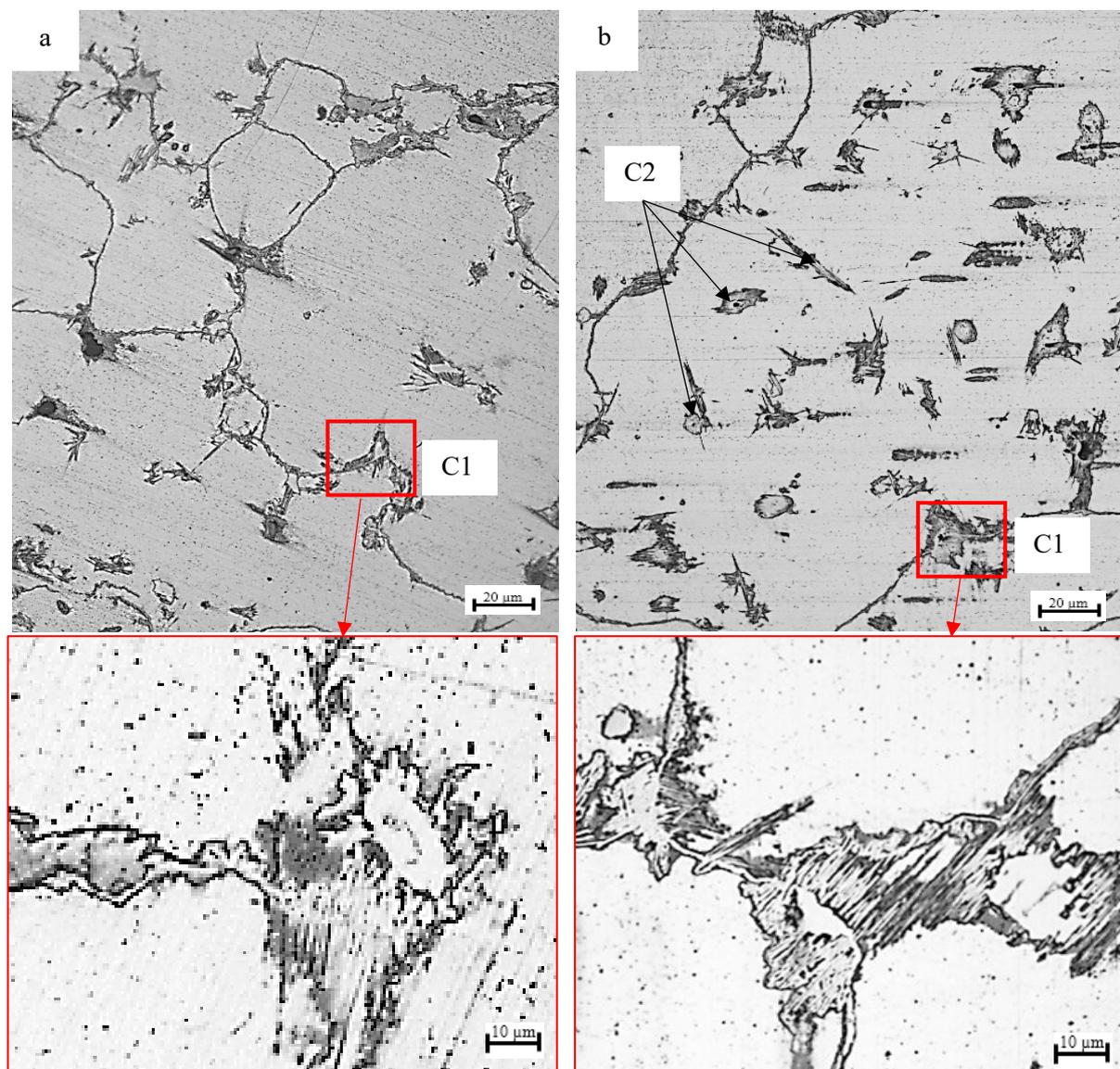
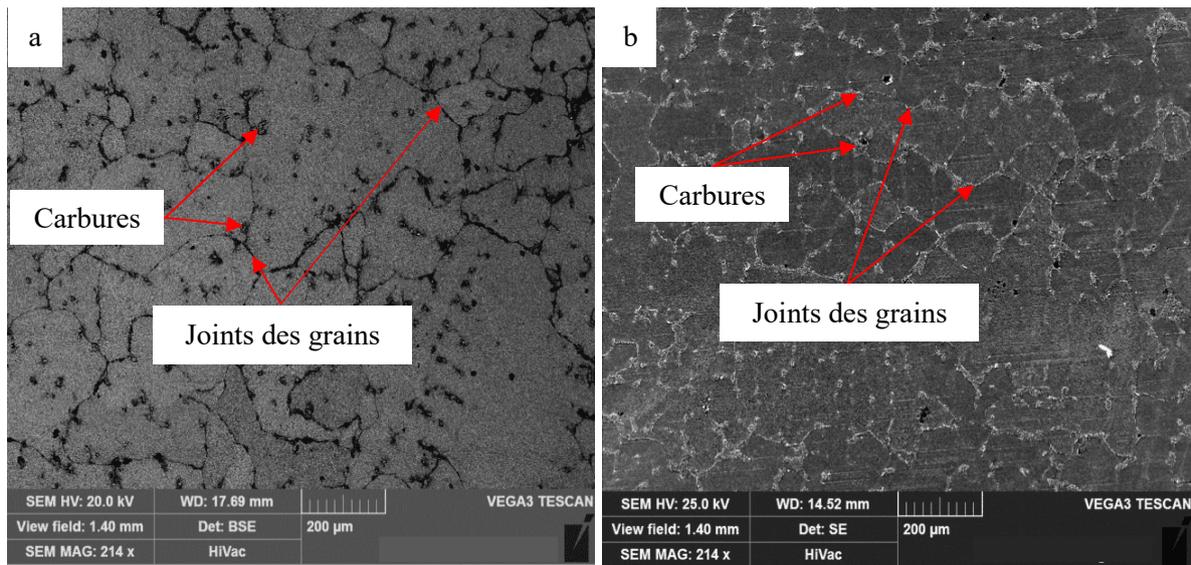


Figure III.97. Carbures inter et intragranulaires des aciers B1 (a) et A6 (b)

En se basant sur les micrographies MEB des deux aciers (figure III.97), il est clair que l'acier A6 présente une microstructure plus fine que l'acier B1. La taille des grains de chaque acier a été ainsi mesurée (tableau III.28) afin de confirmer cette observation. Les résultats ont montré que la taille des grains austénitiques diminue avec l'augmentation de la teneur en chrome et l'ajout du niobium. Ces deux éléments sont des éléments générateurs de carbures. Leur addition favorise la formation des carbures aux joints des grains qui ralentie le grossissement des grains austénitiques et affine ainsi la structure.



**Figure III.98.** Micrographies MEB des aciers B1 (a) et A6 (b) à l'état brut de coulée

**Tableau III. 28.** Tailles des grains des aciers B1 et A6 à l'état brut de coulée

	Acier B1	Acier A6
Tailles des grains austénitiques ( $\mu\text{m}$ )	52	30.1

Dans l'optique de déterminer les éléments dissouts dans la matrice et dans les différents carbures inter et intragranulaires de l'acier A6, une analyse EDS a été réalisée (figure III.98). L'analyse spectrale des carbures intergranulaires (C1) a révélée principalement des pics de Fe, de Mn, de Cr et de C. Ceci montre que ces carbures sont de la cémentite alliée au manganèse et au chrome. Le spectre EDS de la matrice a révélée des pics de Fe, de Mn, de Cr, de Ni, de Nb et de C. Ce résultat est expliqué par l'enrichissement de la matrice en éléments ajoutés (Cr, Nb et Ni). Le spectre des carbures intragranulaires (C2) est composé essentiellement des pics de C et de Nb. Ceci correspond au carbure de niobium.

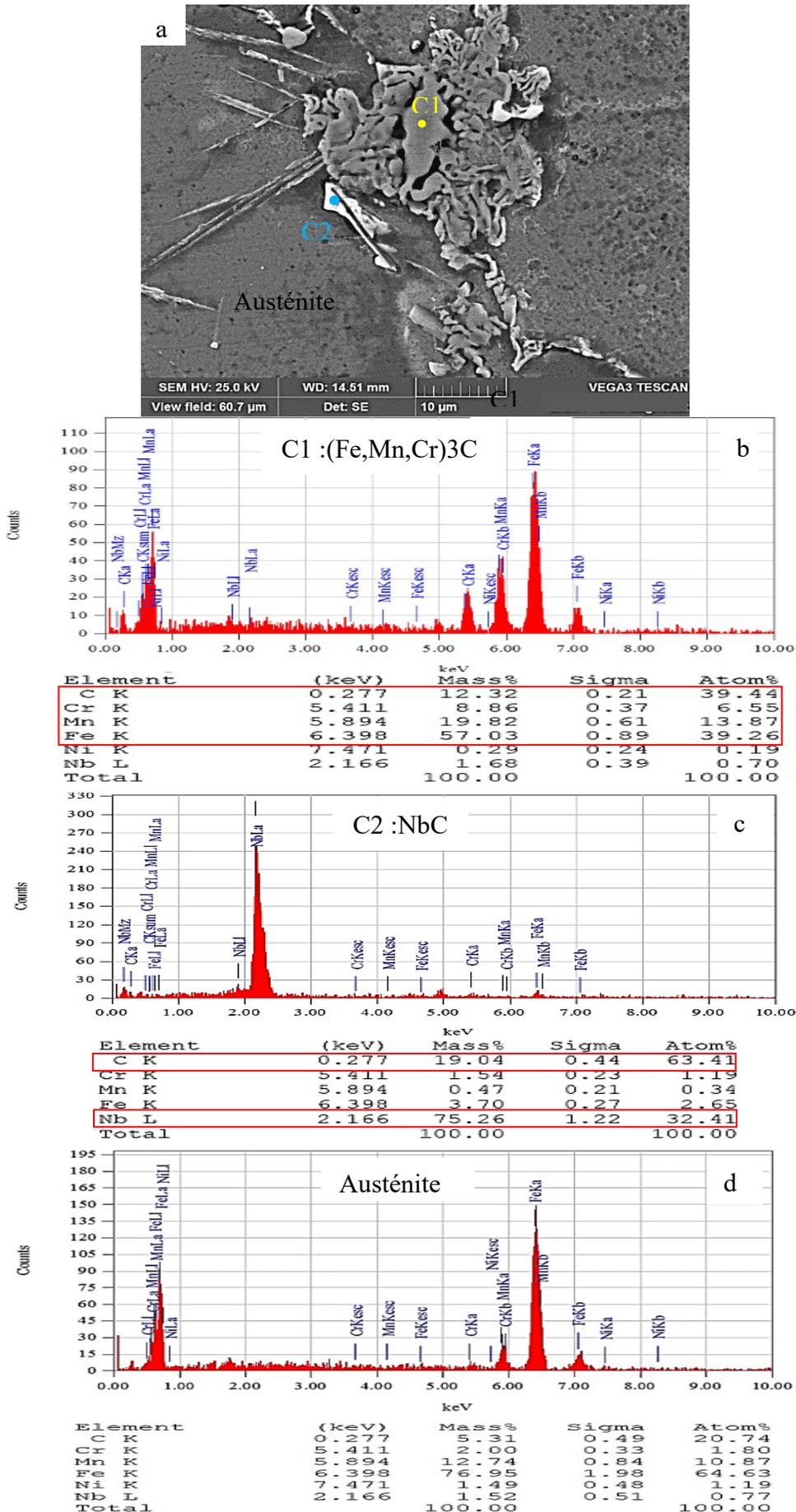
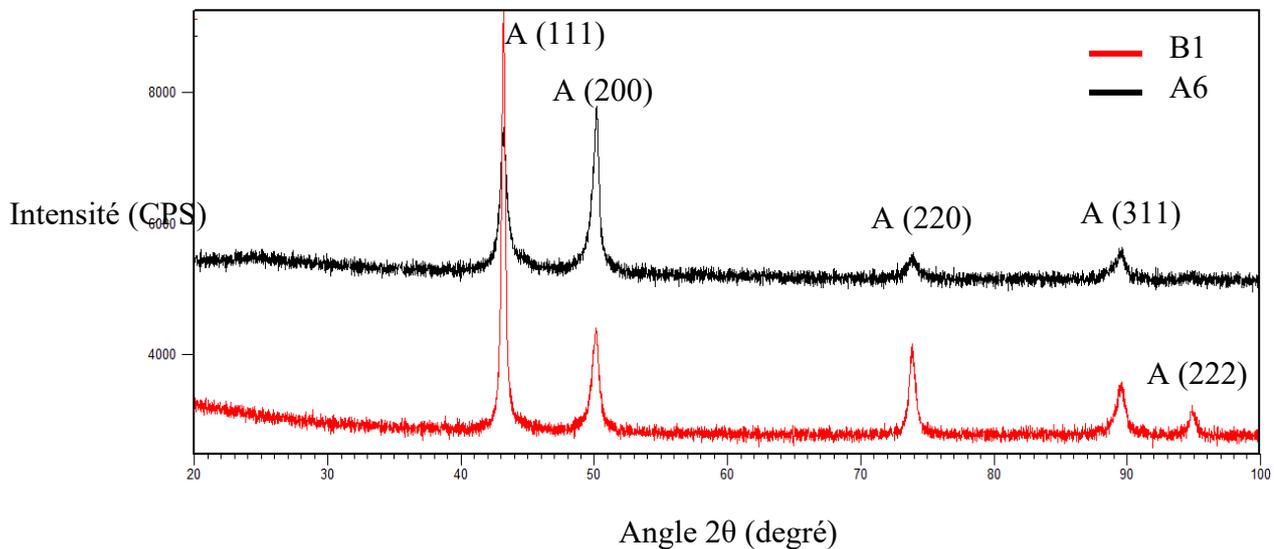


Figure III.99. Micrographie MEB et analyses EDS de l'acier A6

## Résultats et discussions

Les diffractogrammes des rayons X des aciers B1 et A6 à l'état brut de coulée sont présentés par la figure III.99. Ces derniers montrent que les deux aciers contiennent de l'austénite. Les carbures n'ont pas été identifiés à cause de leurs faibles tailles et leurs très faibles quantités comparativement à l'austénite. Les pics représentant l'austénite dans l'acier A6 sont considérablement moins intenses que ceux de l'acier B1. L'austénite (222) est révélée seulement pour l'acier B1. Ceci montre la quantité de l'austénite de l'acier A6 est faible comparativement à celle de l'acier B1. Les éléments ajoutés (Cr et Nb) ont participé à la formation de carbures simples et complexes conduisant légèrement à la diminution de la formation de l'austénite.

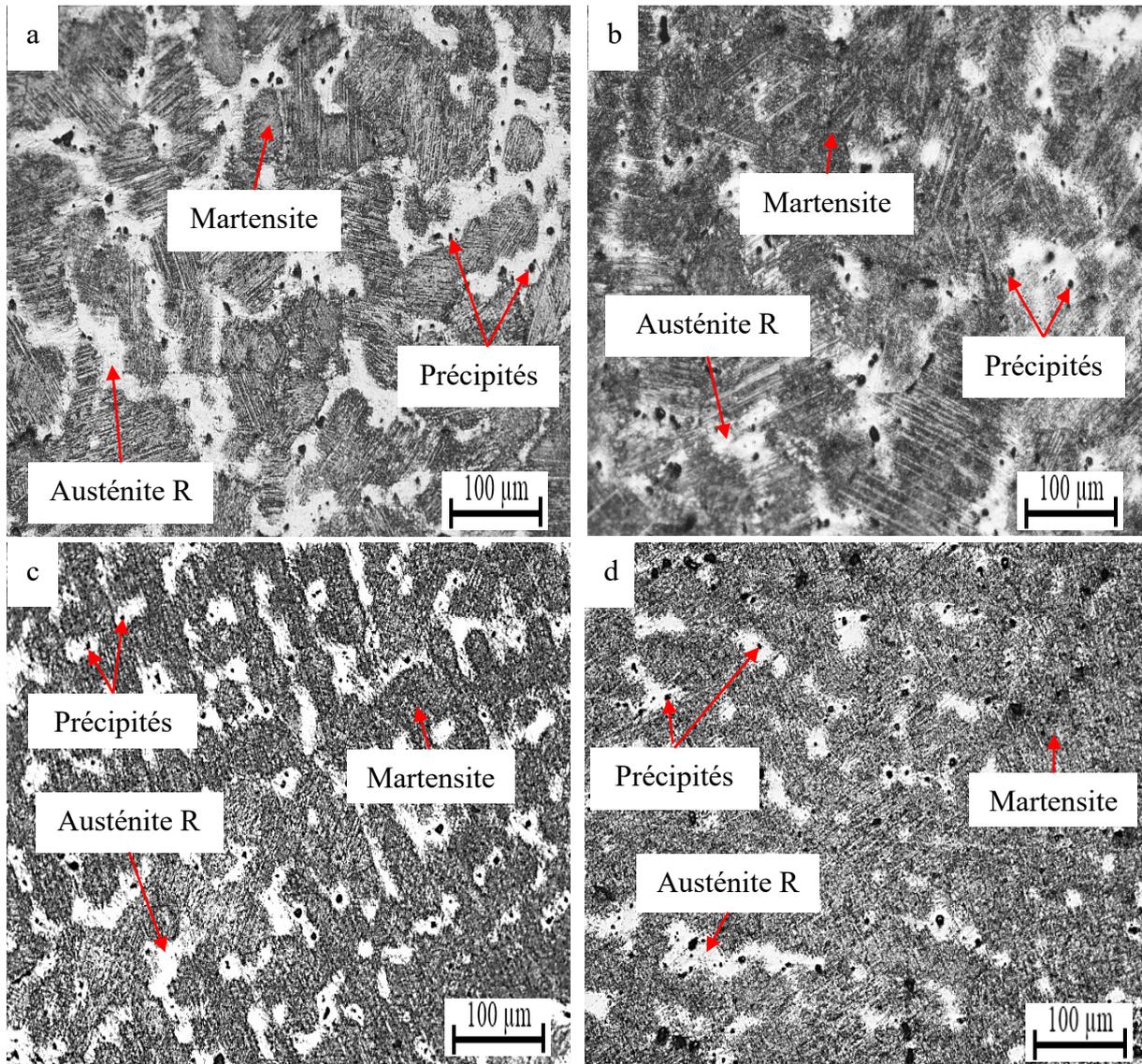


**Figure III.100.** Diffractogrammes des rayons X des aciers B1 et A6 à l'état brut de coulée.  
A : austénite

Les micrographies optiques des aciers B1 et A6 obtenues après traitements thermiques sont montrées par la figure III.100. A cet état, l'acier A6 est composé également de martensite, d'austénite résiduelle et de carbures précipités. La comparaison entre les microstructures des deux aciers montre que l'acier A6 présente plus de martensite que l'acier B1. Ceci est principalement lié à l'ajout du chrome et du niobium. Comme il a été expliqué précédemment, le chrome favorise également la formation de la martensite en grande quantité par son effet trempant. L'influence conjuguée du chrome et du niobium (présent dans l'acier A6) augmente la trempabilité de cet acier par rapport à l'acier B1. Ceci explique la présence de martensite en plus forte quantité dans l'acier A6. Les microstructures de l'acier A6 traité à 1050°C et à 1100°C (figure III.100 b et d) montrent que la quantité de la martensite formée est influencée

## Résultats et discussions

également par la température du traitement thermique. Le passage de la température de 1050°C à 1100°C conduit à une plus grande décomposition des carbures secondaires (principalement la cémentite). Cette décomposition favorise un enrichissement de l'austénite en ces éléments lors de la mise en solution conduisant ainsi à la formation de plus grande quantité de martensite lors de la trempe.

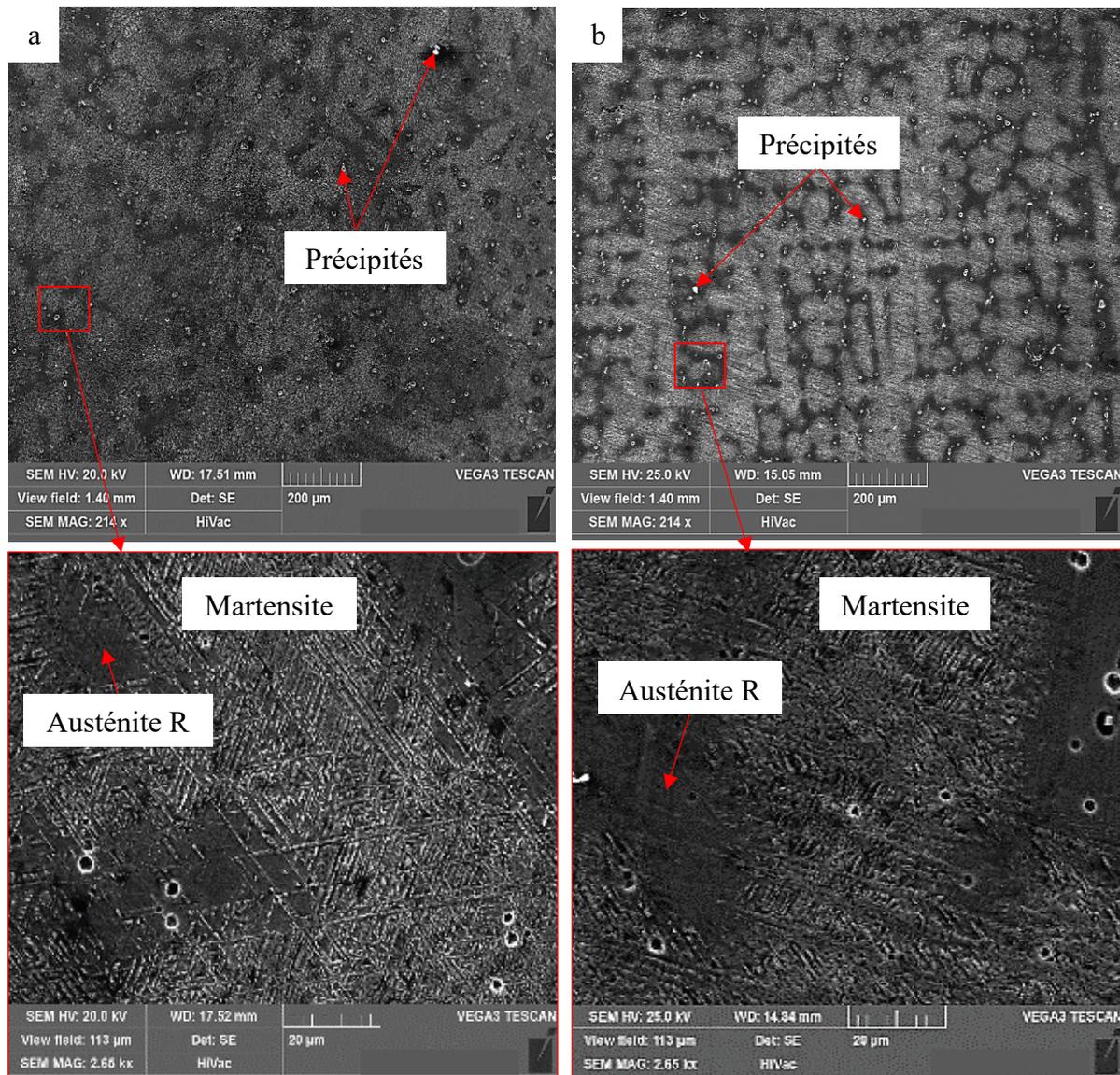


**Figure III.101.** Micrographies optiques des aciers considérés à l'état traité. B1 à 1050°C (a), A6 à 1050°C (b), B1 à 1100°C (c) et A6 à 1100°C (d)

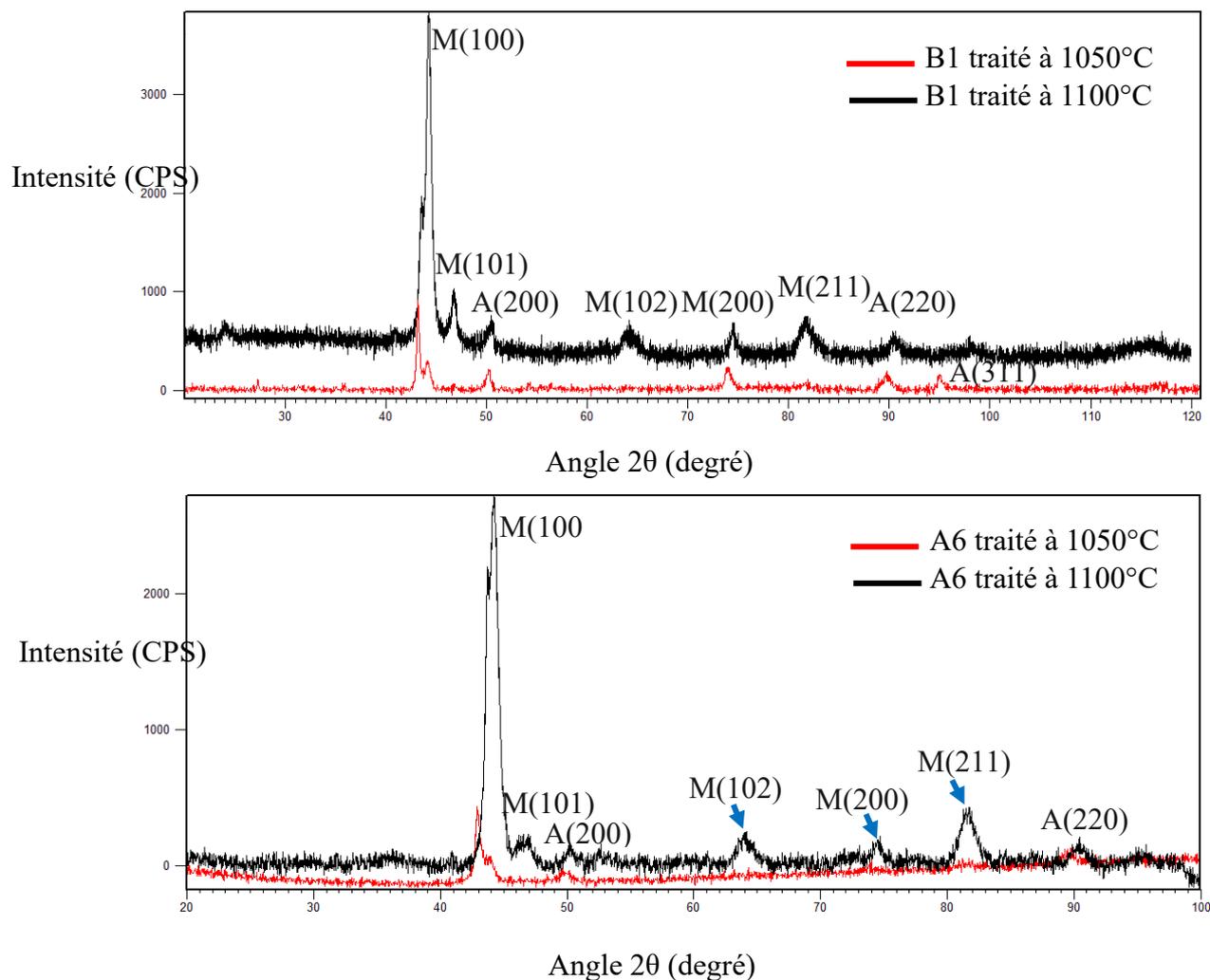
Les micrographies MEB des deux aciers B1 et A6 traités à 1050°C sont présentées par la figure III.101. Cette dernière montre que la quantité de carbures précipités présents dans la microstructure de l'acier A6 est relativement importante que celle de l'acier B1. Ces précipités sont distribués uniformément dans toute la matrice. Ces derniers sont probablement un produit de la décomposition partielle des carbures secondaires formés à l'état brut de coulée. La

## Résultats et discussions

quantité élevée de ces précipités dans l'acier A6 est expliquée par l'ajout des éléments carburigènes (Cr et Nb). De ces observations, il résulte que le traitement thermique à 1050°C n'a pas assuré une décomposition complète des carbures secondaires formés à l'état brut de coulée.



L'analyse par diffraction des rayons X des aciers B1 et A6 à l'état traité (figure III.102) montre que ces derniers sont composés de martensite et d'austénite. Les pics représentant l'austénite dans l'acier A6 sont moins nombreux que dans l'acier B1. Ceci montre que l'acier B1 contient plus d'austénite résiduelle que l'acier A6. L'acier A6 traité à 1100°C a présenté plus de pics de martensite qu'à 1050°C et sont considérablement plus intenses. Ceci est expliqué par l'effet de la température du traitement thermique.



**Figure III.103.** Diffractogrammes des rayons X des aciers B1 et A6 à l'état traité.

A : austénite résiduelle, M : Martensite

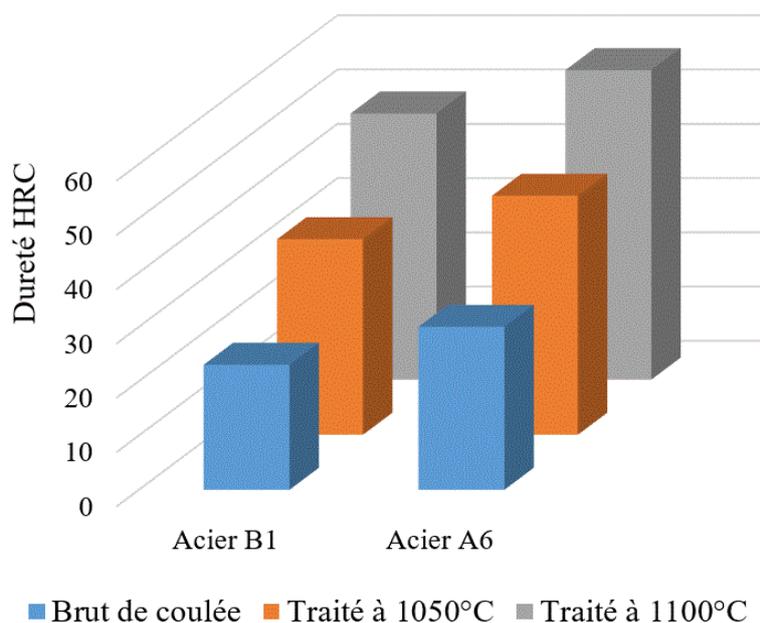
### III.4.2.2. Dureté et microdureté

Les duretés HRC des aciers B1 et A6 à l'état brut de coulée et traité thermiquement sont montrées par la figure III.103. Les duretés de l'acier A6 sont plus élevées que celles de l'acier B1 à l'état brut de coulée. Cette propriété a été encore améliorée après les deux traitements thermiques appliqués. La dureté de l'acier A6 a été améliorée de 30 HRC à l'état brut de coulée à 44 HRC et à 57 HRC après traitement thermique à 1050°C et à 1100°C respectivement.

A l'état brut de coulée, l'augmentation de la dureté de l'acier A6 comparativement à l'acier B1 est expliquée par l'existence des carbures de niobium NbC et l'augmentation de la teneur en chrome dans l'acier A6 qui a conduit à une formation d'une quantité relativement importante de cémentite  $(Fe,Mn,Cr)_3C$  dans ce dernier. D'après l'observation microstructurale des deux aciers à l'état brut de coulée (figure III.94), les carbure de niobium sont distribués uniformément

dans toute la matrice, alors que la cémentite  $(Fe,Mn,Cr)_3C$  se trouve principalement aux joints des grains austénitiques. La formation des carbures intergranulaires influe inversement sur le grossissement des grains, ce qui affine la structure. Une microstructure fine et riche en carbures intragranulaires présente une meilleure dureté, ce qui est le cas pour l'acier A6.

A l'état traité, l'amélioration de la dureté des deux aciers B1 et A6 est justifiée par la formation de la martensite. L'acier A6 présente une dureté élevée comparativement à l'acier B1 après les deux traitements thermiques appliqués. Ceci est dû à la présence des éléments trempant (Nb et Cr) dans cet acier. Le traitement à  $1100^{\circ}C$  a produit une forte dureté que le traitement à  $1050^{\circ}C$ .



**Figure III.104.** Duretés HRC des aciers B1 et A6

Les microduretés des aciers B1 et A6 à l'état brut de coulée et traité thermiquement sont montrées par le tableau III.29 et la figure III.104. La microdureté de la matrice de l'acier A6 à l'état brut de coulée est légèrement élevée que celle de l'acier B1. Ceci est dû à son enrichissement en éléments ajoutés Nb, Cr et Ni. La microdureté des carbures intergranulaires de l'acier A6 est relativement élevée que celle des carbures de l'acier B1. Les carbures intergranulaires des deux aciers sont de même type  $M_3C$  et composés des mêmes éléments Fe, Mn, Cr et C (figure III.98). La seule différence entre les deux est que les carbures de l'acier A6 sont plus riches en chrome ce qui favorise l'augmentation de leur microdureté comparativement aux carbures intragranulaires de l'acier B1. La microdureté des carbures intra et intergranulaires sont totalement différentes. Les carbures intragranulaires présentent une dureté plus élevée ( $2126 \mu Hv_{20}$ ) que celle des carbures intergranulaires ( $1265 \mu Hv_{20}$ ). Ceci confirme que ces

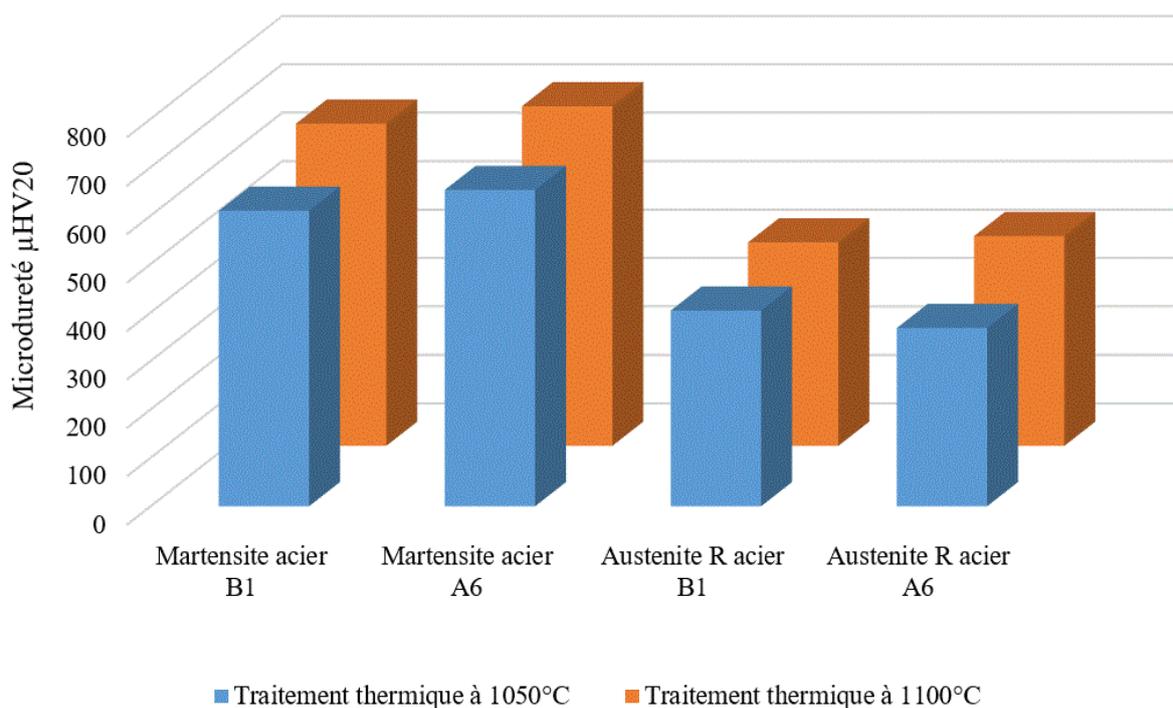
## Résultats et discussions

derniers sont des carbures différents. La microdureté des carbures intragranulaires mesurée correspond à la dureté des carbures de niobium.

La microdureté de la martensite de l'acier A6 est plus importante que celle de l'acier B1. Cette dernière s'accroît avec l'élévation de la température du traitement thermique. L'ajout des éléments trempant tels que le niobium et le chrome accompagné d'une augmentation de la température du traitement thermique a favorisé une formation d'une martensite plus riche en ces éléments, ce qui a mené à l'augmentation de la microdureté de cette phase.

**Tableau III.29.** Microduretés des phases des aciers B1 et A6

	Microduretés, $\mu\text{HV}_{20}$						
	Brut de coulée			Traité thermiquement à 1050°C		Traité thermiquement à 1100°C	
	Matrice (Austénite)	(Fe,Mn,Cr) <sub>3</sub> C	NbC	Martensite	Austénite R	Martensite	Austénite R
Acier B1	391	1120	/	610	404	649	411
Acier A6	417	1265	2126	665	420	701	433



**Figure III.105.** Microduretés de la martensite et de l'austénite résiduelle des aciers B1 et A6 à l'état traité

### III.4.2.3. Comportement tribologique

Les pertes de masse des aciers A6 et B1 à l'état brut de coulée et traité sont présentées par la figure III 105. La perte de masse de l'acier A6 est beaucoup plus faible que celle de l'acier B1 pour les deux états brut de coulée et traité thermiquement. Cette diminution est fortement liée

## Résultats et discussions

aux changements microstructuraux induits par les éléments d'addition et les traitements thermiques appliqués.

A l'état brut de coulée, les éléments carburigènes ajoutés (Cr et Nb) favorisent la formation d'une structure fine et riche en carbures intragranulaires, de faibles tailles et dispersées uniformément dans toute la matrice. De l'autre côté, la présence d'un autre élément fortement gammagène (0.89%Ni), ne provoquant pas un changement microstructural observable, participe à l'enrichissement de la matrice austénitique conduisant à son durcissement. Ceci explique la diminution de la perte de masse et l'amélioration la résistance à l'usure de cet acier. A l'état traité, la perte de masse des deux aciers est plus faible par rapport à l'état brut de coulée. La formation de la martensite après traitements thermiques améliore la tenue à l'usure des aciers considérés et réduit leur perte de masse. La perte de masse de l'acier A6 reste toujours plus faible par rapport à l'acier B1 après les deux traitements thermiques. Ceci est expliqué par l'effet des éléments trempant menant à la formation de la martensite en quantité significative lors de la trempe. La diminution de la perte de masse de l'acier A6 avec l'augmentation de la température du traitement thermique de 1050°C à 1100°C se traduit par une amélioration du comportement à l'usure de cet acier. Ceci est interprété par la formation d'une structure plus riche en martensite et en fins précipités dispersés uniformément dans la matrice (figure III.100).

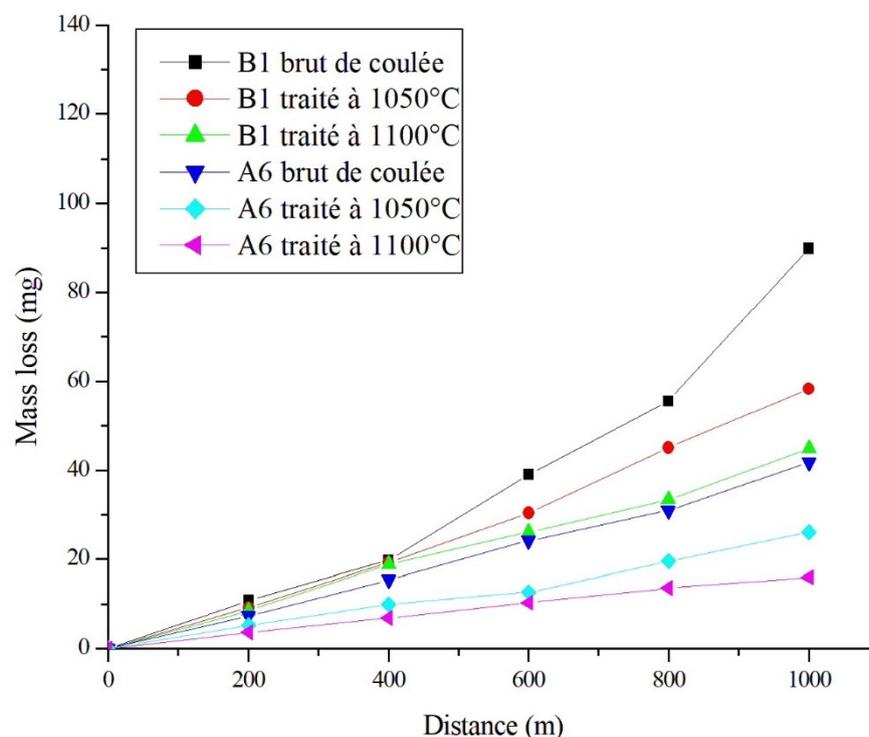


Figure III.106. Pertes de masse des aciers B1 et A6 à l'état brut de coulée et traité

## Résultats et discussions

Les courbes et les coefficients de frottement des aciers B1 et A6 à l'état brut de coulée et traité en fonction de la distance parcourue sont montrés respectivement par le tableau III.30 et la figure III.106.

Deux différents stades ont été identifiés, un stade de rodage et un stade de stabilité. Ces deux stades varient en fonction de la composition chimique, des traitements thermiques et de la charge appliquée.

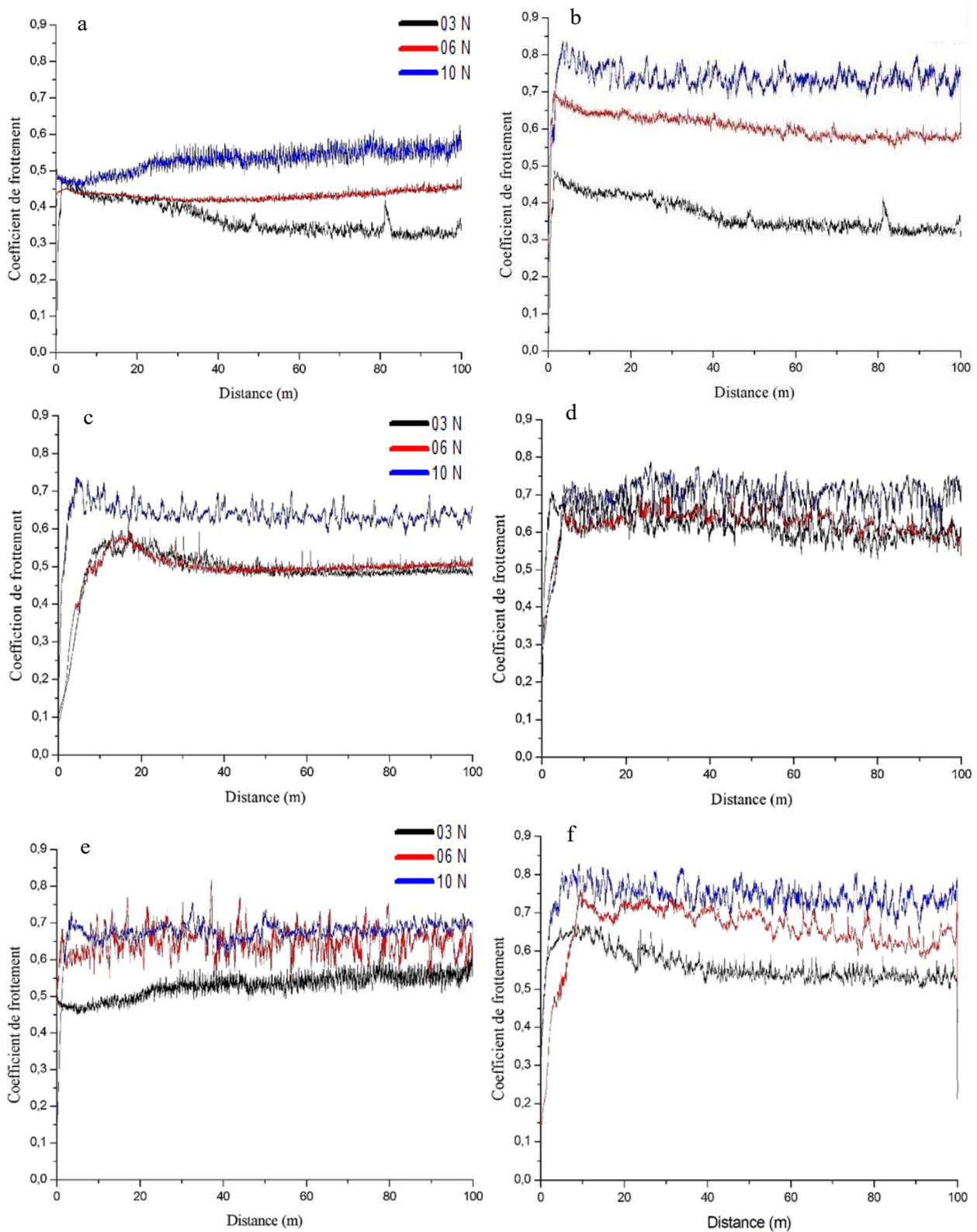
A l'état brut de coulée et pour une charge de 3N, les coefficients de frottement des deux aciers B1 et A6 diminuent légèrement jusqu'à une distance de 50m puis se stabilisent à partir des valeurs de 0.366 et de 0.398 respectivement. Lors de l'application de la charge de 6N, les coefficients de frottement des deux aciers restent pratiquement invariables et égale à 0,482 pour l'acier B1 et 0.688 pour l'acier A6. A 10N, les coefficients de frottement des aciers B1 et A6 commencent à se stabiliser après une distance parcourue de 30m et de 20m respectivement (figure III.106 a et b). On remarque que les coefficients de frottement de l'acier A6 sont plus élevés que ceux de l'acier B1. Ceci est expliqué par la présence de carbures secondaires dans la microstructure de l'acier A6 en plus grande quantité par rapport à l'acier B1.

A l'état traité, la période de rodage est faible comparativement à l'état brut de coulée (figure III.106 c,d,e et f). Les courbes de coefficient de frottement de l'acier A6 commencent à se stabiliser après de faibles distances relativement à l'acier B1. Ces remarques sont expliquées par l'existence de quantité plus importante d'austénite résiduelle dans l'acier B1. Cette dernière conduit à une hétérogénéité de la structure nécessitant une longue durée de rodage par rapport à celle de l'acier A6. D'après les observations optiques de l'acier A6 (figure III.100), ce dernier présente une microstructure majoritairement composée de martensite. Cette dernière conduit à une faible période de rodage par rapport à l'acier B1 et favorise une augmentation du coefficient de frottement (figure III.106 d et f).

**Tableau III.30.** Coefficients de frottements des aciers B1 et A6

	Charges, N					
	03		06		10	
	B1	A6	B1	A6	B1	A6
Brut de coulée	0.366	0.398	0,482	0.688	0.590	0.740
Traité à 1050°C	0.492	0.689	0,494	0.693	0.602	0.751
Traité à 1100°C	0.529	0.672	0,528	0.707	0.617	0.763

## Résultats et discussions



**Figure III.107.** Coefficients de frottement des aciers B1 (a) et A6 (b) à l'état brut de coulée et à l'état traité : B1 (c) et A6 (d) à 1050°C et B1 (e) et A6 (f) à 1100°C

## Résultats et discussions

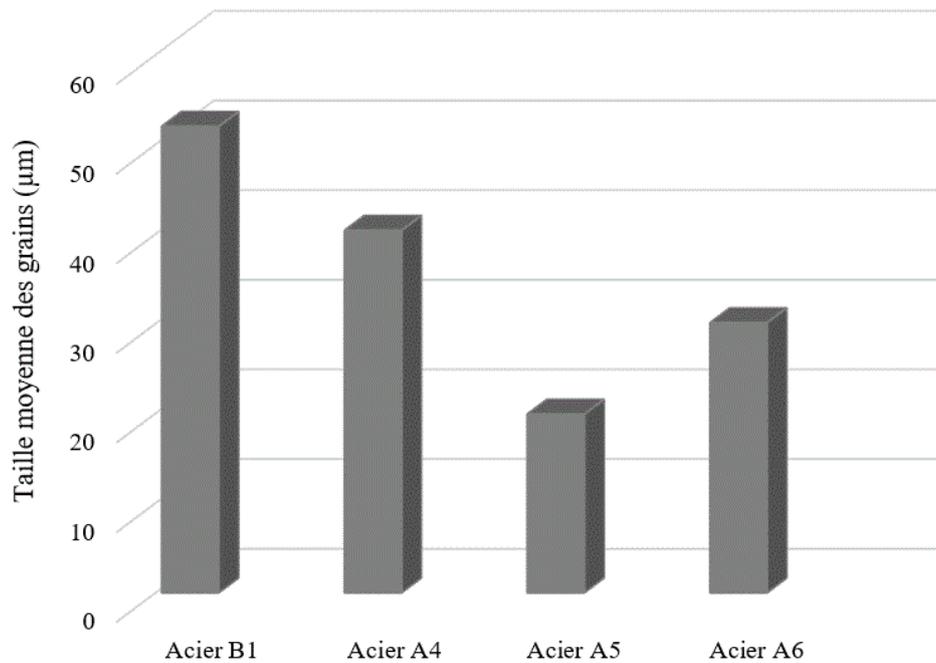
Une analyse récapitulative regroupant les principales caractérisations des microstructures, de duretés et de comportements tribologiques des aciers A4, A5 et A6 et B1 est discuté dans cette partie.

L'observation microstructurale des aciers caractérisés montre qu'à l'état brut de coulée, ces derniers ont les mêmes constituants microstructuraux : austénite et carbures secondaires (inter et intragranulaires). Les carbures intergranulaires dans tous ces aciers sont de la cémentite alliée au manganèse et au chrome ((Fe,Mn,Cr)<sub>3</sub>C). La grosseur de cette dernière évolue avec l'augmentation de la teneur en chrome. Quant aux carbures intragranulaires, dans les aciers B1, A4 et A5, ils sont de la cémentite alliée au manganèse ((Fe,Mn)<sub>3</sub>C). Par contre dans l'acier A6, ces derniers sont des carbures de niobium de type MC (NbC).

La taille moyenne des grains austénitiques diffère également d'un acier à un autre. Cette dernière diminue avec l'augmentation de la teneur en chrome. Les tailles moyennes des grains austénitiques des aciers B1, A4, A5 et A6 sont 52µm, 40.4µm, 19.9µm et 30.1µm respectivement (figure III.107). L'acier A5 présente la plus fine structure. Le tableau III.31 montre les différents carbures formés et la taille des grains austénitiques des aciers considérés.

**Tableau III.31.** Carbures formés et tailles des grains austénitiques des différents aciers à l'état brut de coulée

Aciers	Éléments d'addition	Carbures	Distribution des carbures	Tailles moyennes des grains austénitiques (µm)
B1	/	(Fe,Mn) <sub>3</sub> C	Intragranulaires	52
		(Fe,Mn,Cr) <sub>3</sub> C	Intergranulaires	
A4	Cr + Ni	(Fe,Mn) <sub>3</sub> C	Intragranulaires	40.4
		(Fe,Mn,Cr) <sub>3</sub> C	Intergranulaires	
A5	Cr + Ni	(Fe,Mn) <sub>3</sub> C	Intragranulaires	19.9
		(Fe,Mn,Cr) <sub>3</sub> C	Intergranulaires	
A6	Cr + Ni + Nb	(Fe,Mn,Cr) <sub>3</sub> C	Intergranulaires	30.1
		NbC	Intragranulaires	



**Figure III.108.** Tailles moyennes des grains austénitiques des aciers B1, A4, A5 et A6 à l'état brut de coulée

A l'état traité, tous les aciers considérés ont les mêmes microstructures. Ces dernières sont composées de martensite, d'austénite résiduelle et de précipités. La martensite est la phase prédominante pour les deux traitements thermiques appliqués dans tous les aciers. Cette dernière évolue également avec l'augmentation des éléments ajoutés (trempant) et de la température du traitement thermique.

Les duretés HRC des aciers B1, A4, A5 et A6 à l'état brut de coulée et traité sont montrées par la figure III.108. Elles varient proportionnellement avec l'augmentation de la teneur en éléments ajoutés et de la température des traitements thermiques appliqués. L'acier A6 est l'acier le plus dur à l'état brut de coulée malgré qu'il présente une structure grossière par rapport à l'acier A5. Ceci est expliqué par la présence des carbures intragranulaires de type MC (NbC) dans sa microstructure. A l'état traité, cet acier reste également le plus dur pour les deux traitements thermiques appliqués grâce au taux de martensite le plus élevé.

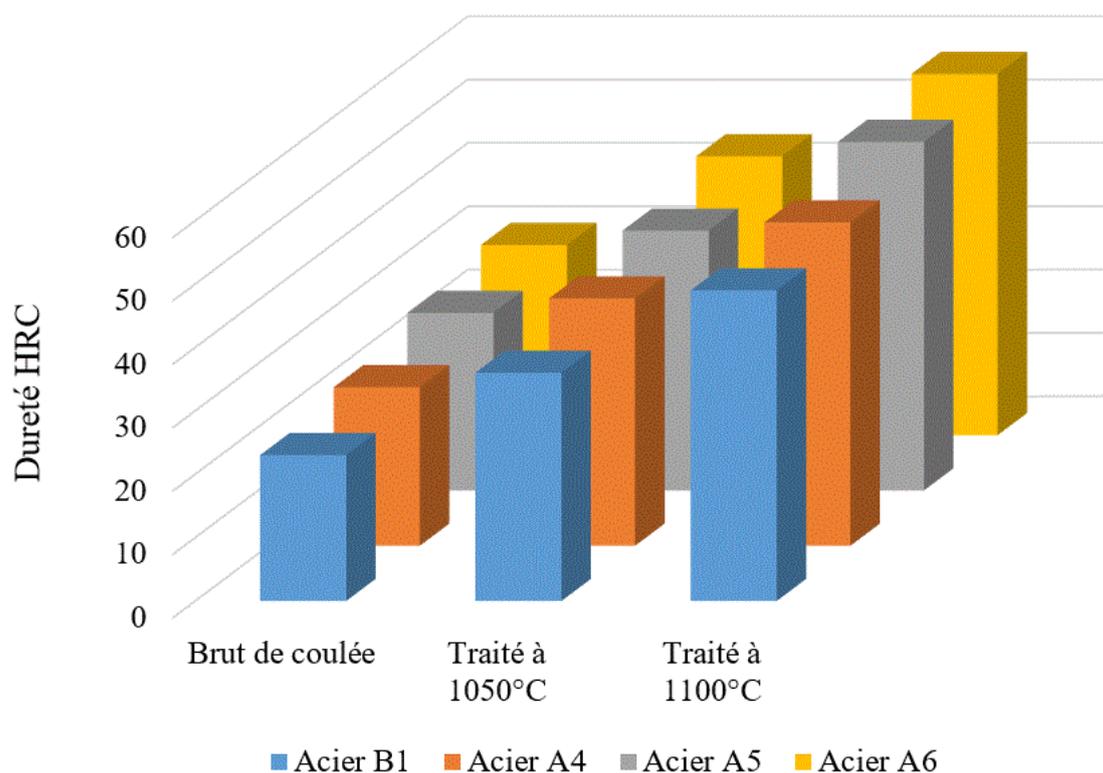


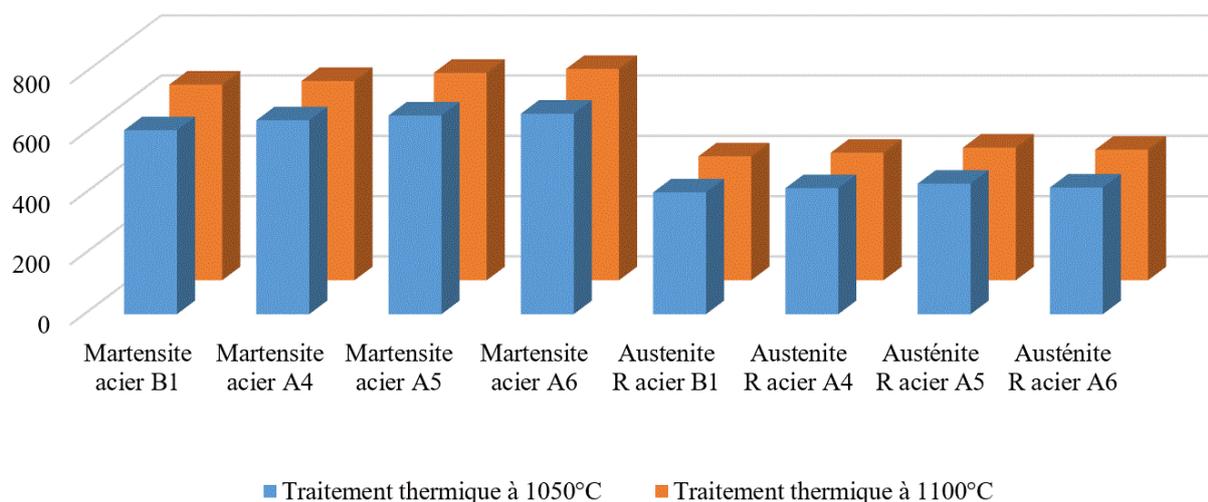
Figure III.109. Duretés HRC des aciers B1, A4, A5 et A6 à l'état brut de coulée et traité

Les microduretés des différentes phases existantes à l'état brut de coulée et traité des aciers considérés sont données par le tableau III.32 et présentées par la figure III.109. A l'état brut de coulée, l'acier A5 révèle une austénite et une cémentite plus dures que celles des aciers B1, A4 et A6. A l'état traité, l'austénite de l'acier A5 est relativement plus dure que celle des trois autres aciers pour les deux traitements thermiques. Par contre, la microdureté de la martensite des aciers considérés est améliorée sous l'action des éléments ajoutés et de la température des traitements thermiques appliqués. La martensite de l'acier A6 est la plus dure que celles des autres aciers pour les deux traitements thermiques. Ceci est dû à son enrichissement en chrome et en niobium.

Tableau III.32. Microduretés des différentes phases des aciers B1, A4, A5 et A6 à l'état brut de coulée et traité thermiquement

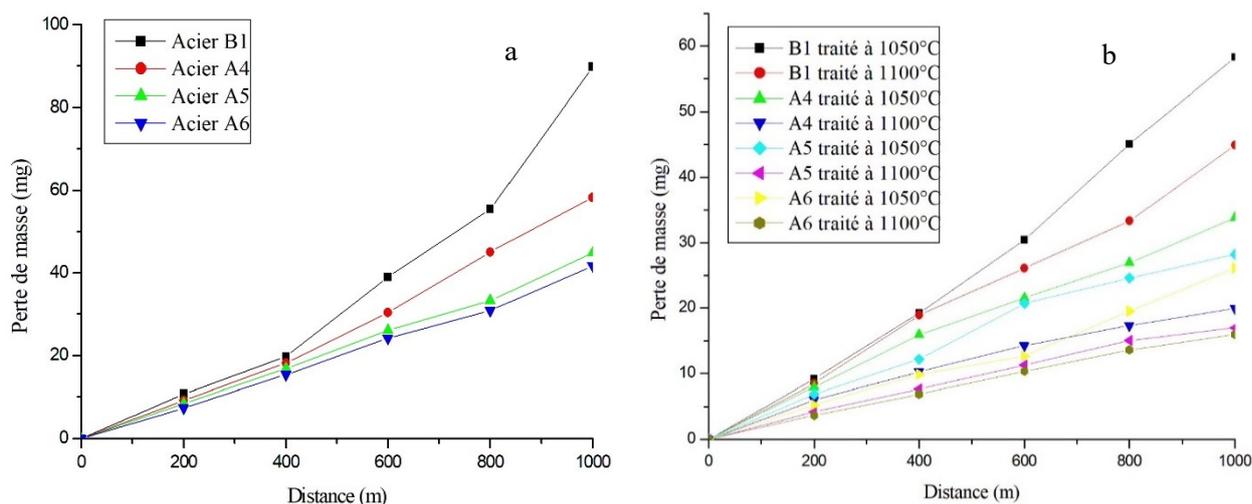
Aciers	Microduretés, $\mu\text{HV}_{20}$						
	Brut de coulée			Traité thermiquement à 1050°C		Traité thermiquement à 1100°C	
	Matrice (Austénite)	(Fe,Mn,Cr) <sub>3</sub> C	NbC	Martensite	Austénite R	Martensite	Austénite R
B1	391	1120	/	610	404	649	411
A4	415	1270	/	643	418	661	423
A5	450	1327	/	659	433	688	440
A6	417	1265	2126	665	420	701	433

## Résultats et discussions



**Figure III.111.** Microduretés de la martensite et de l'austénite résiduelle des aciers B1, A4, A5 et A6 à l'état traité

Les pertes de masse des aciers B1, A4, A5 et A6 à l'état brut de coulée et traité sont présentées par la figure III.110. A l'état brut de coulée, la perte de masse des aciers considérés diminue avec l'augmentation de la teneur des éléments ajoutés. La perte de masse de l'acier A6 est la plus faible, ce qui explique son meilleur comportement au frottement comparativement aux autres aciers. A l'état traité, les pertes de masse sont plus faibles par rapport à l'état brut de coulée. Les fortes pertes de masse sont enregistrées dans l'acier B1. La perte de masse la plus faible est obtenue après traitement thermique à 1100°C.



**Figure III.110.** Pertes de masse des aciers B1, A4, A4 et A6 à l'état brut de coulée (a) et traité (b)

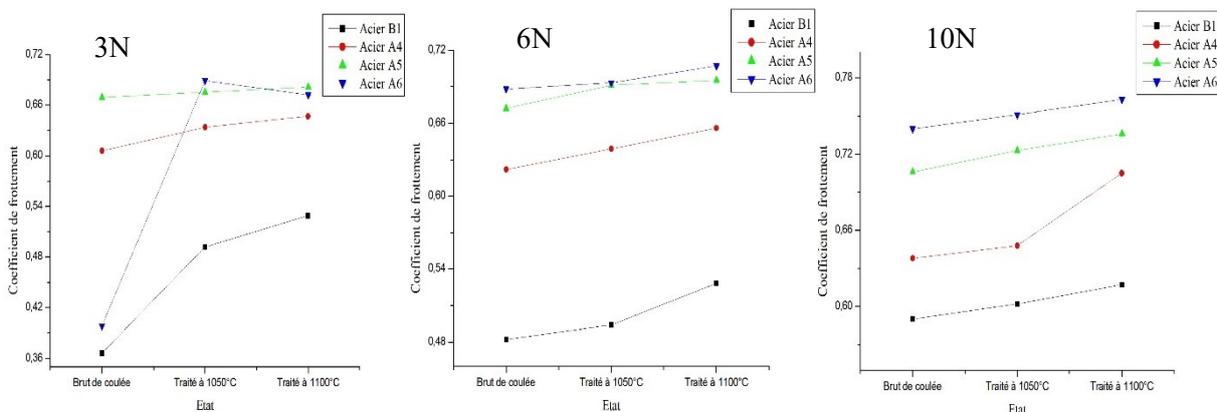
La variation du coefficient de frottement en fonction de la charge appliquée est présentée par le tableau III.33 et la figure III.111. Le coefficient de frottement augmente avec la charge

## Résultats et discussions

appliquée que ce soit à l'état brut de coulée ou à l'état traité. Ce dernier évolue aussi avec l'ajout des éléments d'alliage. A l'état brut de coulée, l'acier A5 présente un coefficient de frottement plus élevé que les autres aciers sous une charge de 3N. Par contre à 6N et à 10N, c'est l'acier A6 qui a le coefficient de frottement le plus élevé. A l'état traité, le coefficient de frottement est relativement plus élevé qu'à l'état brut de coulée pour tous les aciers et sous différentes charges. L'acier A6 présente un coefficient de frottement le plus élevé comparativement aux autres aciers pour les trois charges. Le traitement thermique à 1100°C a conduit à un coefficient de frottement le plus élevé pour tous les aciers.

**Tableau III.33.** Coefficients de frottement des aciers à l'état brut de coulée et traité

Aciers	Charges, N											
	03				06				10			
	B1	A4	A5	A6	B1	A4	A5	A6	B1	A4	A5	A6
Brut de coulée	0.366	0.606	0.669	0.398	0.482	0.622	0.672	0.688	0.590	0.638	0.706	0.740
Traité à 1050°C	0.492	0.634	0.675	0.689	0.494	0.639	0.691	0.693	0.602	0.648	0.723	0.751
Traité à 1100°C	0.529	0.647	0.681	0.672	0.528	0.656	0.695	0.707	0.617	0.705	0.736	0.763



**Figure III.112.** Variation du coefficient de frottement en fonction de la charge appliquée des aciers B1, A4, A5 et A6 à l'état brut de coulée et traité

### III.4.3. Conclusion

Les principaux résultats que l'on peut tirer de cette partie sont :

- Etat brut de coulée :
  - La microstructure de l'acier Hadfield contenant une faible quantité de chrome est composée d'austénite et de carbures secondaires intra et intergranulaires. Les carbures intragranulaires sont de la cémentite alliée au manganèse ((Fe,Mn)<sub>3</sub>C) et les intergranulaires sont de la cémentite alliée au manganèse et au chrome ((Fe,Mn,Cr)<sub>3</sub>C) ;
  - L'augmentation de la teneur en chrome a favorisé le grossissement de la cémentite (Fe,Mn,Cr)<sub>3</sub>C et l'augmentation de sa quantité ;
  - La formation de la cémentite alliée (Fe,Mn,Cr)<sub>3</sub>C a réduit le grossissement des grains austénitiques et a affiné la structure de l'acier ;
  - L'ajout du nickel en faible teneur n'a pas provoqué de changement microstructural remarquable ;
  - L'ajout du niobium a conduit à la formation d'un nouveau carbure intragranulaire de type MC (NbC).
- Etat traité
  - La microstructure de l'acier Hadfield est composée de martensite, d'austénite résiduelle et de précipités ;
  - L'augmentation de la température du traitement thermique de 1050°C à 1100°C a provoqué la décomposition des carbures secondaires conduisant à la formation de la martensite en grande quantité ;
  - La quantité de la martensite augmente également avec l'élévation de la teneur en chrome et en niobium.
- La dureté et la résistance à l'usure sont améliorées avec l'augmentation de la teneur en chrome et en niobium et de la température des traitements thermiques appliqués.
- Le coefficient de frottement s'élève avec l'ajout du chrome et du niobium et avec la charge appliquée.