

Figure III.36. Micrographies optiques 2D (a) et 3D (b) et rugosités Ra et Sa (c) de l'échantillon A1 traité à 1100°C après le test tribologique à l'état lubrifié

L'observation optique de la surface de l'acier A1 traité à 1100°C après l'essai tribologique à l'état lubrifié (figure III.36) révèle une micrographie exempte de rayures et composée de deux phases différentes ayant été colorées par le lubrifiant utilisé. Ces deux phases correspondent à celles de l'acier à l'état traité où la martensite est la phase majoritaire par rapport à l'austénite résiduelle. Ainsi à travers la micrographie obtenue, le lubrifiant utilisé a coloré la martensite en bleu. Ce lubrifiant a provoqué l'élimination des aspérités en excès restantes après le polissage mécanique réalisé contre un papier de granulométrie 4000 avant le test tribologique. Ce phénomène a conduit à une usure par polissage. Ce type d'usure est obtenu généralement en frottant deux surfaces solides l'une contre l'autre. Il consiste à un polissage de finition d'une surface déjà polis mécaniquement. Ce résultat est observé seulement pour l'acier A1 traité à 1100°C. Ce dernier contient plus de martensite conduisant à une haute dureté comparativement aux autres aciers expérimentés et par conséquent un meilleur polissage.

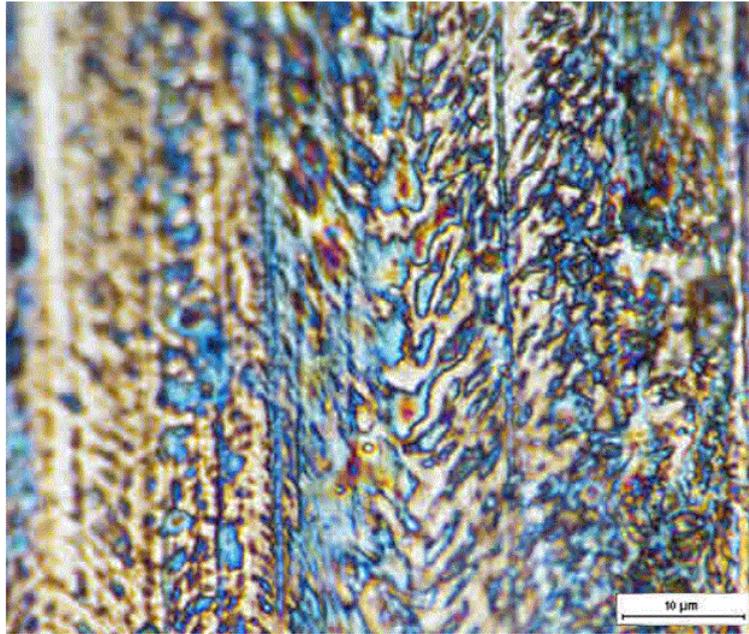


Figure III.37. Micrographie optique de l'acier A1 traité à 1100°C après lubrification

Afin de mettre en valeur l'effet du lubrifiant sur les paramètres de rugosité R_a et S_a , une analyse AFM a été effectuée (figure III.37 et III.38) sur la surface l'échantillon A1 traité à 1100°C avant et après le test tribologique à l'état lubrifié. Avant le test tribologique, l'échantillon a été attaqué chimiquement au Nital 4%. Ce dernier a présenté une rugosité linéaire R_a de 49.126nm (figure III.37) alors que la rugosité R_a du même acier ayant subi le test tribologique lubrifié est de 15.035nm (figure III.38). L'attaque chimique a provoqué un phénomène de corrosion conduisant à une dégradation de l'état de surface. Par contre, le lubrifiant utilisé a eu un effet moins nocif sur la surface. Ces résultats expliquent l'effet positif du lubrifiant. La rugosité surfacique S_a de l'acier A1 traité à 1100°C et attaqué chimiquement est égale à 123.85nm et celle du même acier après le test tribologique à l'état lubrifié est de 15.918nm. On observe qu'après l'essai tribologique la rugosité surfacique s'est fortement améliorée. Cette amélioration est estimée à huit fois plus. Ceci est expliqué par le fait que l'attaque chimique a provoqué un phénomène de corrosion de la matrice plus intense que les précipités présents dans la microstructure de l'acier (figure III.37). Par contre, le test tribologique à l'état lubrifié a formé un tribofilm à la surface testée.

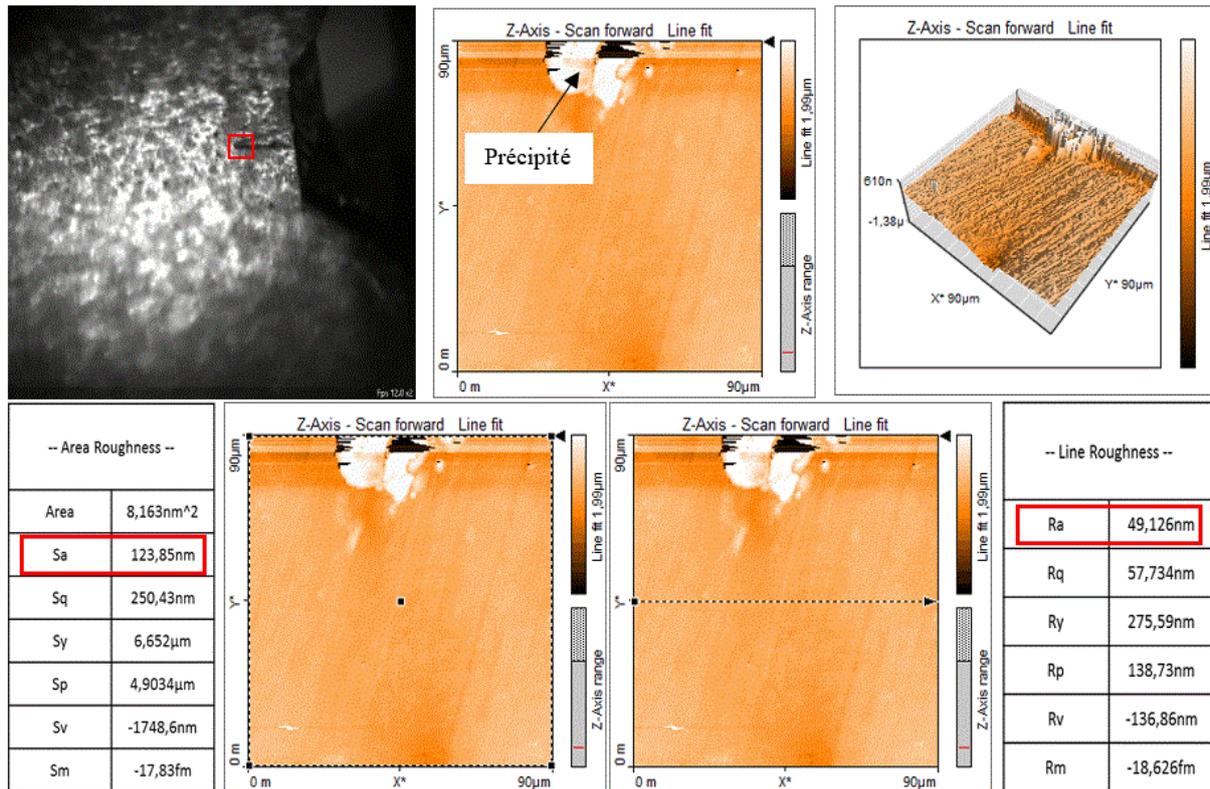


Figure III.39. Analyse AFM de l'acier A1 traité à 1100°C attaqué chimiquement

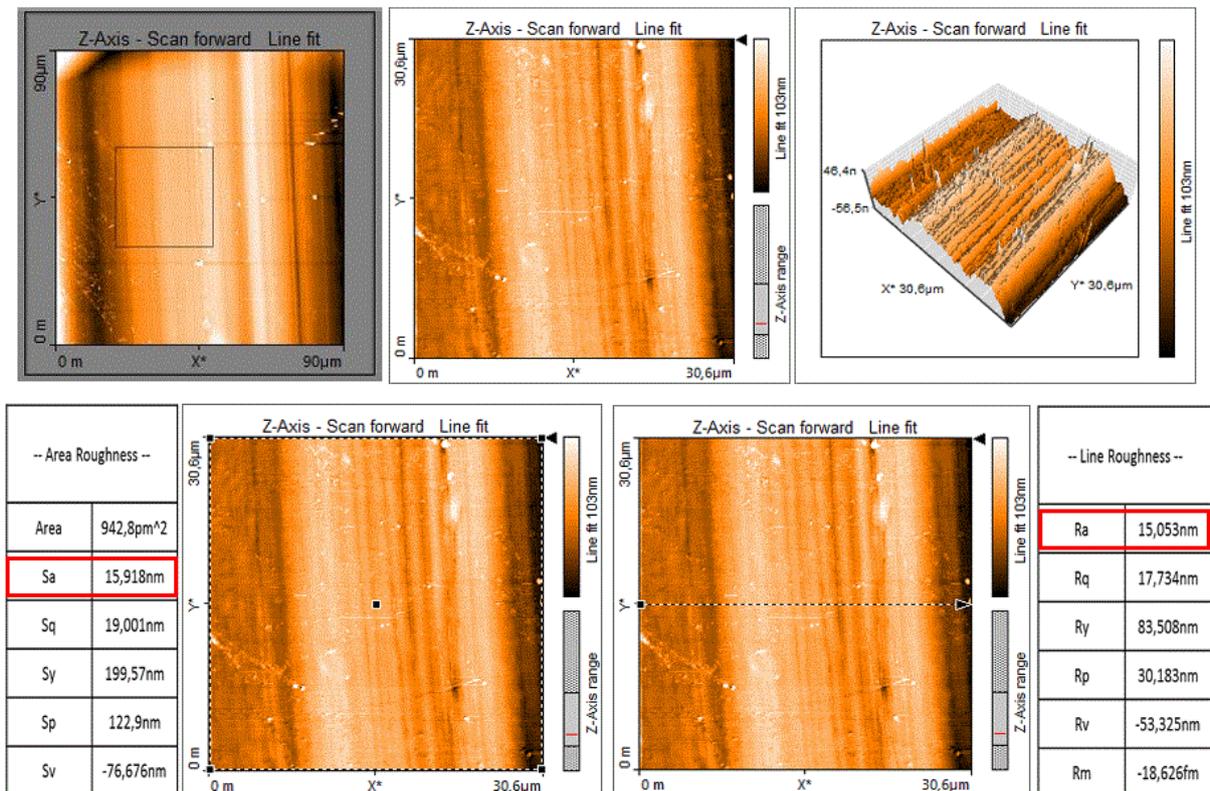


Figure III.38. Analyse AFM de l'acier A1 traité à 1100°C après lubrification

Résultats et discussions

Une observation au MEB et une analyse EDS (figure III.40 et III.41) des surfaces de l'échantillon A1 traité à 1050°C et à 1100°C après lubrification ont été réalisées dans le but de déterminer la composition du tribofilm formé. Le spectre de l'acier A1 traité à 1050°C révèle, en plus des pics des éléments composant l'acier (Fe, Mn, Cr et Mo), des pics de Ca et P. Quant au spectre du même acier traité à 1100°C, il montre les mêmes pics avec la présence d'un pic de Zn. Ces résultats expliquent la formation d'un tribofilm composé des éléments se trouvant dans l'huile utilisée.

Le comportement tribologique à l'état lubrifié des aciers B2 et A1 traités à 1050°C sont complètement différents comme le montre les figures III.39 et III.40. On observe que sur l'acier B2 s'est formé un amas de débris d'usure plus important par rapport à l'acier A1 traité à la même température. Ceci est expliqué par le fait que l'acier A1 est plus dur que l'acier B2 grâce à la présence d'une quantité importante de martensite dans l'acier A1. D'autre part, l'analyse EDS de l'acier B2 n'a pas révélé de pics montrant les éléments contenus dans l'huile utilisée comme lubrifiant. Ceci montre la non-formation de tribofilm diminuant l'usure.

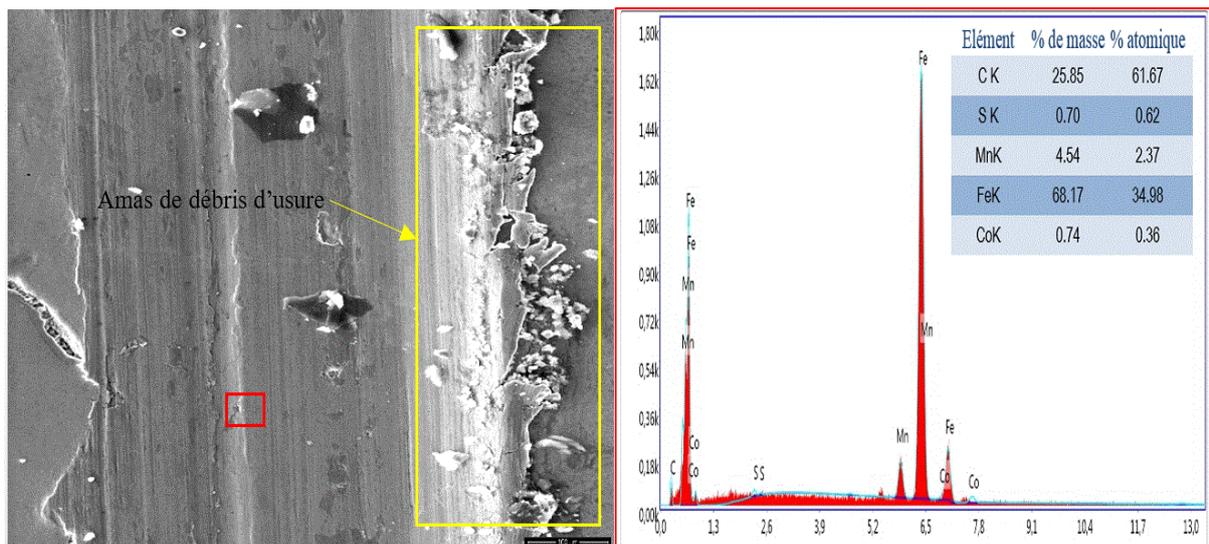


Figure III.40. Micrographie MEB et analyse EDS de l'acier B2 traité à 1050°C après le test tribologique à l'état lubrifié

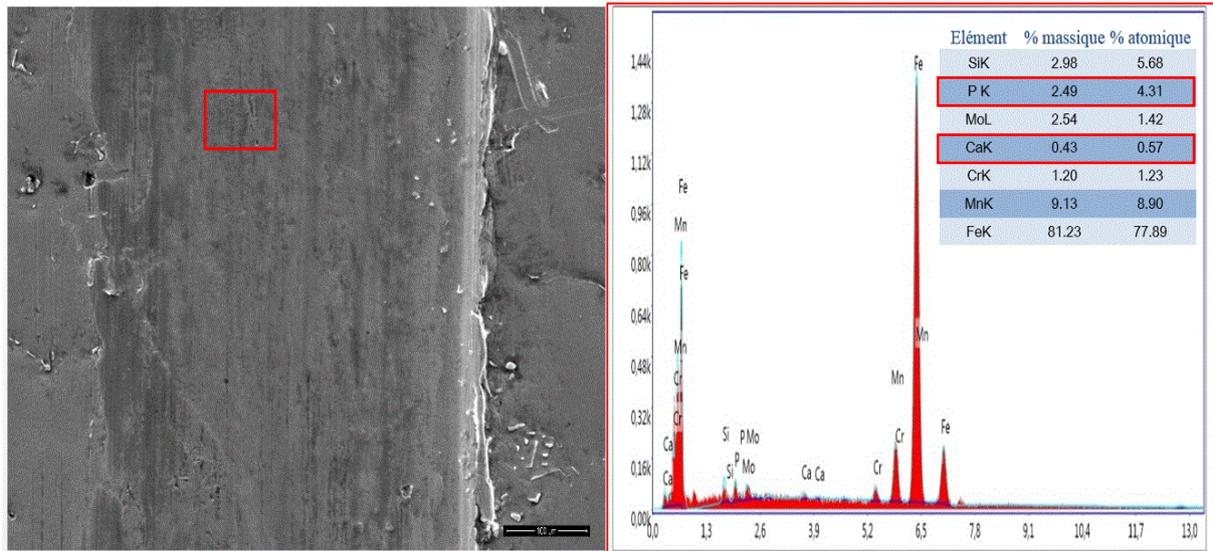


Figure III.42. Micrographie MEB et analyse EDS de l'acier A1 traité à 1050°C après le test tribologique à l'état lubrifié

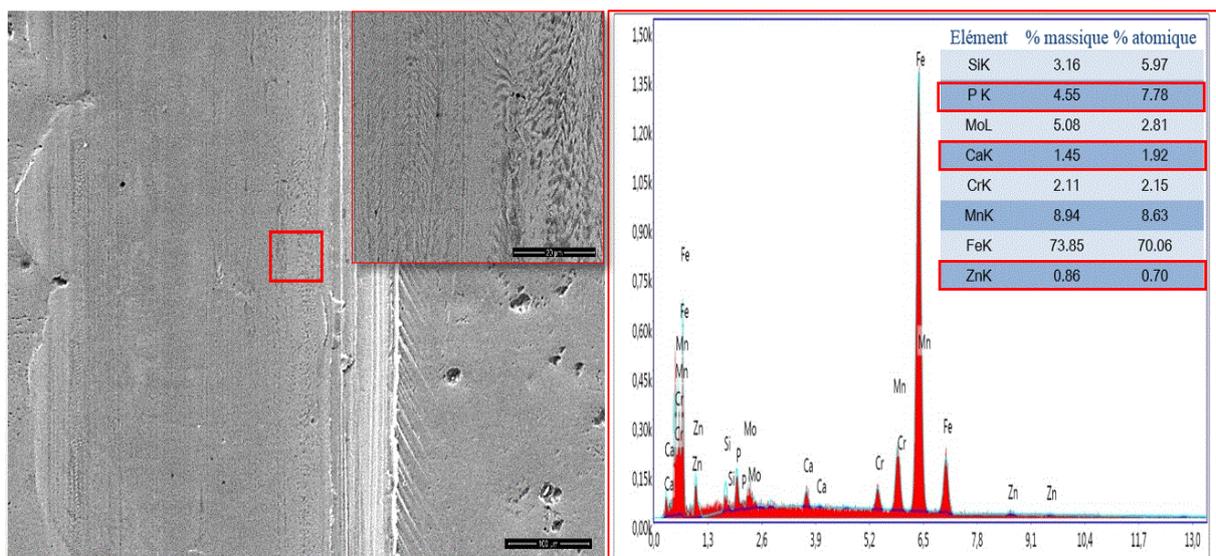


Figure III.41. Micrographie MEB et analyse EDS de l'acier A1 traité à 1100°C après le test tribologique à l'état lubrifié

III.3.2. Effet combiné du chrome et du niobium

L'acier A2 (tableau III.11) contient plus de chrome et de niobium par rapport à l'acier B2.

Tableau III.11. Compositions chimiques des aciers B2 et A2

Aciers	Eléments chimiques (en pourcentage massique, %)							
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Nb
B2	0.932	10.54	0.283	0.049	0.006	1.44	0.24	/
A2	0.939	09.96	0.200	0.067	0.005	2.37	0.25	0.143

III.3.2.1. Analyse microstructurale

Les micrographies optiques des aciers B2 et A2 à l'état brut de coulée sont montrées par la figure III.42. Les microstructures des deux aciers sont composées d'austénite et de carbures. L'acier A2 présente une structure plus fine que celle de l'acier B2. La taille des grains austénitiques de l'acier B2 et A2 sont de 138 μm et de 60 μm respectivement (tableau III.12). Cette finesse des grains est due à l'action combinée des éléments ajoutés (Cr et Nb). Ces derniers sont des éléments fortement carburigènes. Ils ont favorisé la formation des carbures secondaires aux joints des grains austénitiques, ce qui a bloqué leur grossissement et a conduit à la finesse de la structure.

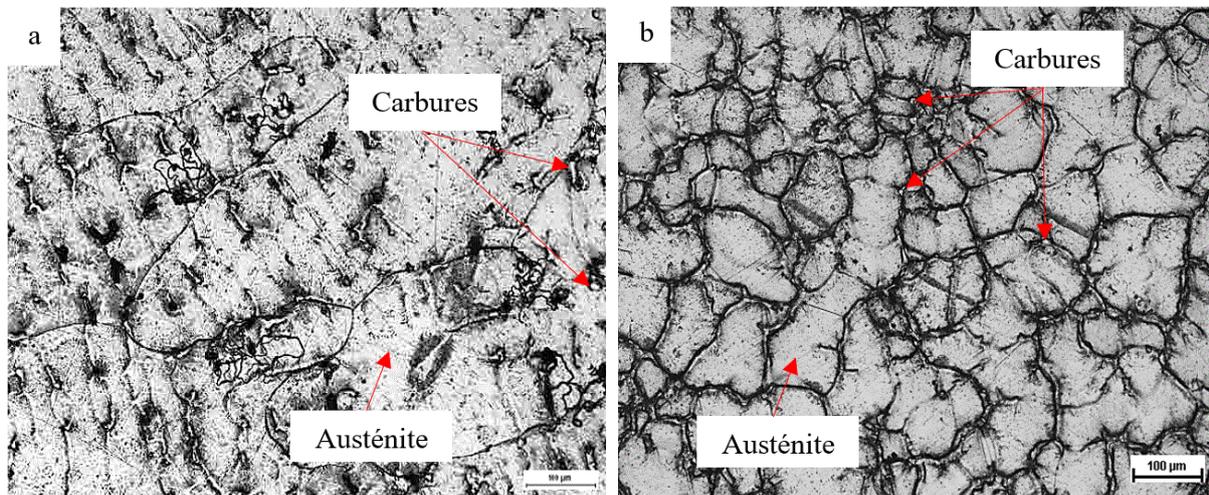


Figure III.43. Micrographies optiques à l'état brut de coulée des aciers B2 (a) et A2 (b)

Tableau III.12. Tailles des grains austénitiques des aciers B1 et A2 à l'état brut de coulée

	Acier B2	Acier A2
Tailles des grains austénitiques (μm)	138	60

Résultats et discussions

Les micrographies MEB de l'acier A2 sont présentées par la figure III.43. Sur cette dernière, on observe différents carbures. Ces derniers apparaissent sous différentes formes et différentes grosseurs aux joints et à l'intérieur des grains. Les carbures intergranulaires pourraient être de la cémentite alliée au manganèse et au chrome. D'après les analyses EDS précédentes (acier A1), le chrome ajouté se trouve dissout dans l'austénite et dans la cémentite. Des précipités intragranulaires de faibles tailles ont été aussi observés. Ces derniers sont dispersés dans toute la matrice. Ils sont probablement des carbures de niobium de type MC. Une analyse ESD n'a pas pu être effectuée pour analyser ces derniers.

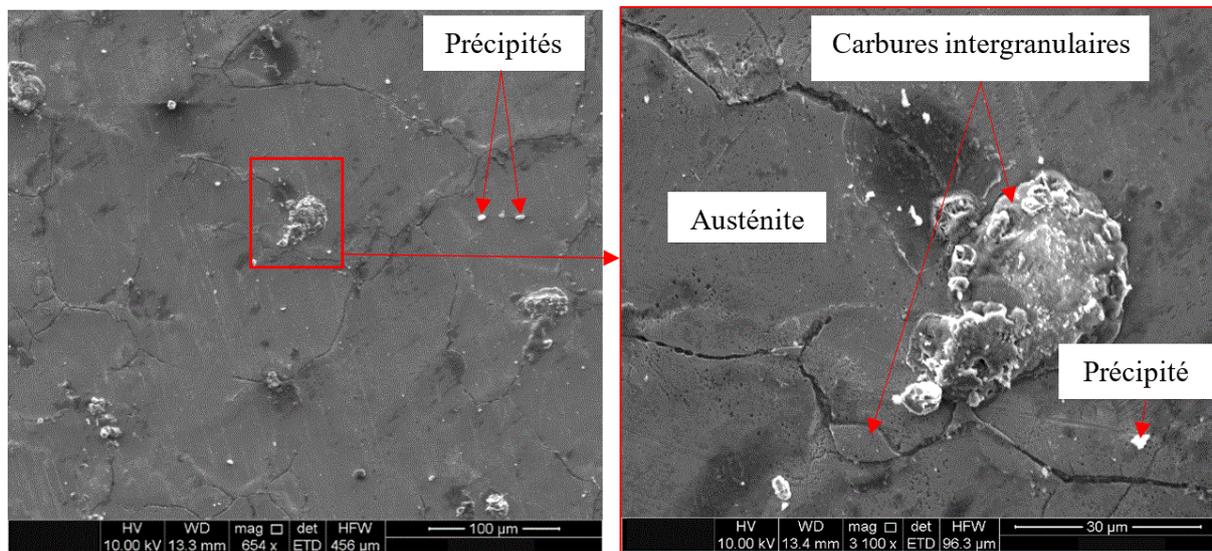


Figure III.44. Micrographies MEB de l'acier A2 à l'état brut de coulée

Les micrographies optiques des aciers B2 et A2 à l'état traité sont présentées par la figure III.44. Les microstructures des deux aciers sont composées de martensite, d'austénite résiduelle et de précipités. Ces derniers sont dispersés uniformément dans l'austénite résiduelle. Les quantités de la martensite et des précipités formés varient en fonction des éléments ajoutés et des traitements thermiques appliqués. Le taux de la martensite dans l'acier A2 est relativement élevé par rapport à l'acier B2. Ceci est lié à l'effet trempant du chrome et du niobium ajoutés. Le traitement thermique à 1100°C favorise la formation d'une quantité plus importante de martensite que celui effectué à 1050°C. Comme il a été expliqué dans le sous chapitre précédent, l'augmentation de la température du traitement thermique permet de décomposer plus de carbures secondaires formés à l'état brut de coulée. Ceci conduit à une meilleure mise en solution des éléments qui favorisent lors de la trempe la formation de la martensite en grande quantité.

Résultats et discussions

La quantité de précipités dans l'acier A2 est légèrement plus importante par rapport à l'acier B2. Ceci est dû à l'effet carburigène des éléments ajoutés. Ces derniers forment des carbures de type M_3C et de type MC qui ne peuvent pas être complètement dissociés sous l'effet des traitements thermiques appliqués.

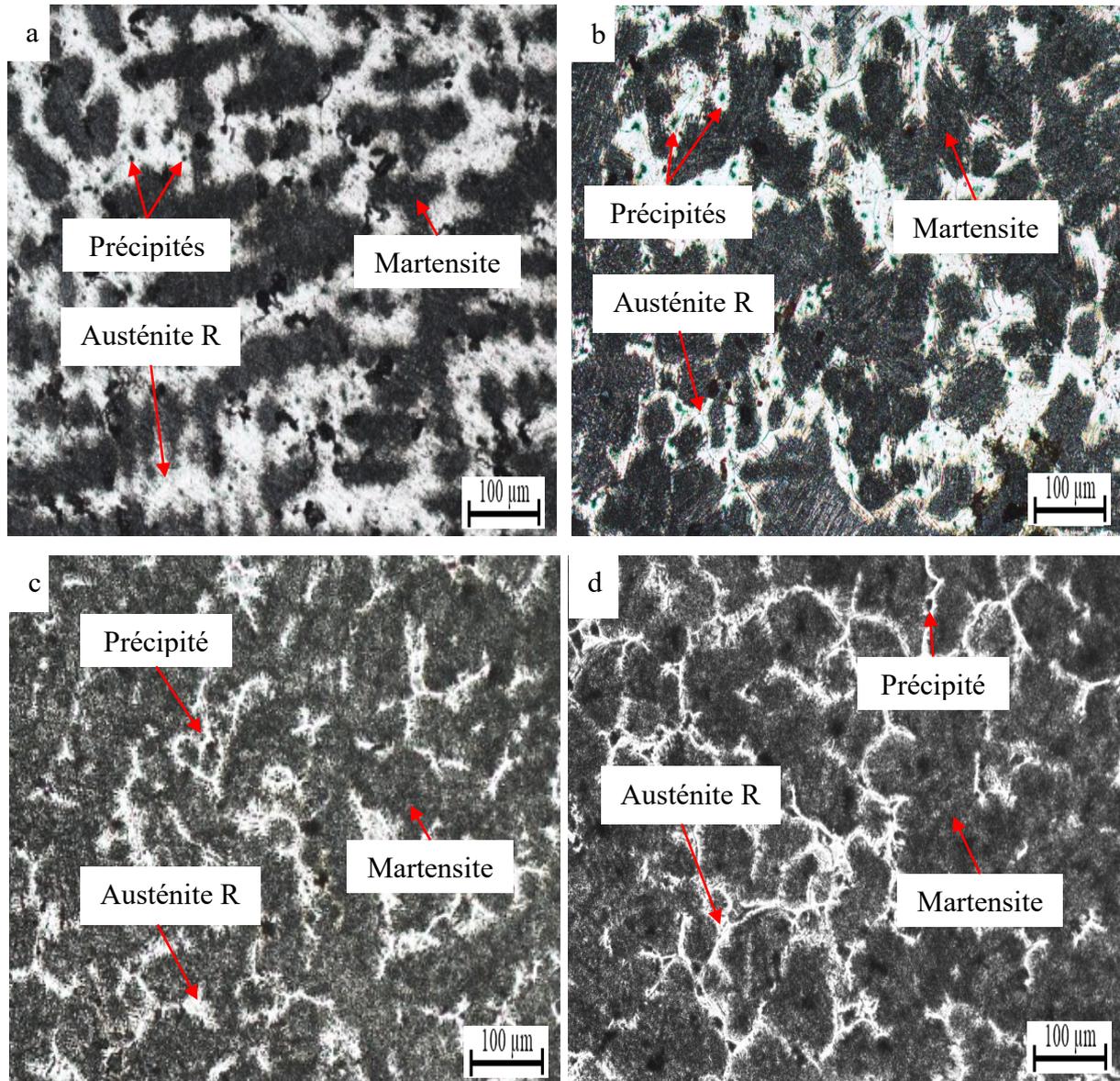


Figure III.45. Micrographies optiques à l'état traité thermiquement. B2 à 1050°C (a), A2 à 1050°C (b), B2 à 1100°C (c) et A2 à 1100°C (d)

L'analyse par diffraction des rayons X des aciers B2 et A2 à l'état traité est montrée par la figure III.45. Cette dernière confirme la présence de l'austénite et de la martensite dans les deux aciers à l'état traité. L'acier A5 présente des pics de martensite plus intenses que l'acier B2. Ceci est dû à l'effet tramant des éléments ajoutés (Nb et Cr). La température du traitement thermique a également un effet sur la formation de la martensite. De nouveaux pics révélant la

présence de cette phase ont été aussi observés pour l'acier A2 traité à 1100°C. Ainsi, les pics indiquant la phase austénitique sont plus intenses dans l'acier A2 traité à 1050°C que celui traité à 1100°C. Ceci explique que l'élévation de la température du traitement thermique de 1050°C à 1100°C conduit à la transformation de l'austénite en martensite en grande quantité.

III.3.2.2. Dureté et microdureté

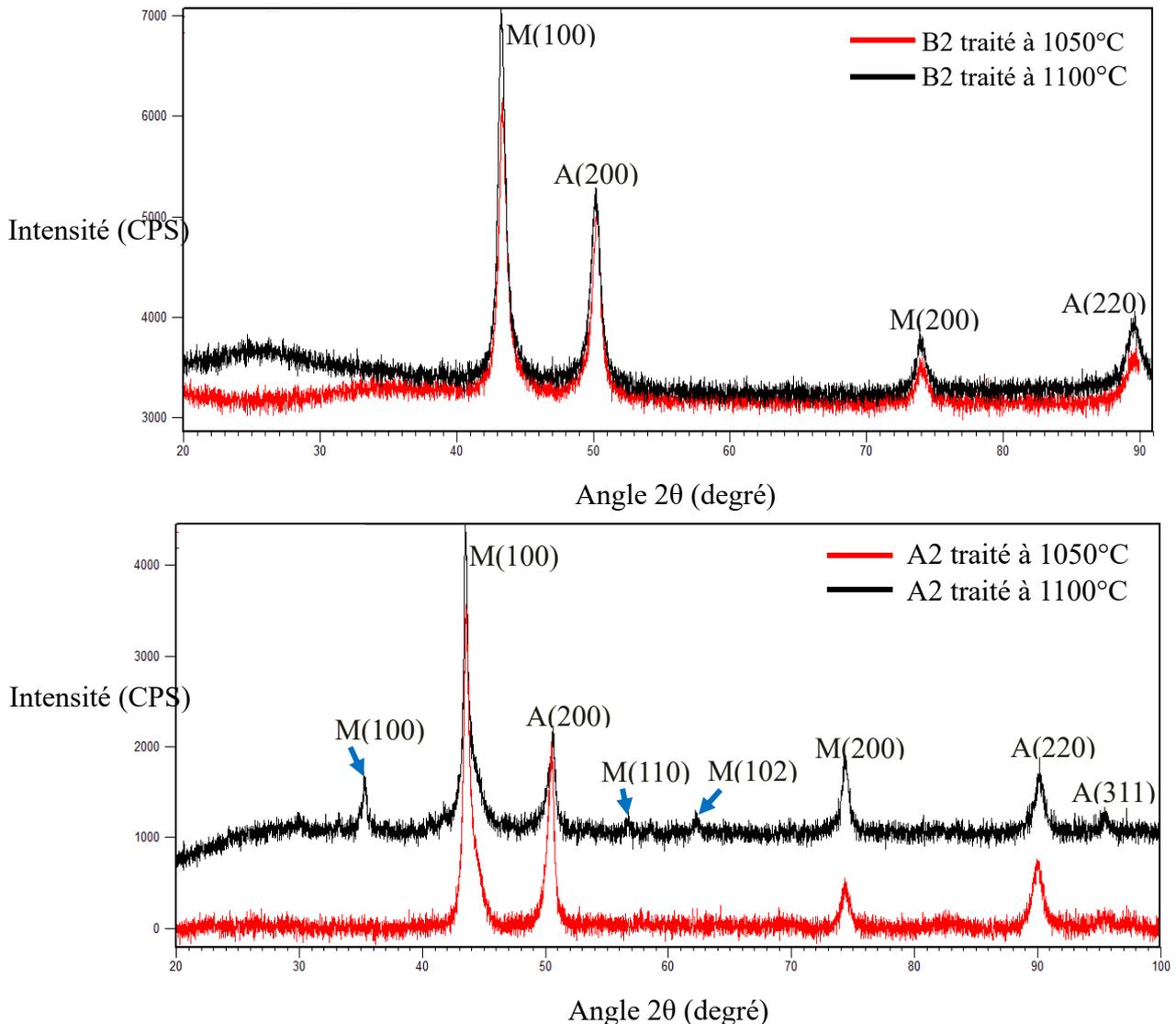


Figure III.46. Diffractogrammes des rayons X des aciers B2 et A2 à l'état traité.

A : austénite et M : martensite

La figure III.46 montre les duretés HRC des deux aciers B2 et A2 à l'état brut de coulée et à l'état traité. L'acier A2 présente des duretés plus élevées que celles de l'acier B2 pour les deux états. Les duretés de l'acier A2 à l'état brut de coulée, traité à 1050°C et à 1100°C sont respectivement égales à 22 HRC, 43 HRC et 59 HRC.

Résultats et discussions

L'augmentation de la dureté de l'acier A2 comparativement à l'acier B2 est directement liée à l'ajout du chrome et du niobium. A l'état brut de coulée, l'augmentation de la teneur en chrome favorise la formation des carbures intergranulaires de type M_3C en grande quantité conduisant à un affinement de la structure. L'ajout du niobium favorise la formation des carbures intragranulaires de type MC de taille fine dispersés dans toute la matrice. Les carbures formés conduisent à une amélioration de la dureté totale de l'acier. Par contre à l'état traité, les éléments ajoutés conduisent à une augmentation de la quantité de la martensite. L'augmentation de la température du traitement thermique influe aussi positivement sur la formation de cette dernière, ce qui améliore la dureté de l'acier.

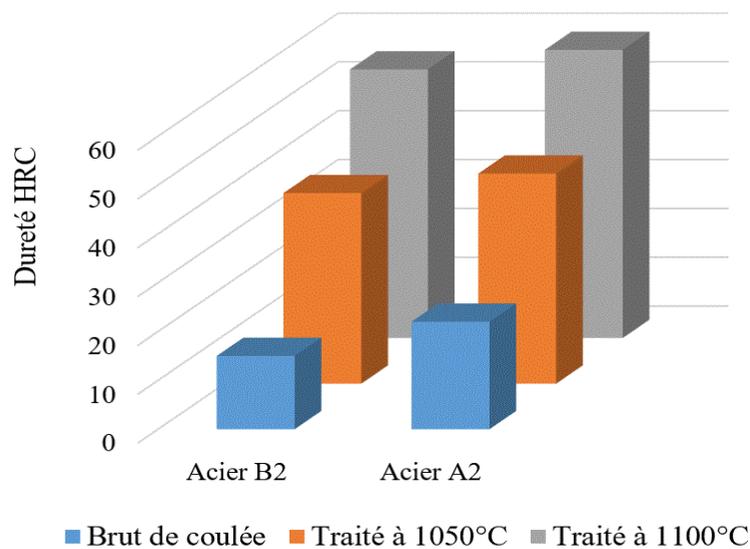


Figure III.47. Duretés HRC des aciers B2 et A2

Les microduretés des différentes phases des aciers B2 et A2 à l'état brut de coulée et traité sont montrées par le tableau III.13 et présentées sur la figure III.47.

A l'état brut de coulée, l'austénite de l'acier A2 est plus dure ($402 \mu Hv_{20}$) que celle de l'acier B2 ($359 \mu Hv_{20}$). Ceci s'explique par l'enrichissement de la matrice en éléments ajoutés (Cr et Nb). Ces éléments participent à la fois à l'enrichissement de la matrice et à la formation des carbures secondaires de types M_3C et MC. La microdureté des carbures intergranulaires de l'acier A2 ($1150 \mu Hv_{20}$) est relativement élevée que celle des carbures présents dans l'acier B2 ($1097 \mu Hv_{20}$). Ceci montre que ces carbures sont de même type M_3C et sont de la cémentite alliée au manganèse et au chrome. L'augmentation de la dureté de ces derniers dans l'acier A2 est expliquée par leur enrichissement en chrome. La dureté des carbures intragranulaires de type MC n'a pas pu être mesurée à cause de leurs faibles tailles.

Résultats et discussions

La martensite et l'austénite résiduelle de l'acier A2 sont plus dures que celles de l'acier B2. Les microduretés de la martensite et de l'austénite résiduelle de l'acier A2 varient de 671 à 740 μHV_{20} et de 417 à 428 μHV_{20} respectivement. La microdureté de la martensite est améliorée sous l'effet des éléments ajoutés et des traitements thermiques appliqués. L'ajout combiné de deux éléments trempant avec l'application des traitements thermiques à haute température suivis d'une trempe à l'eau favorise la formation d'une martensite plus riche en éléments et plus dure.

Tableau III.13. Microduretés des différentes phases des aciers B2 et A2 à l'état brut de coulée et traité

Aciers	Microduretés, μHV_{20}					
	Brut de coulée		Traité thermiquement à 1050°C		Traité thermiquement à 1100°C	
	Austénite	Carbures	Martensite	Austénite R	Martensite	Austénite R
B2	359	1097	653	368	684	366
A2	402	1150	671	417	740	428

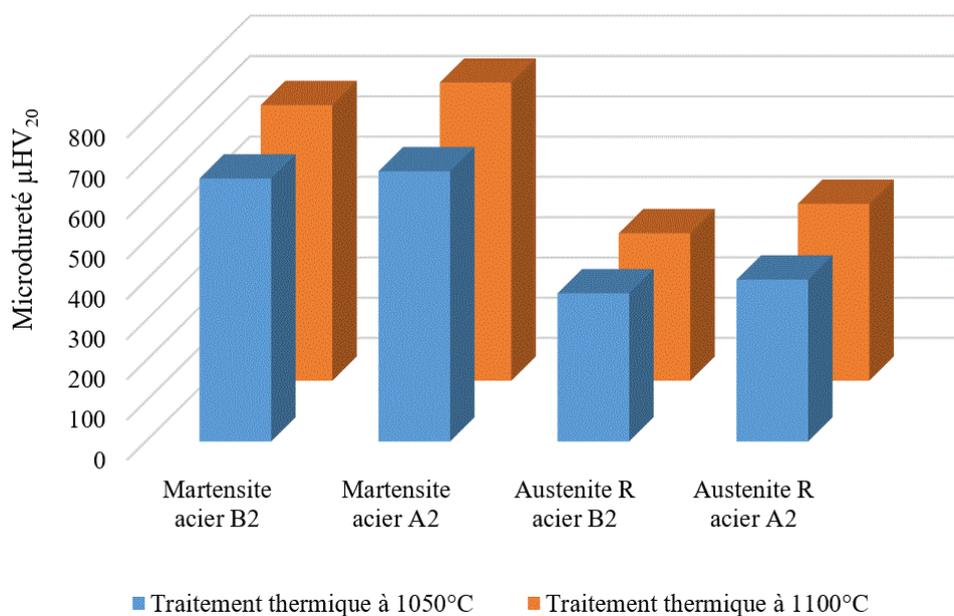


Figure III.48. Microduretés de la martensite et de l'austénite résiduelle des aciers B2 et A2 à l'état traité