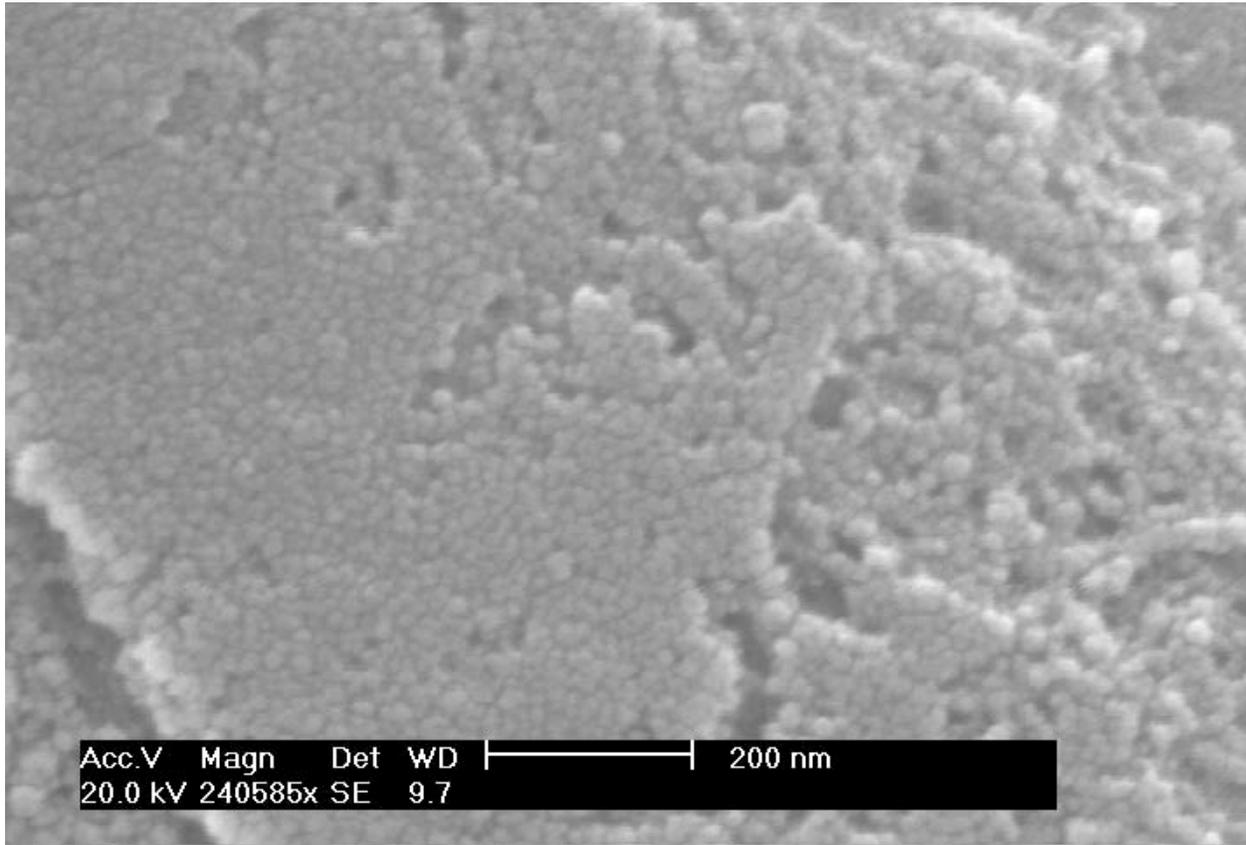


Lire
la seconde partie
de la thèse

Annexe B - Images MEBE

B.1 - Métallisation en utilisant le platine



Couche-mince de platine de métallisation sur la surface des fibres de carbone

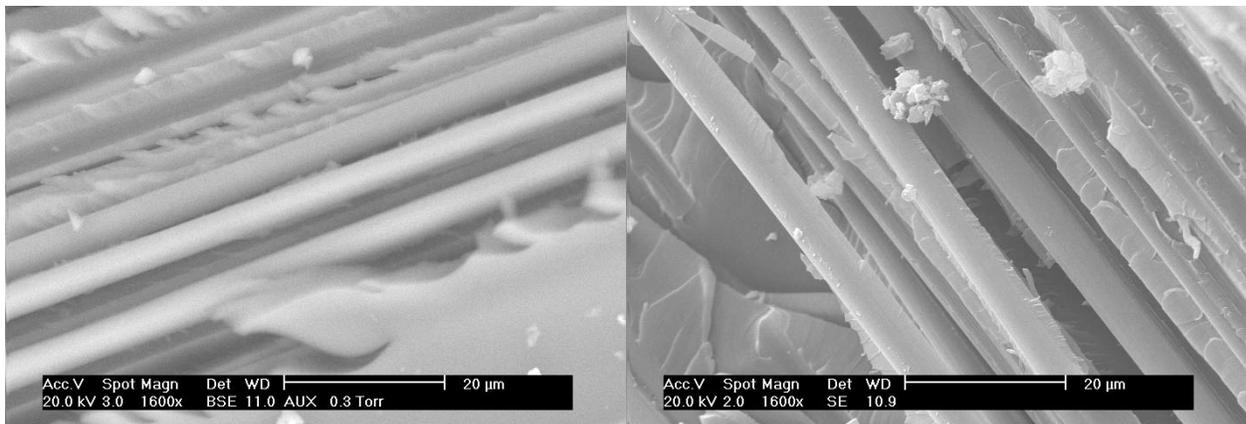
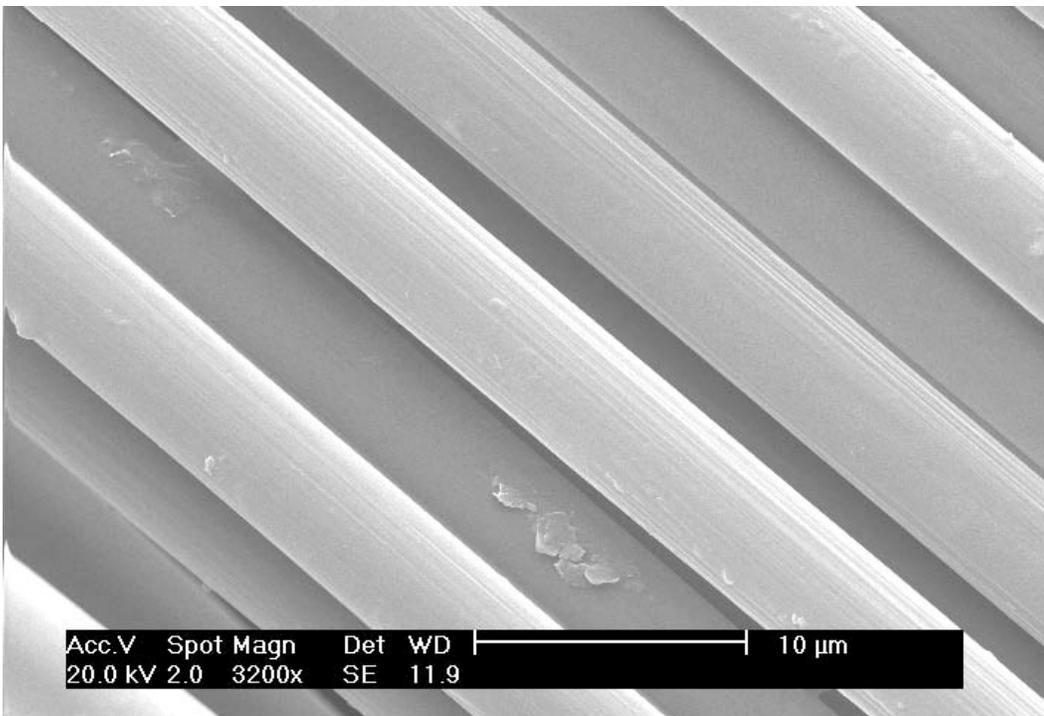
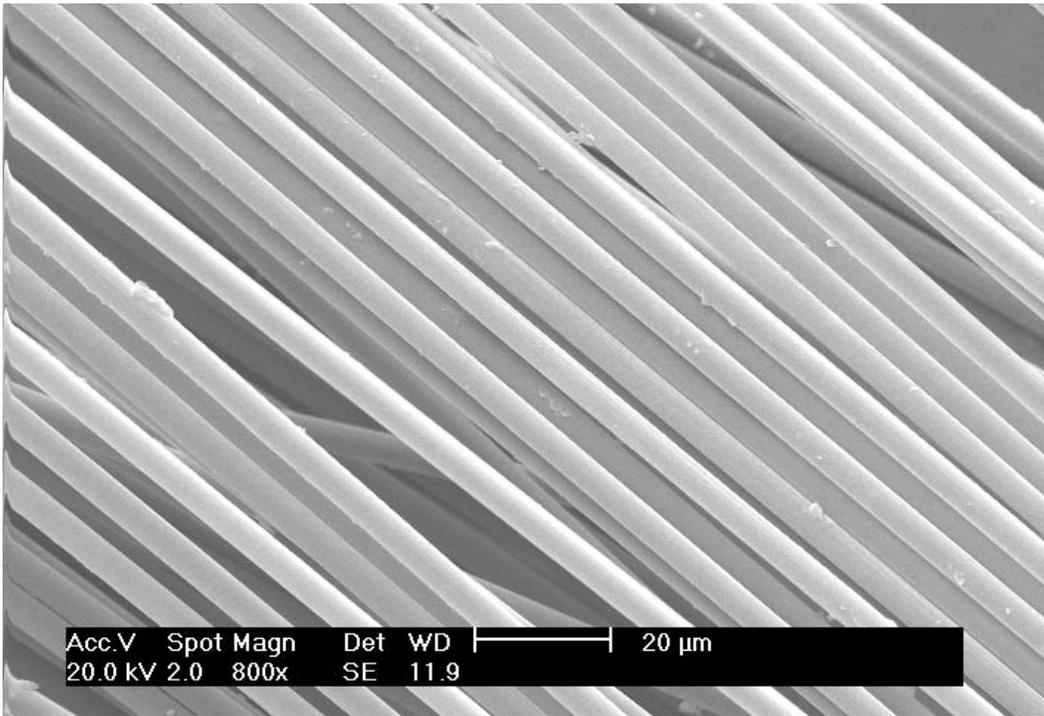


Image MEBE du composite avant métallisation

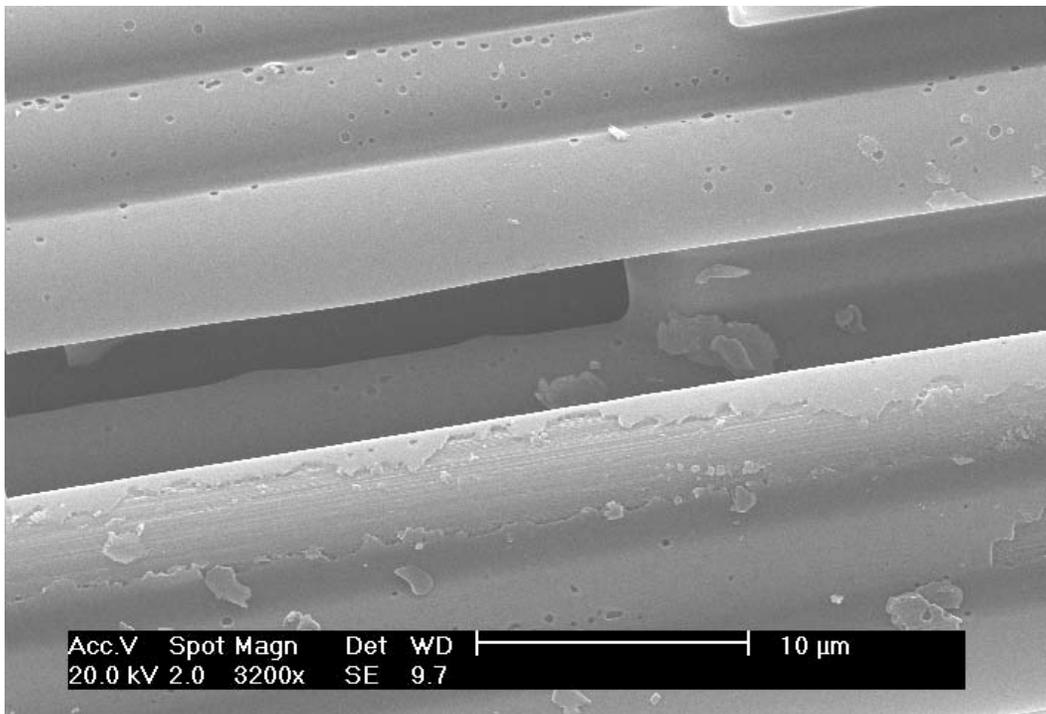
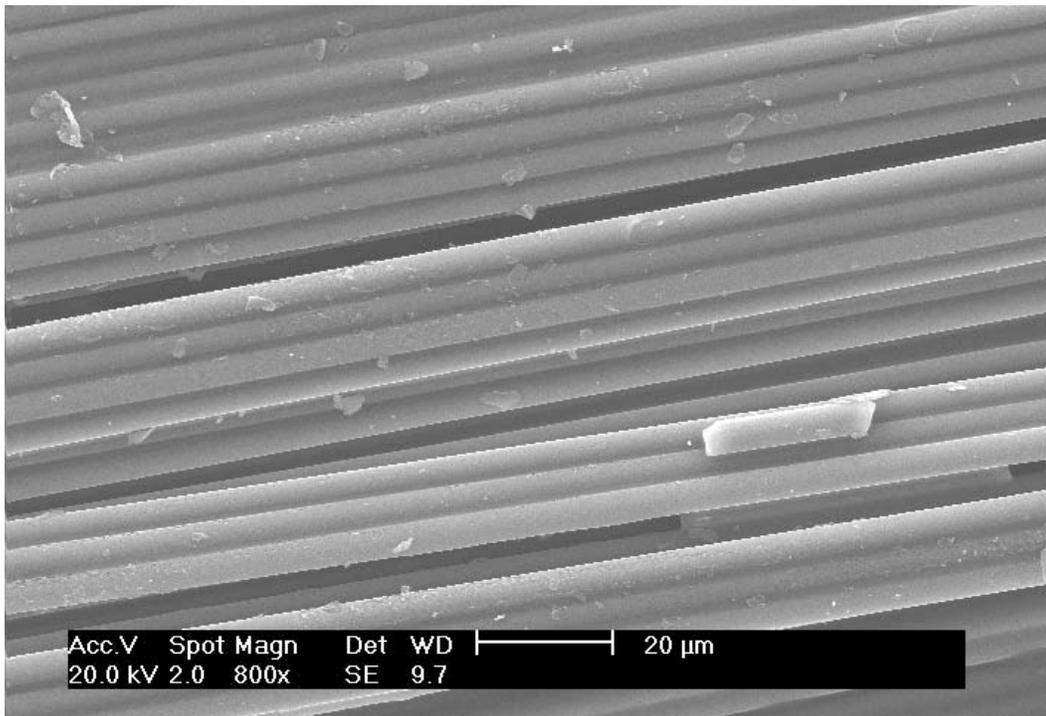
Image MEBE du composite après métallisation

B.2 - Fibres de carbone issues des tests préliminaires (L9)
B.2.1 - Fibres de carbone vierges IMS60 $\sigma_{t \text{ fibre}} = 4\,092 \text{ MPa}$

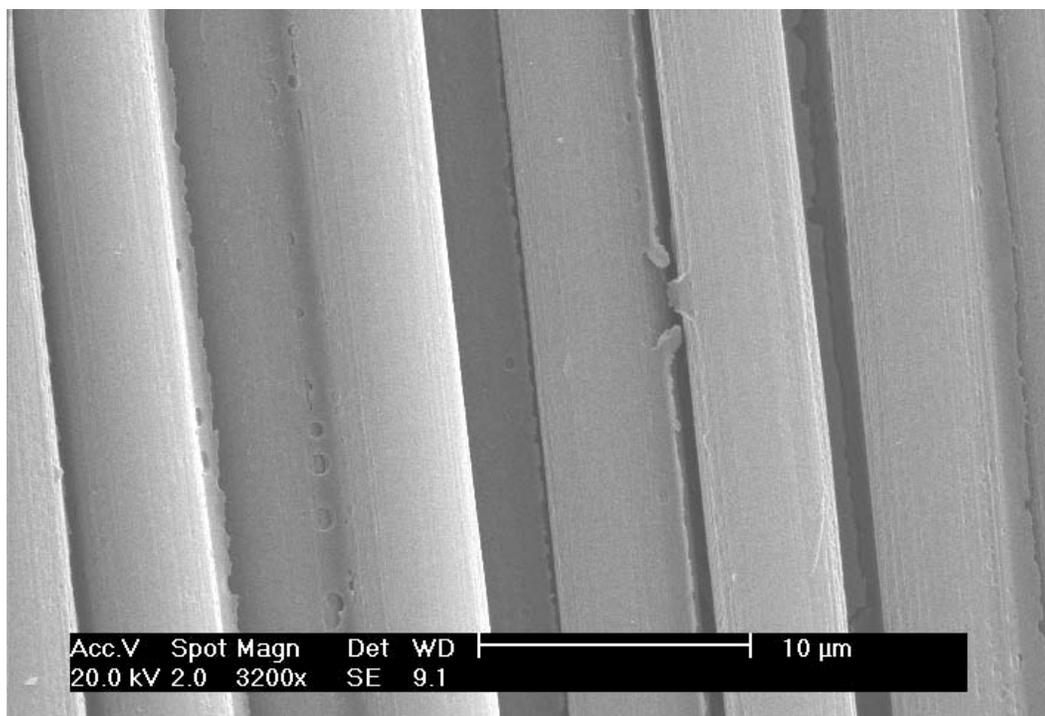
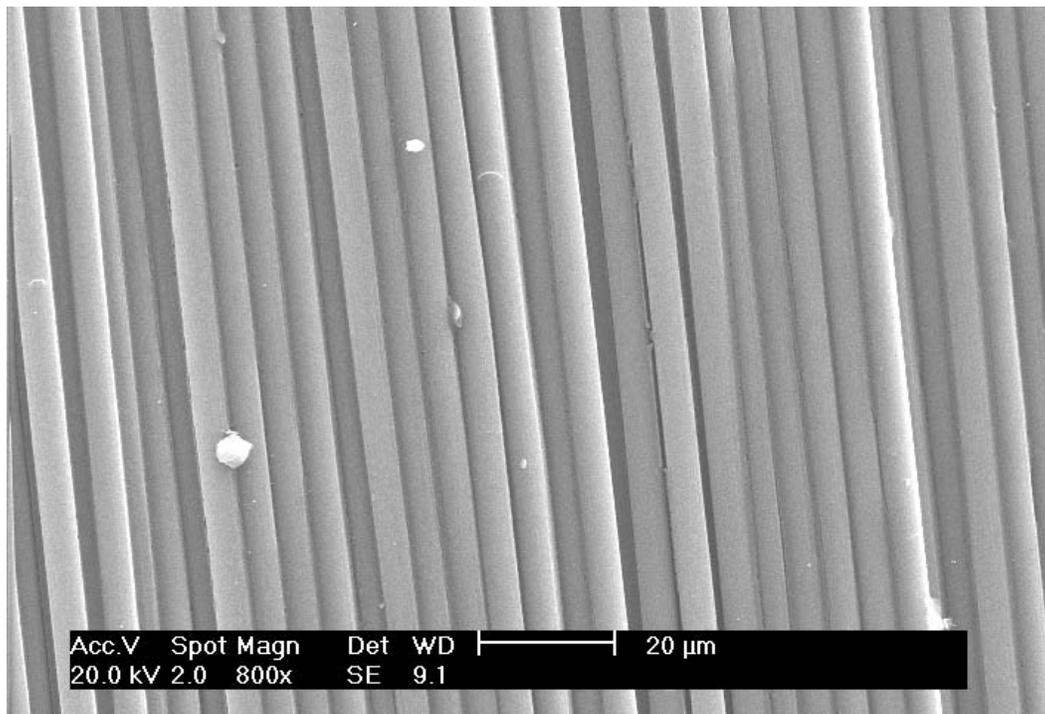


B.2.2 - Fibres issues des traitements des composites RTM6 ($m = 50\text{ g}$)

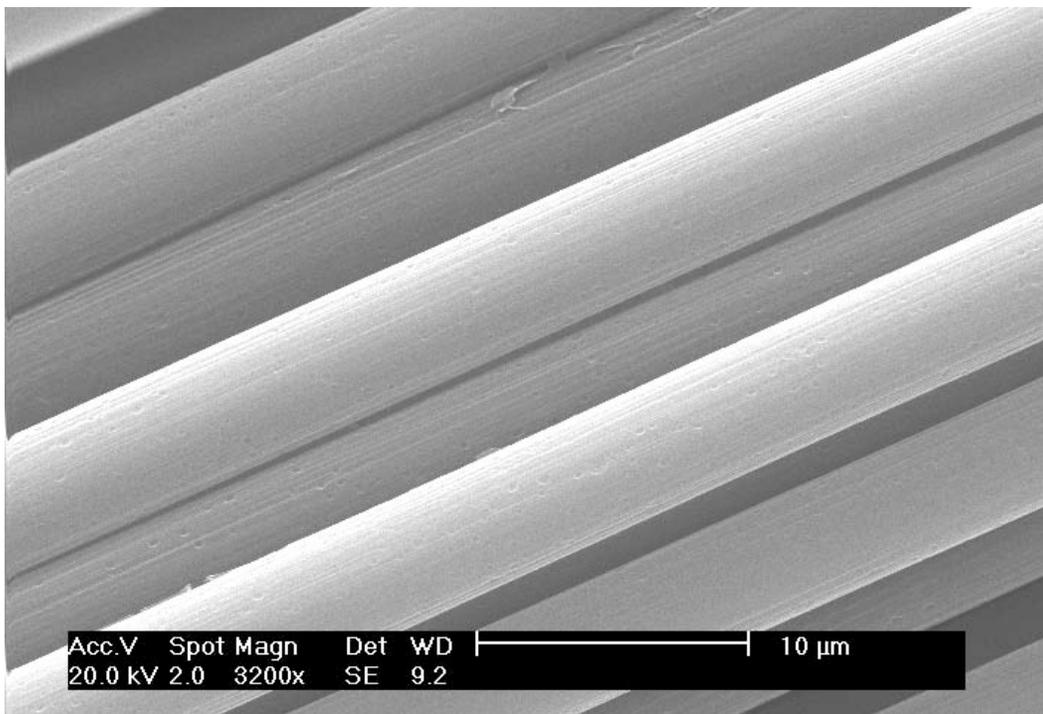
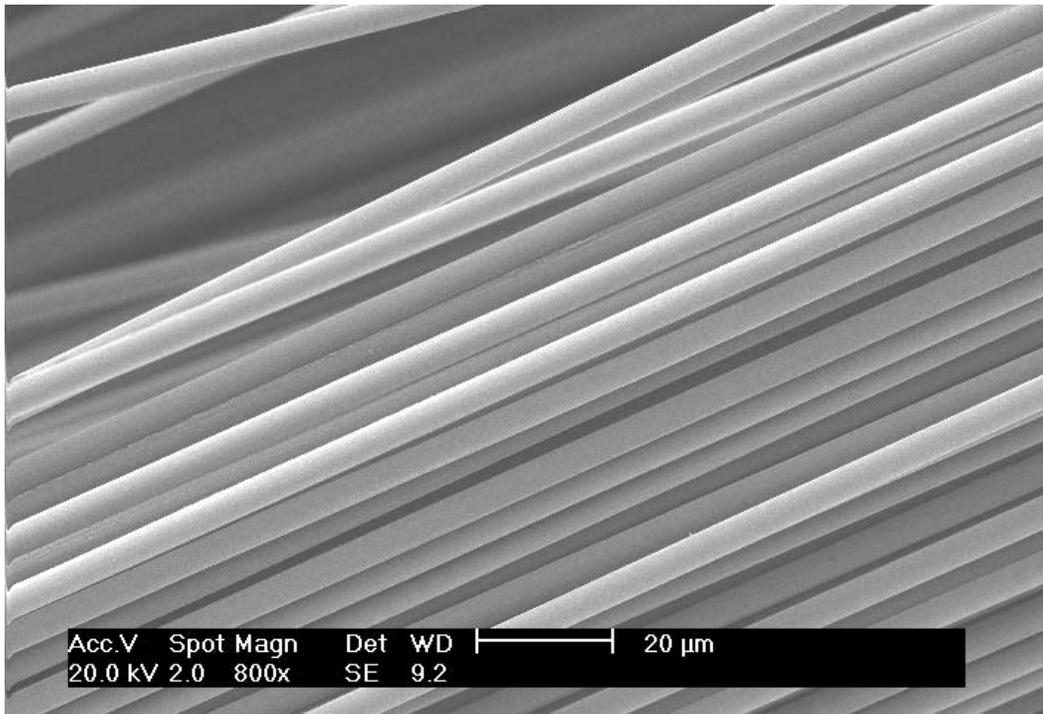
Essais 1 : $T = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 0,5\text{ h}$, $Q_{\text{H}_2\text{O}} = 200\text{ g.h}^{-1}$, $Q_{\text{N}_2} = 450\text{ g.h}^{-1}$, $\sigma_{\text{t fibre}} = 5\,386\text{ MPa}$



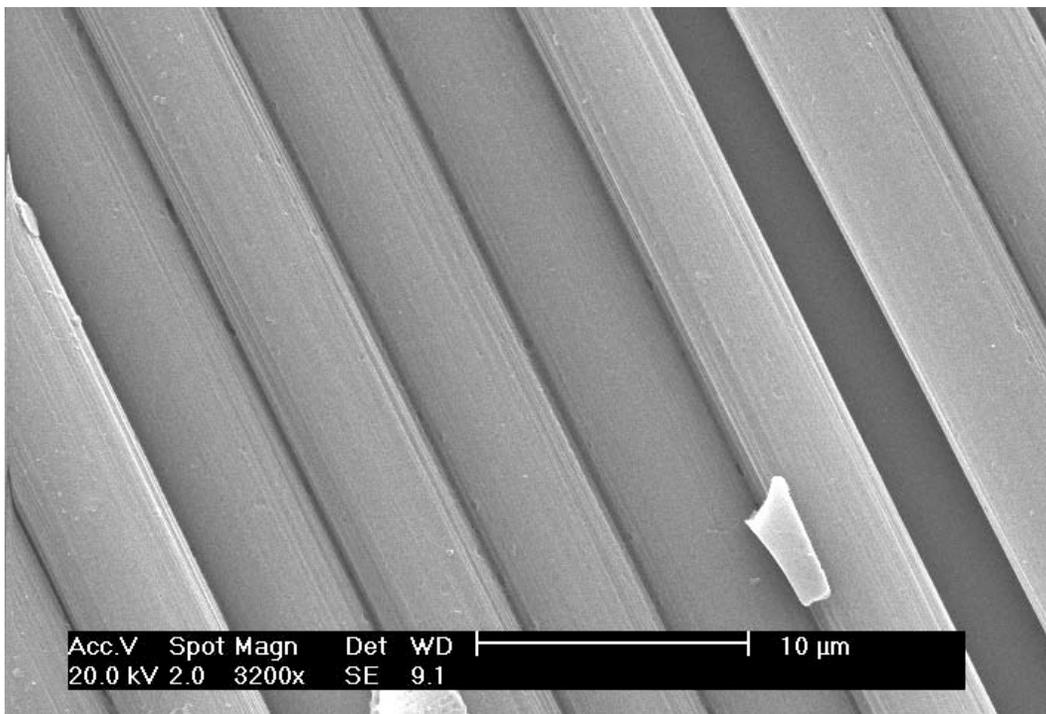
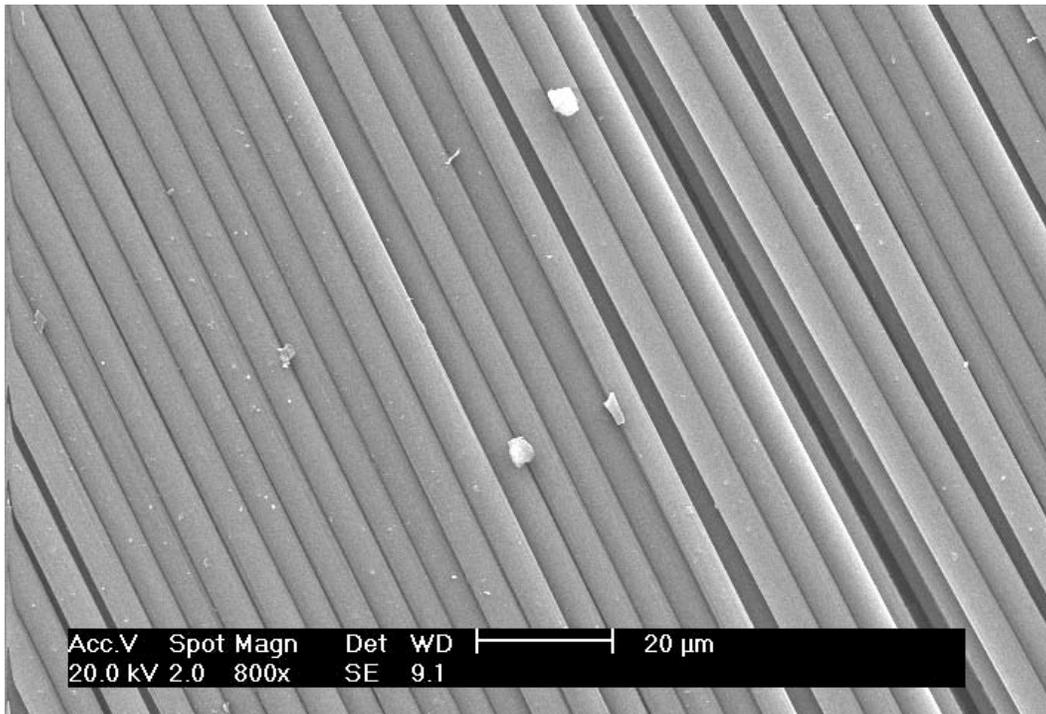
Essais 2 : $T = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 1\text{ h}$, $Q_{\text{H}_2\text{O}} = 300\text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$, $Q_{\text{N}_2} = 900\text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$, $\sigma_t \text{ fibre} = 4\text{ }670\text{ MPa}$



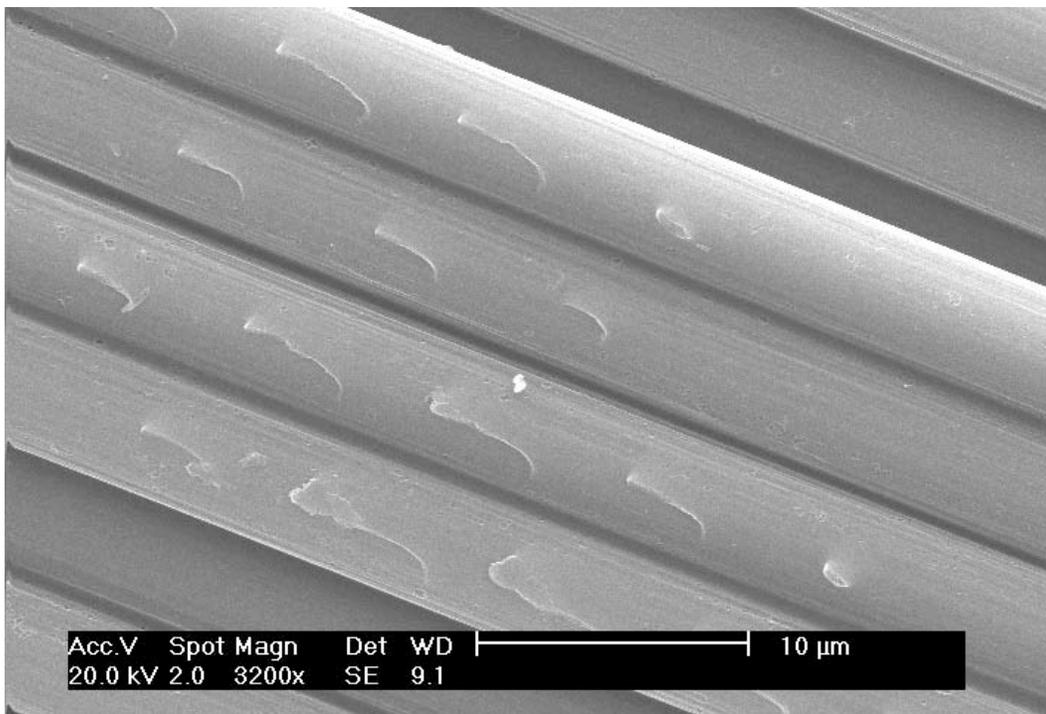
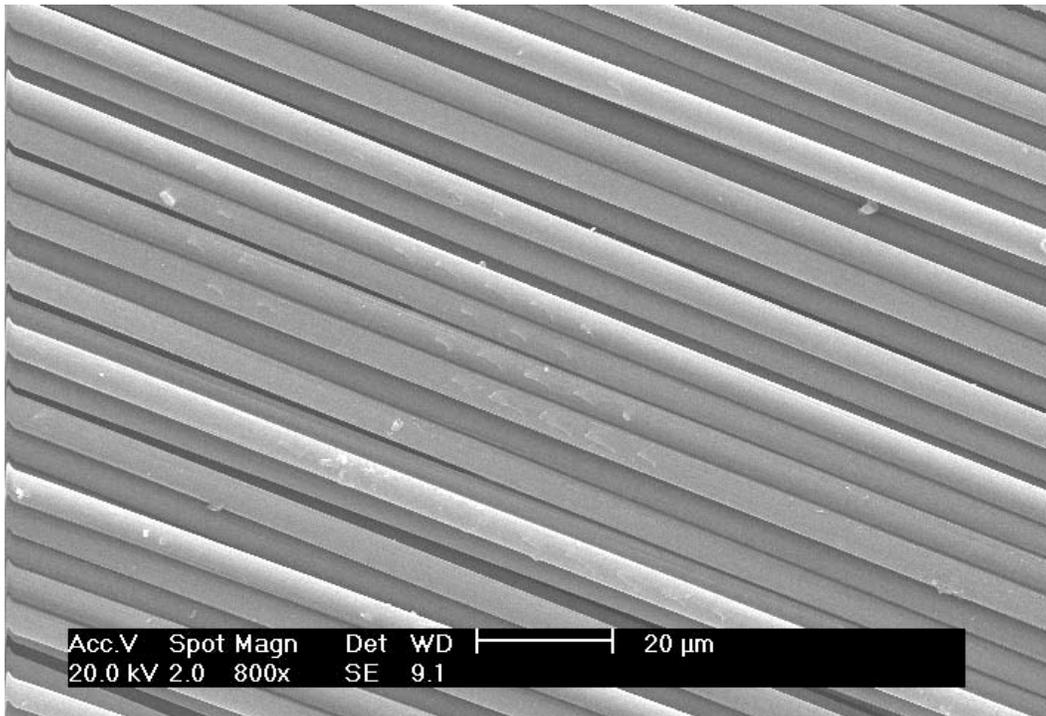
Essais 3 : $T = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 2\text{ h}$, $Q_{\text{H}_2\text{O}} = 400\text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$, $Q_{\text{N}_2} = 1\ 800\text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$, $\sigma_{t\text{ fibre}} = 3\ 146\text{ MPa}$



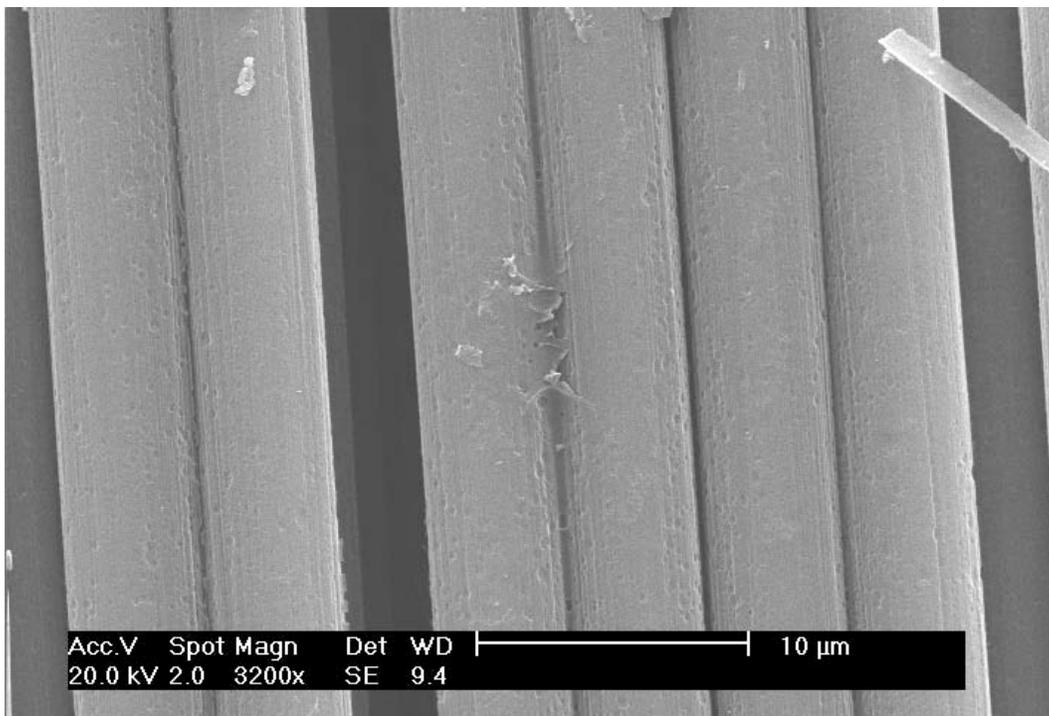
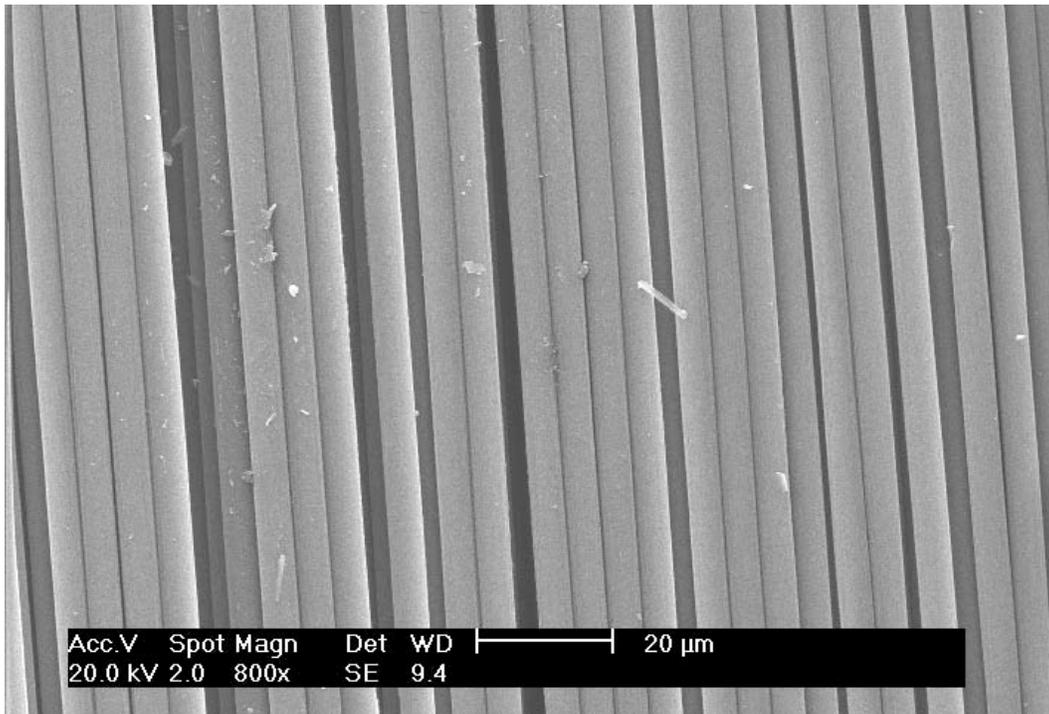
Essais 4 : $T = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 0,5\text{ h}$, $Q_{\text{H}_2\text{O}} = 300\text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$, $Q_{\text{N}_2} = 1\ 800\text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$, $\sigma_{\text{fibre}} = 3\ 171\text{ MPa}$



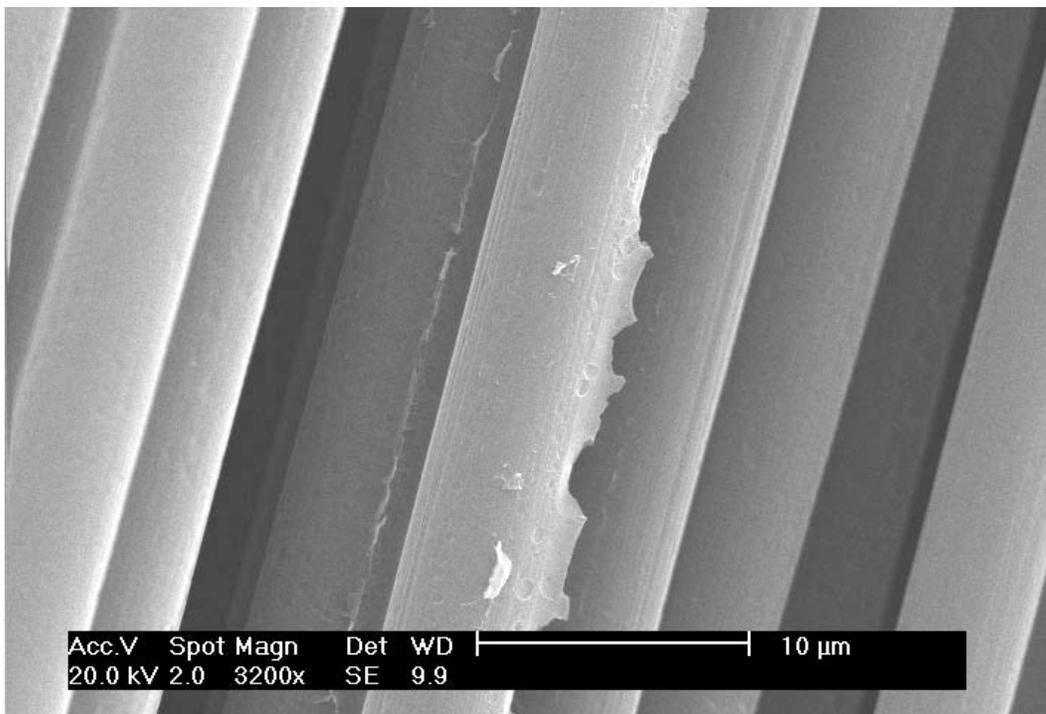
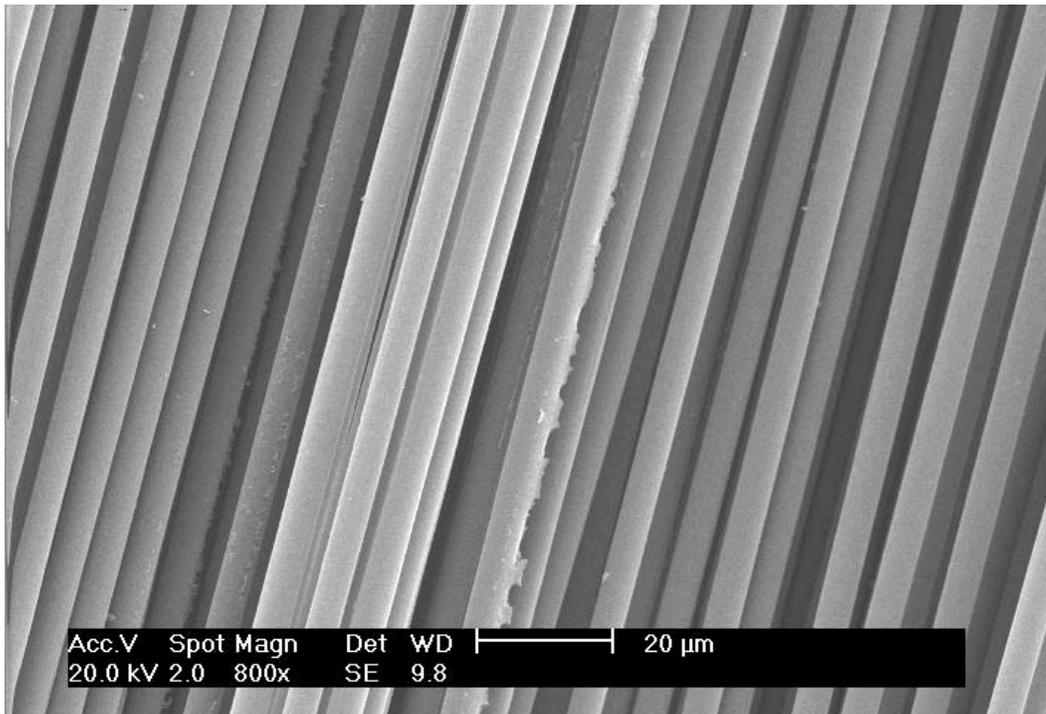
Essais 5 : $T = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 1\text{ h}$, $Q_{\text{H}_2\text{O}} = 400\text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$, $Q_{\text{N}_2} = 450\text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$, $\sigma_t \text{ fibre} = 2\,980\text{ MPa}$



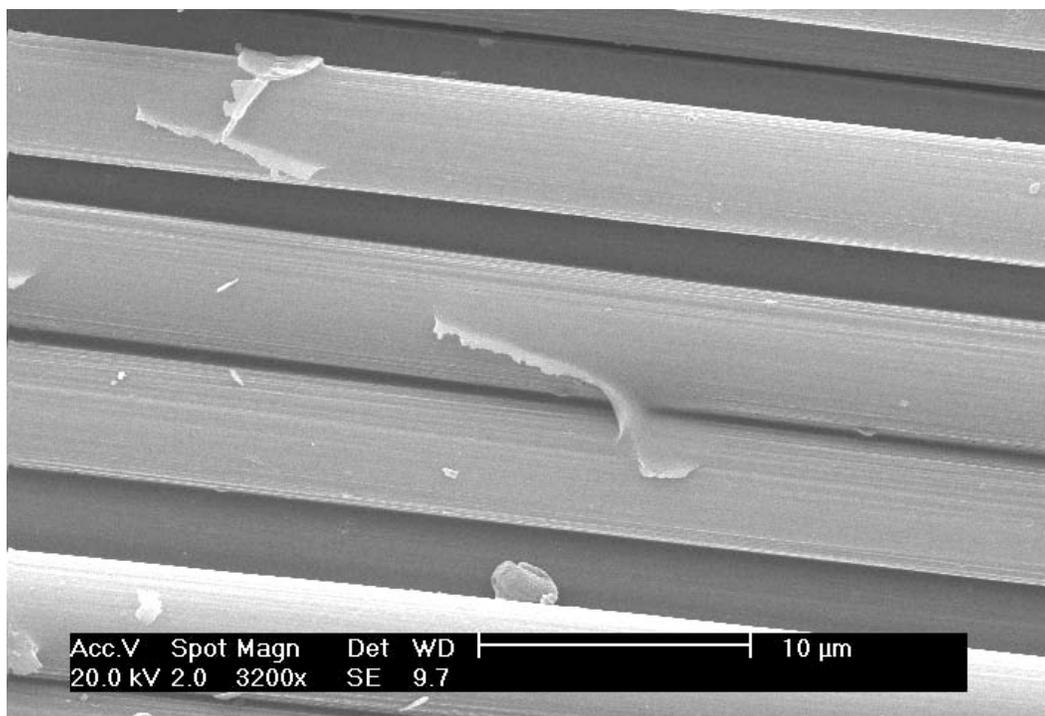
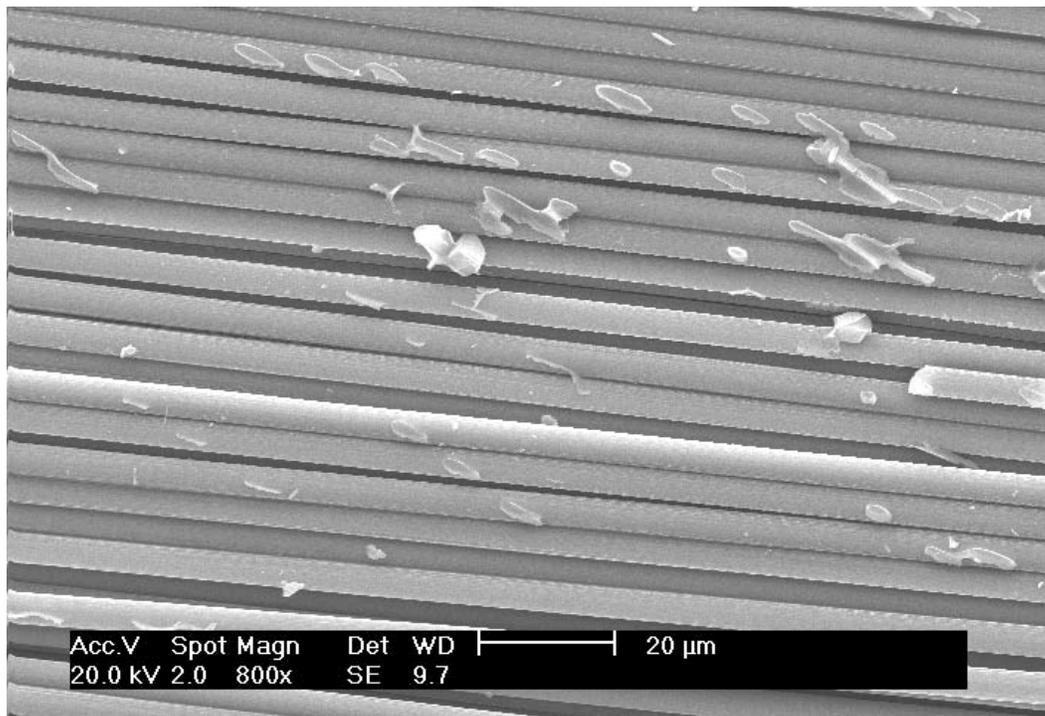
Essais 6 : $T = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 2\text{ h}$, $Q_{\text{H}_2\text{O}} = 200\text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$, $Q_{\text{N}_2} = 900\text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$, $\sigma_{\text{fibre}} = 2\,488\text{ MPa}$



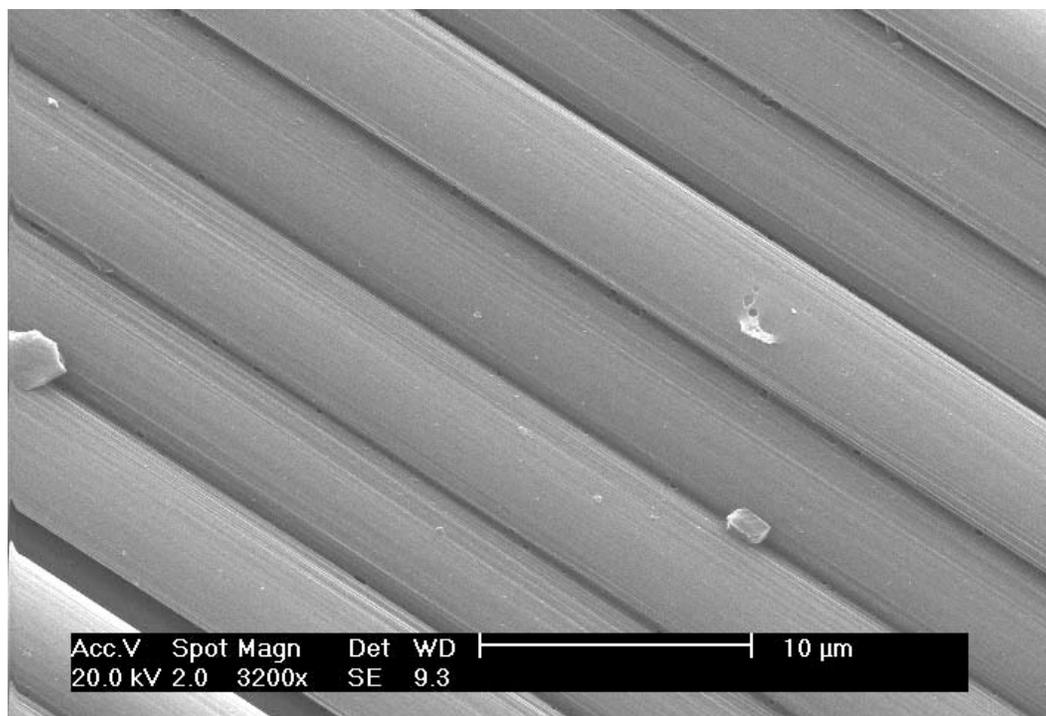
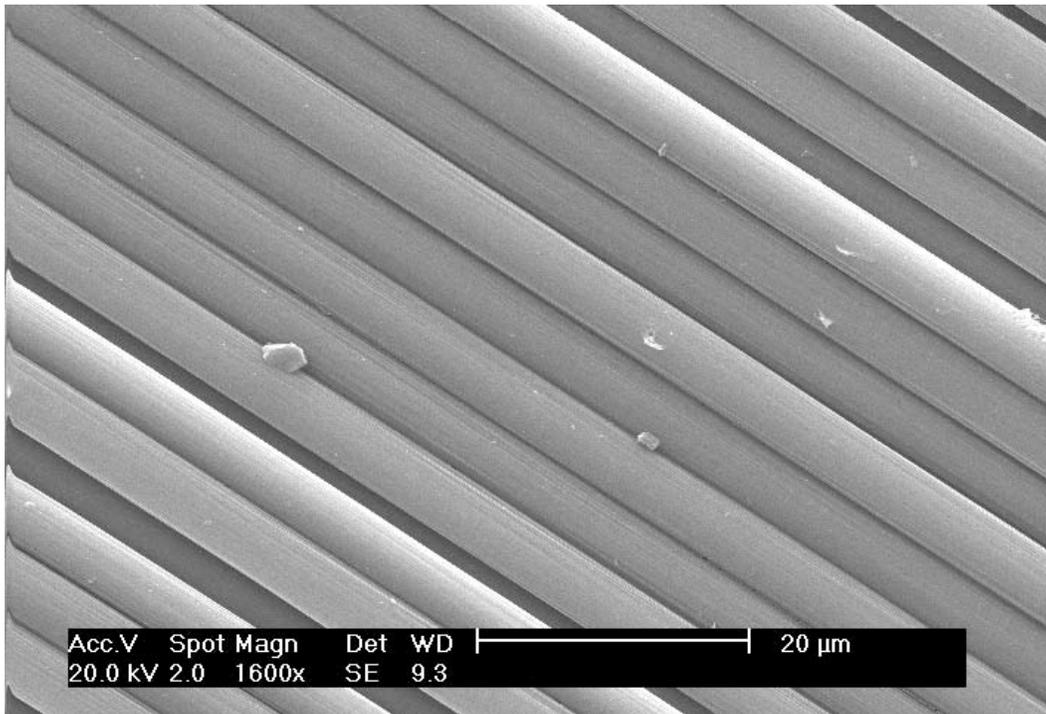
Essais 7 : $T = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 0,5\text{ h}$, $Q_{\text{H}_2\text{O}} = 400\text{ g.h}^{-1}$, $Q_{\text{N}_2} = 900\text{ g.h}^{-1}$, $\sigma_{t\text{ fibre}} = 2\ 544\text{ MPa}$



Essais 8 : $T = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 1\text{ h}$, $Q_{\text{H}_2\text{O}} = 200\text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$, $Q_{\text{N}_2} = 1\ 800\text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$, $\sigma_{t\text{ fibre}} = 4\ 224\text{ MPa}$

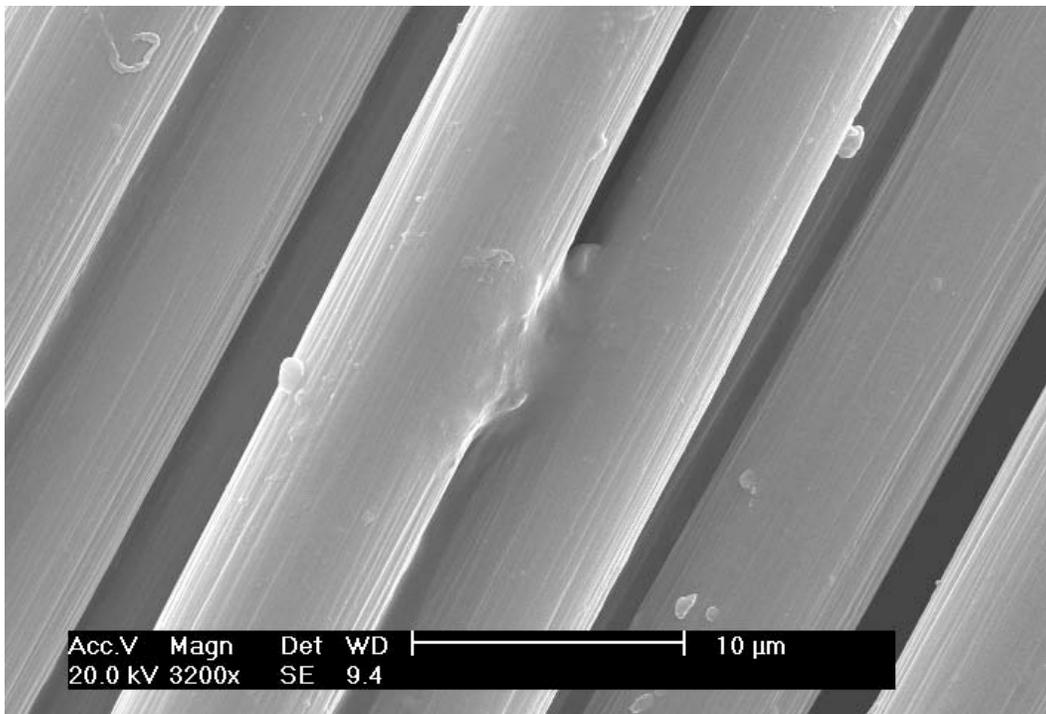
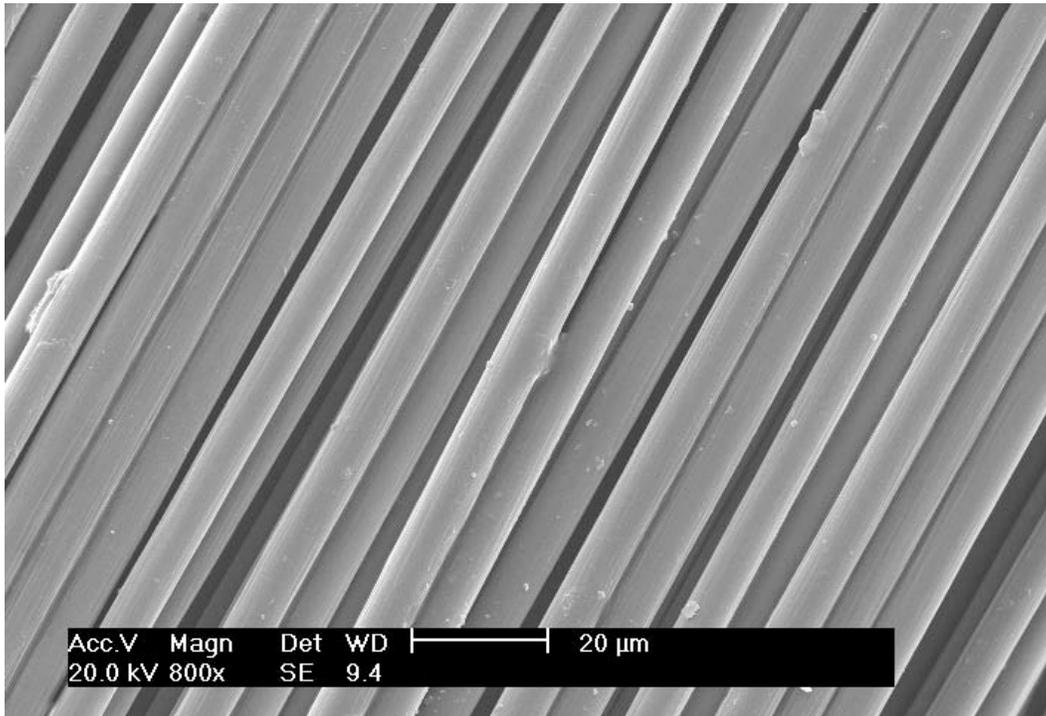


Essais 9 : $T = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 2\text{ h}$, $Q_{\text{H}_2\text{O}} = 300\text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$, $Q_{\text{N}_2} = 450\text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$, $\sigma_{\text{t fibre}} = 4\text{ 333 MPa}$



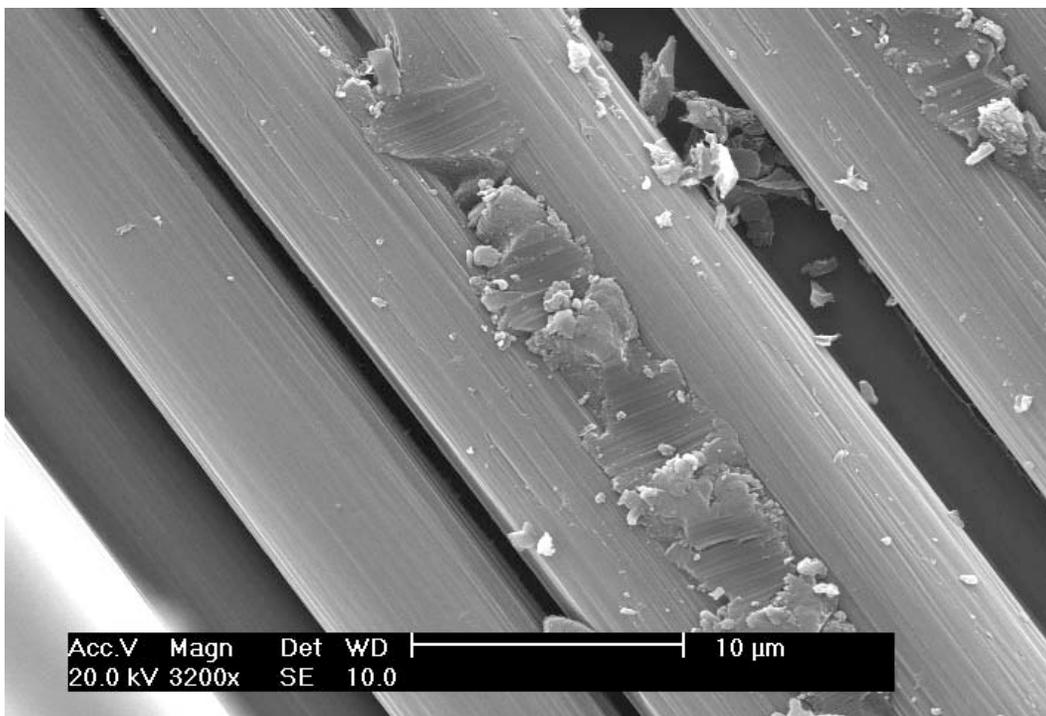
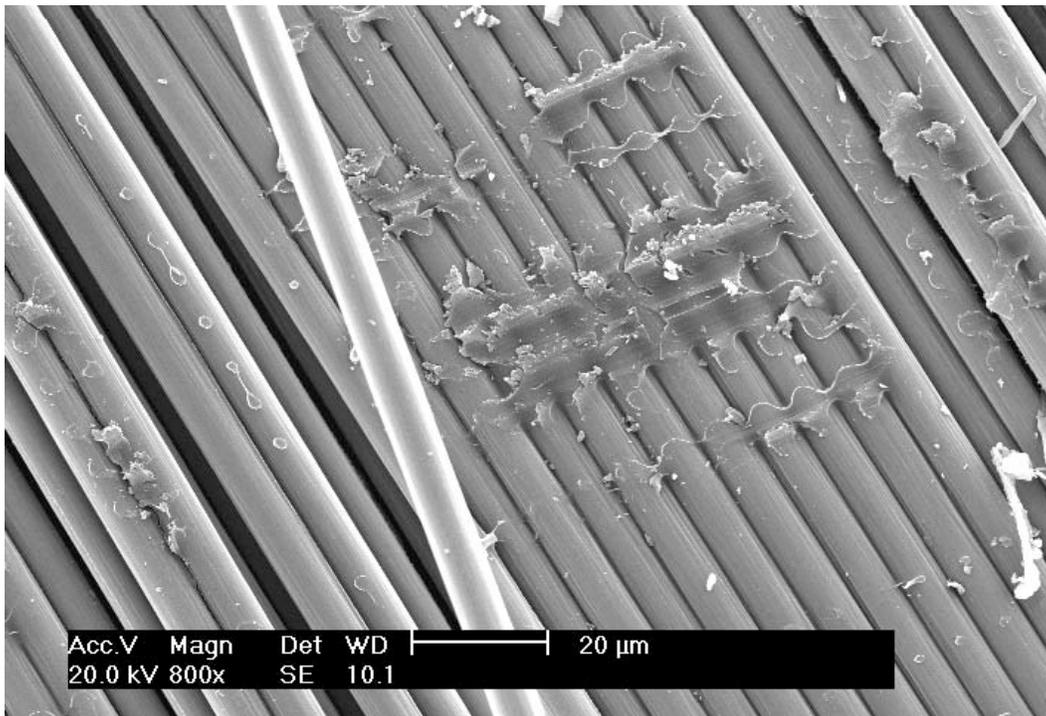
B.3 - Fibres de carbone issues des plans d'expériences affinés (L4)

B.3.1 - Fibres de carbone vierges AS4C $\sigma_{f \text{ fibre}} = 3\,651 \text{ MPa}$

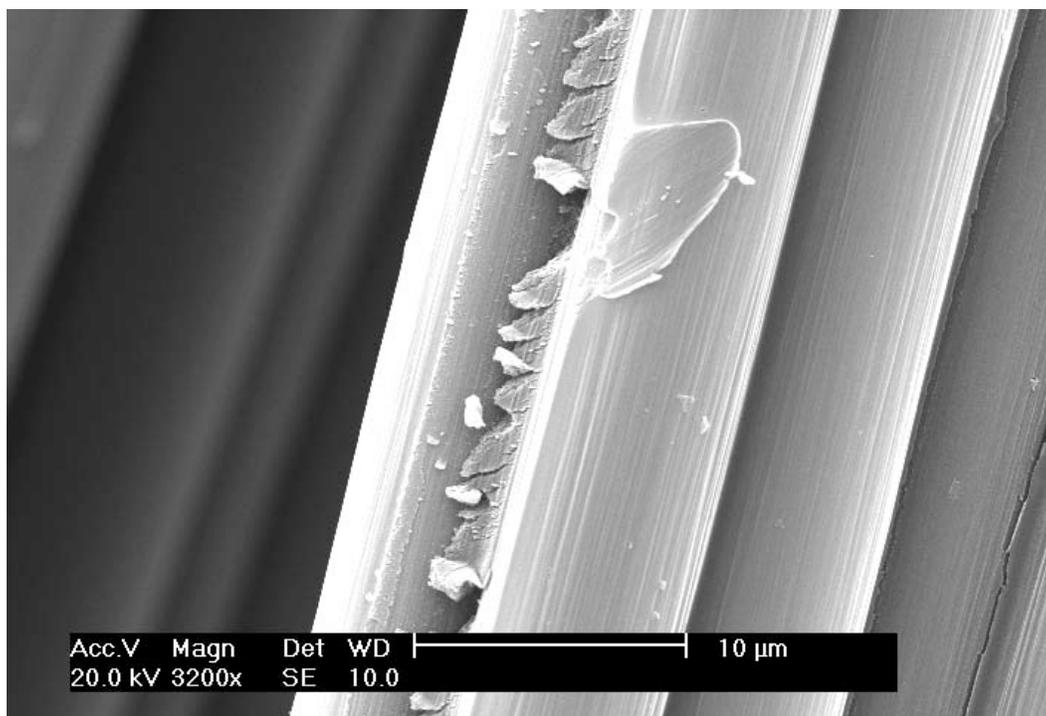
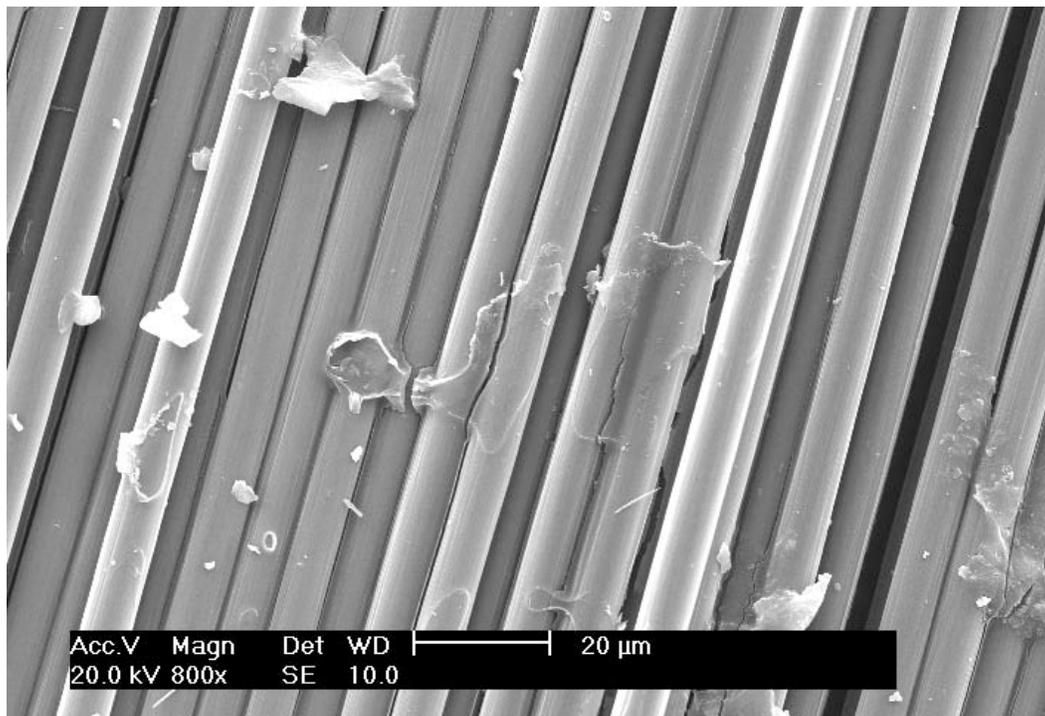


B.3.2 - Fibres issues des traitements des composites RTM6

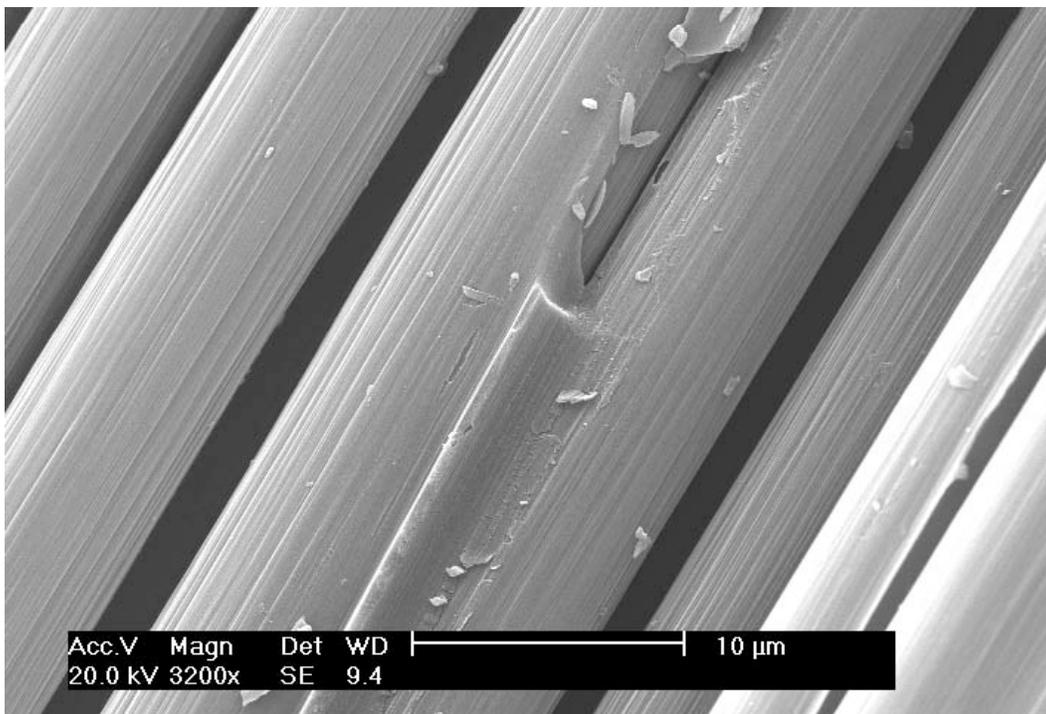
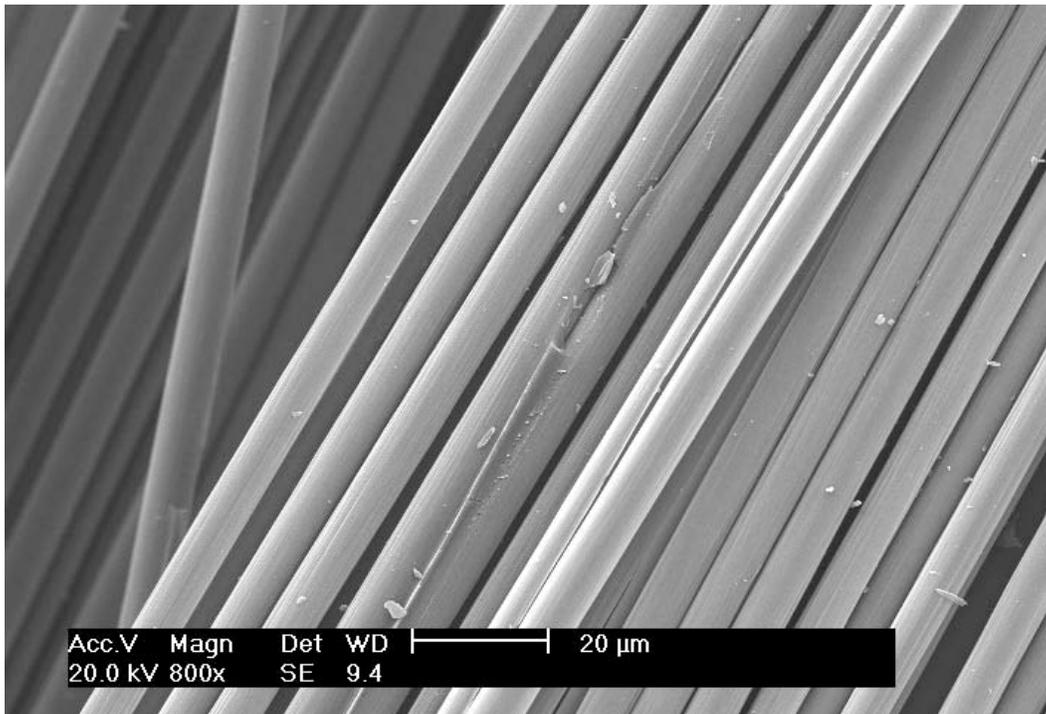
Essai 1 : $T = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 1\text{ h}$, $Q_{\text{H}_2\text{O}} = 175\text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$, $\sigma_{\text{fibre}} = 3\,495\text{ MPa}$



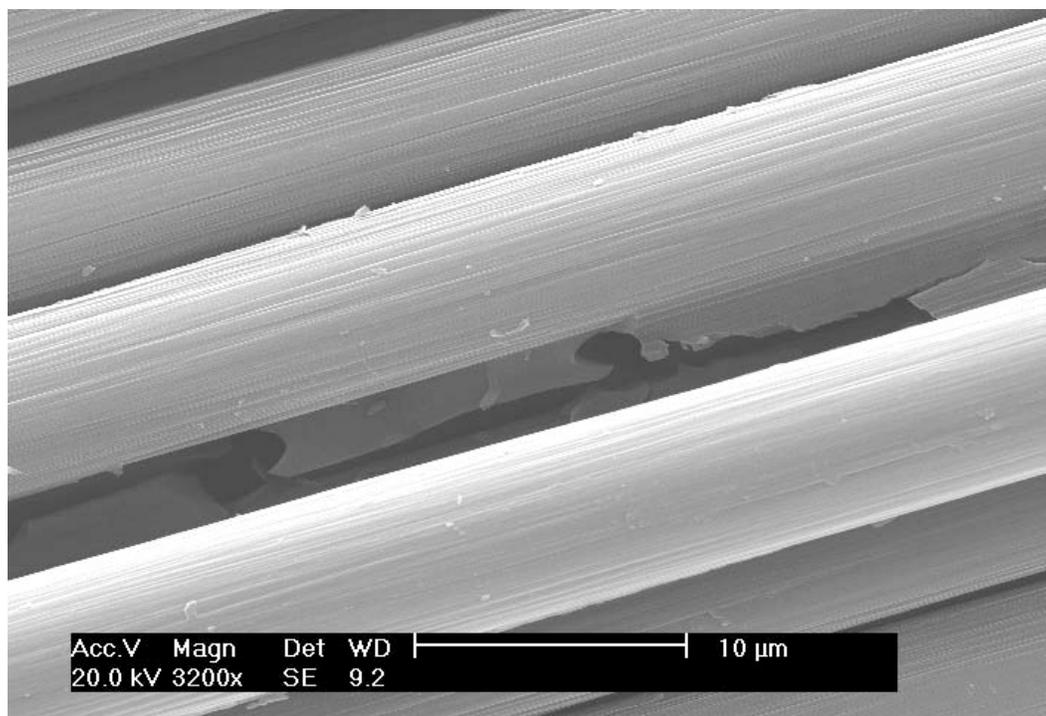
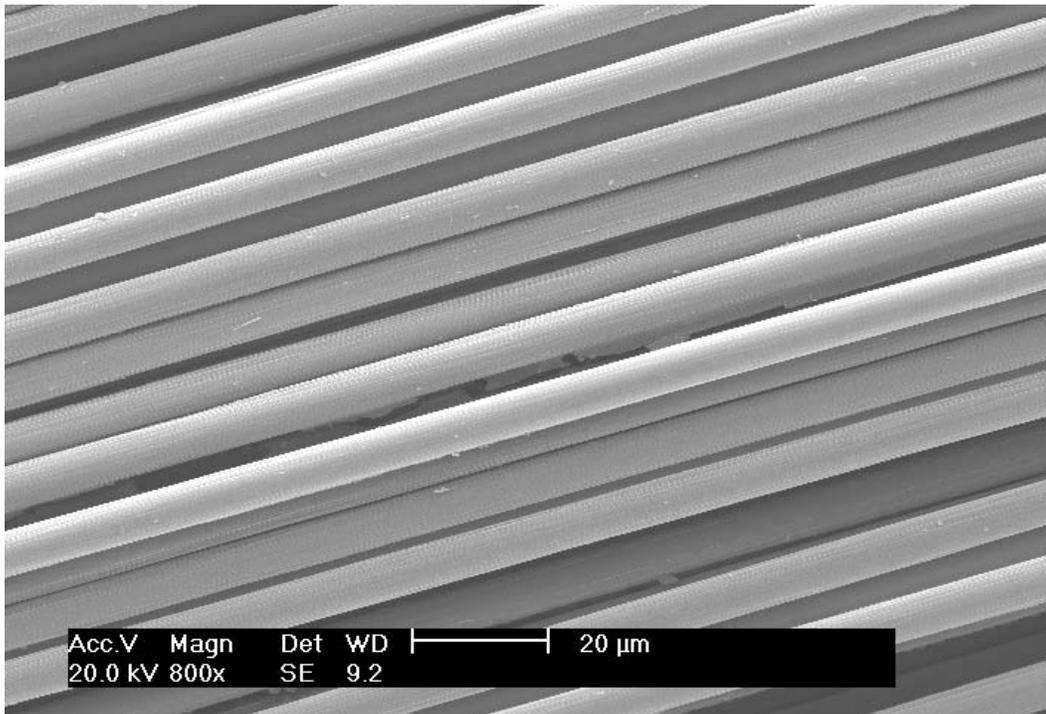
Essai 2 : $T = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 2\text{ h}$, $Q_{\text{H}_2\text{O}} = 325\text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$, $\sigma_{t\text{ fibre}} = 3\,285\text{ MPa}$



Essai 3 : $T = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 2\text{ h}$, $Q_{\text{H}_2\text{O}} = 175\text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$, $\sigma_{t\text{ fibre}} = 3\,469\text{ MPa}$

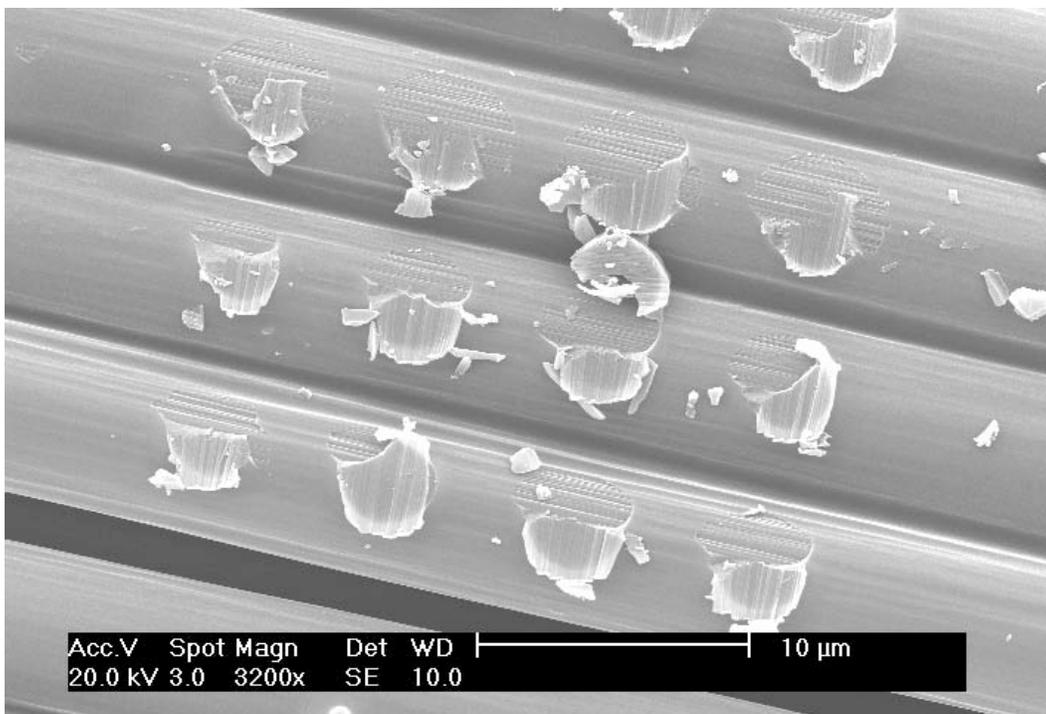
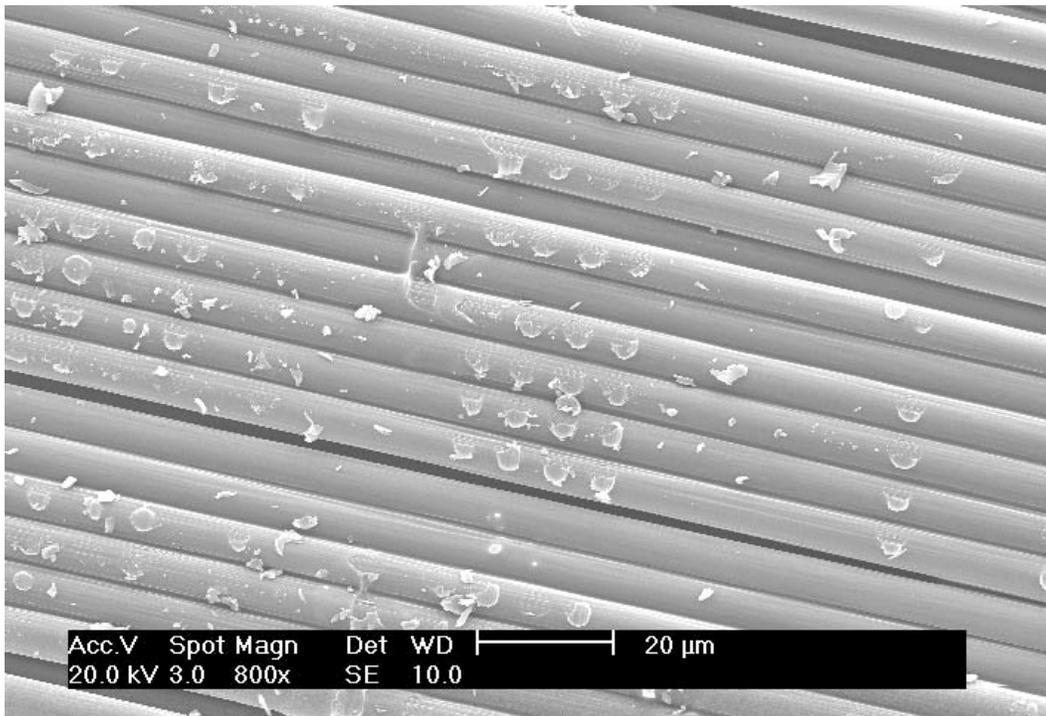


Essai 4 : $T = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 1\text{ h}$, $Q_{\text{H}_2\text{O}} = 325\text{ g.h}^{-1}$, $\sigma_{t\text{ fibre}} = 3\,447\text{ MPa}$

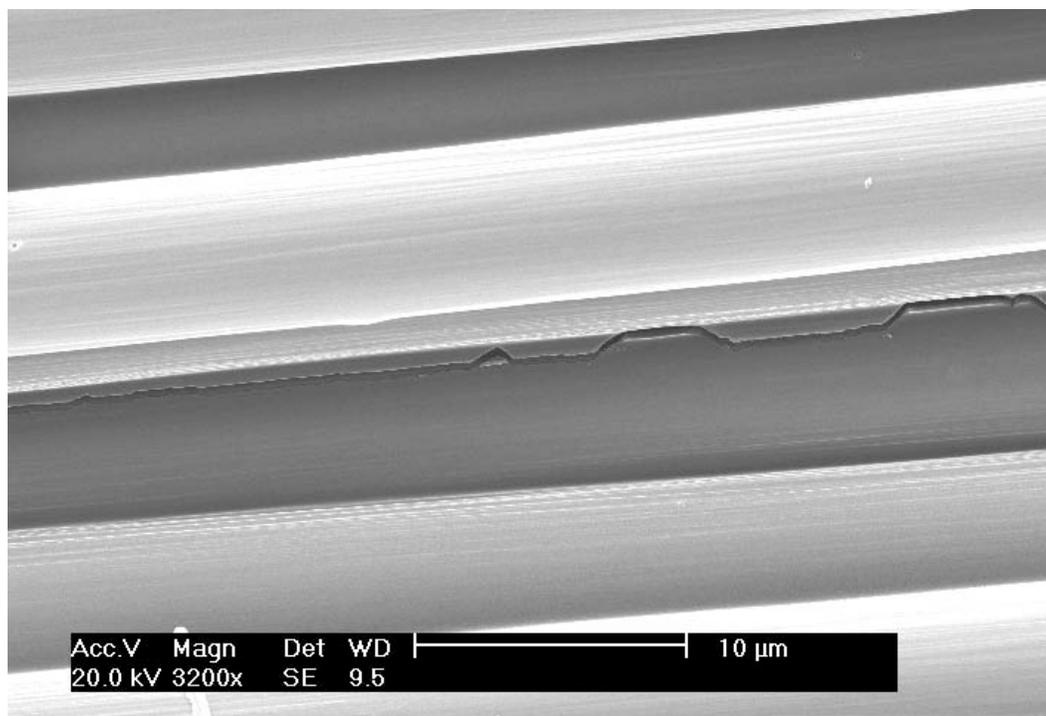
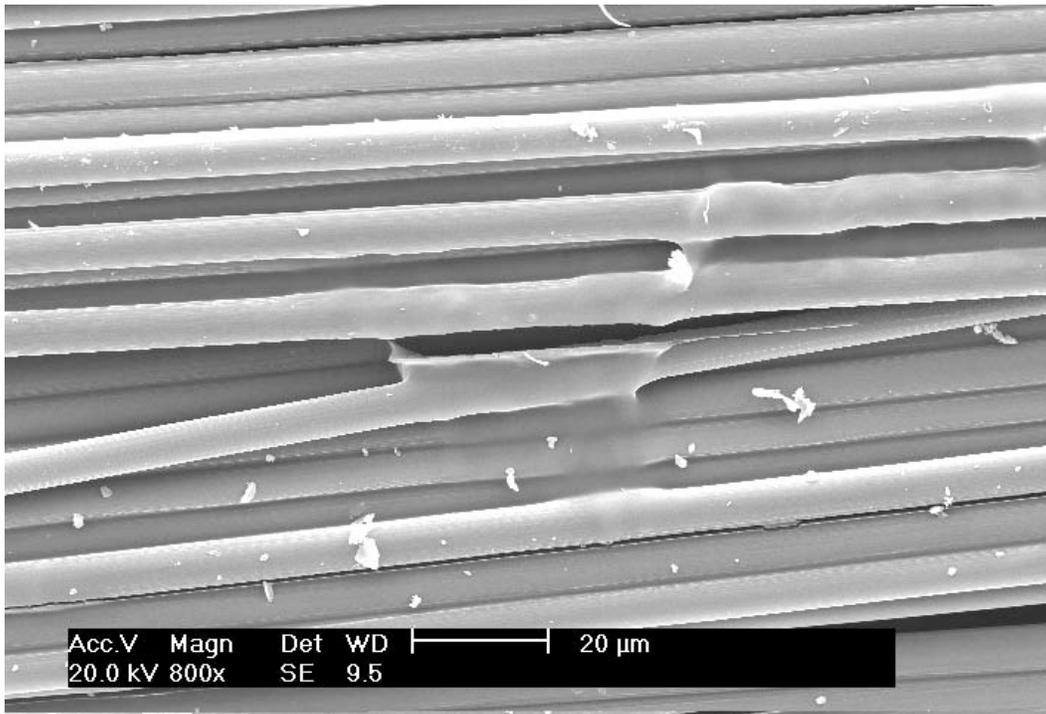


B.3.3 - Fibres issues des traitements des composites SR1710

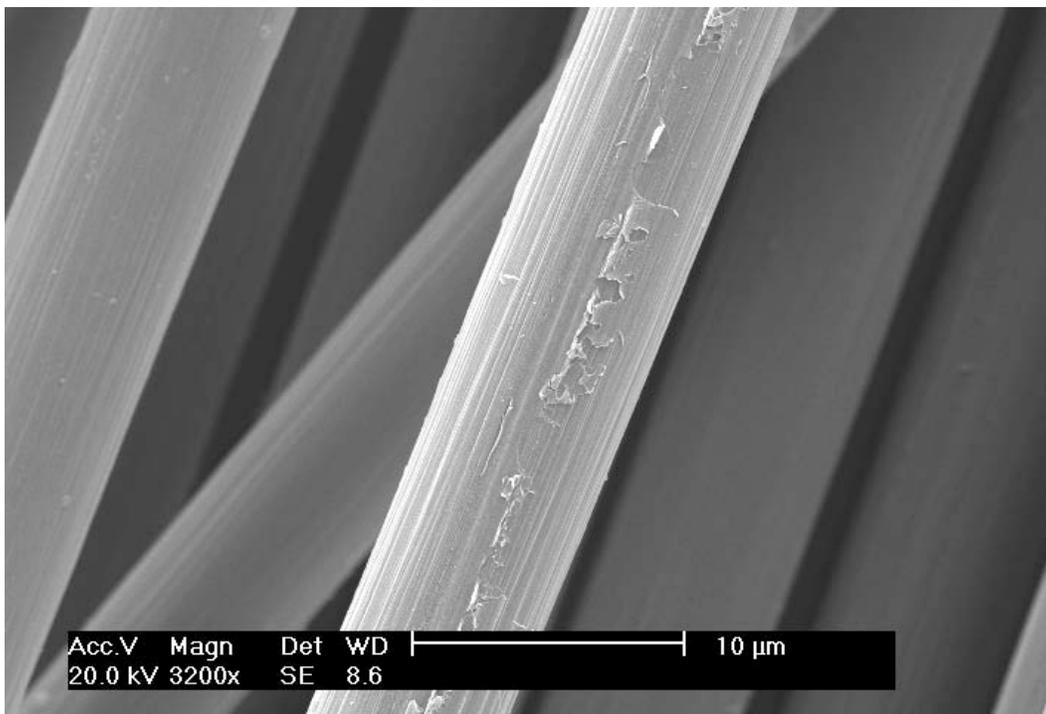
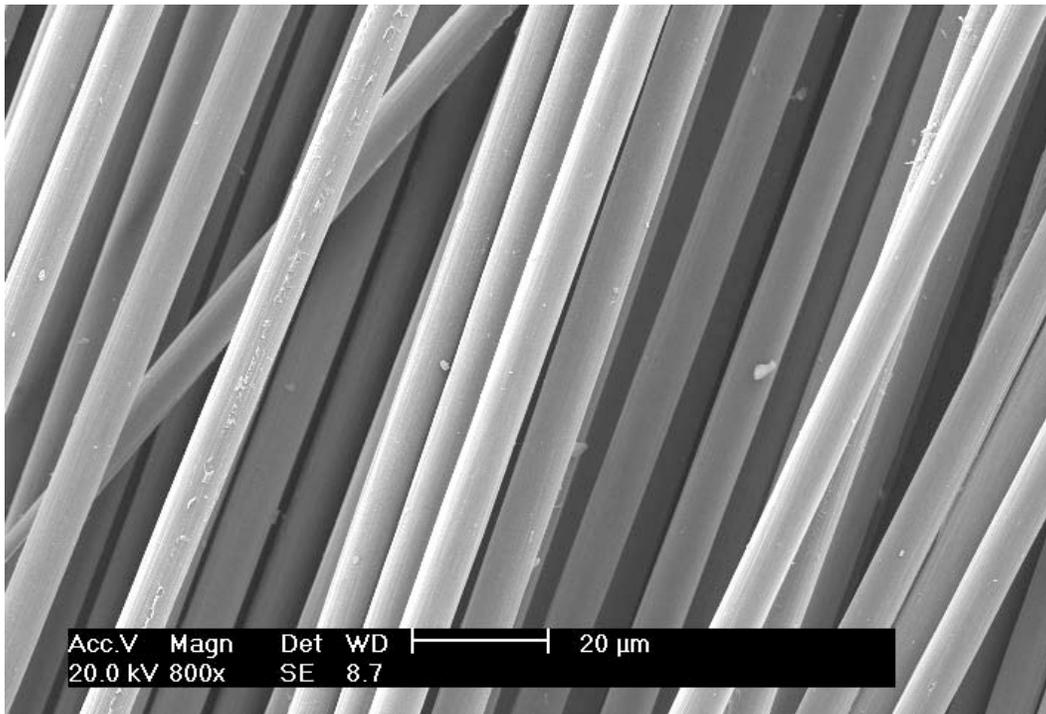
Essai 1 : $T = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 1\text{ h}$, $Q_{\text{H}_2\text{O}} = 175\text{ g.h}^{-1}$, $\sigma_{\text{fibre}} = 3\ 566\text{ MPa}$



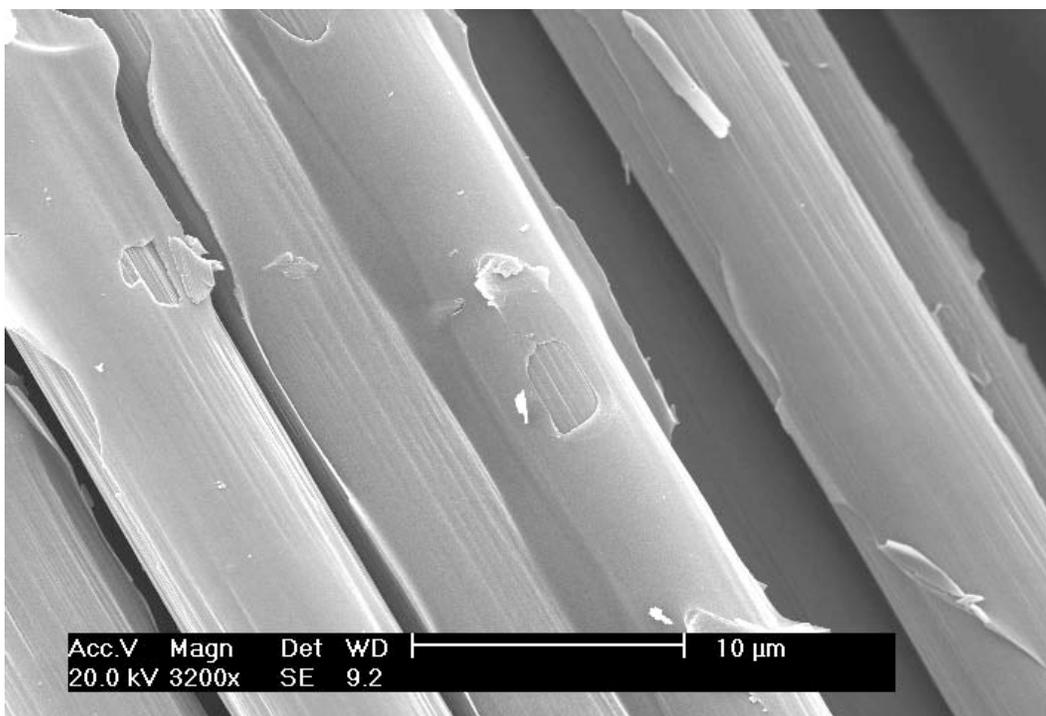
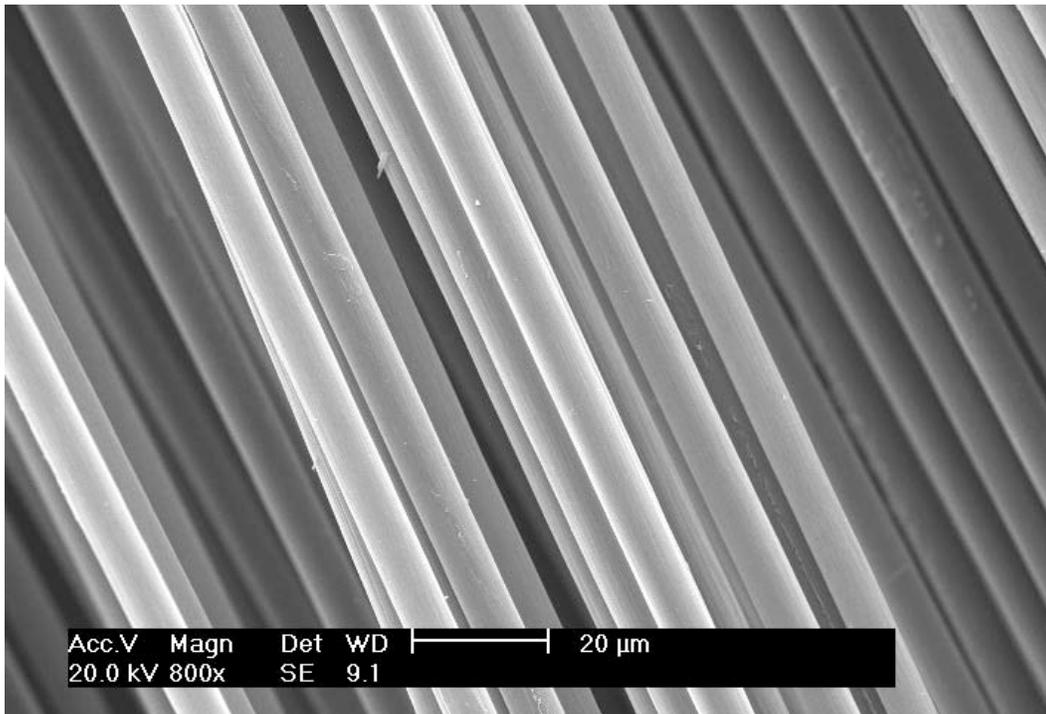
Essai 2 : $T = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 2\text{ h}$, $Q_{\text{H}_2\text{O}} = 325\text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$, $\sigma_{t\text{ fibre}} = 3\text{ 652 MPa}$



Essai 3 : $T = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 2\text{ h}$, $Q_{\text{H}_2\text{O}} = 175\text{ g.h}^{-1}$, $\sigma_{t\text{ fibre}} = 3\ 612\text{ MPa}$

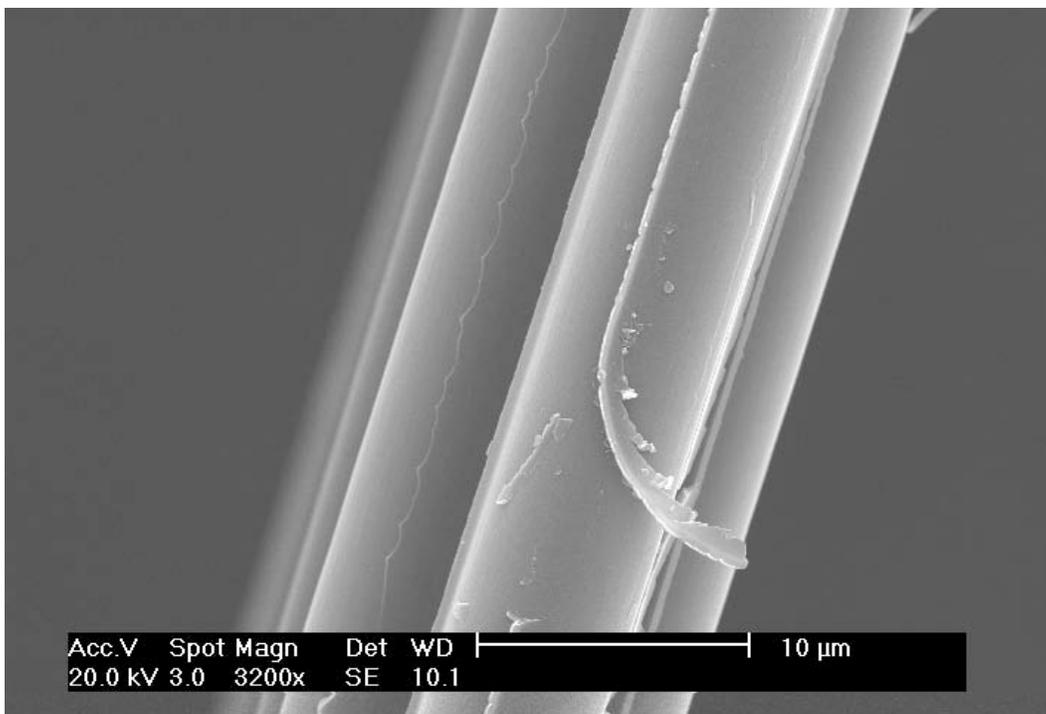
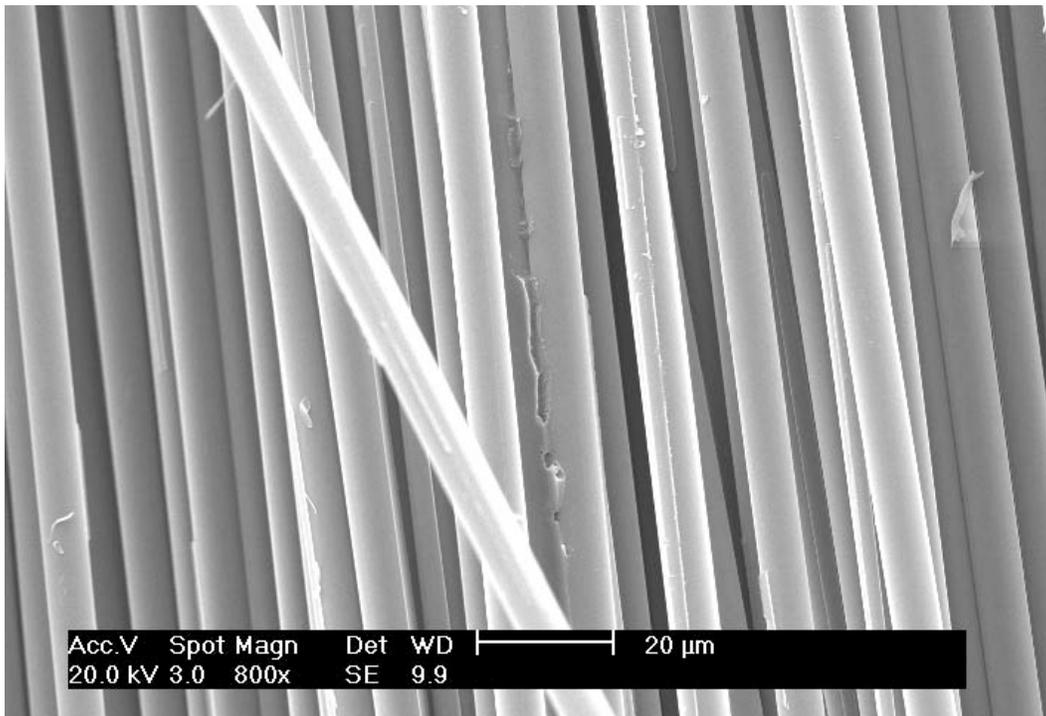


Essai 4 : $T = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 1\text{ h}$, $Q_{\text{H}_2\text{O}} = 325\text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$, $\sigma_{t\text{ fibre}} = 3\,377\text{ MPa}$

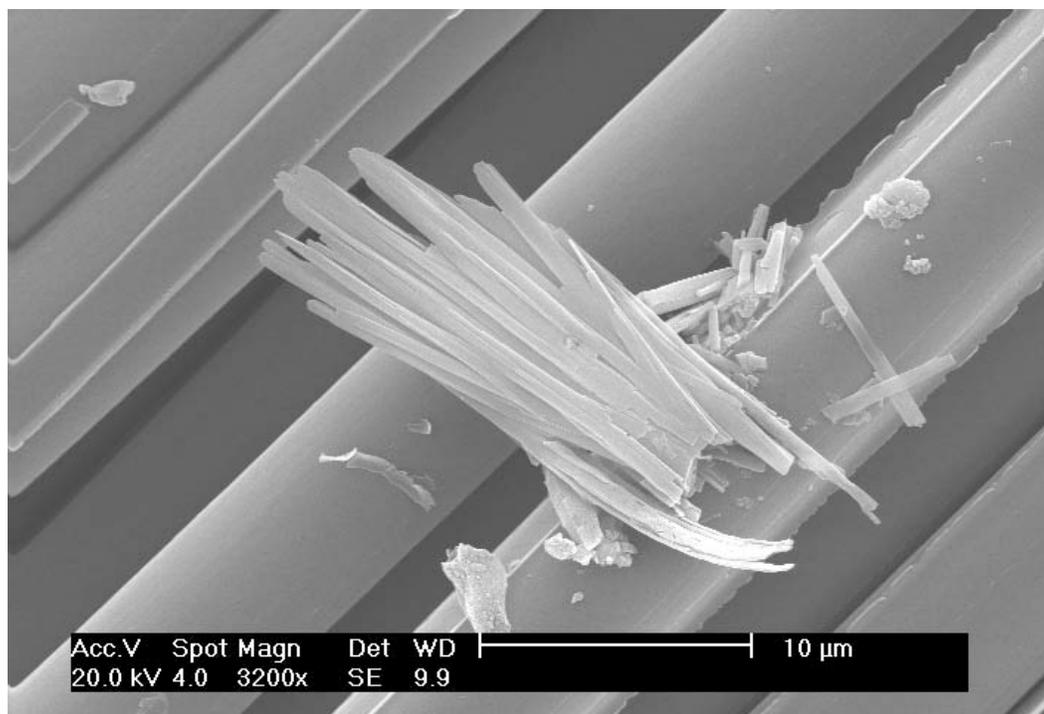
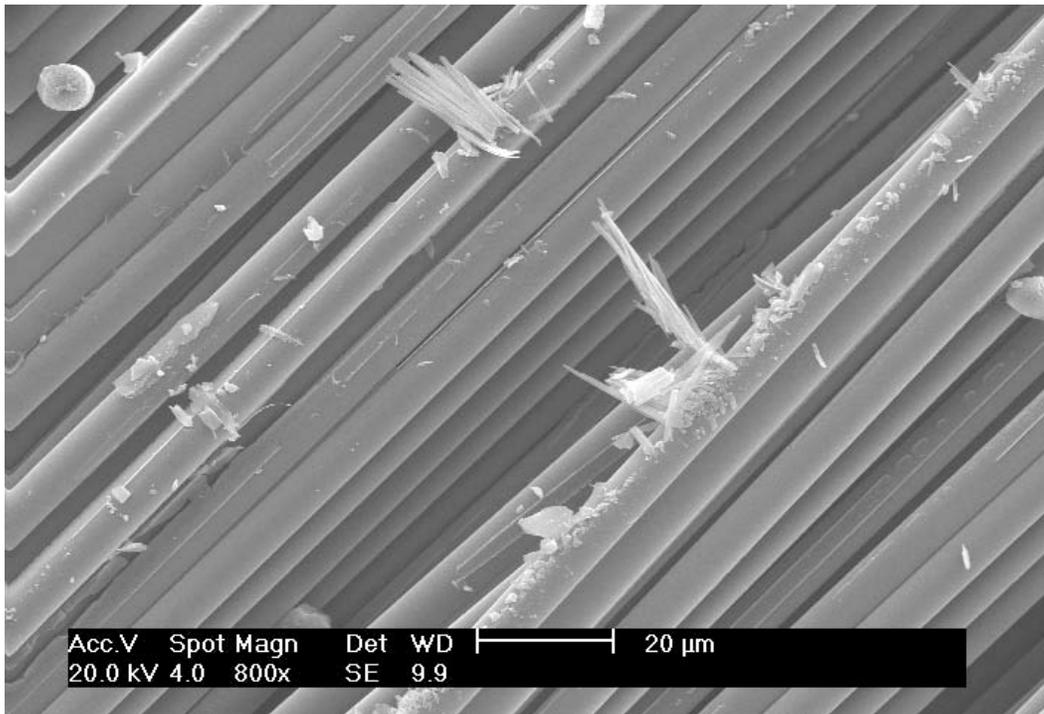


B.3.4 - Fibres issues des traitements des composites Sikadur 30 (fibre de carbone T700)

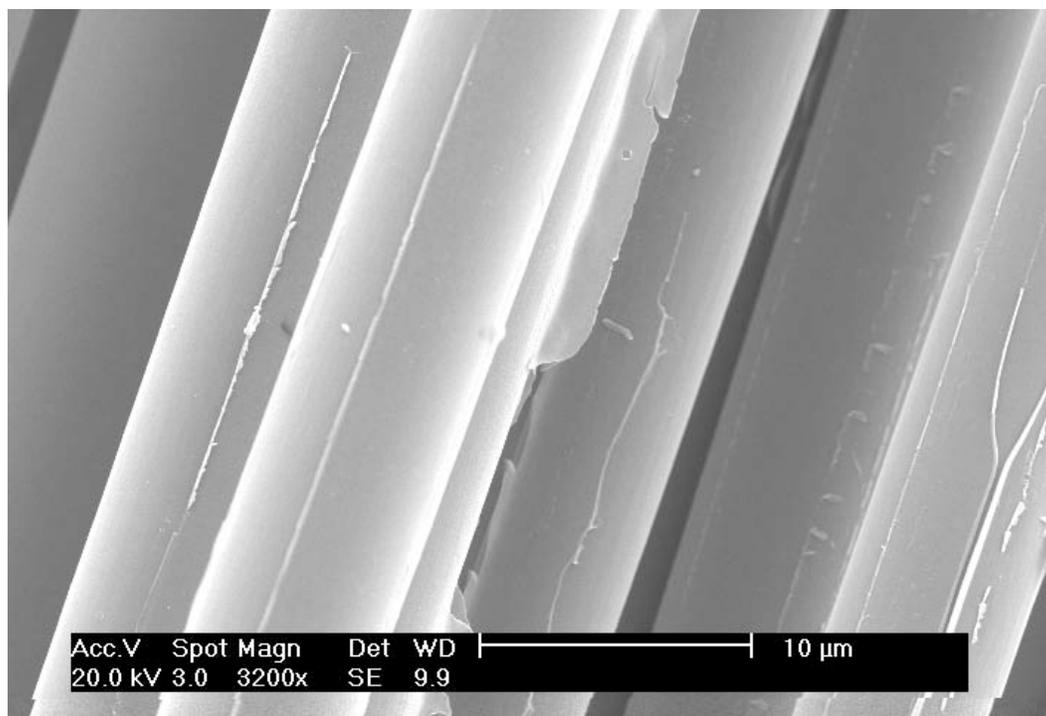
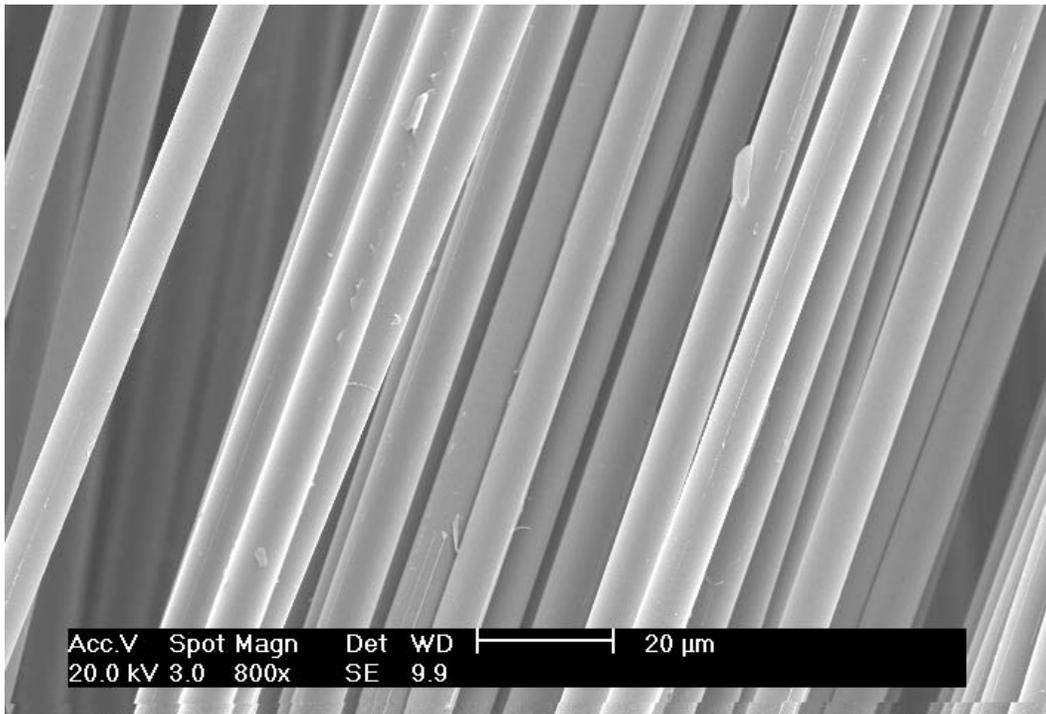
Essai 1 : $T = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 1\text{ h}$, $Q_{\text{H}_2\text{O}} = 60\text{ g.h}^{-1}$, $\sigma_{t\text{ fibre}} = 4\ 186\text{ MPa}$



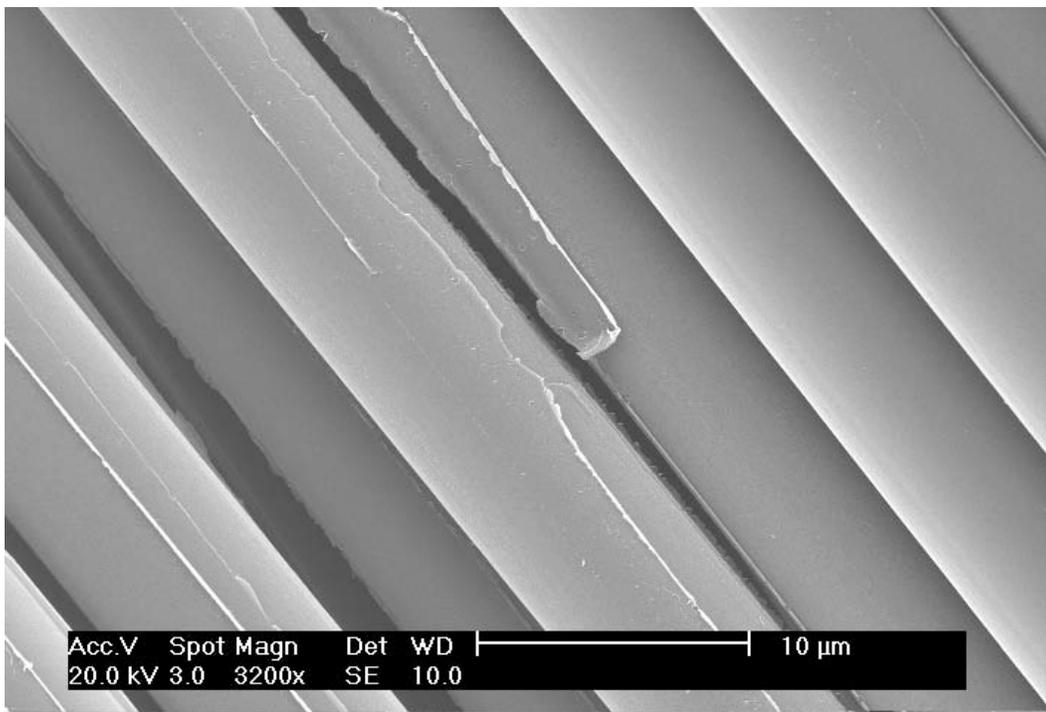
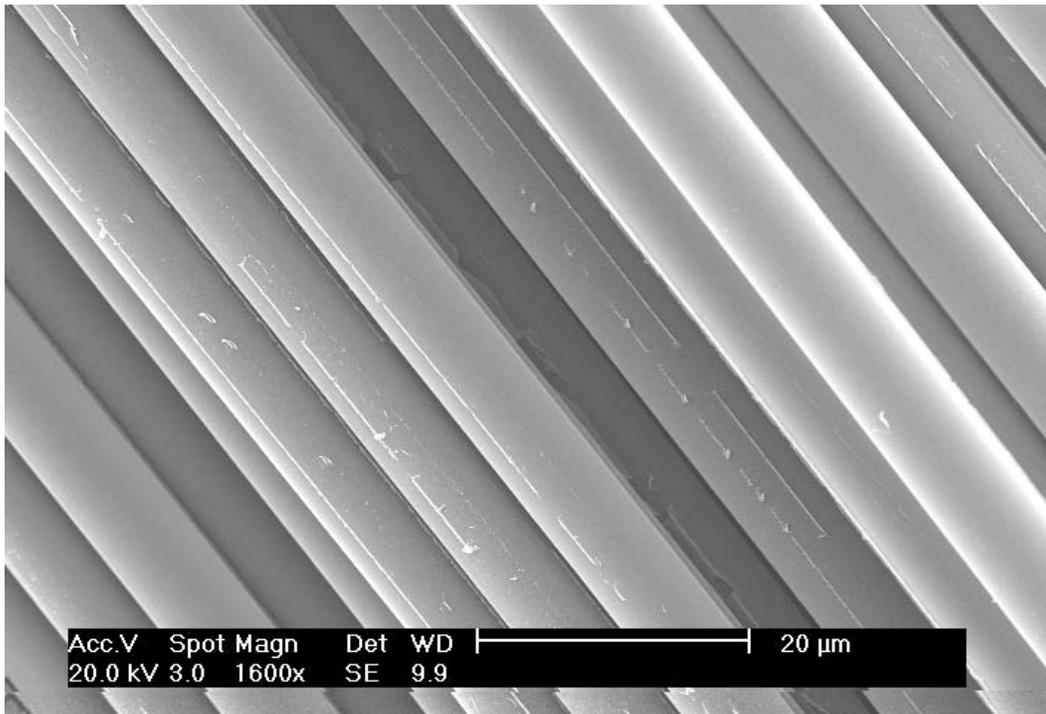
Essai 2 : $T = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 2\text{ h}$, $Q_{\text{H}_2\text{O}} = 90\text{ g.h}^{-1}$, $\sigma_{\text{fibre}} = 3\,957\text{ MPa}$



Essai 3 : $T = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 2\text{ h}$, $Q_{\text{H}_2\text{O}} = 60\text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$, $\sigma_{t\text{ fibre}} = 3\,451\text{ MPa}$

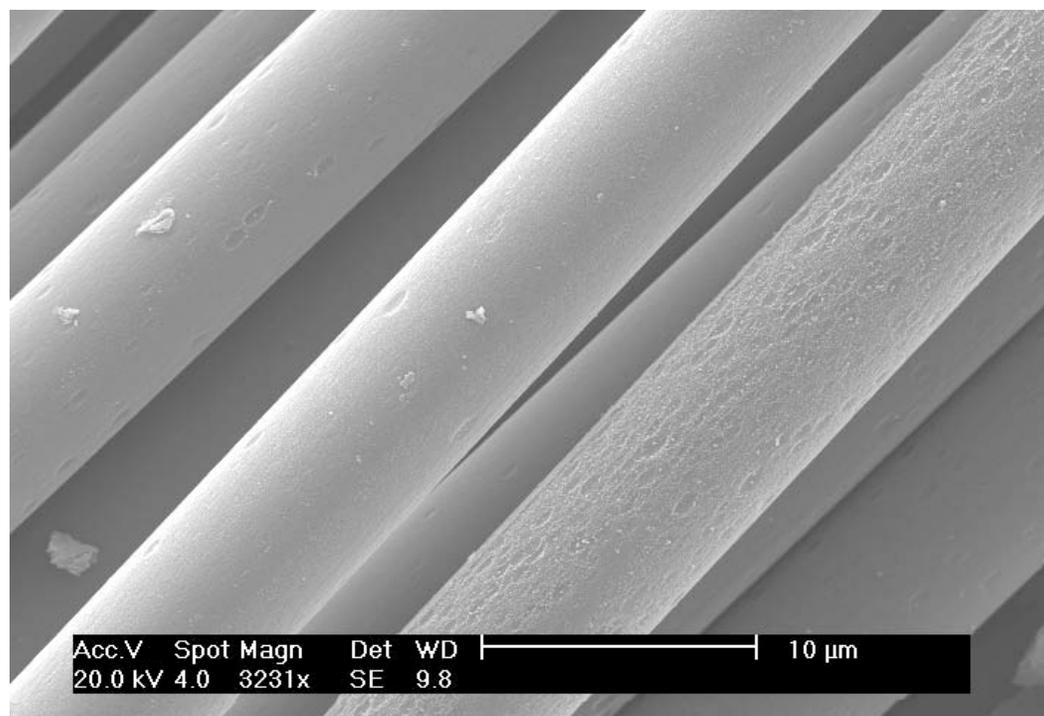
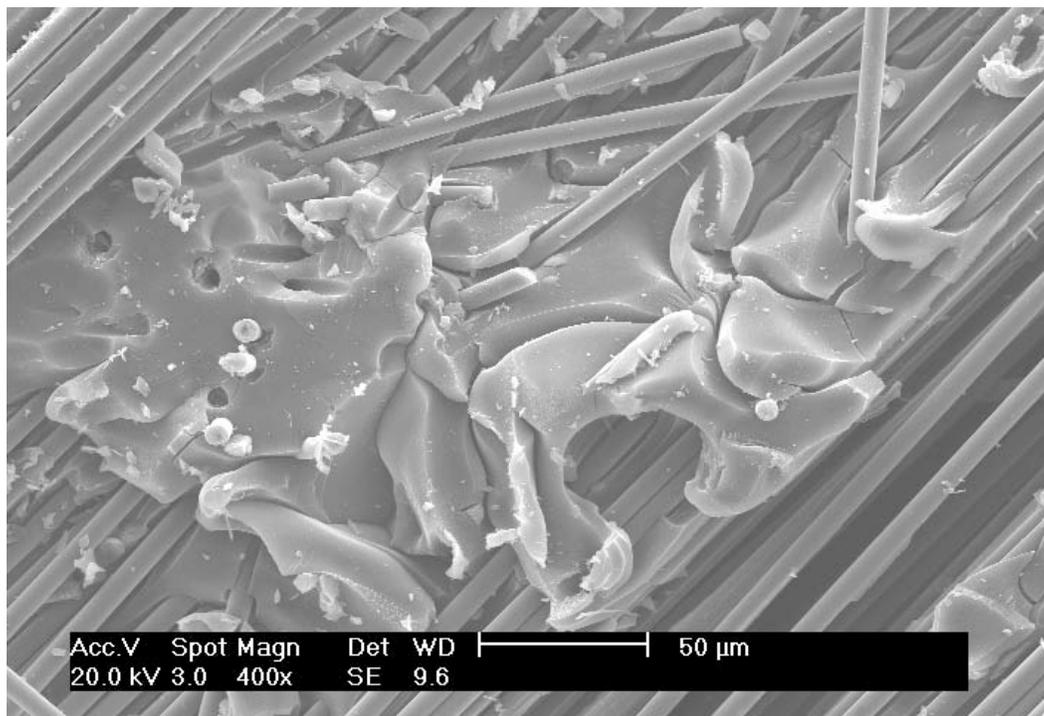


Essai 4 : $T = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 1\text{ h}$, $Q_{\text{H}_2\text{O}} = 90\text{ g.h}^{-1}$, $\sigma_{\text{t fibre}} = 3\ 657\text{ MPa}$



B.3.5 - Fibres issues des traitements des composites PPS

Essai 3 : $T = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 2\text{ h}$, $Q_{\text{H}_2\text{O}} = 60\text{ g.h}^{-1}$



Annexe C - Expression de $f(\alpha)$ des modèles cinétiques des réactions d'état solide utilisés dans la méthode IKP

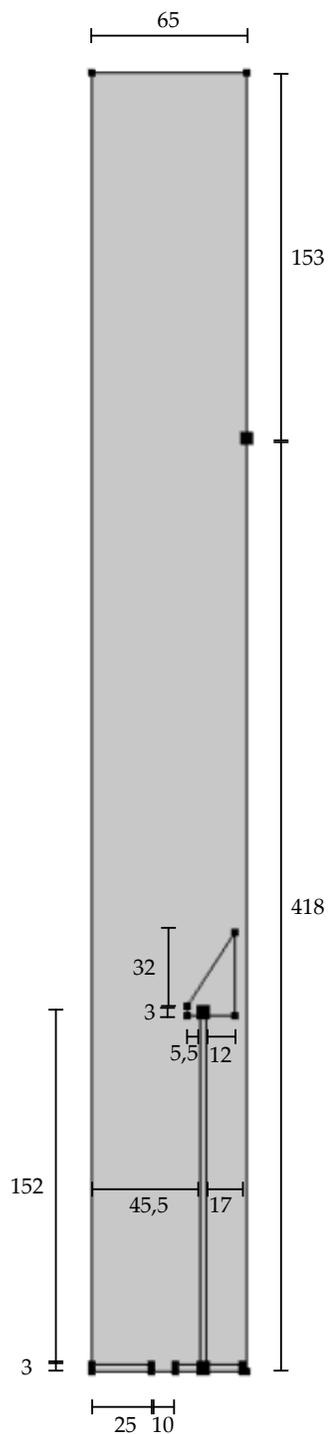
Symbole	$f(\alpha)$	$g(\alpha)$	Dénomination	Mécanisme
S1	$4[-\ln(1-\alpha)]^{3/4}(1-\alpha)$	$[-\ln(1-\alpha)]^{1/4}$		Nucléation et croissance des nucléus $n=1/4$
S2	$3[-\ln(1-\alpha)]^{2/3}(1-\alpha)$	$[-\ln(1-\alpha)]^{1/3}$	Équation d'Avrami-Erofeev	Croissance des nucléus en 3-D $n=1/3$
S3	$2[-\ln(1-\alpha)]^{1/2}(1-\alpha)$	$[-\ln(1-\alpha)]^{1/2}$		Croissance des nucléus en 2-D $n=1/2$
S4	$(3/2)[- \ln(1-\alpha)]^{1/3}(1-\alpha)$	$[-\ln(1-\alpha)]^{2/3}$		Nucléation et croissance des nucléus $n=2/3$
S5	$(1-\alpha)$	$-\ln(1-\alpha)$	Nucléation aléatoire d'1er ordre	Loi de désintégration uni-moléculaire $n=1$
S6	1	α	Réaction d'interphase (1er ordre, symétrie plane)	Réaction d'interphase en 1-D, $n=1$
S7	$(1-\alpha)^{1/2}$	$2[1-(1-\alpha)^{1/2}]$	Symétrie cylindrique	Réaction d'interphase en 2-D, $n=1/2$
S8	$(1-\alpha)^{2/3}$	$3[1-(1-\alpha)^{1/3}]$	Symétrie sphérique	Réaction d'interphase en 3-D, $n=1/3$
S9	$(1/2)\alpha^{-1}$	α^2		Diffusion en 1-D, symétrie plane
S10	$-1/\ln(1-\alpha)$	$(1-\alpha)\ln(1-\alpha)+\alpha$	Loi de diffusion	Diffusion en 2-D, symétrie cylindrique
S11	$1/[(1-\alpha)^{1/3}-1]$	$1-(2/3)\alpha-(1-\alpha)^{2/3}$		Diffusion en 3-D, Ginstling-Brounstein
S12	$(3/2)(1-\alpha)^{2/3}[1-(1-\alpha)^{1/3}]$	$[1-(1-\alpha)^{1/3}]^2$		Diffusion en 3-D, équation de Jander
S13	$4(1-\alpha)^{3/4}$	$\alpha^{1/4}$	Fonction de puissance	$n=1/4$
S14	$3(1-\alpha)^{2/3}$	$\alpha^{1/3}$		$n=1/3$
S15	$2(1-\alpha)^{1/2}$	$\alpha^{1/2}$		$n=1/2$
S16	$(3/2)(1-\alpha)^{1/3}$	$\alpha^{2/3}$		$n=2/3$
S17	$(1/2)/(1-\alpha)$	$1-(1-\alpha)^2$		Réaction d'ordre
S18	$(1/3)/(1-\alpha)^2$	$1-(1-\alpha)^3$	Réaction d'ordre	Troisième ordre

Annexe D - Valeurs moyennes de S_j pour les 18 fonctions d'avancement en pyrolyse et en vapo-thermolyse

	$\overline{s_1}$	$\overline{s_2}$	$\overline{s_3}$	$\overline{s_4}$	$\overline{s_5}$	$\overline{s_6}$	$\overline{s_7}$	$\overline{s_8}$	$\overline{s_9}$	$\overline{s_{10}}$	$\overline{s_{11}}$	$\overline{s_{12}}$	$\overline{s_{13}}$	$\overline{s_{14}}$	$\overline{s_{15}}$	$\overline{s_{16}}$	$\overline{s_{17}}$	$\overline{s_{18}}$
Composite RTM6																		
Pyro	0.017	0.012	0.009	0.007	0.006	0.018	0.009	0.007	0.011	0.009	0.026	0.063	0.048	0.033	0.013	0.015	0.013	0.026
Vapo	0.064	0.045	0.027	0.018	0.009	0.052	0.023	0.017	0.037	0.047	0.131	0.178	0.135	0.093	0.052	0.064	0.039	0.152
Composite SR1710																		
Pyro	0.011	0.008	0.007	0.007	0.008	0.011	0.007	0.007	0.007	0.005	0.021	0.040	0.030	0.020	0.038	0.206	0.009	0.020
Vapo	0.011	0.008	0.007	0.007	0.008	0.011	0.007	0.007	0.007	0.005	0.018	0.040	0.030	0.020	0.037	0.189	0.008	0.016
Composite M21																		
Pyro	0.0030	0.0021	0.0027	0.0033	0.0037	0.0015	0.0025	0.0029	0.0090	0.0214	0.0758	0.0065	0.0041	0.0024	0.0034	0.0038	0.0027	0.0996
Vapo	0.0027	0.0024	0.0027	0.0029	0.0030	0.0021	0.0025	0.0027	0.0102	0.0223	0.0743	0.0046	0.0032	0.0025	0.0036	0.0045	0.0032	0.1011
Composite Pi-Preg																		
Pyro	0.008	0.006	0.006	0.006	0.007	0.011	0.006	0.006	0.006	0.004	0.016	0.043	0.032	0.021	0.107	0.403	0.008	0.015
Vapo	0.010	0.009	0.008	0.008	0.009	0.011	0.008	0.008	0.008	0.007	0.017	0.038	0.028	0.019	0.073	0.272	0.009	0.015

Annexe E - Configurations des paramètres de modélisation

E.1 - Configuration des paramètres du modèle du pilote en régime stationnaire



Géométrie (symétrie axiale) du four pilote en 2D (mm)

Propriétés de la vapeur d'eau :

Pression absolue $P_A = P + 1 \text{ atm}$

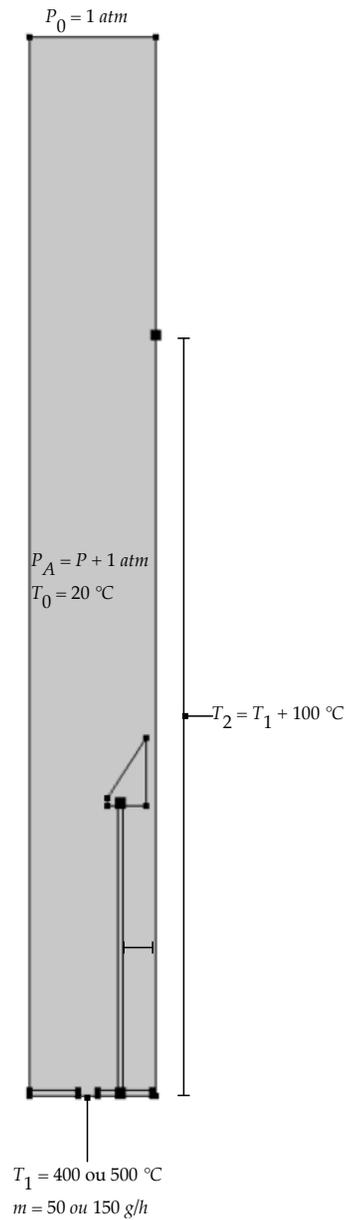
Débit massique normal $m = 50$ ou $150 \text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$

Pression à la sortie du four $P_0 = 1 \text{ atm}$

Température initiale $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

Température de la vapeur d'eau à l'entrée du four $T_1 = 400$ ou $500 \text{ }^\circ\text{C}$

Température des résistances chauffantes $T_2 = T_1 + 100 \text{ }^\circ\text{C}$

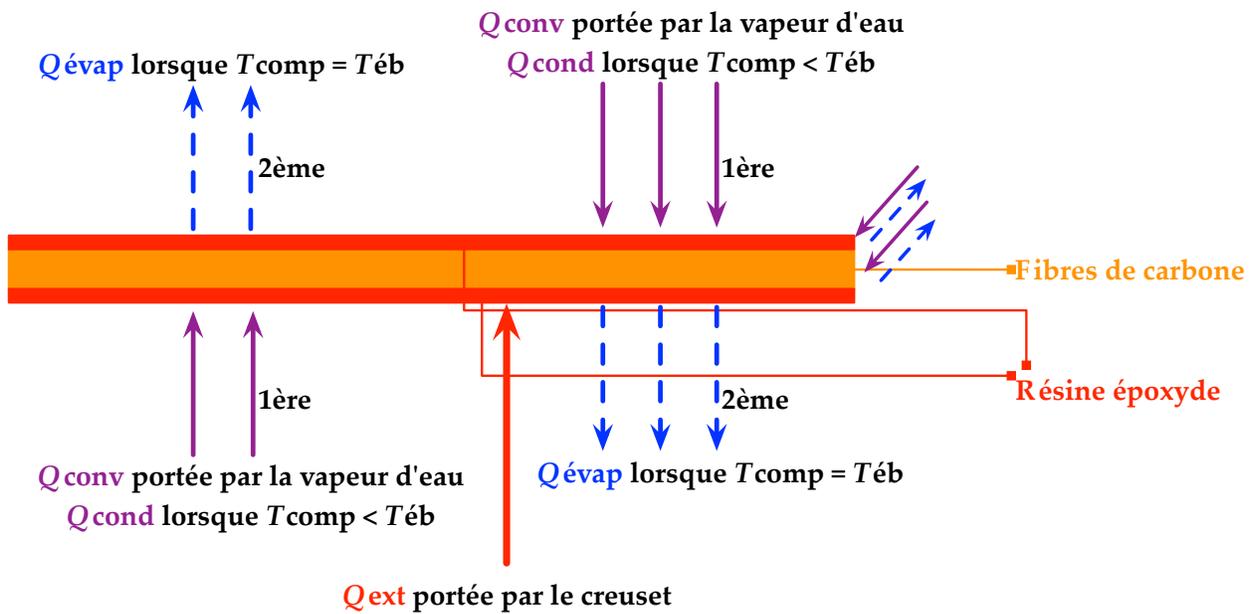
**Refroidissement par convection forcée :**

Longueur de la plaque virtuelle $L : 0,6 \text{ m}$

Vitesse du fluide externe $V_{\text{ext}} = 0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (fluide externe = l'air à $20 \text{ }^\circ\text{C}$ et 1 atm)

E.2 - Configuration des paramètres du modèle de la dégradation d'un CFRP

$C_{p \text{ fib}} = 710 \text{ J.kg}^{-1}.K^{-1}$	Capacité calorifique massique à pression constante de la fibre de carbone
$\rho_{\text{fib}} = 1\,800 \text{ kg.m}^{-3}$	Masse volumique de la fibre de carbone
$k_{\text{fib}} = 10 \text{ W.m}^{-1}.K^{-1}$	Conductivité thermique de la fibre de carbone
$C_{p \text{ rés}} = 2\,000 \text{ J.kg}^{-1}.K^{-1}$	Capacité calorifique massique à pression constante de la résine
$\rho_{\text{rés}} = 1\,140 \text{ kg.m}^{-3}$	Masse volumique de la résine
$k_{\text{rés}} = 0,2 \text{ W.m}^{-1}.K^{-1}$	Conductivité thermique de la résine
$h = 8 \text{ W.m}^2.K^{-1}$	Coefficient de transfert de chaleur de la vapeur d'eau
$T_{\infty} = 773,15 \text{ K}$	Température de la vapeur d'eau surchauffée
$k_{\text{paroi}} = 0,075 \text{ W.m}^{-1}.K^{-1}$	Conductivité thermique de la paroi du creuset
$e = 2,5 \text{ mm}$	Épaisseur de la paroi du creuset
$T_{\text{ext}} = 673,15 \text{ K}$	Température de la paroi externe du creuset
$Q_w = 2257 \text{ kJ.kg}^{-1}$	Chaleur latente de vaporisation de l'eau
$\beta_v = 3,87.10^{-8} \text{ kg.m}^{-2}.s.Pa$	Coefficient de transfert de masse de la vapeur d'eau
$T = 293,15 \text{ K}$	Température initiale du composite



Flux de chaleur entrants et sortants du système (plaque composite)

Annexe F - Fractiles de la loi de Fisher-Snedecor (F) (extrait). P = 0,95

$v_1 \backslash v_2$	1	2	3	4	5	6	7	8	10	12	20	40	60	·
1	161	200	216	225	230	234	237	239	242	244	248	251	252	254
2	18.5	19.0	19.2	19.2	19.3	19.3	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.5	19.5	19.5
3	10.1	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.79	8.74	8.66	8.59	8.57	8.53
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	5.96	5.91	5.80	5.72	5.69	5.63
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.74	4.68	4.56	4.46	4.43	4.37
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.06	4.00	3.87	3.77	3.74	3.67
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.64	3.57	3.44	3.34	3.30	3.23
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.35	3.28	3.15	3.04	3.01	2.93
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.14	3.07	2.94	2.83	2.79	2.71
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	2.98	2.91	2.77	2.66	2.62	2.54
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.85	2.79	2.65	2.53	2.49	2.40
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.75	2.69	2.54	2.43	2.38	2.30
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.67	2.60	2.46	2.34	2.30	2.21
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.60	2.53	2.39	2.27	2.22	2.13
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.54	2.48	2.33	2.20	2.16	2.07
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.38	2.31	2.16	2.03	1.98	1.88
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.35	2.28	2.12	1.99	1.95	1.84
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.16	2.09	1.93	1.79	1.74	1.62
100	3.94	3.09	2.70	2.46	2.31	2.19	2.10	2.03	1.93	1.85	1.68	1.52	1.45	1.28
∞	3.84	3.00	2.60	2.37	2.21	2.10	2.01	1.94	1.83	1.75	1.57	1.39	1.32	1.00

v_1 : degrés de liberté du numérateur (inter-groupe)

v_2 : degrés de liberté du dénominateur (intra-groupe)

Annexe G - Terminologie spécifique dans le domaine des plans d'expériences

Degré de liberté Nombre de valeurs qui peuvent être fixées librement pour spécifier un système.

Facteur La variable qui influe sur une réponse.

Facteur interne Un facteur contrôlable par l'opérateur.

Facteur catégorique Un facteur dont les valeurs sont fixées et ne sont pas forcément numériques.

Facteur continu Un facteur dont les valeurs sont représentées par des nombres continus.

Hypothèse nulle Hypothèse que l'on doit rejeter ou ne pas rejeter (accepter) à l'issue du test.

Niveau L'une des valeurs d'un des facteurs dans un plan d'expériences.

Réponse La grandeur d'intérêt.

Seuil de signification Valeur du risque de première espèce lorsque l'hypothèse nulle est une hypothèse simple. Valeur maximale du risque de première espèce lorsque l'hypothèse nulle est une hypothèse composite.

Statistique t La variable auxiliaire t .

Table (d'expériences) Un tableau dans lequel chaque ligne correspond à un essai expérimental indiquant les niveaux que doivent prendre les facteurs étudiés.

Table orthogonale Une table d'expériences est orthogonale par rapport à un modèle si tous les éléments de ce modèle sont orthogonaux dans cette table d'expériences. Deux facteurs sont orthogonaux dans une table d'expériences, si tous les couples de niveaux de ces facteurs existent et sont en nombre identique.

Test F Test où la statistique utilisée suit une loi de F lorsque l'hypothèse nulle est vraie. Il intervient notamment dans les problèmes suivants : test de l'égalité des variances de deux lois normales, à partir des variances estimées sur deux échantillons indépendants ; test intervenant dans l'analyse de la variance.

Valeur critique Dans un test d'hypothèse, valeur qui sert de limite et à laquelle on compare celle observée sur l'échantillon afin de déterminer si l'on doit rejeter ou non l'hypothèse.

Valeur F La variable auxiliaire F d'un modèle, $F = \text{Moyenne des carrés de la régression} / \text{Moyenne des carrés des résidus du modèle}$.

Valeur p Dans un test statistique, la valeur p (ou la probabilité critique) est la probabilité d'obtenir la même valeur (ou une valeur encore plus extrême) du test si l'hypothèse nulle était vraie. Si cette valeur p est inférieure à la valeur du seuil préalablement défini (traditionnellement 5% ou 1%), on rejette l'hypothèse nulle.

Valorisation de déchets composites à matrices polymériques renforcées de fibres de carbone par un procédé de vapo-thermolyse

Résumé

Le composite à matrices polymériques renforcées de fibres de carbone (CFRP) est un matériau précieux en raison de ses excellentes propriétés mécaniques, légèreté et durabilité. Un gain important d'efficacité et une réduction des émissions de carbone peuvent être obtenus en remplaçant les pièces métalliques par les CFRPs dans l'industrie du transport. Toutefois, le recyclage de déchets CFRP est problématique, car le renfort de fibres de carbone est

chimiquement lié à la matrice de résine réticulée. Néanmoins, la réutilisation de fibres de carbone couteuses rend le recyclage des CFRPs potentiellement viable en termes d'économie. Dans notre laboratoire, une étude multi-échelle d'un procédé de vapo-thermolyse a été réalisée, dont l'objectif est de séparer les fibres de carbone de matrices polymériques en utilisant la vapeur d'eau surchauffée. Afin d'obtenir une meilleure compréhension du comportement de dégradation thermique des matériaux CFRP, de nombreuses analyses thermiques ainsi que les caractérisations physico-chimiques ont été effectuées sur différentes fibres de carbone, résines polymériques (époxyde ou polyphénylène sulfide) et les composites correspondants. Une étude cinétique a été également abordée. Les plans d'expériences réalisées à l'échelle pilote dans un réacteur sophistiqué permettent de déterminer les conditions expérimentales optimales du procédé semi-industriel. Les fibres de carbone récupérées à partir de conditions optimisées apparaissent propres, sans résine et conservent plus de 90% de leur résistance à la traction d'origine. Les phases gazeuse et liquide émises ont également été quantitativement analysées. La modélisation de l'écoulement et des transferts thermiques du réacteur ainsi que la simulation de la dégradation de matrices polymériques montrent les résultats comparables avec les observations expérimentales. L'analyse du cycle de vie indique que le recyclage des CFRPs peut être favorable pour l'environnement par rapport au scénario de mise en décharge.

Mot clés : déchet composite, matrice polymérique, fibre de carbone, valorisation, vapo-thermolyse, plan d'expériences

Abstract

Carbon fiber reinforced polymer-matrix composite (CFRP) is a highly valued material because of its exceptional strength, rigidity, light weight and durability. Significant fuel efficiency gains and carbon emission reduction can be obtained by replacing metal parts in automotive components with CFRPs. However, the recycling of CFRP waste is problematic because the reinforcement (carbon fiber) is chemically bonded to the cross-linked matrix resin. Nevertheless, the reuse of expensive carbon fibers makes the recycling a potentially economically viable option. A thermal process to separate carbon fibers from polymer matrix by using superheated steam has been studied in our laboratory at both bench and pilot scale. In order to understand the thermal degradation behavior of the CFRP materials, the thermal analyses along with the physicochemical characterizations of various carbon fibers, polymer resins (epoxy or polyphenylene sulfide) as well as the corresponding composites have been carried out. A kinetic study has also been conducted. The experimental design performed in a sophisticated pilot reactor helps to determine the optimal experimental conditions of the process in a semi-industrial scale. Reclaimed carbon fibers from optimized steam-thermolysis appear resin free and exhibit over 90% of their original tensile strength. The gas and liquid phases emitted from the process have also been analyzed quantitatively. The flow modeling of the reactor and the simulation of the polymer thermal degradation are in close agreement with the experimental observations. The life cycle assessment shows that the CFRP recycling can be environmentally beneficial compared to the disposal scenario.

Key words : composite waste, polymer matrix, carbon fibre, recycling, steam-thermolysis, experimental design

Sheng Yin YE

Courriel : shengyin.ye@mines-albi.fr

Établissement : Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse)

Laboratoire : Centre de Recherche d'Albi en génie des Procédés des Solides Divisés, de l'Énergie et de l'Environnement (RAPSODEE)

École Doctorale : Mécanique, Énergétique, Génie civil et Procédés (MEGeP)