



HAL
open science

Décomposition thermique de particules de combustibles forestiers méditerranéens

R. Grossiord, C. Moro

► **To cite this version:**

R. Grossiord, C. Moro. Décomposition thermique de particules de combustibles forestiers méditerranéens. 30 p., 1998. hal-02834338

HAL Id: hal-02834338

<https://hal.inrae.fr/hal-02834338>

Submitted on 7 Jun 2020

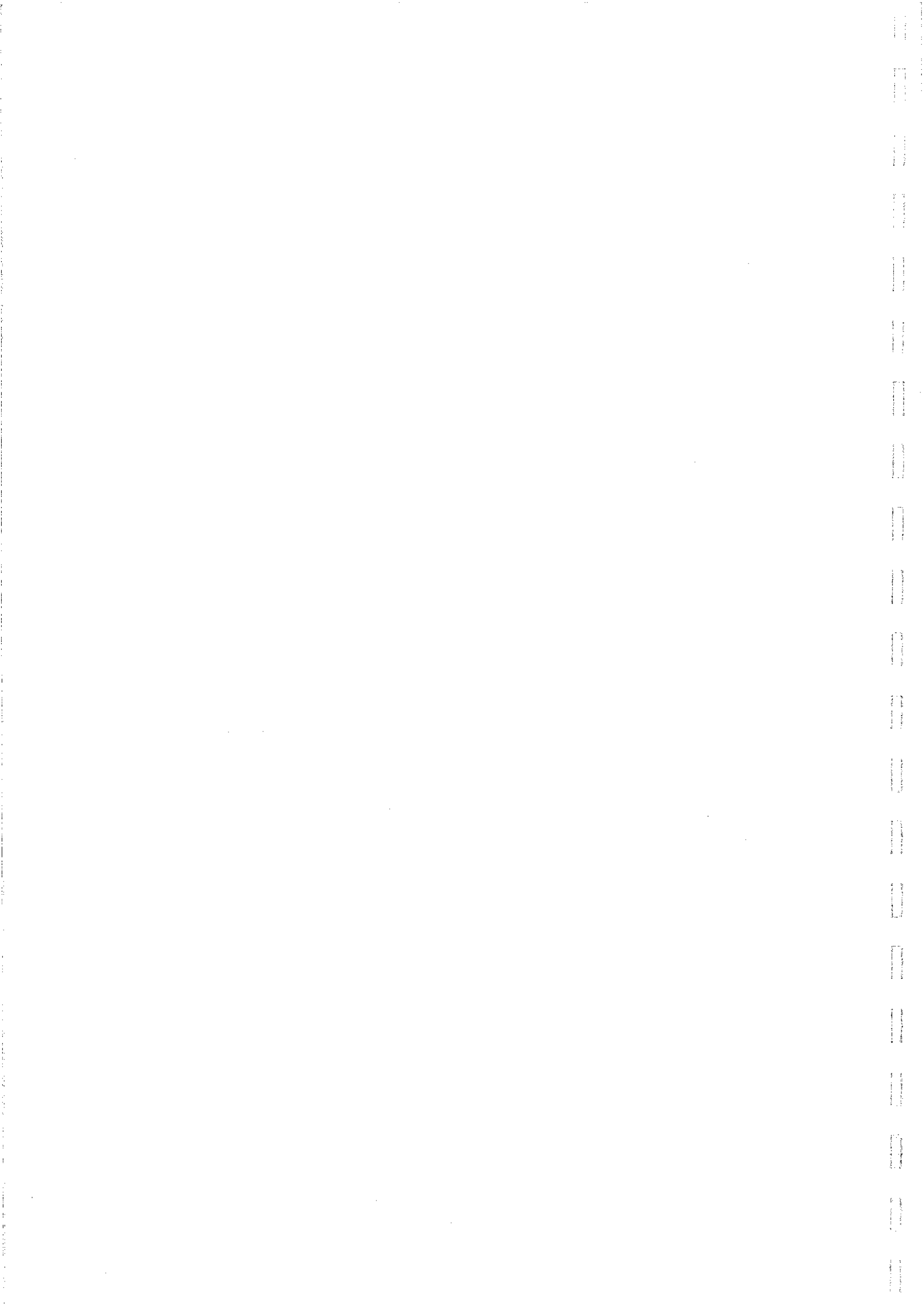
HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**Décomposition thermique
de particules
de combustibles méditerranéens**

Raphaël GROSSIORD, Claude MORO

Document PIF9803



Institut National de la Recherche Agronomique
Département Forêt et Milieux Naturels
Unité de Recherches Forestières Méditerranéennes
Equipe de Prévention des Incendies de Forêt
Document PIF9803

**DECOMPOSITION THERMIQUE DE PARTICULES
DE COMBUSTIBLES FORESTIERS MEDITERRANEENS**

Raphaël GROSSIORD, Claude MORO

Unité Expérimentale du Ruscas
Equipe de Prévention des Incendies de Forêt
4935 route du Dom
83230 BORMES LES MIMOSAS CEDEX
Téléphone : +33 (0)4 94 71 55 77 ou +33 (0)4 94 05 32 10
Fac-similé : +33 (0)4 94 05 32 11
messagerie électronique : moro@avignon.inra.fr

SOMMAIRE

REMARQUE :

La première partie regroupe les travaux de Claude MORO effectués de fin 1996 à avril 1997. Cette étude, qui constitue un premier jet sur un éventail d'espèces méditerranéennes, a été suivie de celle menée par Raphaël GROSSIORD (seconde partie) en 1998.

Le four a été étalonné en 1998 ; toutes les températures indiquées dans ce document prennent en compte les résultats de cet étalonnage.

Première partie	
Décomposition thermique de particules de différents combustibles forestiers méditerranéens	
1. But de l'étude	1
2. Matériel	1
3. Méthode	1
4. Analyse des résultats	2
Pin d'Alep	4
Pin noir Laricio de Corse	6
Pin maritime	8
Pin pignon	10
Chêne pubescent	12
Chêne liège	14
5. Perte de masse en fonction de la température	15
6. Etudes ultérieures envisageables	19
Seconde partie	
Décomposition thermique d'aiguilles mortes de Pin maritime selon deux régimes de montée en température	
1. Introduction	20
2. Matériel et méthode	20
3. Première vitesse de montée en température	20
4. Seconde vitesse de montée en température	24
5. Conclusions	27

DECOMPOSITION THERMIQUE DE PARTICULES

DE DIFFERENTS COMBUSTIBLES FORESTIERS MEDITERRANEENS

1. BUT DE L'ETUDE

Dans le cadre de la modélisation des incendies de forêt, apprécier les températures auxquelles les végétaux se décomposent et étudier les variations interspécifiques.

2. MATERIEL

2.1. Matériel de laboratoire

Nous avons utilisé pour cette étude un four à moufle Nabertherm N5 équipé d'un contrôleur programmable C19. Il peut atteindre 1100°C. Sa vitesse maximum de montée en température est d'environ 17°C min⁻¹.

Les échantillons sont placés dans des béciers inox d'une contenance de 150 ml environ (diamètre 55 mm sous collerette, hauteur 60 mm). Le four a une capacité de dix béciers.

2.2. Matériel végétal

Dans un premier temps, les échantillons étudiés sont des combustibles morts c'est-à-dire des aiguilles et des feuilles sèches à l'air (nous ne nous sommes donc pas affranchis de la teneur en eau ici).

3. METHODE

Avant le début de l'expérience, la tare de chaque bécier est déterminée au mg près. La masse initiale de chaque échantillon est également déterminée au mg (masse initiale de cinq grammes environ).

L'ensemble des échantillons est ensuite mis au four dont la température est programmée pour s'élever au rythme de 1.5°C min⁻¹.

Lorsque la température affichée au programmeur C19 est égale à la température désirée, un des échantillons est sorti rapidement du four. Il est placé immédiatement dans une chambre hermétique sous vide d'air (20 cm de mercure) où il se refroidit sans s'hydrater jusqu'à ce qu'il soit suffisamment froid pour que sa masse et celle du bécier puissent être déterminées.

3.1. Evolutions du protocole

Nous avons dans un premier temps cherché à couvrir la plage 100 à 700°C par intervalles successifs de 50°C.

L'ouverture fréquente du four (tous les 25°C environ) entraînant un apport d'oxygène et une modification du cycle de chauffe programmé, nous avons décidé de n'extraire les échantillons que tous les 50°C environ.

Le protocole (pour le Pin noir laricio de Corse, le Chêne pubescent et le Chêne liège) a donc été modifié ainsi : 43, 90, 137, 184, 232, 279, 326, 373, 420, 467°C puis 208, 255, 302, 349, 397, 467, 514, 562, 609, 656°C.

Systématiquement, pour ces trois dernières espèces, les échantillons de la première série sont plus dégradés que ceux de la deuxième. En effet, des échantillons retirés à des températures voisines n'ont pas connu des conditions similaires (nombres d'ouvertures de porte différents donc quantités d'oxygène disponible et cycles de montée en température différents). L'échantillon retiré à 232°C l'est à la cinquième ouverture de porte alors que celui retiré à 208°C l'est à la première.

3.2. Détermination des températures étudiées

Elles ont été déterminées sur la base du matériel disponible et en fonction des problèmes rencontrés.

Il convient donc pour comparer efficacement deux séries (qui n'ont pas la même amplitude d'étude) de ne pas les relier par une "température intermédiaire" comme l'on a fait pour ces réajustements, mais de faire varier les séries dans une amplitude de même ordre.

Il est impératif de définir alors les températures "importantes". Au vu des graphiques (toutes espèces confondues), il apparaît (sachant que l'on ne peut compter à chaque série que sur dix points) que :

- La température 43°C ne semble pas indispensable pour la modélisation; il en est de même pour les températures supérieures à 514°C.

- Le panel le plus adéquat se situerait donc entre 67°C et 514°C.

En conservant un pas de 50°C environ les séries suivantes ont été retenues :

43, 114, 161, 208, 255, 302, 349, 397, 491°C.

90, 137, 184, 232, 279, 326, 373, 420, 467, 514°C.

3.3. Réajustement des premiers essais

Les points litigieux cités précédemment pour le Pin noir laricio de Corse, le Chêne pubescent et le Chêne liège ont été vérifiés (points 184, 232, 279 et 467°C).

Notons, pour le Pin noir laricio de Corse, qu'un problème matériel nous a bloqué à 323°C lors de l'essai N° 5. Un essai N° 5 bis a été nécessaire.

3.4. Teneurs en eau

Pour avoir la teneur en eau (indice de siccité) de la masse végétale étudiée, trois échantillons sont prélevés et mis à l'étuve simultanément avec l'introduction des échantillons dans le four.

4. ANALYSES DES RESULTATS

La perte de masse en fonction de la température est représentée avec :

- en abscisse : la température (en K) du four lors de la sortie de chaque échantillon.
- en ordonnée : la masse relative (en %), c'est-à-dire le rapport entre la masse de l'échantillon (notée M) à la sortie du four (en fait après refroidissement dans la chambre à dessiccation) et sa masse initiale (notée M_i).

Les données ainsi que les graphiques sont présentés de la page 3 à la page 14.

Commentaires

Sur la méthodologie

Les échantillons ont séjourné une demi-heure dans la chambre hermétique avant les pesées (sauf bien entendu lorsque l'intervalle de sortie était de 25°C).

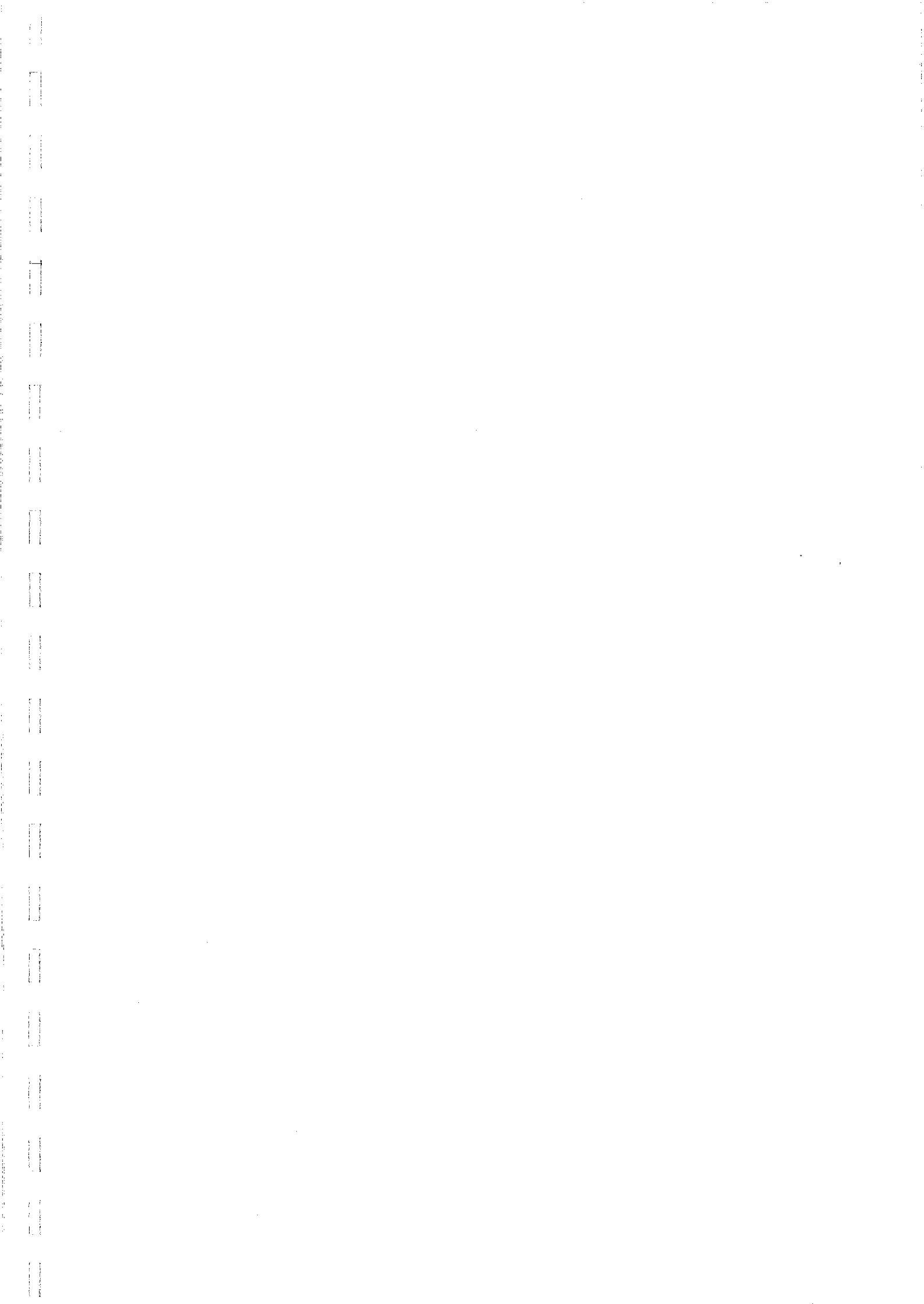
Les températures de "sortie" des échantillons (T° désirées) correspondent aux températures lues sur l'écran du programmeur C19. L'on ne peut préjuger combien de temps l'échantillon est resté à cette température (par exemple si pour passer de 200 à 201 degrés il faut deux minutes, l'on ne peut pas dire si l'échantillon a été prélevé au tout début du passage à 200 degrés ou juste avant que la température ne passe à 201 degrés). Les températures ont été corrigées à la suite de l'étalonnage du four.

Sur le matériel végétal

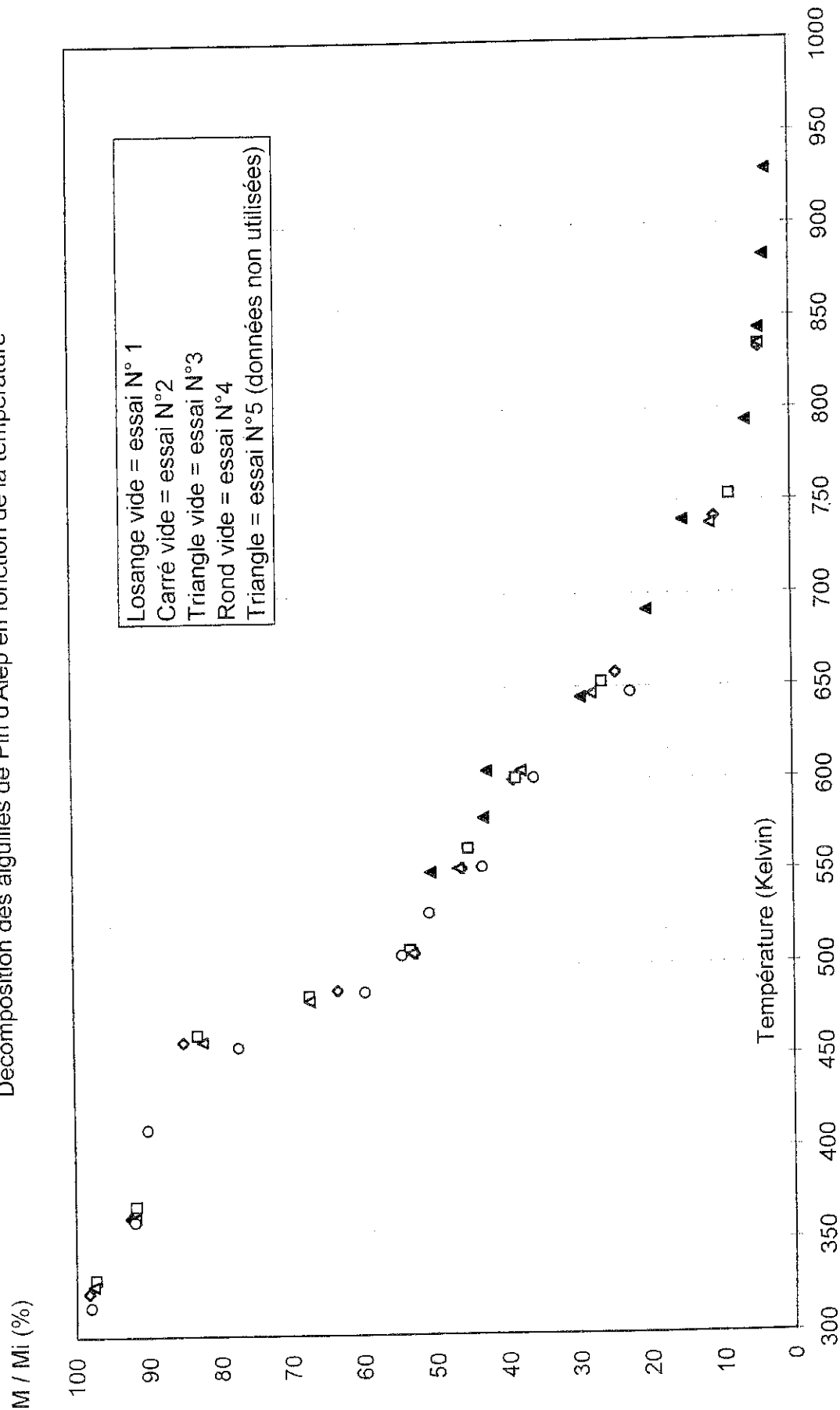
Ces essais ont été réalisés avec de la litière "sèche à l'air" d'une teneur en eau moyenne rapportée au poids frais de 8% pour le Pin maritime, entre 7 et 9% pour le Pin pignon, 6 à 7% pour le Pin d'Alep, 8 à 9% pour le Pin noir laricio de Corse, 9 à 10% pour le Chêne pubescent et aux environs de 6% pour le Chêne liège.

En ce qui concerne cette dernière espèce, l'échantillonnage réalisé ici l'a été avec du matériel "artificiel" (feuilles "vertes" séchées vingt quatre heures à l'étuve et stockées quelques jours à température ambiante du laboratoire avant les tests).

Notons que, quelle que soit l'espèce testée, le matériel végétal a toujours été stocké un certain temps en laboratoire de manière à ce que celui-ci se stabilise.



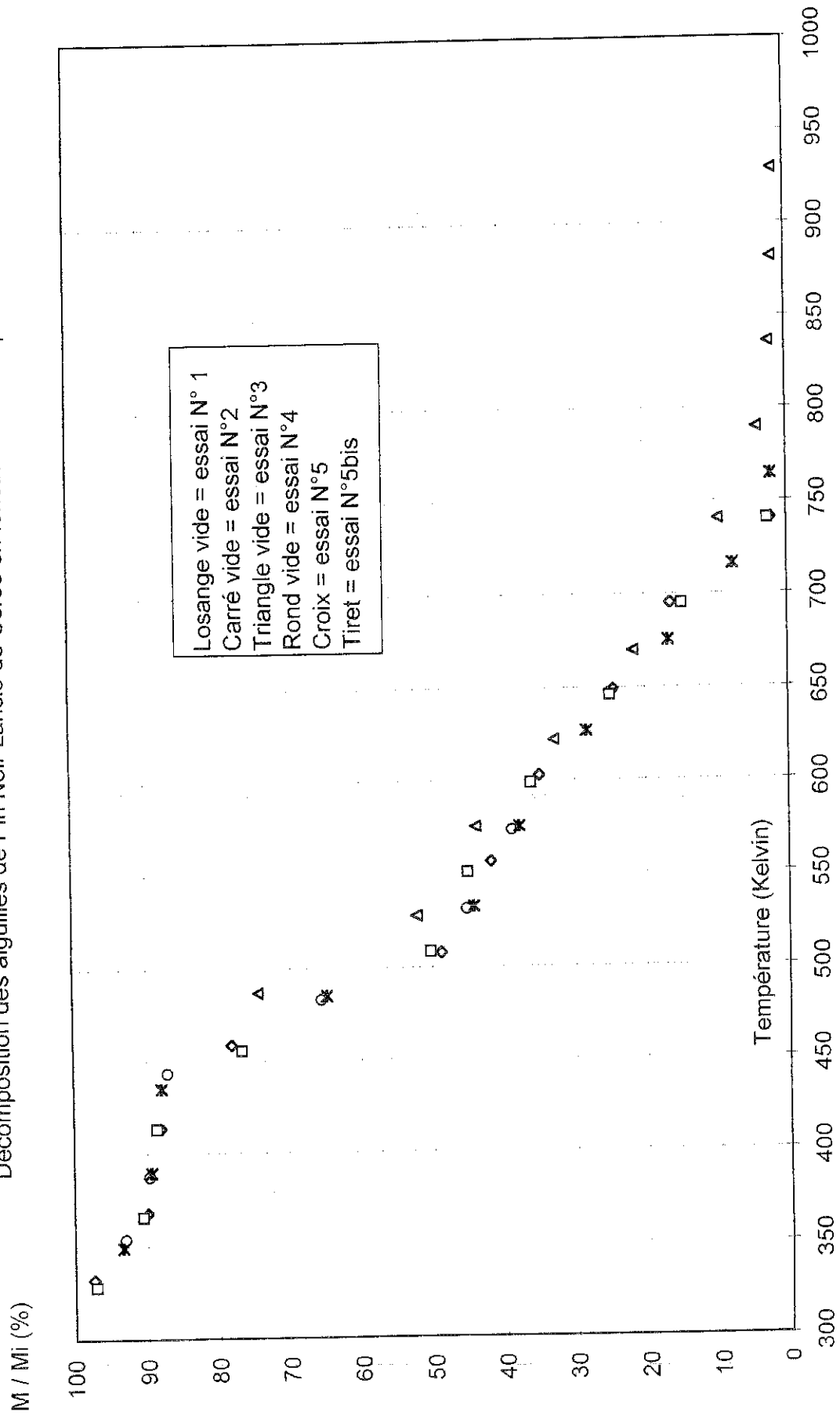
Décomposition des aiguilles de Pin d'Alep en fonction de la température



PIN D'ALEP

N° essai	T°C	Kelvin	Masse Initiale(g)	Masse à la T°(g)	M/Mi	IS début
1	51	324	5.351	5.257	0.98	
1	91	364	5.058	4.675	0.92	
1	186	459	5.289	4.502	0.85	0.877
1	214	487	5.585	3.545	0.63	
1	233	507	5.388	2.849	0.53	
1	279	552	5.227	2.422	0.46	0.879
1	327	600	5.213	2.032	0.39	
1	384	657	5.110	1.255	0.25	
1	468	741	5.439	0.584	0.11	0.882
1	560	833	5.892	0.263	0.04	
2	58	331	5.342	5.197	0.97	
2	98	371	5.362	4.918	0.92	
2	190	463	5.504	4.575	0.83	0.863
2	211	484	5.444	3.668	0.67	
2	235	508	5.317	2.840	0.53	
2	290	563	5.528	2.507	0.45	0.875
2	328	601	6.034	2.332	0.39	
2	380	653	5.565	1.473	0.26	
2	481	754	5.257	0.453	0.09	0.873
2	562	835	5.633	0.249	0.04	
3	54	327	4.939	4.819	0.98	
3	91	364	5.535	5.085	0.92	
3	186	459	5.013	4.129	0.82	0.863
3	208	481	5.381	3.625	0.67	
3	233	507	5.854	3.115	0.53	
3	279	552	5.146	2.403	0.47	0.863
3	332	605	5.534	2.099	0.38	
3	373	646	5.549	1.553	0.28	
3	464	738	5.378	0.608	0.11	0.862
3	562	835	5.546	0.247	0.04	
4	43	316	5.248	5.141	0.98	
4	89	362	5.154	4.740	0.92	
4	139	412	5.132	4.623	0.90	0.865
4	183	457	5.067	3.921	0.77	
4	213	486	5.023	3.001	0.60	
4	233	506	4.930	2.688	0.55	0.864
4	255	528	5.200	2.641	0.51	
4	280	553	5.492	2.388	0.43	
4	328	601	5.526	1.996	0.36	0.860
4	374	647	5.265	1.185	0.23	
5	277	550	5.505	2.782	0.51	
5	306	579	5.032	2.176	0.43	
5	332	605	5.038	2.154	0.43	0.864
5	371	644	6.050	1.782	0.29	
5	418	691	5.506	1.109	0.20	
5	466	740	6.168	0.930	0.15	0.862
5	520	793	5.076	0.324	0.06	
5	570	843	4.846	0.218	0.04	
5	610	883	5.361	0.204	0.04	0.868
5	656	929	4.897	0.171	0.03	

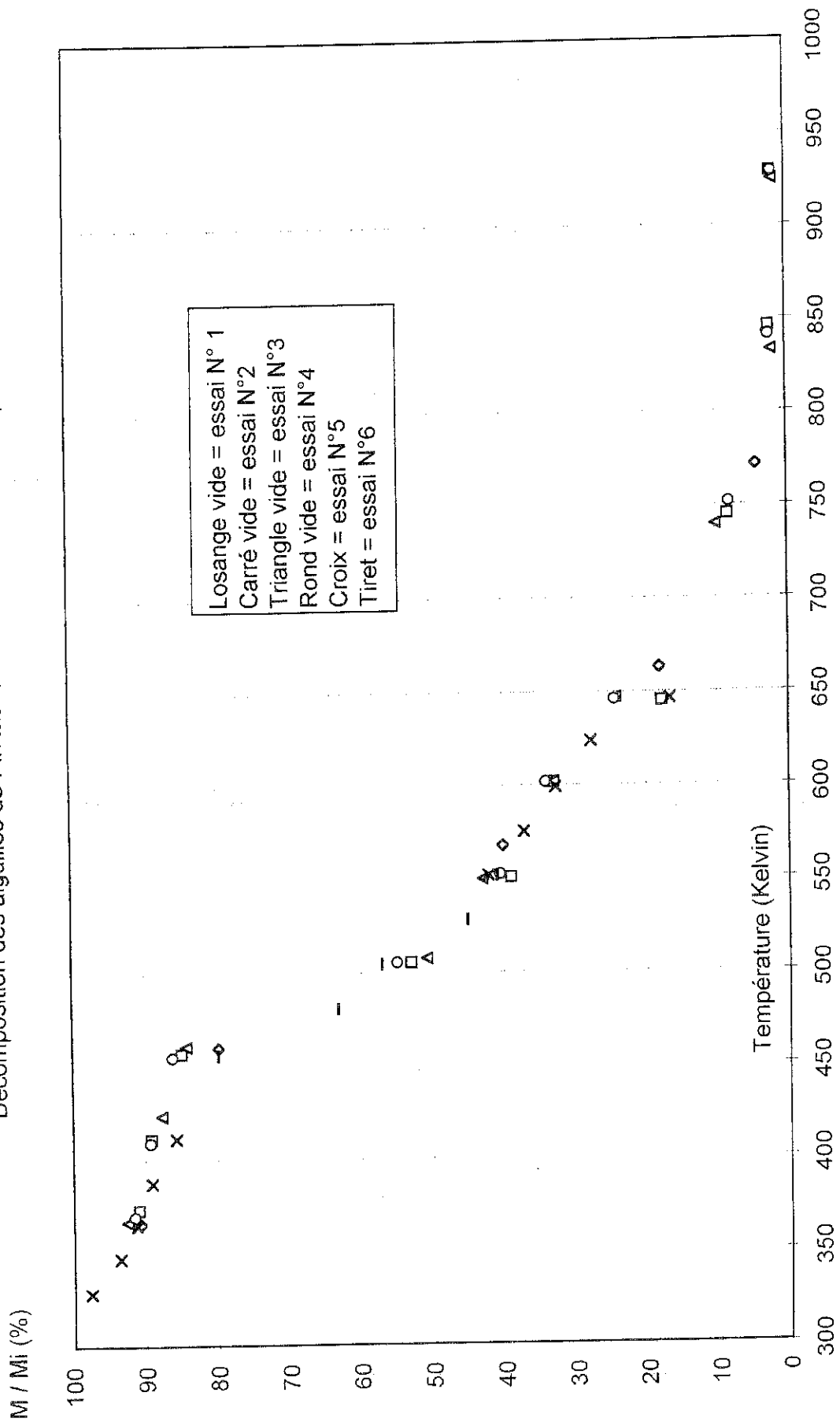
Décomposition des aiguilles de Pin Noir Laricio de Corse en fonction de la température



PIN NOIR LARICIO DE CORSE

N° essai	T°C	Kelvin	Masse Initiale(g)	Masse à la T° (g)	M/Mi	IS (début)
1	59	332	5.364	5.226	0.97	
1	95	368	5.600	5.041	0.90	
1	140	413	4.825	4.251	0.88	0.809
1	185	459	5.899	4.609	0.78	
1	234	508	4.943	2.416	0.49	
1	283	557	5.739	2.399	0.42	0.818
1	330	603	5.166	1.803	0.35	
1	376	649	5.228	1.280	0.24	
1	422	695	5.487	0.901	0.16	0.815
1	467	740	5.028	0.116	0.02	
2	55	328	5.934	5.760	0.97	
2	93	366	5.618	5.093	0.91	
2	140	413	5.167	4.582	0.89	0.830
2	183	456	5.451	4.178	0.77	
2	235	508	5.113	2.572	0.50	
2	278	551	5.340	2.407	0.45	0.824
2	326	599	5.333	1.923	0.36	
2	373	646	5.545	1.384	0.25	
2	422	695	4.782	0.709	0.15	0.837
2	467	740	5.159	0.142	0.03	
3	214	487	5.478	4.074	0.74	
3	254	527	5.569	2.907	0.52	
3	302	575	5.038	2.213	0.44	0.825
3	348	622	5.722	1.876	0.33	
3	397	670	4.916	1.065	0.22	
3	467	740	4.981	0.482	0.10	0.830
3	516	790	4.872	0.204	0.04	
3	563	836	5.120	0.123	0.02	
3	609	882	5.545	0.106	0.02	0.819
3	656	929	5.371	0.097	0.02	
4	211	484	5.678	4.297	0.76	
4	257	530	5.433	2.708	0.50	
4	302	575	5.577	2.446	0.44	0.827
4	349	623	5.402	1.654	0.31	
4	398	671	5.219	1.083	0.21	
4	465	739	5.293	0.597	0.11	0.833
4	516	790	5.414	0.260	0.05	
4	567	840	5.334	0.131	0.02	
4	610	883	5.954	0.114	0.02	0.821
4	656	929	4.966	0.086	0.02	
5	81	354	5.443	5.065	0.93	
5	115	388	5.141	4.613	0.90	0.839
5	170	443	5.155	4.494	0.87	
5	210	483	5.206	3.413	0.66	0.844
5	258	531	5.189	2.349	0.45	
5	300	574	5.197	2.016	0.39	0.841
5bis	76	349	5.427	5.068	0.93	
5bis	117	390	5.158	4.615	0.89	
5bis	162	435	5.745	5.054	0.88	0.827
5bis	212	485	5.010	3.244	0.65	
5bis	259	532	5.381	2.381	0.44	
5bis	302	575	5.850	2.209	0.38	0.831
5bis	353	626	5.908	1.671	0.28	
5bis	402	675	5.231	0.878	0.17	
5bis	443	716	5.131	0.395	0.08	0.831
5bis	491	764	5.022	0.112	0.02	

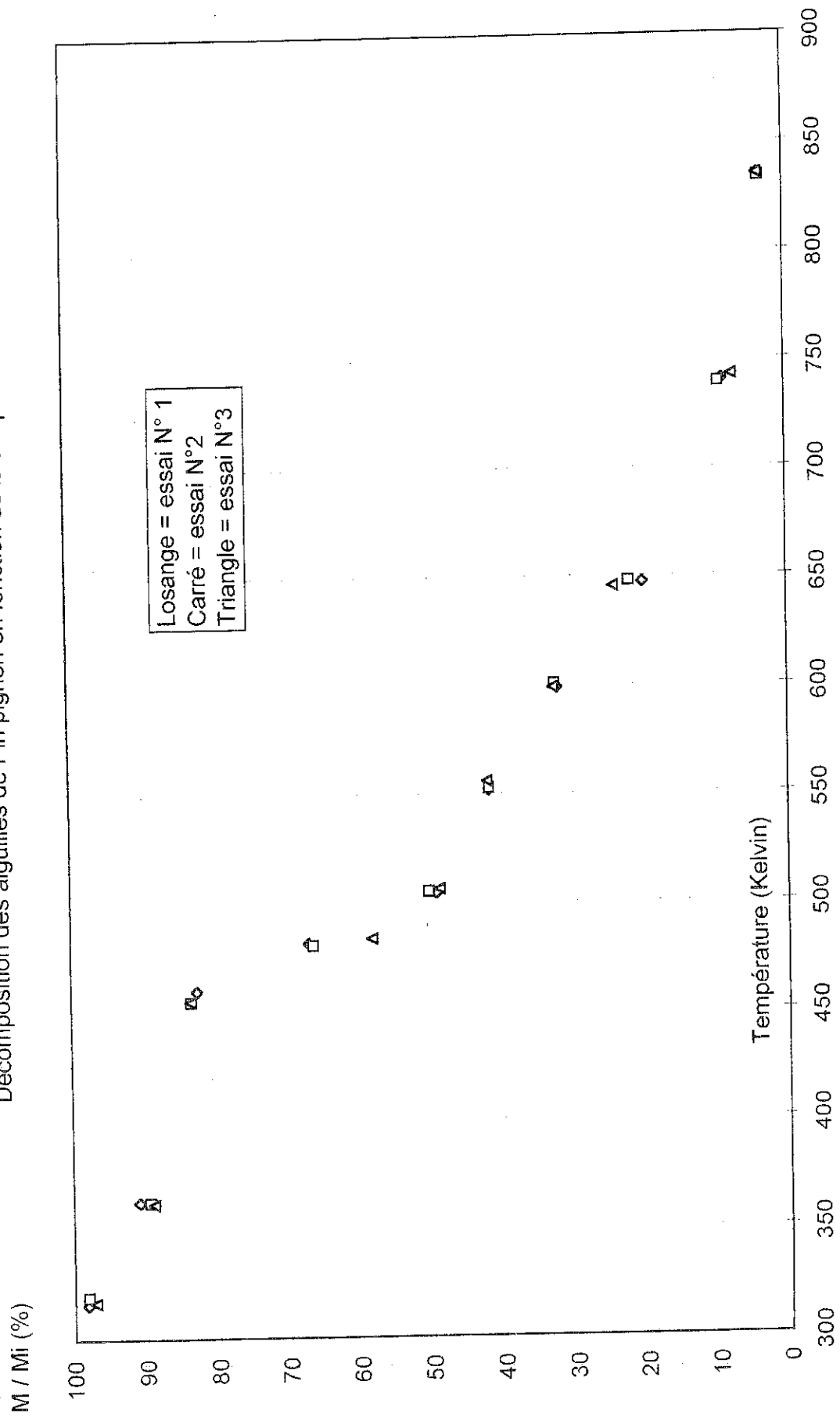
Décomposition des aiguilles de Pin Maritime en fonction de la température



PIN MARITIME

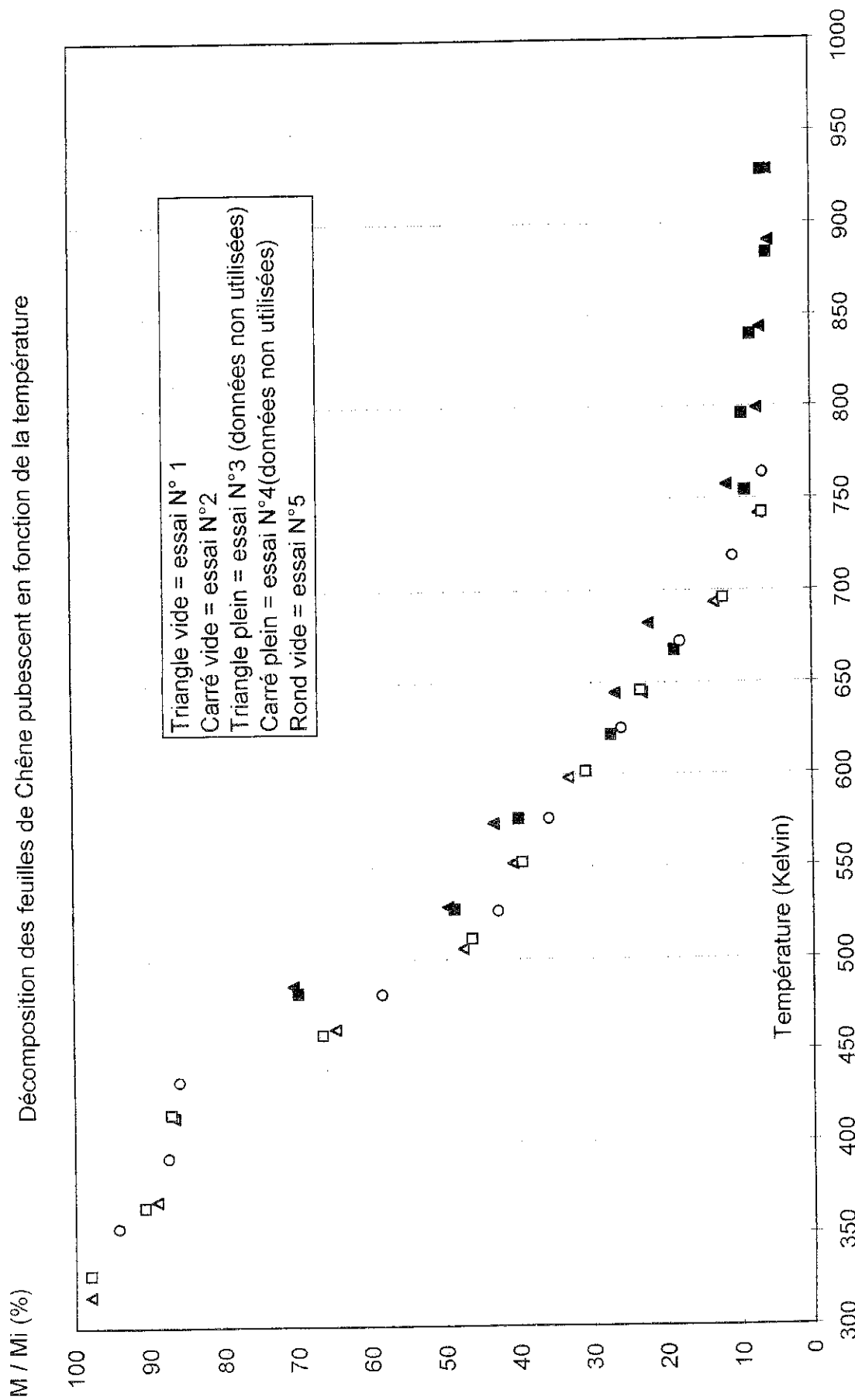
N° essai	T°C	Kelvin	Masse Initiale(g)	Masse à la T°(g)	M/Mi	IS début
1	93	366	5.804	5.265	0.91	
1	187	460	6.719	5.363	0.80	
1	295	568	5.415	2.172	0.40	pas d'étuve
1	390	653	6.255	1.130	0.18	
1	498	772	5.635	0.246	0.04	
1	569	842	5.929	0.151	0.03	
2	100	374	5.967	5.426	0.91	
2	138	411	5.571	4.966	0.89	
2	184	458	6.258	5.316	0.85	0.840
2	233	506	5.912	3.127	0.53	
2	278	551	4.784	1.862	0.39	
2	329	602	5.558	1.832	0.33	0.840
2	372	645	5.545	0.982	0.18	
2	472	745	5.835	0.484	0.08	
2	573	846	5.710	0.136	0.02	0.840
2	656	929	5.275	0.111	0.02	
3	94	367	5.572	5.158	0.93	
3	150	424	5.341	4.685	0.88	
3	188	461	5.328	4.493	0.84	0.856
3	234	508	5.104	2.589	0.51	
3	277	550	5.340	2.293	0.43	
3	329	602	5.471	1.801	0.33	0.849
3	374	647	5.071	1.220	0.24	
3	466	740	5.268	0.525	0.10	
3	560	833	4.944	0.102	0.02	0.853
3	651	924	5.282	0.097	0.02	
4	97	370	5.532	5.066	0.92	
4	136	409	5.897	5.266	0.89	
4	183	456	5.213	4.496	0.86	0.840
4	233	506	5.198	2.850	0.55	
4	280	553	5.220	2.110	0.40	
4	329	602	5.213	1.773	0.34	0.842
4	373	646	5.052	1.230	0.24	
4	479	752	5.154	0.418	0.08	
4	568	841	5.077	0.123	0.02	0.838
4	656	929	5.083	0.099	0.02	
5	55	328	5.317	5.191	0.98	
5	74	347	5.526	5.171	0.94	
5	92	365	5.052	4.611	0.91	0.840
5	115	388	5.324	4.743	0.89	
5	138	411	5.365	4.603	0.86	
5	279	552	5.257	2.213	0.42	0.838
5	302	575	5.111	1.897	0.37	
5	326	599	5.149	1.679	0.33	
5	350	624	5.721	1.582	0.28	0.840
5	373	646	5.309	0.881	0.17	
6	183	457	5.358	4.277	0.80	
6	208	481	5.242	3.306	0.63	0.839
6	232	505	5.063	2.883	0.57	0.838
6	255	528	5.365	2.415	0.45	0.839
6	279	552	5.667	2.315	0.41	

Décomposition des aiguilles de Pin pignon en fonction de la température



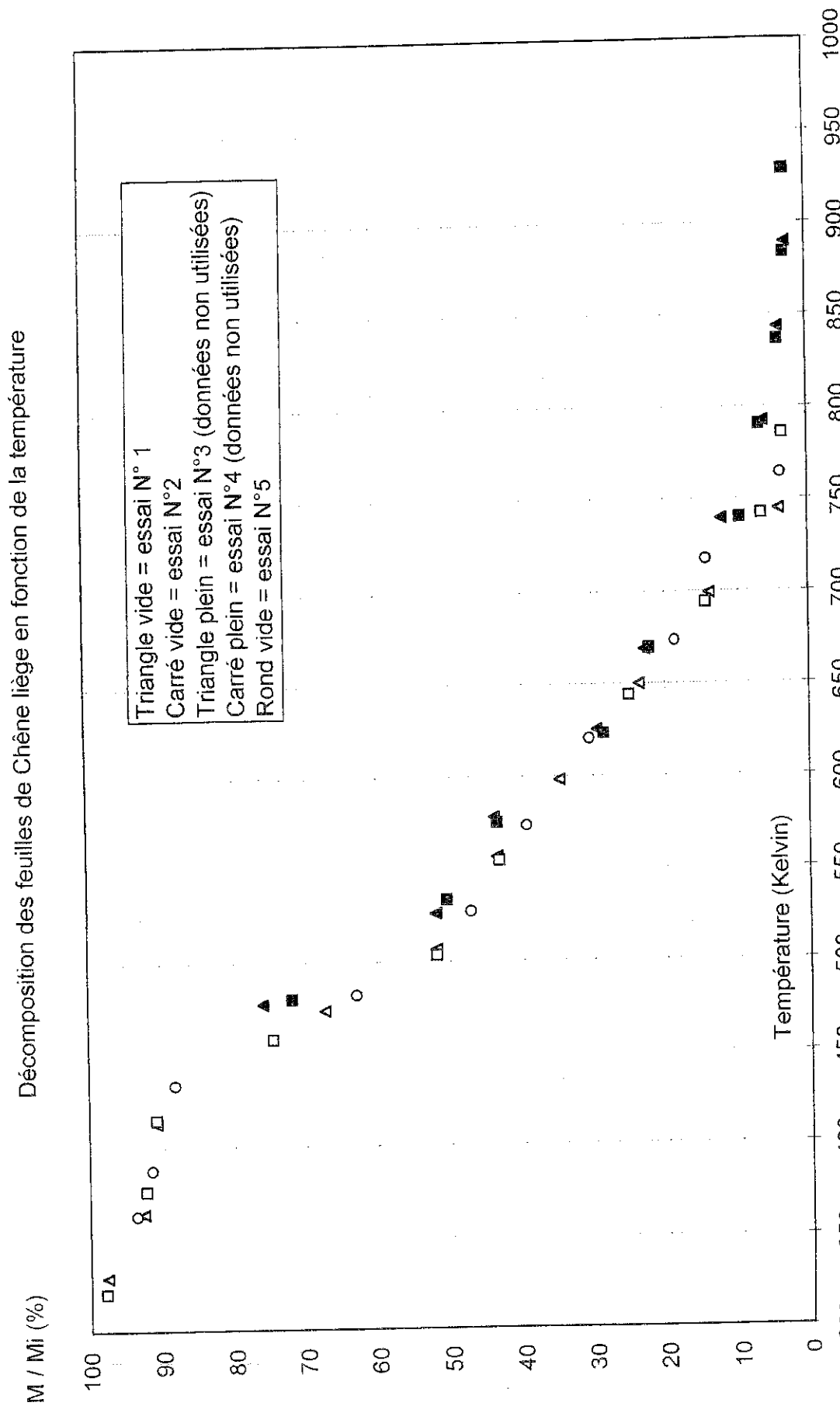
PIN PIGNON

N° essai	T°C	Kelvin	Masse Initiale(g)	Masse à la T°(g)	M/Mi	IS début
1	43	316	5.253	5.158	0.98	
1	90	363	5.190	4.721	0.91	
1	187	460	5.234	4.332	0.83	0.861
1	209	482	5.176	3.472	0.67	
1	232	505	5.262	2.589	0.49	
1	279	552	5.158	2.156	0.42	0.856
1	326	599	5.236	1.683	0.32	
1	374	647	5.039	1.011	0.20	
1	467	740	5.235	0.457	0.09	0.845
1	562	835	5.164	0.182	0.04	
2	47	320	5.511	5.407	0.98	
2	90	363	5.124	4.583	0.89	
2	183	456	5.471	4.570	0.84	0.813
2	208	481	5.313	3.526	0.66	
2	233	506	5.141	2.582	0.50	
2	280	553	5.365	2.239	0.42	0.816
2	328	601	5.480	1.782	0.33	
2	375	648	5.350	1.177	0.22	
2	466	740	5.251	0.484	0.09	0.815
2	561	834	5.136	0.175	0.03	
3	44	317	5.348	5.196	0.97	
3	89	362	5.053	4.495	0.89	
3	183	456	5.637	4.714	0.84	0.813
3	211	484	5.461	3.175	0.58	
3	233	507	5.516	2.691	0.49	
3	282	556	5.631	2.365	0.42	0.818
3	326	599	5.242	1.715	0.33	
3	372	645	5.855	1.418	0.24	
3	469	742	5.137	0.379	0.07	0.814
3	562	835	5.026	0.183	0.04	



CHENE PUBESCENT

N° essai	T°C	Kelvin	Masse Initiale(g)	Masse à la T°(g)	M/Mi	IS début
1	44	317	5.078	4.978	0.98	
1	96	369	5.273	4.699	0.89	
1	141	414	5.029	4.362	0.87	0.803
1	189	462	5.708	3.700	0.65	
1	233	506	5.793	2.757	0.48	
1	279	552	5.810	2.368	0.41	0.805
1	325	598	5.169	1.718	0.33	
1	371	644	5.614	1.295	0.23	
1	420	693	5.178	0.693	0.13	0.806
1	468	741	5.815	0.422	0.07	
2	56	329	5.465	5.356	0.98	
2	93	366	5.414	4.910	0.91	
2	143	416	5.091	4.436	0.87	0.811
2	186	459	5.422	3.608	0.67	
2	238	511	5.381	2.495	0.46	
2	280	553	5.540	2.190	0.40	0.815
2	329	602	5.232	1.613	0.31	
2	373	646	5.920	1.380	0.23	
2	423	396	5.062	0.615	0.12	0.820
2	469	742	5.317	0.361	0.07	
3	213	486	5.737	4.049	0.71	
3	255	528	5.327	2.642	0.50	
3	300	574	5.236	2.273	0.43	0.818
3	371	644	5.867	1.574	0.27	
3	409	682	5.752	1.278	0.22	
3	484	757	5.654	0.657	0.12	0.820
3	526	799	5.522	0.410	0.07	
3	570	843	5.448	0.379	0.07	
3	617	890	5.354	0.310	0.06	0.818
3	656	929	5.543	0.331	0.06	
4	209	482	5.527	3.863	0.70	
4	254	527	5.418	2.641	0.49	
4	303	576	5.398	2.161	0.40	0.807
4	348	622	5.502	1.506	0.27	
4	395	668	5.635	1.057	0.19	
4	481	755	5.778	0.525	0.09	0.807
4	523	796	5.853	0.552	0.09	
4	566	839	5.613	0.462	0.08	
4	611	884	5.105	0.309	0.06	0.808
4	656	929	5.149	0.346	0.07	
5	82	355	5.135	4.840	0.94	
5	119	392	5.224	4.574	0.88	
5	161	434	5.014	4.314	0.86	0.820
5	208	481	5.512	3.225	0.59	
5	253	526	5.442	2.334	0.43	
5	303	576	5.184	1.862	0.36	0.820
5	352	625	5.227	1.356	0.26	
5	399	673	5.258	0.943	0.18	
5	446	719	5.151	0.556	0.11	0.822
5	491	764	5.547	0.370	0.07	



CHENE LIEGE

N° essai	T°C	Kelvin	Masse Initiale(g)	Masse à la T°(g)	M/Mi	IS début
1	56	329	5.621	5.492	0.98	
1	91	364	4.933	4.569	0.93	
1	140	413	5.528	5.017	0.91	0.882
1	200	474	4.990	3.362	0.67	
1	233	507	5.033	2.611	0.52	
1	283	557	5.432	2.363	0.44	0.880
1	325	596	5.088	1.766	0.35	
1	377	650	5.144	1.209	0.24	
1	426	699	4.864	0.666	0.14	0.882
1	471	744	5.740	0.232	0.04	
2	48	321	5.696	5.574	0.98	
2	103	376	5.385	4.967	0.92	
2	142	415	5.732	5.202	0.91	0.883
2	185	459	4.756	3.548	0.75	
2	231	504	5.619	2.912	0.52	
2	282	555	5.046	2.179	0.43	0.887
2	371	644	5.094	1.270	0.25	
2	421	694	5.270	0.751	0.14	
2	469	742	4.869	0.314	0.06	0.884
2	513	786	5.296	0.186	0.04	
3	204	477	5.523	4.195	0.76	
3	253	526	5.788	3.007	0.52	
3	305	578	5.763	2.530	0.44	0.881
3	352	625	5.340	1.575	0.29	
3	396	669	5.593	1.272	0.23	
3	466	740	5.119	0.612	0.12	0.881
3	519	792	5.496	0.336	0.06	
3	570	843	5.753	0.228	0.04	
3	616	889	5.177	0.150	0.03	0.881
3	656	929	5.483	0.162	0.03	
4	207	480	5.124	3.683	0.72	
4	261	534	5.684	2.868	0.50	
4	302	575	5.092	2.216	0.44	0.889
4	350	624	5.197	1.484	0.29	
4	397	670	5.583	1.237	0.22	
4	467	740	5.048	0.477	0.09	0.889
4	517	790	5.704	0.381	0.07	
4	564	837	5.260	0.209	0.04	
4	611	884	4.972	0.152	0.03	0.886
4	656	929	5.343	0.164	0.03	
5	90	363	5.223	4.888	0.94	
5	115	388	5.217	4.770	0.91	
5	161	434	5.259	4.640	0.88	0.879
5	209	482	5.060	3.184	0.63	
5	254	527	5.236	2.472	0.47	
5	300	574	5.076	1.998	0.39	0.880
5	348	621	5.481	1.678	0.31	
5	400	674	5.171	0.958	0.19	
5	445	718	5.475	0.773	0.14	0.884
5	491	764	5.682	0.215	0.04	

5. PERTE DE MASSE EN FONCTION DE LA TEMPERATURE

Trois phénomènes distincts sont apparus lors de la réalisation des courbes d'évolution de la perte de masse des échantillons :

- une légère perte (les pertes ne sont pas qualifiées ici) entre 43°C et 161°C ou 184°C en fonction des espèces,
- une chute brutale entre 184 et 232°C,
- une perte régulière entre 232 et 514°C (légèrement plus prononcée qu'entre 43 et 161-184°C).

La forme des courbes nous a amené à considérer une régression linéaire pour chaque plage de température (voir graphiques).

Le tableau ci-après nous indique pour chaque espèce (ainsi que toutes espèces confondues) les coefficients des modèles de la forme :

$$M / M_i = A.T + B \quad M / M_i \text{ étant exprimé en } \%, \text{ les températures en Kelvin.}$$

	Toutes espèces	Pin d'Alep	Pin noir laricio de Corse	Pin maritime	Pin pignon	Chêne pubescent	Chêne liège
Plage (K)	316 - 434	316 - 458	316 - 434	316 - 458	316 - 458	316 - 434	316 - 434
A	- 0,095	- 0,1121	- 0,0822	- 0,098	- 0,0986	- 0,1124	- 0,0801
B	127,31	133,77	122,43	128	127,7	133,22	123,11
r ²	0,82	0,91	0,84	0,85	0,92	0,90	0,93
Plage (K)	434 - 505	458 - 505	434 - 505	458 - 528	458 - 505	434 - 505	434 - 505
A	- 0,557	- 0,6009	- 0,5363	- 0,5808	- 0,7018	- 0,4845	- 0,5059
B	333,59	357,27	323,09	348,29	403,64	292,1	307,15
r ²	0,90	0,94	0,99	0,96	0,97	0,96	1
Plage (K)	505 - 788	505 - 740	505 - 764	528 - 764	505 - 740	505 - 764	505 - 788
A	- 0,1868	- 0,187	- 0,1982	- 0,1729	- 0,1785	- 0,171	- 0,1875
B	145,59	148,88	151,91	135,9	139,61	133,81	146,45
r ²	0,97	0,99	0,99	0,96	0,99	0,99	0,99

Pour le Pin noir laricio de Corse et les deux chênes, la première phase se manifeste jusqu'à 434 K. En revanche, pour les trois autres pins, elle se manifeste jusqu'à 458 K. Cette perte semble être analogue si l'on se réfère aux coefficients directeurs.

La deuxième phase est la plus prononcée pour le Pin pignon (et chez les autres pins en général), dans une moindre mesure pour les feuillus.

Quant à la troisième phase, elle serait sensiblement la même pour toutes les espèces.

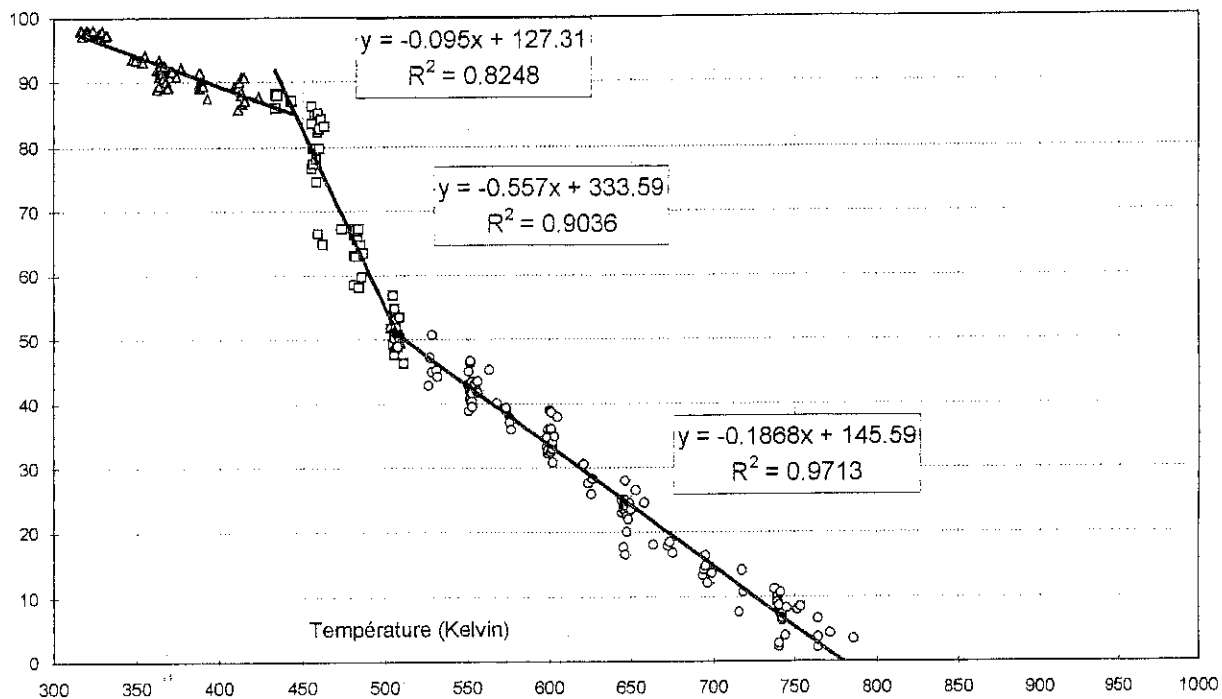
Représentations graphiques

Le symbole de la première phase est un triangle vide, celui de la deuxième est un carré vide et pour la troisième un rond vide. Quant aux données non utilisées dans les modèles elles sont représentées par un losange à fond noir.

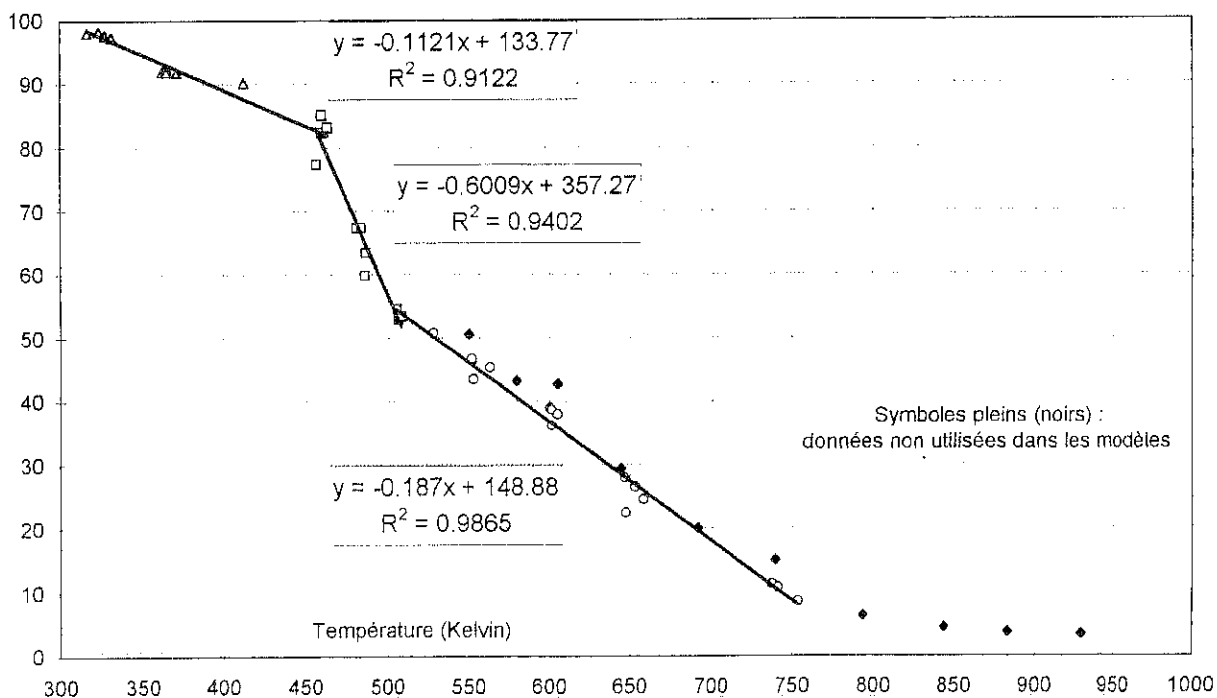
Le premier graphique regroupe toutes les espèces.

La régression de chaque phase est matérialisée sur chaque graphique sachant que Y représente M/M_i (en %) et que X représente la température (en K).

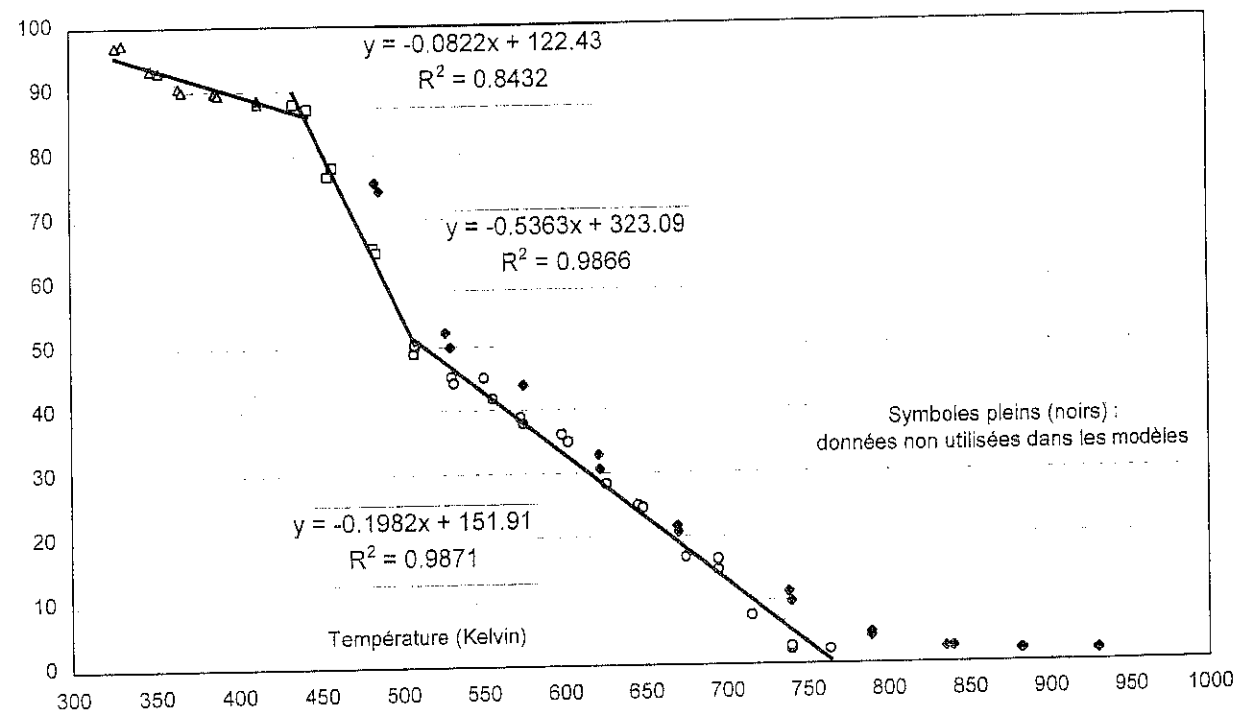
M / Mi (%) Décomposition de végétaux (toutes espèces confondues) en fonction de la température



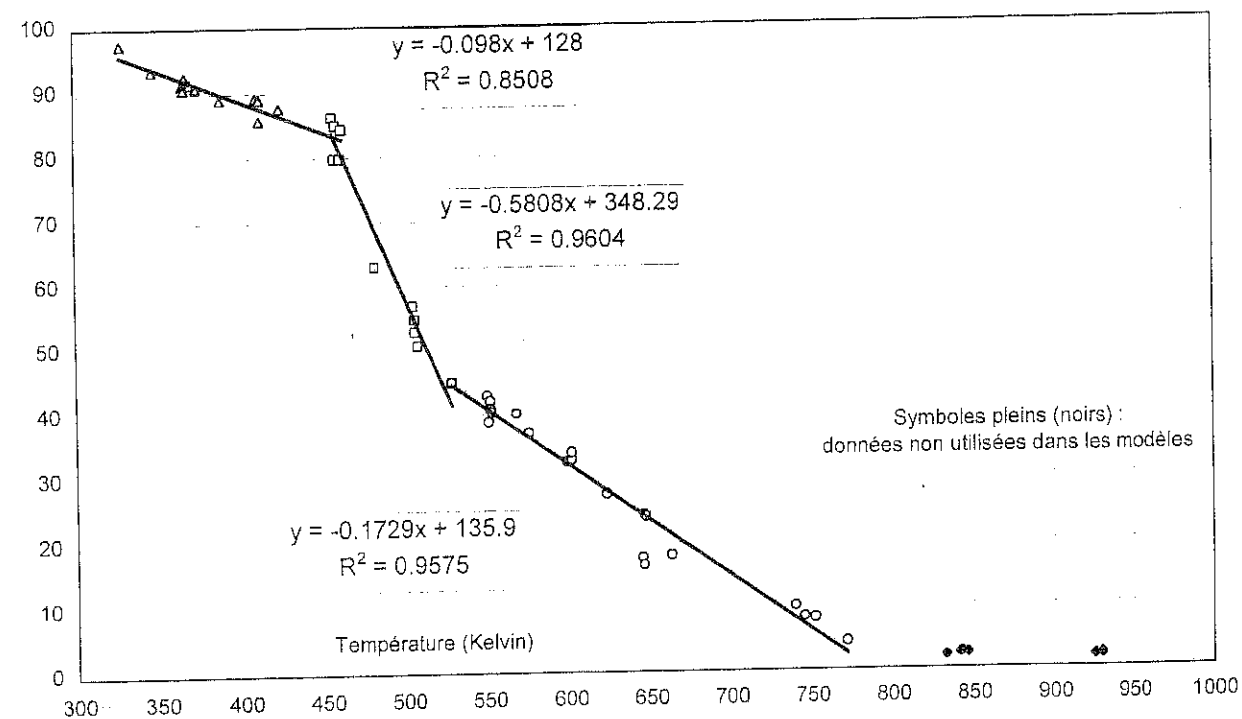
M / Mi (%) Décomposition des aiguilles de Pin d'Alep en fonction de la température

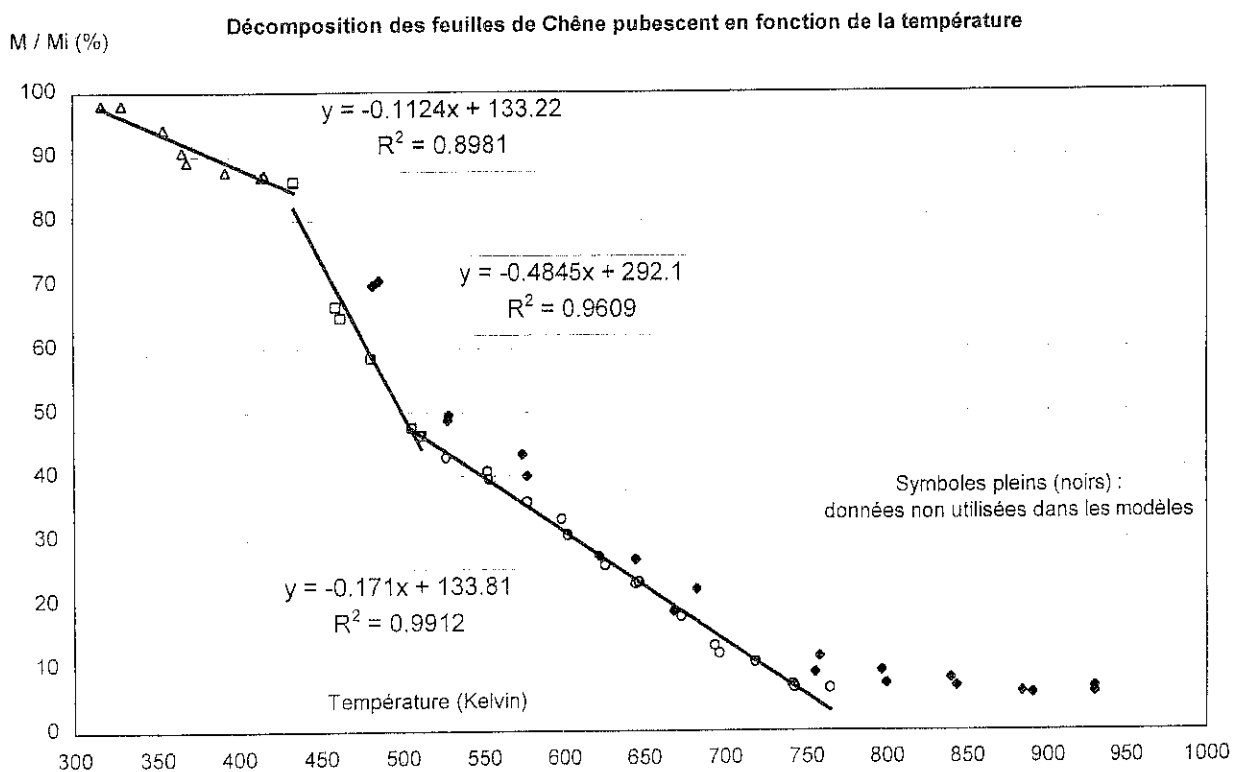
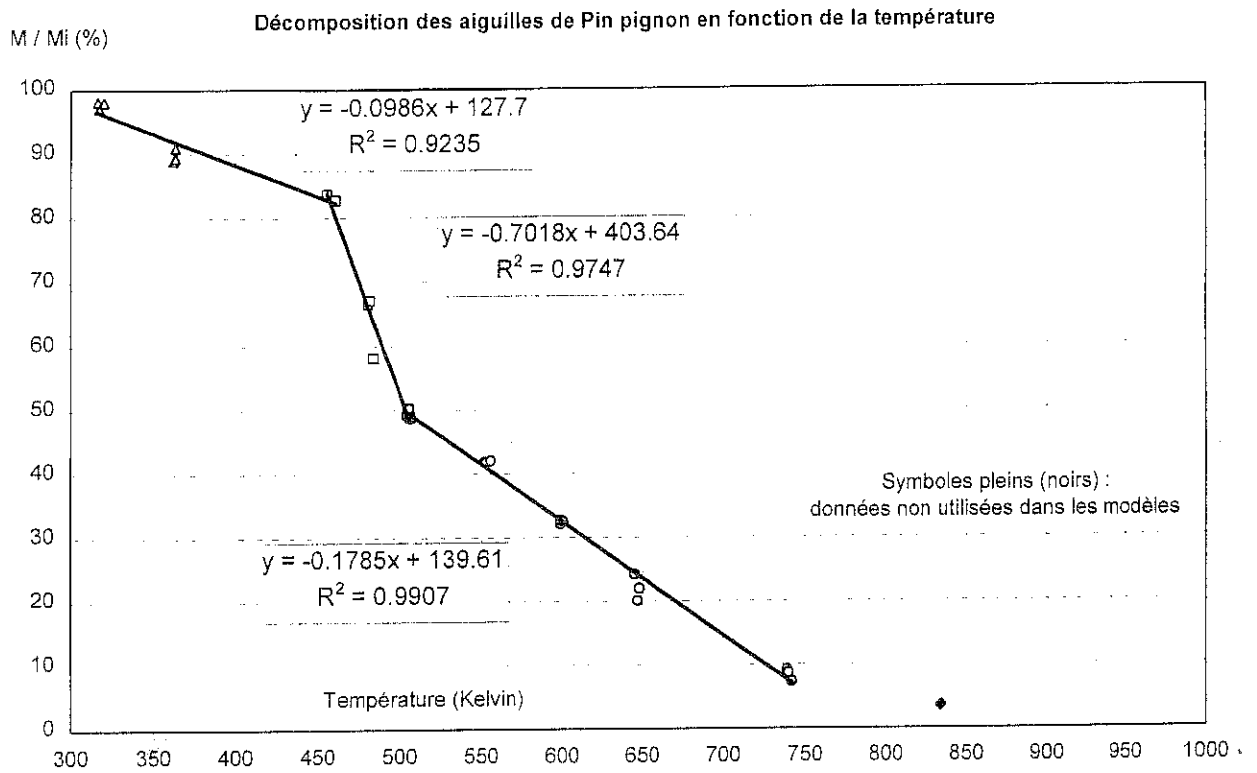


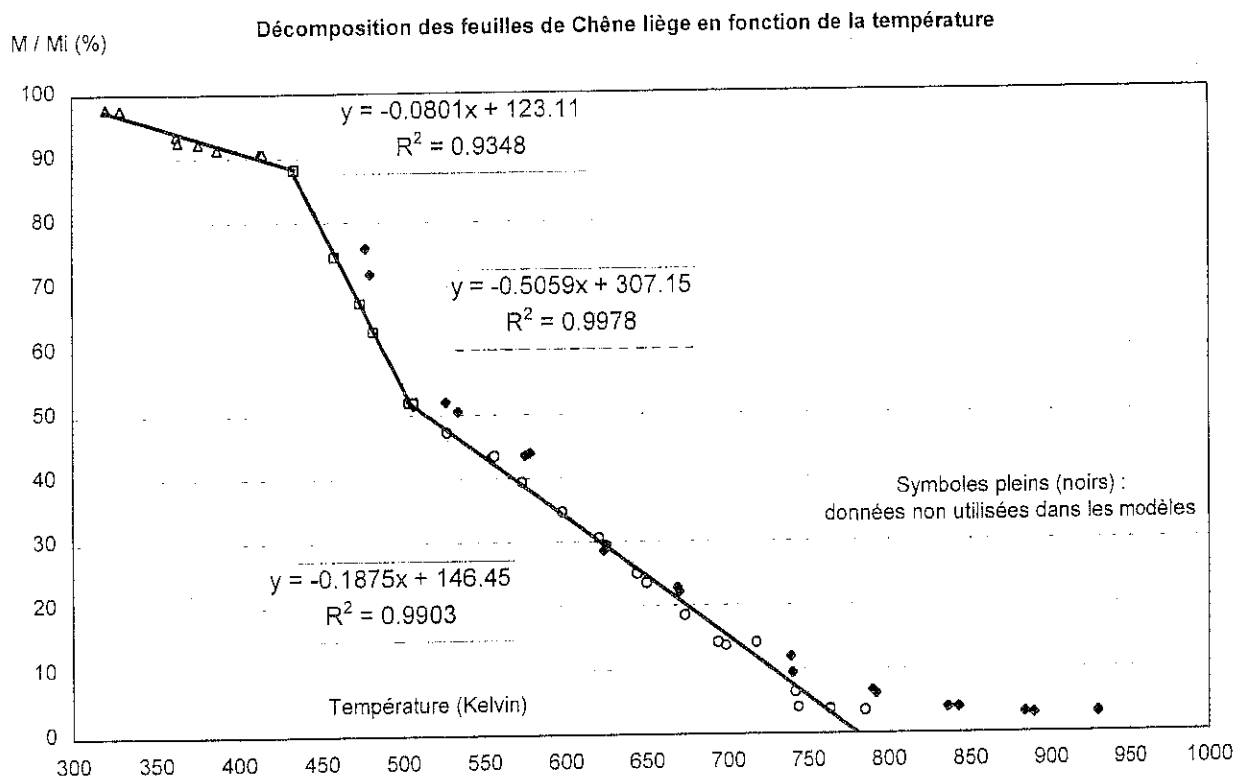
Décomposition des aiguilles de Pin noir laricio de Corse en fonction de la température



Décomposition des aiguilles de Pin maritime en fonction de la température







6. ETUDES ULTERIEURES ENVISAGEABLES

Combustible fin

Si les pins "méditerranéens" ont été étudiés, de nombreux autres feuillus sont à suivre. Par exemple les Chênes vert et kermès ainsi que des espèces de la strate arbustive vectrices du feu comme l'Arbousier, les Cistes, etc.

Remarque

Pour certains feuillus, et dans une moindre mesure pour certains pins, l'échantillonnage se heurte à de sérieux problèmes pour s'assurer de l'homogénéité des lots. Par exemple, pour le Chêne liège, il a fallu procéder à un artifice pour effectuer cette étude et réaliser un échantillonnage "particulier" de manière à le rendre "homogène" (feuilles vertes séchées à l'étuve).

Combustible "grossier"

Il est envisagé de procéder de même pour les rameaux. En suivant la gradation du combustible forestier, les rameaux inférieurs à 2°mm, puis compris entre 2 et 6°mm, ceux entre 6 et 25°mm et enfin ceux supérieurs à 25°mm sont à étudier.

DECOMPOSITION THERMIQUE D'AIGUILLES MORTES DE PIN MARITIME SELON DEUX REGIMES DE MONTEE EN TEMPERATURE

1. INTRODUCTION

Suite aux résultats obtenus par Claude MORO et suite aux remarques faites sur le protocole, il a été décidé de modifier quelques points de la méthodologie et de se consacrer uniquement à l'étude de la décomposition thermique d'aiguilles mortes de Pin maritime.

2. MATERIEL ET METHODE

2.1. Matériel végétal

Contrairement aux travaux précédents, les aiguilles mortes de Pin maritime ont été séchées à l'étuve à 60°C pendant 24h. Les lots étudiés pesaient 5 g environ.

2.2. Matériel de laboratoire

Le matériel de laboratoire est le même que celui utilisé dans les travaux présentés dans la première partie. Le four a été préalablement étalonné.

2.3. Méthode

Pour une vitesse de montée en température du four donnée, nous avons réalisé un essai par température, soit au total treize essais (100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550, 600, 650 et 700°C).

Pour chacun des essais, nous avons testé cinq échantillons, ces derniers étant tous sortis du four à l'instant où la température est atteinte. Ceci permet de s'affranchir des problèmes dus à l'ouverture du four pendant la manipulation.

Avant d'être pesés, les béchers refroidissent pendant environ 30 minutes dans une chambre à dessiccation (vide partiel de 20 cm de mercure).

3. PREMIERE VITESSE DE MONTEE EN TEMPERATURE

La vitesse maximale de montée en température du four a été retenue : elle s'élève à 17.3°C min⁻¹.

Le graphique 1 représente l'évolution de la masse relative (M / M_i en %) en fonction de la température (en K). Les valeurs expérimentales sont présentées dans le tableau 1.

3.1. Commentaires

On observe le même type de courbes que celles présentées dans la première partie (trois zones distinctes : début des réactions de pyrolyse - accélération du processus de décomposition - ralentissement de la réaction).

Dans la zone de vitesse de perte de masse maximale, on observe une grande dispersion des points (pour 473 K, l'écart type sur les masses relatives est de 15.12). Cette dispersion est sans aucun doute due à la vitesse importante de montée en température.

D'autre part, à 873 K, il reste encore en moyenne environ 22% de la masse initiale et 18% à 973 K. La teneur en cendres du Pin maritime est comprise entre 1.7 et 2.1% (cette teneur étant obtenue après une montée à 873°K en 6 heures suivie d'un pallier de 8 heures à 873°K). Que ce soit à 873°K ou à 973°K, on est donc très loin de la teneur en cendres.

La vitesse de montée en température influe sur la décomposition thermique. A la vitesse de montée en température de 1.5°C min⁻¹, le processus de décomposition des aiguilles se fait dans son intégralité (déshydratation, pyrolyse puis incandescence pour finalement arriver aux cendres).

A la vitesse de montée en température de 17.3°C min⁻¹, le végétal subit en surface le même processus de décomposition. La couche de charbon constituée en surface limite alors les échanges gazeux et les transferts thermiques entre la partie centrale du végétal et le milieu extérieur. Le végétal ne peut donc être totalement dégradé.

823	5.123	1.218	23.78	23.22	0.89
	5.022	1.148	22.86		
	5.048	1.218	24.13		
	5.020	1.177	23.45		
	5.040	1.102	21.87		
873	5.020	1.094	21.79	21.94	0.41
	5.105	1.102	21.59		
	5.095	1.153	22.63		
	5.086	1.116	21.94		
	5.088	1.106	21.74		
923	5.097	1.093	21.44	20.36	0.77
	5.092	1.035	20.33		
	5.163	1.068	20.69		
	5.094	1.014	19.91		
	5.084	0.988	19.43		
973	5.055	0.815	16.12	18.12	1.14
	5.052	0.921	18.23		
	5.030	0.939	18.67		
	5.055	0.952	18.83		
	5.015	0.941	18.76		

Tableau 1 (suite) : Perte de masse en fonction de la température, montée à 17,3°C min⁻¹

4. SECONDE VITESSE DE MONTEE EN TEMPERATURE

Une nouvelle série d'essais a été réalisée à la vitesse de montée en température utilisée par Claude MORO, $1.5^{\circ}\text{C min}^{-1}$.

Le graphique 2 et le tableau 2 présentent les résultats obtenus.

4.1. Commentaires

La dispersion des points à 473°K est nettement moindre que précédemment (écart type de 5.23 pour $1.5^{\circ}\text{C min}^{-1}$ contre 15.12 pour $17.3^{\circ}\text{C min}^{-1}$).

En ce qui concerne la teneur en cendres, elle est atteinte à 873°K (2.09% restants).

Le processus de décomposition est allé jusqu'à son terme.

4.2 Comparaison entre les résultats de 1996 - 1997 et ceux de 1998

Le graphique 3 représente les résultats de 1996 - 1997 ainsi que ceux de 1998.

Etant donné que les conditions expérimentales diffèrent sur de nombreux points (litière sèche à l'air / litière séchée à l'étuve - plusieurs ouvertures de four en cours d'expérience / une seule ouverture pour sortir les échantillons - 1 échantillon par température / 5 échantillons par température), il est peu aisé de comparer les résultats.

Toutefois, nous pouvons constater que le processus de dégradation thermique des aiguilles est accéléré par l'apport d'oxygène et par la modification du cycle de chauffe du four liés aux ouvertures répétées de la porte du four.

4.3 Régressions

Lors des essais de 1996 - 1997, les courbes représentant l'évolution de la masse relative ont été décomposées en 3 phases.

Au vu des résultats obtenus lors des expérimentations de 1998, le phénomène de décomposition thermique peut vraisemblablement être décrit de deux façons distinctes (M / M_i en % et T en K) :

Soit en le décomposant en 5 phases linéaires:

phase 1 : jusqu'à 423°K . Déshydratation et début des réactions de pyrolyse.

$$M / M_i = - 0.0728 * T + 124.24 \quad r^2 = 0.8064$$

phase 2 : de 423 à 523°K . Pyrolyse active.

$$M / M_i = - 0.4203 * T + 272.3837 \quad r^2 = 0.963$$

phase 3 : de 523 à 723°K . Pyrolyse moyenne.

$$M / M_i = - 0.2070 * T + 159.1497 \quad r^2 = 0.9886$$

phase 4 : de 723 à 823°K . Pyrolyse lente.

$$M / M_i = - 0.0776 * T + 66.2782 \quad r^2 = 0.9050$$

phase 5 : de 823°K à la fin. Cendres.

Soit en le décomposant en 2 phases:

phase 1 : jusqu'à 423°K . Déshydratation et début des réactions de pyrolyse.

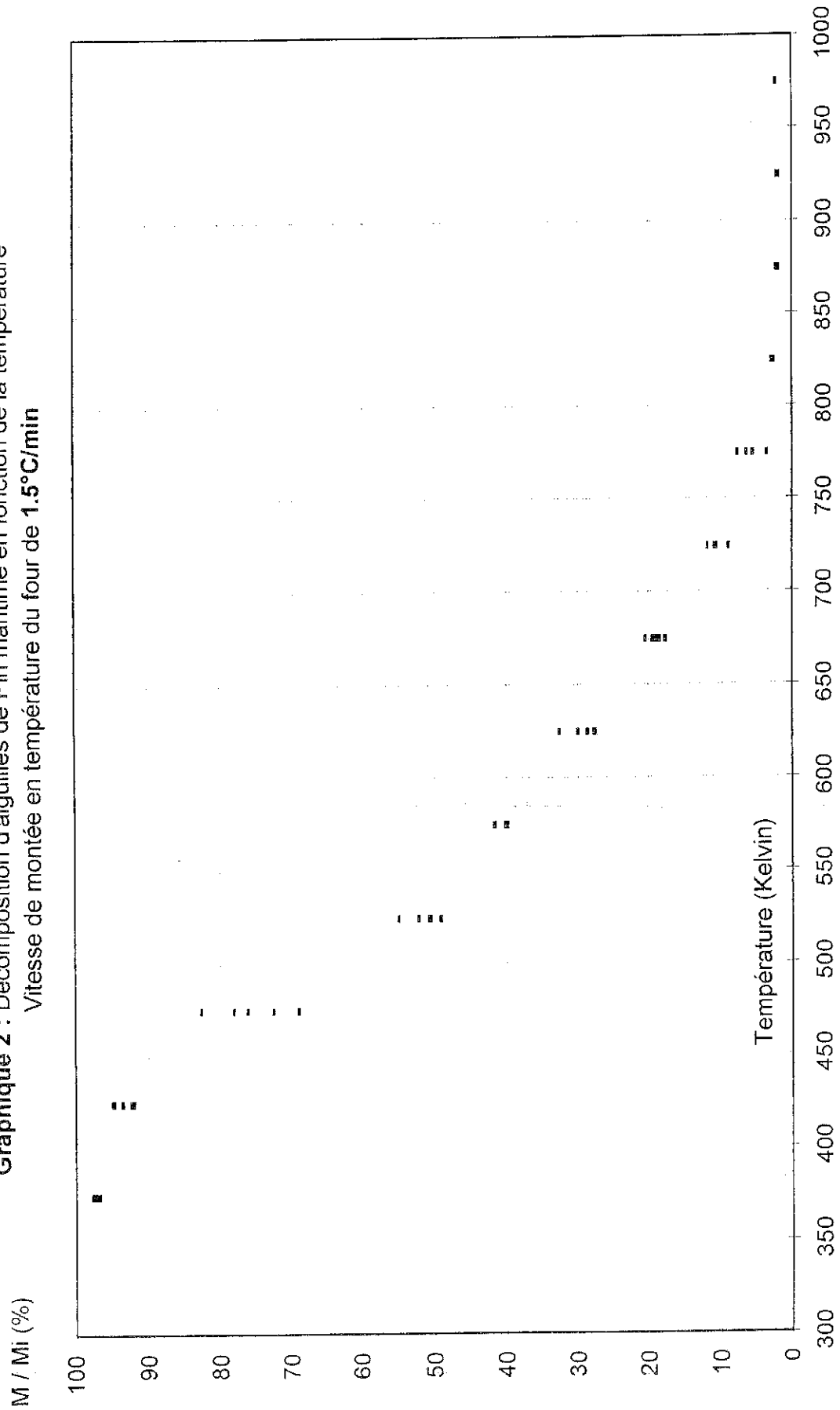
$$M / M_i = - 0.0728 * T + 124.24 \quad r^2 = 0.8064$$

phase 2 : de 423°K à la fin de la réaction, fonction curvilinéaire

$$M / M_i = 3982.7 * \exp(- 0.0082 * T) \quad r^2 = 0.9538$$

NB: les régressions sont faites en considérant l'ensemble des points (5 points pour une température donnée).

Graphique 2 : Décomposition d'aiguilles de Pin maritime en fonction de la température
 Vitesse de montée en température du four de 1.5°C/min



Décomposition thermique de particules de combustibles forestiers méditerranéens

T (K)	M _i (g)	M (g)	M / M _i (%)	M / M _i (%) moyen	Ecart type
373	5.079	4.959	97.64	97.10	0.39
	5.076	4.923	96.99		
	5.076	4.940	97.32		
	5.070	4.911	96.86		
	5.099	4.929	96.67		
423	5.089	4.817	94.66	93.46	1.35
	5.045	4.719	93.54		
	5.067	4.808	94.89		
	5.079	4.669	91.93		
	5.044	4.654	92.27		
473	5.061	4.182	82.63	75.64	5.23
	5.047	3.840	76.08		
	5.077	3.963	78.06		
	5.067	3.493	68.94		
	5.056	3.666	72.51		
523	5.046	2.765	54.8	51.43	2.16
	5.069	2.571	50.72		
	5.086	2.650	52.1		
	5.072	2.557	50.44		
	5.045	2.477	49.1		
573	5.076	2.107	41.51	40.61	0.87
	5.069	2.034	40.13		
	5.081	2.114	41.61		
	5.026	2.012	40.03		
	5.059	2.013	39.79		
623	5.073	1.406	27.72	29.37	2.06
	5.083	1.523	29.96		
	5.065	1.648	32.54		
	5.039	1.388	27.55		
	5.070	1.450	28.6		
673	5.047	0.955	18.92	18.98	1.03
	5.040	0.893	17.72		
	5.067	0.984	19.42		
	5.083	1.039	20.44		
	5.079	0.935	18.41		
723	5.086	0.546	10.74	10.49	1.06
	5.091	0.599	11.77		
	4.989	0.440	8.82		
	5.044	0.529	10.49		
	5.077	0.540	10.64		
773	5.096	0.281	5.51	5.71	1.46
	5.069	0.184	3.63		
	5.071	0.276	5.44		
	5.038	0.320	6.35		
	5.079	0.387	7.62		

 Tableau 2 : Perte de masse en fonction de la température, montée à 1,5°C min⁻¹

823	5.035	0.130	2.58	2.74	0.11
	5.057	0.137	2.71		
	5.064	0.139	2.74		
	5.091	0.146	2.87		
	5.030	0.140	2.78		
873	5.035	0.112	2.22	2.09	0.14
	5.044	0.095	1.88		
	5.078	0.109	2.15		
	5.057	0.110	2.18		
	5.080	0.103	2.03		
923	5.036	0.111	2.2	2.07	0.11
	5.018	0.097	1.93		
	5.074	0.106	2.09		
	5.046	0.100	1.99		
	5.039	0.107	2.12		
973	5.084	0.112	2.2	2.23	0.05
	5.054	0.112	2.22		
	5.066	0.114	2.25		
	5.011	0.109	2.18		
	5.029	0.116	2.3		

 Tableau 2 (suite) : Perte de masse en fonction de la température, montée à $1,5^{\circ}\text{C min}^{-1}$

5. CONCLUSIONS

La méthode retenue en 1998 évite de perturber le processus de décomposition par l'apport d'oxygène ou la modification du cycle de chauffe du four.

La vitesse lente de montée en température ($1,5^{\circ}\text{C min}^{-1}$) permet d'atteindre la décomposition totale du combustible.

La vitesse rapide et a fortiori la vitesse lente sont très largement inférieures à la vitesse de montée en température à laquelle est soumis le combustible forestier lors d'un incendie, depuis la température ambiante à 900°C en quelques secondes.

Cette démarche doit donc impérativement être complétée par des analyses thermogravimétriques où le choc thermique subi par le combustible est du même ordre de grandeur.

Graphique 3 : Décomposition des aiguilles de Pin maritime en fonction de la température
 Vitesse de montée en température de 1.5°C/min
 Comparaison des résultats obtenus en 96 - 97 et en 98

