



**HAL**  
open science

# Influence de l'usinage du bois sur les caractéristiques objectives et sur la perception subjective de l'aspect d'une finition

Cristina Coelho

► **To cite this version:**

Cristina Coelho. Influence de l'usinage du bois sur les caractéristiques objectives et sur la perception subjective de l'aspect d'une finition. Autre. Université Henri Poincaré - Nancy 1, 2006. Français. NNT : 2006NAN10109 . tel-01754414

**HAL Id: tel-01754414**

**<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01754414>**

Submitted on 30 Mar 2018

**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.



## AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : [ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr](mailto:ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr)

## LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

[http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg\\_droi.php](http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php)

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>



UNIVERSIDADE DO PORTO  
Faculdade de Engenharia  
Área: Ciências de Engenharia

SCD UHP NANCY 1  
Bibliothèque des Sciences  
Rue du Jardin Botanique - CS 20148  
54601 VILLERS LES NANCY CEDEX

em co-tutela Portugal - França  
para obtenção do grau de

**DOUTOR da  
UNIVERSIDADE DO PORTO**

apresentada por

SC N2006 109B



UNIVERSITÉ  
HENRI POINCARÉ – NANCY 1  
École Nationale Supérieure des Technologies  
et Industries du Bois  
Laboratoire d'Études et de Recherche sur  
le Matériau Bois – UMR INRA/UHP 1093  
École Doctorale RP2E  
Discipline : Sciences du bois

THÈSE en co-tutelle France - Portugal  
pour obtenir le grade de

**DOCTEUR de l'UNIVERSITÉ  
HENRI POINCARÉ – NANCY 1**

présentée par

**Cristina Maria do Amaral Pereira de Lima Coelho**

**Título / Titre**

**Influência da maquinação da madeira sobre  
as características objectivas e sobre a percepção subjectiva  
do aspecto dum acabamento**

***Influence de l'usinage du bois sur  
les caractéristiques objectives et sur la perception subjective  
de l'aspect d'une finition***

*Soutenue publiquement le 21 juillet 2006  
à la Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto  
devant le jury :*

**Presidente / Président :**

**Sebastião Feyo de Azevedo** : Professor Catedrático, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal

**Arquenteres / Rapporteurs :**

**José Lopes Morais** : Professor Associado, Universidade Trás-os-Montes e Alto Douro, Portugal

**Patrick Martin** : Professeur, Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers, Metz, France

**Examinadores / Examineurs :**

**Carlos Albino Veiga da Costa** : Professor Catedrático, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal (Orientador da tese)

**Luisa Hora de Carvalho** : Professora Coordenadora, Escola Superior de Tecnologia de Viseu, Portugal (Co-orientador da tese)

**Pierre-Jean Méausoone** : Maître de conférences, Université H. Poincaré - Nancy 1 - ENSTIB, France (Co-directeur de thèse)

**Daniel Masson** : Professeur, Université Henri Poincaré - Nancy 1 – ENSTIB, France (Directeur de thèse)

**Cristina Maria do Amaral Pereira de Lima Coelho**

**Influence de l'Usinage du Bois sur les Caractéristiques  
Objectives et sur la Perception Subjective  
de l'Aspect d'une Finition**

Dissertação apresentada para prestação de Provas de Doutoramento na  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

2005

---

---

Les travaux de recherche présentés dans cette thèse ont été soutenus par le Programme

PRODEP/FSE

---

---

Thèse dirigée par Monsieur le Professeur Carlos COSTA et Madame le Professeur Luisa CARVALHO (Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto au Portugal) et aussi par Monsieur le Professeur Daniel MASSON et Monsieur Pierre-Jean MÉAUSOONE, Maître de Conférences (ENSTIB - Université - Henri Poincaré Nancy I - France).

---



*À Filipa et à Vitor*



---

*À toutes les personnes qui m'ont fait ce que je suis*

---

---

*Busque Amor novas artes, novo engenho  
Pera matar-me, e novas esquivanças,  
Que não pode tirar-me as esperanças,  
Que mal me tirará o que eu não tenho.*

*Luís de Camões*

---

---

## Remerciements

Mener à terme une recherche est une tâche ardue et très souvent décourageante. Je tiens donc à associer à l'aboutissement de ce travail toutes les personnes que m'ont permis de le réaliser et celles qui m'ont apporté leur soutien.

Je remercie en premier lieu Monsieur le Professeur Carlos COSTA, et Madame le Professeur Luisa CARVALHO, pour m'avoir acceptée au sein de l'Equipe du Laboratório de Engenharia de Processos, Ambiente e Energia (LEPAE), du Département de Génie Chimique, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto au Portugal et aussi Monsieur le Professeur Daniel MASSON et Pierre-Jean MÉAUSOONE, Maître de Conférences, pour m'avoir acceptée au sein de l'Equipe du Laboratoire d'Etudes et de Recherches sur le Matériau Bois (LERMAB) de l'Université Henri Poincaré Nancy I - France.

Je remercie profondément Luisa et Jorge, pour leur grande disponibilité et pour le partage qu'ils savent faire de leurs compétences, sans lesquels ce travail n'aurait pas été possible. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma gratitude et de mes sincères remerciements.

J'adresse mes vifs remerciements aux membres du jury pour leur disponibilité dans l'appréciation de ce travail.

Je me dois de remercier mes collègues de bureau, pour leur amitié et leur soutien constant, les enseignants-chercheurs, l'ensemble des techniciens et le personnel administratif, de l'ESTV, du LEPAE et de l'ENSTIB pour leur bienveillance et leur gentillesse.

Je tiens à remercier les personnes les plus importantes de ma vie, ma fille Filipa, mon mari Vitor et toute ma famille, que j'ai toujours dans mon coeur, par l'aide inconditionnelle qu'ils m'ont toujours apportée.

Je n'oublierai pas la famille qui m'a hébergée dès mon difficile premier séjour en France. Je tiens à l'exprimer ma reconnaissance, spécialement à Madame Anne et aussi toute sa famille, qui j'ai adoptée comme ma famille française pour le bon accueil que j'ai eu chez eux.

---

---

J'aimerais étendre mes remerciements à toutes les personnes qui, d'une manière ou d'une autre, m'ont aidée dans la réalisation de ce travail.

Enfin, je termine en remerciant le Programme PRODEP/FSE, ainsi que la Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) à travers le projet POCTI/AGR/49218/2002, pour le financement de ce travail.

---

---

## RÉSUMÉ

La finition, application d'un revêtement décoratif et protecteur sur la surface d'un matériau est la dernière opération du processus de production d'un objet.

La qualité d'une finition peut être quantifiée par la mesure des paramètres objectifs de performance correspondant à l'utilisation de l'objet fini. Cependant, l'aspect d'une finition et sa perception par les utilisateurs sont également importants. La qualité d'une finition ne résulte pas seulement des caractéristiques techniques du produit appliqué, mais aussi des conditions de l'application. Les opérations préliminaires à la finition comme l'usinage et la préparation de la surface ont aussi une influence sur l'aspect final.

Une nouvelle méthode a été établie pour évaluer l'influence des paramètres d'usinage de bois (rabotage et ponçage) sur la qualité de la surface finie. Plusieurs paramètres ont été étudiés relatifs aux opérations d'usinage (vitesse de rotation, vitesse d'avance et profondeur de coupe), de préparation de la surface (ponçage: grain de la bande, épaisseur enlevée) et d'application des produits (type de produit et égrenage). En raison du grand nombre de paramètres/niveaux concernés, la méthode de Taguchi a été utilisée pour mettre en place le plan d'expériences.

La quantification de l'état de la surface a été effectuée en utilisant un système de vision artificielle pour la détermination de la *pseudo-rugosité* des surfaces de bois. Une méthode de filtrage basée sur les transformées rapides de Fourier (FFT) a été appliquée, ce qui permet le calcul de plusieurs critères d'évaluation du profil de la surface obtenu. Cette méthodologie semble être très prometteuse pour une meilleure compréhension de l'effet des paramètres clefs d'usinage du bois sur les caractéristiques objectives d'une surface finie.

L'évaluation de la perception de l'état de la surface et de la qualité subjective de la finition a été réalisée en utilisant des méthodes visuelles et tactiles de perception (panel d'observateurs). Les résultats peuvent être utiles pour l'optimisation du procédé global de finition, ce qui peut permettre une augmentation de la productivité et la réduction de coûts.

L'objectif final de cette étude est l'optimisation des opérations industrielles engagées dès l'usinage jusqu'à la finition d'un produit en bois, ce qui peut avoir un grand impact en termes pratiques par rapport à l'approche empirique des choix types de produit/usinage qui est souvent réalisée dans l'industrie, du fait de l'absence d'un support scientifique et technologique.

---

## ABSTRACT

Finishing, application of a decorative and protective coating on the surface of the material is the last operation in the manufacture of an object.

The quality of the finishing can be assessed by objective parameters of performance related to the final use of the finished object. However, the appearance of the finishing and its perception by users is equally important. The quality of a finished surface does not result only from the technical characteristics of the applied product, but also from the conditions of application. Preliminary operations as machining and surface preparation have a great influence too. The analysis of surface quality is also crucial to the successful control of quality in wood manufacturing industries.

A novel method for evaluating the influence of the operating parameters of wood machining (planing and sanding) on the quality of a finished surface was established. Several parameters were studied related to the machining operation (rotation speed, feed speed, depth of cut), to the surface preparation (sanding: grit size, feed speed and depth of sanding) and to the product application (type of product and polishing). Due to the great number of parameters, a statistical experimental design tool was implemented (Taguchi method). The quantitative evaluation of the state of the surface was assessed by means of an artificial vision system for the determination of the *pseudo-roughness* of wood surfaces. A filtering method based on Fast Fourier Transforms (FFT) was applied and it was possible to derive various criteria for evaluating the resulting profile. This methodology seems to be very promising for a better understanding of the effect of the key parameters of wood machining on the objective characteristics of a finished surface.

The assessment of the perception of surface state and subjective quality of the finishing will be carried out by means of visual and tactile perception methods (panel of observers). Further, these results will be useful for the optimisation of this process in order to enhance productivity and reduce costs.

The final aim of this project is the optimisation of wood finishing process, what has a practical impact, mainly due to the importance of this process in furniture industry, but also because the choice of the proper type of machining/product is often done empirically, without scientific and technological support.

---

---

## RESUMO

O acabamento, aplicação de um revestimento decorativo e protector sobre a superfície de um material é a última operação do processo de fabrico de um objecto.

A qualidade de um acabamento pode ser medida através da quantificação de parâmetros objectivos de desempenho relacionados com a utilização ulterior do objecto acabado. Contudo, o aspecto de um acabamento e a sua percepção pelos utilizadores é igualmente importante. A qualidade de um acabamento não resulta unicamente das características técnicas do produto aplicado, mas também das condições de aplicação. As operações preliminares ao acabamento: maquinação e preparação da superfície, têm também influência sobre o aspecto final.

Foi estabelecido um novo método para avaliar a influência dos parâmetros de maquinação da madeira (aplainamento e lixagem) na qualidade da superfície acabada. Foram estudados vários parâmetros relacionados com as operações de maquinação (velocidade de rotação, velocidade de avanço e profundidade de corte), preparação da superfície (lixagem: grão da lixa e espessura removida) e produto de acabamento (tipo de produto e polimento). Devido ao elevado número de parâmetros estudados, foi utilizado o método de planeamento de experiências Taguchi.

A avaliação quantitativa do estado da superfície foi avaliada por meio de um sistema de visão artificial para a determinação da *pseudo-rugosidade* da superfície de madeira. Foi aplicado um método de filtragem baseado em transformadas rápidas de Fourier (FFT) permitindo o cálculo de vários critérios para avaliar o perfil de superfície obtido. Esta metodologia parece ser muito promissora para uma melhor compreensão dos efeitos dos parâmetros chave da maquinação da madeira nas características objectivas de uma superfície acabada.

A avaliação da percepção do estado da superfície e da qualidade subjectiva do acabamento foi realizada através de métodos visuais e tácteis de percepção (painel de observadores).

Os resultados serão úteis para a optimização deste processo, com vista ao aumento da produtividade e redução de custos.

O objectivo final é a optimização das operações industriais envolvidas desde a maquinação até ao acabamento dum produto de madeira, o que terá um grande impacto em termos práticos face à forma empírica como a escolha do tipo de produto/maquinação é realizada na indústria.

---



---

## Table des Matières

<b>Chapitre I - Introduction Générale</b> .....	39
1 Structure de la thèse .....	41
2 Situation du sujet.....	42
3 Objectifs .....	44
<b>Chapitre II - Étude Bibliographique</b> .....	45
1 Essences .....	47
1.1 Les feuillus (Angiospermes) .....	47
1.2 Les résineux (Gymnospermes).....	48
1.3 Structure de la paroi cellulaire et composition chimique.....	49
1.4 Le hêtre ( <i>Fagus sylvatica L.</i> ).....	50
1.4.1 Description du bois - aspect et propriétés .....	52
1.5 Le pin maritime ( <i>Pinus pinaster</i> ) .....	55
1.5.1 Description du bois - aspect et propriétés .....	57
2 Usinage du bois .....	63
2.1 Coupe du bois.....	64
2.1.1 Théorie générale.....	64
2.1.2 Les efforts de coupe .....	65
2.1.3 La formation du copeau.....	73
2.1.4 L'opération de rabotage .....	81
3 États de surface – caractérisation objective.....	84
3.1 États de surface.....	85
3.1.1 Paramètres des surfaces.....	85
3.1.2 Classification des défauts de la surface.....	86
3.1.3 Caractéristiques du profil de la surface .....	88
3.1.4 Paramètres de rugosité .....	89
3.2 Systèmes d'analyse de la surface bois.....	98
3.2.1 Le palpage mécanique.....	98
3.2.2 La vision artificielle .....	99
3.2.3 Les procédés pneumatiques.....	101
3.2.4 Le frottement .....	102
3.2.5 La méthode viso-tactile .....	103
3.3 Traitement du profil de la surface .....	107

---

---

3.3.1 Filtres .....	107
3.3.2 Application au cas du bois .....	109
3.4 Mouillabilité de la surface bois.....	114
3.5 Apparence visuelle de la surface bois.....	118
3.5.1 Généralités .....	118
3.5.2 Mesure de la brillance.....	119
3.5.2.1 Caractérisation de la brillance.....	119
3.5.2.2 Les différents paramètres de mesures de la brillance .....	121
4 État de surface – caractérisation subjective .....	124
4.1 Analyse sensorielle .....	124
4.1.1 Introduction.....	124
4.1.2 Définition et objectifs de l’analyse sensorielle.....	126
4.1.3 Les caractéristiques organoleptiques .....	127
4.1.4 Méthodes et techniques utilisées dans l’analyse sensorielle.....	131
4.1.4.1 Essais de différenciation générale .....	133
4.1.4.2 Essais de différenciation d'attributs .....	136
4.1.4.3 Essais pour la détermination de seuils .....	139
4.1.4.4 Essais descriptifs.....	140
4.1.4.5 Essais affectifs .....	143
4.1.5 L’analyse statistique des résultats des essais d’analyse sensorielle.....	144
4.1.6 Organisation d’un programme d’analyse sensorielle .....	146
<b>Chapitre III - Protocoles Expérimentaux.....</b>	<b>149</b>
1 Méthodologie.....	151
2 Matières premières.....	153
2.1 Caractérisation du bois .....	153
2.1.1 Essences.....	153
2.1.2 Détermination de la masse volumique.....	153
2.1.3 Détermination de l’humidité.....	155
2.2 Caractérisation des produits de finition .....	156
2.2.1 Produits de finition .....	156
2.2.2 Détermination de la viscosité.....	157
2.2.3 Détermination de la masse volumique.....	158
3 Procédés d’usinage .....	160
3.1 Equipement utilisé .....	160

---

---

3.1.1 Instrumentation de la machine et acquisition de données .....	160
3.1.2 L'opération de ponçage .....	161
3.1.3 L'opération d'égrenage .....	161
3.2 Détermination des paramètres et des niveaux d'usinage .....	161
3.2.1 Détermination des paramètres d'usinage .....	161
3.2.2 Détermination des niveaux d'usinage .....	163
4 Système de vision artificielle pour la caractérisation objective de la surface .....	167
5 La mouillabilité de la surface .....	176
6 La brillance spéculaire de la surface .....	178
7 Analyse subjective .....	180
<b>Chapitre IV - Résultats et Discussion .....</b>	<b>183</b>
1 Essais préliminaires .....	185
1.1 Plan des expériences .....	185
1.2 Essais - Préparation des échantillons .....	190
1.3 Caractérisation objective de la surface .....	193
1.3.1 Influence des facteurs étudiés dans l'analyse objective .....	193
1.3.2 Mouillabilité de la surface .....	196
1.3.3 Brillance spéculaire de la surface .....	198
1.4 Conclusions .....	200
2 Première série d'expériences .....	201
2.1 Plan des expériences .....	201
2.2 Essais - Préparation des échantillons .....	205
2.3 Procédés d'usinage .....	209
2.3.1 Reproductibilité du système d'acquisition .....	209
2.3.2 Effet des niveaux d'usinage .....	213
2.3.3 Influence de l'essence .....	215
2.4 Caractérisation objective de la surface .....	217
2.4.1 Influence des angles d'inclinaison de la caméra et d'incidence du laser .....	217
2.4.2 Influence des facteurs étudiés dans l'analyse objective .....	218
2.4.3 Mouillabilité de la surface .....	223
2.4.4 Brillance spéculaire de la surface .....	225
2.5 Caractérisation subjective de la surface .....	227
2.6 Conclusions .....	233
3 Deuxième série d'expériences .....	235

---

---

3.1 Plan des expériences .....	235
3.2 Essais - Préparation des échantillons .....	238
3.3 Procédés d'usinage .....	241
3.3.1 Reproductibilité du système d'acquisition.....	241
3.3.2 Effet des niveaux d'usinage.....	245
3.3.3 Influence de l'essence .....	247
3.4 Caractérisation objective de la surface .....	250
3.4.1 Influence des facteurs dans l'analyse objective .....	250
3.4.2 Validation de la méthode .....	257
3.4.3 Mouillabilité de la surface .....	260
3.4.4 Influence du vieillissement de la surface.....	261
3.4.5 Brillance spéculaire de la surface .....	264
3.5 Caractérisation subjective de la surface.....	266
3.6 Conclusions.....	270
<b>Conclusion Générale et Perspectives .....</b>	<b>273</b>
<b>Bibliographie .....</b>	<b>279</b>
<b>Annexes .....</b>	<b>295</b>
Annexe 1 - Procédé d'usinage et acquisition de données.....	297
Annexe 2 - Programmes informatiques (langage Matlab).....	305
Annexe 3 - Méthodes statistiques utilisées .....	313
Annexe 4 - Fiches techniques des produits de finition .....	379

---

---

## Liste de Tableaux

Tableau II.1 - Caractéristiques physiques et mécaniques du hêtre (à 12% d'humidité) (d'après Martin, 1983 - A.R.BO.LOR) .....	54
Tableau II.2 - Caractéristiques physiques et mécaniques du pin maritime (à 12% d'humidité) (d'après Martin, 1983 - A.R.BO.LOR) .....	61
Tableau II.3 - Influence de l'épaisseur du copeau et de l'angle de coupe sur la forme du copeau (d'après CTBA, 1999) .....	76
Tableau II.4 - Défauts de surface classés par nature et par numéro d'ordre .....	87
Tableau II.5 - Caractéristiques du profil .....	88
Tableau II.6 - Longueur de base ( <i>cut off</i> ) .....	91
Tableau II.7 - Méthodes d'analyse de la surface bois et ses limites .....	106
Tableau III.1 - Détermination de la masse volumique .....	154
Tableau III.2 - Détermination d'humidité .....	155
Tableau III.3 - Détermination de la masse des films .....	157
Tableau III.4 - Détermination de la viscosité .....	158
Tableau III.5 - Détermination de la masse volumique .....	159
Tableau III.6 - Caractéristiques du système de vision laser .....	175
Tableau III.7 - Fiche d'enquête - 1 .....	181
Tableau III.8 - Fiche d'enquête - 2 .....	182
Tableau IV.1 - Paramètres et niveaux d'usinage .....	185
Tableau IV.2 - Marques d'usinage .....	185
Tableau IV.3 - Facteurs et niveaux .....	188
Tableau IV.4 - Plan factoriel complet .....	189
Tableau IV.5 - Table Taguchi .....	190
Tableau IV.6 - Signification statistique des facteurs pour la fréquence moyenne des profils de <i>pseudo-rugosité</i> (+5%, ++1%, +++0,1%) .....	196
Tableau IV.7 - Signification statistique des facteurs pour la puissance moyenne des profils de <i>pseudo-rugosité</i> (+5%, ++1%, +++0,1%) .....	196
Tableau IV.8 - Moyenne des valeurs des angles de contact pour le hêtre .....	196

---

---

Tableau IV.9 - Moyenne des valeurs des angles de contact pour le pin.....	196
Tableau IV.10 - Moyenne des valeurs de la brillance spéculaire avec et sans égrenage .....	198
Tableau IV.11 - Paramètres et niveaux d'usinage .....	201
Tableau IV.12 - Marques d'usinage .....	201
Tableau IV.13 - Facteurs et niveaux.....	203
Tableau IV.14 - Plan factoriel complet.....	204
Tableau IV.15 - Table Taguchi.....	205
Tableau IV.16 - Signification statistique de l'influence des facteurs pour les critères d'évaluation de la surface - moyenne (+5%, ++1%, +++0,1%).....	223
Tableau IV.17 - Signification statistique de l'influence des facteurs pour les critères d'évaluation de la surface - signal-bruit (+5%, ++1%, +++0,1%).....	223
Tableau IV.18 - Moyenne des valeurs des angles de contact pour le hêtre.....	224
Tableau IV.19 - Moyenne des valeurs des angles de contact pour le pin.....	224
Tableau IV.20 - Moyenne des valeurs de la brillance spéculaire avec et sans égrenage .....	226
Tableau IV.21 - Caractérisation objective ( $K_{sub}$ ) et subjective (V+T) pour le hêtre .....	230
Tableau IV.22 - Caractérisation objective ( $K_{sub}$ ) et subjective (V+T) pour le pin.....	230
Tableau IV.23 - Paramètres et niveaux d'usinage.....	235
Tableau IV.24 - Marques d'usinage .....	235
Tableau IV.25 - Facteurs et niveaux.....	237
Tableau IV.26 - Table Taguchi.....	238
Tableau IV.27 - Signification statistique de l'influence des facteurs pour les critères d'évaluation de la surface - moyenne (+5%, ++1%, +++0,1%).....	257
Tableau IV.28 - Signification statistique de l'influence des facteurs pour les critères d'évaluation de la surface - signal-bruit (+5%, ++1%, +++0,1%).....	257
Tableau IV.29 - Moyenne des valeurs des angles de contact pour le hêtre après 1 jour.....	260
Tableau IV.30 - Moyenne des valeurs des angles de contact pour le pin après 1 jour.....	260
Tableau IV.31 - Moyenne des valeurs des angles de contact pour le hêtre après 12 jours ....	262
Tableau IV.32 - Moyenne des valeurs des angles de contact pour le pin après 12 jours .....	262
Tableau IV.33 - Moyenne des valeurs de la brillance spéculaire avec et sans égrenage .....	265

---

---

Tableau IV.34 - Caractérisation objective ( $K_{sub}$ ) et subjective (V+T) pour le hêtre.....	267
Tableau IV.35 - Caractérisation objective ( $K_{sub}$ ) et subjective (V+T) pour le pin.....	267
Tableau A1.1 - Critères d'évaluation objective de la qualité de la surface ( $K_{ond}$ , $K_{rug}$ et énergie spécifique) obtenus après usinage .....	303
Tableau A2.1 - Programme informatique (langage Matlab) – profil de <i>pseudo-rugosité</i> et courbe de la puissance (FFT) .....	305
Tableau A2.2 - Programme informatique (langage Matlab) pour l'étude du procédé d'usinage .....	306
Tableau A3.1 - Correspondance entre la terminologie de l'application JMP et de celle utilisée dans l'approche expérimentale.....	323
Tableau A3.2 - Correspondance entre la terminologie de l'application JMP et celle utilisée dans l'approche expérimentale .....	324

---

---

## Liste de Figures

Figure II.1 -	Structure anatomique du bois de feuillus .....	47
Figure II.2 -	Structure anatomique du bois de résineux.....	48
Figure II.3 -	Structure du bois - observations multi échelles (d'après Harrington, 1998) ..	49
Figure II.4 -	Futaie de hêtres (Auteur : Robbez-Masson, n° 2063, 31/08/2003).....	50
Figure II.5 -	Bois de hêtre ( <i>Fagus sylvatica</i> ).....	52
Figure II.6 -	a) - Plan transversale, b) - Plan radial, c) - Plan tangentiel, du hêtre ( <i>Fagus sylvatica</i> ) (Esteban L. G. et al., 2003).....	53
Figure II.7 -	Futaie de pin maritime (Origine : Académie de Rennes).....	55
Figure II.8 -	Bois de pin maritime ( <i>Pinus pinaster</i> ) .....	58
Figure II.9 -	a) - Plan transversale, b) - Plan radial, c) - Plan tangentiel, du pin maritime ( <i>Pinus pinaster</i> ) (L. G. Esteban et al., 2003) .....	59
Figure II.10 -	Principales directions d'anisotropie (a) et de coupe (b) (Kivimaa, 1950) .....	64
Figure II.11 -	Décomposition de l'effort de coupe (Koch, 1964).....	65
Figure II.12 -	Evaluations simultanées de la densité et des efforts de coupe pour le Douglas.....	66
Figure II.13 -	Evolution de l'effort de coupe $F_c$ en fonction de l'infradensité $S_{12}$ (cas du bouleau (Bétula), à 11% d'humidité usiné en mode de coupe A).....	67
Figure II.14 -	Évolutions de l'effort de coupe $F_c$ en fonction de l'humidité (cas du bouleau (Bétula), avec une infradensité $S_{12}=0,7$ ).....	69
Figure II.15 -	Influence du sens de travail de l'outil sur l'effort de coupe(d'après la thèse de Eyma, 2002) .....	70
Figure II.16 -	Les angles de l'outil de coupe.....	72
Figure II.17 -	Influence de l'angle d'attaque sur les efforts de coupe suivant les directions de coupe A, B, C (voir figure II.1) pour le cas du hêtre (à 12% d'humidité, copeau de 0,2 mm d'épaisseur, outil usé à 50%) (d'après la thèse de Eyma, 2002) .....	72
Figure II.18 -	Allure du copeau suivant les modes de coupe A, B et C (Thomas, 1984).....	74
Figure II.19 -	Copeau obtenu par fendage (d'après Koch, 1964).....	74
Figure II.20 -	Diagramme effort de coupe/temps (d'après Koch, 1964).....	75

---

---

Figure II.21 - Copeau obtenu par compression (d'après Koch, 1964).....	75
Figure II.22 - Diagramme effort de coupe/temps (d'après Koch, 1964) .....	75
Figure II.23 - Copeau obtenu par flambage (d'après Koch, 1964).....	76
Figure II.24 - Diagramme effort de coupe/temps (d'après Koch, 1964) .....	76
Figure II.25 - Evolution de l'angle de levage $\varnothing$ en fonction de l'angle de coupe $\gamma$ et de celui d'inclination des fibres $i$ (d'après Koch, 1964) .....	77
Figure II.26 - Le travail en opposition .....	78
Figure II.27 - 1 <sup>ère</sup> phase - flambage (d'après Koch, 1964).....	78
Figure II.28 - 2 <sup>ème</sup> phase - compression (d'après Koch, 1964).....	78
Figure II.29 - 3 <sup>ème</sup> phase - fendage (d'après Koch, 1964).....	79
Figure II.30 - Défauts d'usinage dus à la coupe par fendage (d'après Koch, 1964).....	79
Figure II.31 - Le travail en avalant.....	80
Figure II.32 - Vue d'ensemble de la corroyeuse .....	81
Figure II.33 - Représentation conventionnelle et organes d'usinage de la corroyeuse.....	82
Figure II.34 - L'étude fonctionnelle du système de la corroyeuse.....	83
Figure II.35 - Diagramme schématique des caractéristiques de la surface(ASME B46.1, 1995).....	86
Figure II.36 - Rugosité moyenne ( $R_a$ ) .....	90
Figure II.37 - Rugosité $R_y$ défini par la rugosité partielle (à ce cas $Z_3$ ) .....	91
Figure II.38 - Diverses formes de rugosité peuvent avoir la même valeur pour $R_y$ .....	92
Figure II.39 - Rugosité $R_t$ . Distance entre le sommet le plus haut ( $p_1$ ) et le creux le plus bas ( $v_1$ ).....	93
Figure II.40 - Rugosité partielle $Z_i$ pour définir $R_z$ .....	94
Figure II.41 - Rugosité moyenne du troisième sommet et creux ( $R_{3Z}$ ).....	95
Figure II.42 - L'obliquité ( <i>Skewness</i> ) - $R_{sk}$ .....	96
Figure II.43 - La finesse ( <i>kurtosis</i> ) - $R_{ku}$ .....	97
Figure II.44 - Buse du rugosimètre pneumatique (d'après Bonac, 1979, cité par Mothe, 1985).....	101
Figure II.45 - Principe de la mesure du frottement .....	103

---

---

Figure II.46 -	La méthode viso-tactile .....	104
Figure II.47 -	a) Déformation de la ligne de référence du filtrage Gaussien; b) Déformation résiduelle après le filtrage Gaussien (adaptée de Li et <i>al.</i> , 2004).....	108
Figure II.48 -	Références de filtrage après traitement robuste avec une fonction de pondération ADRF (X- points d'évaluation ; Y- hauteur ( $\mu\text{m}$ )) (adaptée de Li et <i>al.</i> , 2004) .....	109
Figure II.49 -	L'effet de "push-up" sur un profil de rugosité, avec différentes méthodes de filtrage (adaptée de Gurau et <i>al.</i> , 2002).....	110
Figure II.50 -	Comparaison des fonctions principales d'ISO 11562 : 1996 et RGRF et leur effet sur les demi longueurs marginales du "cut-off" du profil. Longueur de profil 15 mm. (Les lignes verticales marquent le niveau de demi longueur de "cut-off" du filtre) (Adaptée de Gurau et <i>al.</i> , 2002).....	111
Figure II.51 -	Définition des paramètres $R_k$ , $R_{vk}$ et $R_{pk}$ (de la figure 1 d'ISO 13565-2, 1996).....	112
Figure II.52 -	Le modèle d'Young.....	114
Figure II.53 -	Processus de mouillabilité d'un liquide dans une surface poreuse (adaptée de Sheldon et <i>al.</i> , 2001).....	115
Figure II.54 -	L'anisotropie de l'angle de contact dans le bois .....	116
Figure II.55 -	Le triplet : illuminant - objet - observateur .....	120
Figure II.56 -	Goniospectrophotométrie - Notation des angles .....	121
Figure II.57 -	Exemple de mesures de réflexion spéculaire à 20°, 60° et 85° (pour le <i>sheen</i> ) .....	122
Figure II.58 -	Réflexion par une surface plane et par une surface rugueuse. Pic spéculaire - incidence 45°.....	122
Figure II.59 -	Schéma du mécanisme des sens humains .....	128
Figure II.60 -	Organigramme des méthodes d'analyse sensorielle.....	132
Figure III.1 -	Séquences des protocoles expérimentaux .....	151
Figure III.2 -	Diagramme cause-effet des facteurs impliqués dans la qualité de la finition	152
Figure III.3 -	Débit des éprouvettes pour les essais physico-mécaniques .....	154
Figure III.4 -	Coupe Ford n°4 .....	158

---

---

Figure III.5 - Pycnomètre de métal (100 cm <sup>3</sup> ).....	159
Figure III.6 - Corroyeuse instrumentée à 6 arbres.....	160
Figure III.7 - Puissance électrique totale absorbée et vitesse de rotation instantanée.....	162
Figure III.8 - Rapport entre l'avance par dent et la qualité de la surface usinée du bois (Adapté du manuel de l'équipement industriel réf. WEINIG) .....	166
Figure III.9 - Rapport entre la profondeur des marques de coupe et la qualité de la surface du bois (Adapté du manuel de l'équipement industriel réf. WEINIG) .....	166
Figure III.10 - Schéma du système de vision laser.....	168
Figure III.11 - Photographie du système de vision laser .....	171
Figure III.12 - Image de la surface d'une éprouvette, profil de <i>pseudo-rugosité</i> et courbe de puissance (FFT) .....	172
Figure III.13 - Schéma du système de vision laser.....	174
Figure III.14 - Photographie du système de vision laser .....	175
Figure III.15 - Goniomètre .....	177
Figure III.16 - Exemple de la détermination de l'angle d'équilibre pour une éprouvette de hêtre (N3-essai 9, après 12 jours) .....	177
Figure III.17 - Brillancemètre.....	179
Figure III.18 - Endroits de détermination de la brillance spéculaire.....	179
Figure IV.1 - Surface de hêtre (H) et du pin (P), avec l'usinage au niveau 3 (N3).....	186
Figure IV.2 - Surface de hêtre (H) et du pin (P), avec l'usinage au niveau 2 (N2).....	187
Figure IV.3 - Surface de hêtre (H) et du pin (P), avec l'usinage au niveau 1 (N1).....	187
Figure IV.4 - Séquence opératoire pour l'obtention des éprouvettes .....	192
Figure IV.5 - Image de la surface, profil de <i>pseudo-rugosité</i> et courbe de puissance (FFT) pour une éprouvette de pin, obtenue avec le niveau d'usinage N1 ....	194
Figure IV.6 - Image de la surface, profil de <i>pseudo-rugosité</i> et courbe de puissance (FFT) pour une éprouvette de pin, obtenue avec le niveau d'usinage N2....	194
Figure IV.7 - Niveau de signification des facteurs pour la fréquence moyenne et la puissance moyenne des profils de <i>pseudo-rugosité</i> .....	195
Figure IV.8 - Évolution de l'angle de contact en fonction du temps pour le pin (P) et le hêtre (H) usinée avec le niveau N1 et N2 (après 1 jour) .....	197

---

---

Figure IV.9 - Influence du type de vernis dans la brillance de la surface du bois du pin et de hêtre .....	199
Figure IV.10 - Surface de hêtre (H) et du pin (P), avec l'usinage au niveau 3 (N3) .....	202
Figure IV.11 - Surface de hêtre (H) et du pin (P), avec l'usinage au niveau 2 (N2) .....	202
Figure IV.12 - Surface de hêtre (H) et du pin (P), avec l'usinage au niveau 1 (N1) .....	203
Figure IV.13 - Plan de coupe des éprouvettes de pin.....	207
Figure IV.14 - Plan de coupe des éprouvettes de hêtre.....	208
Figure IV.15 - Reproductibilité du système pour le niveau d'usinage 1, pour les trois planches de pin.....	210
Figure IV.16 - Reproductibilité du système pour le niveau d'usinage 1, pour les trois planches de hêtre .....	211
Figure IV.17 - Reproductibilité du système pour le niveau d'usinage 2, pour les trois planches de pin.....	211
Figure IV.18 - Reproductibilité du système pour le niveau d'usinage 2, pour les trois planches de hêtre .....	212
Figure IV.19 - Reproductibilité du système pour le niveau d'usinage 3, pour les trois planches de pin.....	212
Figure IV.20 - Reproductibilité du système pour le niveau d'usinage 3, pour les trois planches de hêtre .....	213
Figure IV.21 - Monitorisation d'usinage – Pin .....	214
Figure IV.22 - Monitorisation d'usinage – Hêtre.....	215
Figure IV.23 - Monitorisation d'usinage du pin et de hêtre pour le niveau 1 .....	216
Figure IV.24 - Monitorisation d'usinage du pin et de hêtre pour le niveau 2.....	216
Figure IV.25 - Monitorisation d'usinage du pin et de hêtre pour le niveau 3 .....	217
Figure IV.26 - Corrélation avec le niveau d'usinage .....	218
Figure IV.27 - Corrélation avec le grain de ponçage .....	218
Figure IV.28 - Influence du niveau d'usinage sur le $K_{ond}$ (critère d'ondulation).....	219
Figure IV.29 - Influence du niveau d'usinage sur le $K_{rug}$ (critère de rugosité).....	219
Figure IV.30 - Influence du niveau d'usinage sur l'énergie spécifique.....	219
Figure IV.31 - Influence du niveau d'usinage sur le $K_{ond}$ (critère d'ondulation).....	219

---

---

Figure IV.32 - Influence du niveau d'usinage sur le $K_{rug}$ (critère de rugosité) .....	219
Figure IV.33 - Image de la surface, profil de <i>pseudo-rugosité</i> et courbe de puissance (FFT) pour deux éprouvettes de hêtre, obtenue avec les niveaux d'usinage N1 et N3.....	221
Figure IV.34 - Influence des différents niveaux des facteurs sur le critère $K_{ond}$ (moyenne).....	221
Figure IV.35 - Influence des différents niveaux des facteurs sur le critère $K_{ond}$ (indice signal-bruit).....	222
Figure IV.36 - Influence des différents niveaux des facteurs sur le critère $K_{rug}$ (moyenne).....	222
Figure IV.37 - Influence des différents niveaux des facteurs sur le critère $K_{rug}$ (indice signal-bruit).....	222
Figure IV.38 - Moyenne et écart-type de l'angle de contact pour le pin (P) et le hêtre (H) usinée avec le niveau N1, N2 et N3 (après 88 jours).....	225
Figure IV.39 - Influence du type de vernis dans la brillance de la surface du bois du pin et de hêtre.....	226
Figure IV.40 - Évaluation subjective de la surface par les experts et les élèves (ondulation visuelle-OV et tactile-OT, rugosité visuelle-RV et tactile-RT).....	227
Figure IV.41 - Influence du niveau d'usinage dans l'évaluation subjective de la surface par les experts et élèves (ondulation visuelle-OV et tactile-OT, rugosité visuelle-RV et tactile-RT).....	228
Figure IV.42 - Évaluation subjective de la surface par les experts et les élèves .....	229
Figure IV.43 - Corrélation entre le critère objectif ( $K_{sub}$ ) et subjectif (V+T) d'évaluation de la surface .....	231
Figure IV.44 - Surface de hêtre (H) et du pin (P), avec l'usinage au niveau 3 (N3).....	236
Figure IV.45 - Surface de hêtre (H) et du pin (P), avec l'usinage au niveau 2 (N2).....	236
Figure IV.46 - Surface de hêtre (H) et du pin (P), avec l'usinage au niveau 1 (N1).....	237
Figure IV.47 - Plan pour la coupe des éprouvettes du pin et de hêtre (108 éprouvettes).....	240
Figure IV.48 - Reproductibilité du système pour le niveau d'usinage 1, pour les deux planches de pin .....	242
Figure IV.49 - Reproductibilité du système pour le niveau d'usinage 1, pour les deux planches de hêtre.....	243
Figure IV.50 - Reproductibilité du système pour le niveau d'usinage 2, pour les deux planches de pin .....	243

---

---

Figure IV.51 - Reproductibilité du système pour le niveau d'usinage 2, pour les deux planches de hêtre .....	244
Figure IV.52 - Reproductibilité du système pour le niveau d'usinage 3, pour les deux planches de pin .....	244
Figure IV.53 - Reproductibilité du système pour le niveau d'usinage 3, pour les deux planches de hêtre .....	245
Figure IV.54 - Monitorisation d'usinage – Pin .....	246
Figure IV.55 - Monitorisation d'usinage – Hêtre.....	247
Figure IV.56 - Monitorisation d'usinage du pin et de hêtre pour le niveau 1 .....	248
Figure IV.57 - Monitorisation d'usinage du pin et de hêtre pour le niveau 2 .....	249
Figure IV.58 - Monitorisation d'usinage du pin et de hêtre pour le niveau 3 .....	249
Figure IV.59 - Influence du niveau d'usinage sur le $K_{ond}$ (critère d'ondulation).....	250
Figure IV.60 - Influence du niveau d'usinage sur le $K_{rug}$ (critère de rugosité).....	250
Figure IV.61 - Influence du niveau d'usinage sur l'énergie spécifique .....	251
Figure IV.62 - Influence du niveau d'usinage sur le $K_{ond}$ (critère d'ondulation).....	251
Figure IV.63 - Influence du niveau d'usinage sur le $K_{rug}$ (critère de rugosité).....	251
Figure IV.64 - Influence du ponçage sur le $K_{ond}$ (critère d'ondulation).....	251
Figure IV.65 - Influence du ponçage sur le $K_{rug}$ (critère de rugosité) .....	251
Figure IV.66 - Image de la surface, profil de <i>pseudo-rugosité</i> et courbe de puissance (FFT) pour deux éprouvettes de hêtre, obtenue avec les niveaux d'usinage N1 et N3 .....	253
Figure IV.67 - Influence des différents niveaux des facteurs sur le critère $K_{ond}$ (moyenne) 254	
Figure IV.68 - Influence des différents niveaux des facteurs sur le critère $K_{ond}$ (indice signal-bruit).....	254
Figure IV.69 - Influence des différents niveaux des facteurs sur le critère $K_{rug}$ (moyenne) 254	
Figure IV.70 - Influence des différents niveaux des facteurs sur le critère $K_{rug}$ (indice signal-bruit).....	254
Figure IV.71 - Influence des différents niveaux des facteurs sur le critère $K_{sub}$ (moyenne) 255	
Figure IV.72 - Influence des différents niveaux des facteurs sur le critère $K_{sub}$ (indice signal-bruit).....	255

---

---

Figure IV.73 - Influence des différents niveaux des facteurs sur l'énergie spécifique consommée (moyenne).....	255
Figure IV.74 - Influence des différents niveaux des facteurs sur l'énergie spécifique consommée (indice signal-bruit) .....	255
Figure IV.75 - Influence du niveau d'usinage sur le $K_{ond}$ (critère d'ondulation).....	258
Figure IV.76 - Influence du niveau d'usinage sur le $K_{rug}$ (critère de rugosité).....	258
Figure IV.77 - Influence du niveau d'usinage sur l'énergie spécifique .....	258
Figure IV.78 - Influence du niveau d'usinage sur le $K_{ond}$ (critère d'ondulation).....	258
Figure IV.79 - Influence du niveau d'usinage sur le $K_{rug}$ (critère de rugosité) .....	258
Figure IV.80 - Influence du niveau d'usinage sur le $K_{ond}$ (critère d'ondulation).....	259
Figure IV.81 - Influence du niveau d'usinage sur le $K_{rug}$ (critère de rugosité) .....	259
Figure IV.82 - Influence du niveau d'usinage sur l'énergie spécifique .....	259
Figure IV.83 - Influence du niveau d'usinage sur le $K_{ond}$ (critère d'ondulation).....	259
Figure IV.84 - Influence du niveau d'usinage sur le $K_{rug}$ (critère de rugosité) .....	259
Figure IV.85 - Moyenne et écart-type de l'angle de contact pour le pin (P) et le hêtre (H) usinée avec le niveau N1, N2 et N3 (après 1 jour) .....	261
Figure IV.86 - Moyenne et écart-type de l'angle de contact pour le pin (P) et le hêtre (H) usinée avec le niveau N1, N2 et N3 (après 1 et 12 jours).....	263
Figure IV.87 - Moyenne et écart-type de l'angle de contact pour le pin (P) et le hêtre (H) usinée avec le niveau N1, N2 et N3 (après 1, 12 et 88 jours).....	264
Figure IV.88 - Influence du type de vernis dans la brillance de la surface du bois du pin et de hêtre.....	265
Figure IV.89 - Évaluation subjective de la surface par les experts et les élèves .....	266
Figure IV.90 - Corrélation entre le critère objectif ( $K_{sub}$ ) et subjectif d'évaluation de la surface.....	268
Figure IV.91 - Coefficient de corrélation entre le critère objectif ( $K_{sub}$ ) et l'évaluation subjective de la surface pour chaque observateur.....	269
Figure A1.1 - Détermination du coefficient d'humidité $K_h$ .....	297
Figure A1.2 - Variations des propriétés mécaniques (élastiques) du bois en fonction du pourcentage d'humidité .....	298
Figure A1.3 - Influence de la température sur les efforts de coupe $F_c$ .....	299

---

---

Figure A1.4 - Application en Labtech® - exemple d'exécution.....	300
Figure A1.5 - Application en NI LabView® - exemple d'exécution .....	301
Figure A1.6 - Application en NI LabView® - <i>VIs</i> .....	302
Figure A3.1 - Matrice de Taguchi L4 ( $2^3$ ).....	320
Figure A3.2 - Menu d'entrée de données pour une matrice L18 à l'option <i>Taguchi Arrays</i> , de l'application JMP .....	322
Figure A3.3 - Exemple de tableau de synthèse de l'ajustement effectué.....	323
Figure A3.4 - Exemple de tableau ANOVA pour le modèle global utilisé.....	323
Figure A3.5 - Exemple de tableau ANOVA par facteur.....	323

---

---

## Liste de Figures

Figure II.1 -	Structure anatomique du bois de feuillus .....	47
Figure II.2 -	Structure anatomique du bois de résineux.....	48
Figure II.3 -	Structure du bois - observations multi échelles (d'après Harrington, 1998) ..	49
Figure II.4 -	Futaie de hêtres (Auteur : Robbez-Masson, n° 2063, 31/08/2003).....	50
Figure II.5 -	Bois de hêtre ( <i>Fagus sylvatica</i> ).....	52
Figure II.6 -	a) - Plan transversale, b) - Plan radial, c) - Plan tangentiel, du hêtre ( <i>Fagus sylvatica</i> ) (Esteban L. G. et al., 2003).....	53
Figure II.7 -	Futaie de pin maritime (Origine : Académie de Rennes).....	55
Figure II.8 -	Bois de pin maritime ( <i>Pinus pinaster</i> ) .....	58
Figure II.9 -	a) - Plan transversale, b) - Plan radial, c) - Plan tangentiel, du pin maritime ( <i>Pinus pinaster</i> ) (L. G. Esteban et al., 2003) .....	59
Figure II.10 -	Principales directions d'anisotropie (a) et de coupe (b) (Kivimaa, 1950) .....	64
Figure II.11 -	Décomposition de l'effort de coupe (Koch, 1964).....	65
Figure II.12 -	Evaluations simultanées de la densité et des efforts de coupe pour le Douglas.....	66
Figure II.13 -	Evolution de l'effort de coupe $F_c$ en fonction de l'infradensité $S_{12}$ (cas du bouleau (Bétula), à 11% d'humidité usiné en mode de coupe A).....	67
Figure II.14 -	Évolutions de l'effort de coupe $F_c$ en fonction de l'humidité (cas du bouleau (Bétula), avec une infradensité $S_{12}=0,7$ ).....	69
Figure II.15 -	Influence du sens de travail de l'outil sur l'effort de coupe(d'après la thèse de Eyma, 2002) .....	70
Figure II.16 -	Les angles de l'outil de coupe .....	72
Figure II.17 -	Influence de l'angle d'attaque sur les efforts de coupe suivant les directions de coupe A, B, C (voir figure II.1) pour le cas du hêtre (à 12% d'humidité, copeau de 0,2 mm d'épaisseur, outil usé à 50%) (d'après la thèse de Eyma, 2002) .....	72
Figure II.18 -	Allure du copeau suivant les modes de coupe A, B et C (Thomas, 1984).....	74
Figure II.19 -	Copeau obtenu par fendage (d'après Koch, 1964).....	74
Figure II.20 -	Diagramme effort de coupe/temps (d'après Koch, 1964).....	75

---

---

Figure II.21 - Copeau obtenu par compression (d'après Koch, 1964).....	75
Figure II.22 - Diagramme effort de coupe/temps (d'après Koch, 1964) .....	75
Figure II.23 - Copeau obtenu par flambage (d'après Koch, 1964) .....	76
Figure II.24 - Diagramme effort de coupe/temps (d'après Koch, 1964) .....	76
Figure II.25 - Evolution de l'angle de levage $\sigma$ en fonction de l'angle de coupe $\gamma$ et de celui d'inclinaison des fibres $i$ (d'après Koch, 1964) .....	77
Figure II.26 - Le travail en opposition .....	78
Figure II.27 - 1 <sup>ère</sup> phase - flambage (d'après Koch, 1964).....	78
Figure II.28 - 2 <sup>ème</sup> phase - compression (d'après Koch, 1964) .....	78
Figure II.29 - 3 <sup>ème</sup> phase - fendage (d'après Koch, 1964).....	79
Figure II.30 - Défauts d'usinage dus à la coupe par fendage (d'après Koch, 1964).....	79
Figure II.31 - Le travail en avalant.....	80
Figure II.32 - Vue d'ensemble de la corroyeuse .....	81
Figure II.33 - Représentation conventionnelle et organes d'usinage de la corroyeuse.....	82
Figure II.34 - L'étude fonctionnelle du système de la corroyeuse.....	83
Figure II.35 - Diagramme schématique des caractéristiques de la surface(ASME B46.1, 1995).....	86
Figure II.36 - Rugosité moyenne ( $R_a$ ) .....	90
Figure II.37 - Rugosité $R_y$ défini par la rugosité partielle (à ce cas $Z_3$ ) .....	91
Figure II.38 - Diverses formes de rugosité peuvent avoir la même valeur pour $R_y$ .....	92
Figure II.39 - Rugosité $R_t$ . Distance entre le sommet le plus haut ( $p_1$ ) et le creux le plus bas ( $v_1$ ) .....	93
Figure II.40 - Rugosité partielle $Z_i$ pour définir $R_z$ .....	94
Figure II.41 - Rugosité moyenne du troisième sommet et creux ( $R_{3Z}$ ).....	95
Figure II.42 - L'obliquité ( <i>Skewness</i> ) - $R_{sk}$ .....	96
Figure II.43 - La finesse ( <i>kurtosis</i> ) - $R_{ku}$ .....	97
Figure II.44 - Buse du rugosimètre pneumatique (d'après Bonac, 1979, cité par Mothe, 1985).....	101
Figure II.45 - Principe de la mesure du frottement .....	103

---

---

Figure II.46 -	La méthode viso-tactile .....	104
Figure II.47 -	a) Déformation de la ligne de référence du filtrage Gaussien; b) Déformation résiduelle après le filtrage Gaussien (adaptée de Li et <i>al.</i> , 2004).....	108
Figure II.48 -	Références de filtrage après traitement robuste avec une fonction de pondération ADRF (X- points d'évaluation ; Y- hauteur ( $\mu\text{m}$ )) (adaptée de Li et <i>al.</i> , 2004).....	109
Figure II.49 -	L'effet de "push-up" sur un profil de rugosité, avec différentes méthodes de filtrage (adaptée de Gurau et <i>al.</i> , 2002).....	110
Figure II.50 -	Comparaison des fonctions principales d'ISO 11562 : 1996 et RGRF et leur effet sur les demi longueurs marginales du "cut-off" du profil. Longueur de profil 15 mm. (Les lignes verticales marquent le niveau de demi longueur de "cut-off" du filtre) (Adaptée de Gurau et <i>al.</i> , 2002).....	111
Figure II.51 -	Définition des paramètres $R_k$ , $R_{vk}$ et $R_{pk}$ (de la figure 1 d'ISO 13565-2, 1996).....	112
Figure II.52 -	Le modèle d'Young.....	114
Figure II.53 -	Processus de mouillabilité d'un liquide dans une surface poreuse (adaptée de Sheldon et <i>al.</i> , 2001).....	115
Figure II.54 -	L'anisotropie de l'angle de contact dans le bois .....	116
Figure II.55 -	Le triplet : illuminant - objet - observateur .....	120
Figure II.56 -	Goniospectrophotométrie - Notation des angles .....	121
Figure II.57 -	Exemple de mesures de réflexion spéculaire à 20°, 60° et 85° (pour le <i>sheen</i> ) .....	122
Figure II.58 -	Réflexion par une surface plane et par une surface rugueuse. Pic spéculaire - incidence 45°.....	122
Figure II.59 -	Schéma du mécanisme des sens humains .....	128
Figure II.60 -	Organigramme des méthodes d'analyse sensorielle.....	132
Figure III.1 -	Séquences des protocoles expérimentaux .....	151
Figure III.2 -	Diagramme cause-effet des facteurs impliqués dans la qualité de la finition	152
Figure III.3 -	Débit des éprouvettes pour les essais physico-mécaniques .....	154
Figure III.4 -	Coupe Ford n°4 .....	158

---

---

Figure III.5 -	Pycnomètre de métal (100 cm <sup>3</sup> ).....	159
Figure III.6 -	Corroyeuse instrumentée à 6 arbres.....	160
Figure III.7 -	Puissance électrique totale absorbée et vitesse de rotation instantanée.....	162
Figure III.8 -	Rapport entre l'avance par dent et la qualité de la surface usinée du bois (Adapté du manuel de l'équipement industriel réf. WEINIG) .....	166
Figure III.9 -	Rapport entre la profondeur des marques de coupe et la qualité de la surface du bois (Adapté du manuel de l'équipement industriel réf. WEINIG) .....	166
Figure III.10 -	Schéma du système de vision laser.....	168
Figure III.11 -	Photographie du système de vision laser .....	171
Figure III.12 -	Image de la surface d'une éprouvette, profil de <i>pseudo-rugosité</i> et courbe de puissance (FFT) .....	172
Figure III.13 -	Schéma du système de vision laser.....	174
Figure III.14 -	Photographie du système de vision laser .....	175
Figure III.15 -	Goniomètre .....	177
Figure III.16 -	Exemple de la détermination de l'angle d'équilibre pour une éprouvette de hêtre (N3-essai 9, après 12 jours) .....	177
Figure III.17 -	Brillancemètre.....	179
Figure III.18 -	Endroits de détermination de la brillance spéculaire.....	179
Figure IV.1 -	Surface de hêtre (H) et du pin (P), avec l'usinage au niveau 3 (N3).....	186
Figure IV.2 -	Surface de hêtre (H) et du pin (P), avec l'usinage au niveau 2 (N2).....	187
Figure IV.3 -	Surface de hêtre (H) et du pin (P), avec l'usinage au niveau 1 (N1).....	187
Figure IV.4 -	Séquence opératoire pour l'obtention des éprouvettes .....	192
Figure IV.5 -	Image de la surface, profil de <i>pseudo-rugosité</i> et courbe de puissance (FFT) pour une éprouvette de pin, obtenue avec le niveau d'usinage N1 ....	194
Figure IV.6 -	Image de la surface, profil de <i>pseudo-rugosité</i> et courbe de puissance (FFT) pour une éprouvette de pin, obtenue avec le niveau d'usinage N2....	194
Figure IV.7 -	Niveau de signification des facteurs pour la fréquence moyenne et la puissance moyenne des profils de <i>pseudo-rugosité</i> .....	195
Figure IV.8 -	Évolution de l'angle de contact en fonction du temps pour le pin (P) et le hêtre (H) usinée avec le niveau N1 et N2 (après 1 jour) .....	197

---

---

Figure IV.9 - Influence du type de vernis dans la brillance de la surface du bois du pin et de hêtre .....	199
Figure IV.10 - Surface de hêtre (H) et du pin (P), avec l'usinage au niveau 3 (N3) .....	202
Figure IV.11 - Surface de hêtre (H) et du pin (P), avec l'usinage au niveau 2 (N2) .....	202
Figure IV.12 - Surface de hêtre (H) et du pin (P), avec l'usinage au niveau 1 (N1) .....	203
Figure IV.13 - Plan de coupe des éprouvettes de pin.....	207
Figure IV.14 - Plan de coupe des éprouvettes de hêtre.....	208
Figure IV.15 - Reproductibilité du système pour le niveau d'usinage 1, pour les trois planches de pin.....	210
Figure IV.16 - Reproductibilité du système pour le niveau d'usinage 1, pour les trois planches de hêtre .....	211
Figure IV.17 - Reproductibilité du système pour le niveau d'usinage 2, pour les trois planches de pin.....	211
Figure IV.18 - Reproductibilité du système pour le niveau d'usinage 2, pour les trois planches de hêtre .....	212
Figure IV.19 - Reproductibilité du système pour le niveau d'usinage 3, pour les trois planches de pin.....	212
Figure IV.20 - Reproductibilité du système pour le niveau d'usinage 3, pour les trois planches de hêtre .....	213
Figure IV.21 - Monitorisation d'usinage – Pin .....	214
Figure IV.22 - Monitorisation d'usinage – Hêtre.....	215
Figure IV.23 - Monitorisation d'usinage du pin et de hêtre pour le niveau 1 .....	216
Figure IV.24 - Monitorisation d'usinage du pin et de hêtre pour le niveau 2.....	216
Figure IV.25 - Monitorisation d'usinage du pin et de hêtre pour le niveau 3.....	217
Figure IV.26 - Corrélation avec le niveau d'usinage .....	218
Figure IV.27 - Corrélation avec le grain de ponçage .....	218
Figure IV.28 - Influence du niveau d'usinage sur le $K_{ond}$ (critère d'ondulation).....	219
Figure IV.29 - Influence du niveau d'usinage sur le $K_{rug}$ (critère de rugosité).....	219
Figure IV.30 - Influence du niveau d'usinage sur l'énergie spécifique .....	219
Figure IV.31 - Influence du niveau d'usinage sur le $K_{ond}$ (critère d'ondulation).....	219

---

---

Figure IV.32 - Influence du niveau d'usinage sur le $K_{rug}$ (critère de rugosité) .....	219
Figure IV.33 - Image de la surface, profil de <i>pseudo-rugosité</i> et courbe de puissance (FFT) pour deux éprouvettes de hêtre, obtenue avec les niveaux d'usinage N1 et N3.....	221
Figure IV.34 - Influence des différents niveaux des facteurs sur le critère $K_{ond}$ (moyenne).....	221
Figure IV.35 - Influence des différents niveaux des facteurs sur le critère $K_{ond}$ (indice signal-bruit).....	222
Figure IV.36 - Influence des différents niveaux des facteurs sur le critère $K_{rug}$ (moyenne).....	222
Figure IV.37 - Influence des différents niveaux des facteurs sur le critère $K_{rug}$ (indice signal-bruit).....	222
Figure IV.38 - Moyenne et écart-type de l'angle de contact pour le pin (P) et le hêtre (H) usinée avec le niveau N1, N2 et N3 (après 88 jours).....	225
Figure IV.39 - Influence du type de vernis dans la brillance de la surface du bois du pin et de hêtre.....	226
Figure IV.40 - Évaluation subjective de la surface par les experts et les élèves (ondulation visuelle-OV et tactile-OT, rugosité visuelle-RV et tactile-RT).....	227
Figure IV.41 - Influence du niveau d'usinage dans l'évaluation subjective de la surface par les experts et élèves (ondulation visuelle-OV et tactile-OT, rugosité visuelle-RV et tactile-RT).....	228
Figure IV.42 - Évaluation subjective de la surface par les experts et les élèves .....	229
Figure IV.43 - Corrélation entre le critère objectif ( $K_{sub}$ ) et subjectif (V+T) d'évaluation de la surface .....	231
Figure IV.44 - Surface de hêtre (H) et du pin (P), avec l'usinage au niveau 3 (N3).....	236
Figure IV.45 - Surface de hêtre (H) et du pin (P), avec l'usinage au niveau 2 (N2).....	236
Figure IV.46 - Surface de hêtre (H) et du pin (P), avec l'usinage au niveau 1 (N1).....	237
Figure IV.47 - Plan pour la coupe des éprouvettes du pin et de hêtre (108 éprouvettes).....	240
Figure IV.48 - Reproductibilité du système pour le niveau d'usinage 1, pour les deux planches de pin .....	242
Figure IV.49 - Reproductibilité du système pour le niveau d'usinage 1, pour les deux planches de hêtre.....	243
Figure IV.50 - Reproductibilité du système pour le niveau d'usinage 2, pour les deux planches de pin .....	243

---

---

Figure IV.51 - Reproductibilité du système pour le niveau d'usinage 2, pour les deux planches de hêtre .....	244
Figure IV.52 - Reproductibilité du système pour le niveau d'usinage 3, pour les deux planches de pin .....	244
Figure IV.53 - Reproductibilité du système pour le niveau d'usinage 3, pour les deux planches de hêtre .....	245
Figure IV.54 - Monitorisation d'usinage – Pin .....	246
Figure IV.55 - Monitorisation d'usinage – Hêtre.....	247
Figure IV.56 - Monitorisation d'usinage du pin et de hêtre pour le niveau 1 .....	248
Figure IV.57 - Monitorisation d'usinage du pin et de hêtre pour le niveau 2 .....	249
Figure IV.58 - Monitorisation d'usinage du pin et de hêtre pour le niveau 3 .....	249
Figure IV.59 - Influence du niveau d'usinage sur le $K_{ond}$ (critère d'ondulation).....	250
Figure IV.60 - Influence du niveau d'usinage sur le $K_{rug}$ (critère de rugosité).....	250
Figure IV.61 - Influence du niveau d'usinage sur l'énergie spécifique.....	251
Figure IV.62 - Influence du niveau d'usinage sur le $K_{ond}$ (critère d'ondulation).....	251
Figure IV.63 - Influence du niveau d'usinage sur le $K_{rug}$ (critère de rugosité).....	251
Figure IV.64 - Influence du ponçage sur le $K_{ond}$ (critère d'ondulation).....	251
Figure IV.65 - Influence du ponçage sur le $K_{rug}$ (critère de rugosité).....	251
Figure IV.66 - Image de la surface, profil de <i>pseudo-rugosité</i> et courbe de puissance (FFT) pour deux éprouvettes de hêtre, obtenue avec les niveaux d'usinage N1 et N3 .....	253
Figure IV.67 - Influence des différents niveaux des facteurs sur le critère $K_{ond}$ (moyenne) .....	254
Figure IV.68 - Influence des différents niveaux des facteurs sur le critère $K_{ond}$ (indice signal-bruit) .....	254
Figure IV.69 - Influence des différents niveaux des facteurs sur le critère $K_{rug}$ (moyenne) .....	254
Figure IV.70 - Influence des différents niveaux des facteurs sur le critère $K_{rug}$ (indice signal-bruit) .....	254
Figure IV.71 - Influence des différents niveaux des facteurs sur le critère $K_{sub}$ (moyenne) .....	255
Figure IV.72 - Influence des différents niveaux des facteurs sur le critère $K_{sub}$ (indice signal-bruit) .....	255

---

Figure IV.73 - Influence des différents niveaux des facteurs sur l'énergie spécifique consommée (moyenne).....	255
Figure IV.74 - Influence des différents niveaux des facteurs sur l'énergie spécifique consommée (indice signal-bruit) .....	255
Figure IV.75 - Influence du niveau d'usinage sur le $K_{\text{ond}}$ (critère d'ondulation).....	258
Figure IV.76 - Influence du niveau d'usinage sur le $K_{\text{rug}}$ (critère de rugosité).....	258
Figure IV.77 - Influence du niveau d'usinage sur l'énergie spécifique .....	258
Figure IV.78 - Influence du niveau d'usinage sur le $K_{\text{ond}}$ (critère d'ondulation).....	258
Figure IV.79 - Influence du niveau d'usinage sur le $K_{\text{rug}}$ (critère de rugosité) .....	258
Figure IV.80 - Influence du niveau d'usinage sur le $K_{\text{ond}}$ (critère d'ondulation).....	259
Figure IV.81 - Influence du niveau d'usinage sur le $K_{\text{rug}}$ (critère de rugosité) .....	259
Figure IV.82 - Influence du niveau d'usinage sur l'énergie spécifique .....	259
Figure IV.83 - Influence du niveau d'usinage sur le $K_{\text{ond}}$ (critère d'ondulation).....	259
Figure IV.84 - Influence du niveau d'usinage sur le $K_{\text{rug}}$ (critère de rugosité) .....	259
Figure IV.85 - Moyenne et écart-type de l'angle de contact pour le pin (P) et le hêtre (H) usinée avec le niveau N1, N2 et N3 (après 1 jour) .....	261
Figure IV.86 - Moyenne et écart-type de l'angle de contact pour le pin (P) et le hêtre (H) usinée avec le niveau N1, N2 et N3 (après 1 et 12 jours).....	263
Figure IV.87 - Moyenne et écart-type de l'angle de contact pour le pin (P) et le hêtre (H) usinée avec le niveau N1, N2 et N3 (après 1, 12 et 88 jours).....	264
Figure IV.88 - Influence du type de vernis dans la brillance de la surface du bois du pin et de hêtre.....	265
Figure IV.89 - Évaluation subjective de la surface par les experts et les élèves .....	266
Figure IV.90 - Corrélation entre le critère objectif ( $K_{\text{sub}}$ ) et subjectif d'évaluation de la surface.....	268
Figure IV.91 - Coefficient de corrélation entre le critère objectif ( $K_{\text{sub}}$ ) et l'évaluation subjective de la surface pour chaque observateur.....	269
Figure A1.1 - Détermination du coefficient d'humidité $K_h$ .....	297
Figure A1.2 - Variations des propriétés mécaniques (élastiques) du bois en fonction du pourcentage d'humidité .....	298
Figure A1.3 - Influence de la température sur les efforts de coupe $F_c$ .....	299

---

---

Figure A1.4 - Application en Labtech® - exemple d'exécution.....	300
Figure A1.5 - Application en NI LabView® - exemple d'exécution .....	301
Figure A1.6 - Application en NI LabView® - <i>VI</i> s .....	302
Figure A3.1 - Matrice de Taguchi L4 ( $2^3$ ) .....	320
Figure A3.2 - Menu d'entrée de données pour une matrice L18 à l'option <i>Taguchi Arrays</i> , de l'application JMP .....	322
Figure A3.3 - Exemple de tableau de synthèse de l'ajustement effectué .....	323
Figure A3.4 - Exemple de tableau ANOVA pour le modèle global utilisé .....	323
Figure A3.5 - Exemple de tableau ANOVA par facteur.....	323

---

# **Chapitre I - Introduction Générale**

## **1 Structure de la thèse**

Ce rapport de thèse est organisé en quatre parties/chapitres. Après une présentation de la structure de la thèse, la première partie situe le sujet de la thèse par rapport à l'industrie du bois et en particulier à l'industrie de l'ameublement et présente les objectifs du travail.

La deuxième partie, présente une étude bibliographique des thèmes couverts par cette étude, en particulier les essences de bois, l'usinage du bois et les état de surfaces et leurs caractérisations objective et subjective.

La troisième partie se rapporte à l'approche expérimentale, dont est d'abord présentée la méthodologie, avant une caractérisation des matières premières et la description du procédé d'usinage. Les méthodes de caractérisation objective de la surface - système de vision artificielle, détermination de la mouillabilité et de la brillance spéculaire - sont ensuite développées ainsi que l'analyse subjective.

Dans cette étude, trois protocoles expérimentaux ont été mis en œuvre. Le protocole préliminaire a consisté en une première approche du problème de façon à identifier les contraintes de la méthodologie utilisée et essayer tous les équipements. Ce protocole a été modifié en tenant compte les résultats obtenus et finalement un troisième protocole a été exécuté de façon à valider les méthodes.

Ainsi, dans le chapitre 4, sont présentés et discutés les résultats, aussi que les conclusions partielles pour chacun des protocoles.

Enfin, une conclusion générale est formulée à partir des connaissances acquises pendant la réalisation de cette recherche, qui permet d'envisager de futurs développements de ce travail.

## **2 Situation du sujet**

L'évolution des moyens de production dans l'industrie du bois et la concurrence imposent des rentabilités de plus en plus élevées.

Aujourd'hui, les entreprises de l'industrie de la seconde transformation du bois sont très diversifiées en raison de la grande variété de produits qu'elles fabriquent. Ces entreprises utilisent des machines et des modes de transformation très spécialisés qui dépendent du produit à fabriquer. Ainsi, chaque machine-outil est associée à un produit ou à un élément bien déterminé, dans l'objectif de bien maîtriser les conditions d'usinage et d'augmenter la productivité en raison des coûts fixes très importants des machines. Par l'utilisation de conditions optimisées, les coûts de production liés à chaque pièce et, en conséquence, la rentabilité de la machine sont améliorés.

Les conditions de coupe sont conditionnées par le type de matériau à usiner et leur contrôle et leur maîtrise sont très importants puisque ce sont elles qui déterminent le comportement lors de la coupe, ainsi que l'état de surface final de l'usinage. Il est donc d'un grand intérêt de connaître l'interaction entre les paramètres d'usinage et la qualité de la surface usinée obtenue, pour être en mesure d'obtenir les informations nécessaires au développement de modèles, c'est à dire des équations de prévision qui permettront d'estimer la qualité finale d'une surface à partir des conditions opératoires.

Un problème fondamental de l'industrie du bois, et en particulier, dans l'industrie de l'ameublement est la relative méconnaissance de la plage des conditions de coupe permettant d'obtenir un usinage correct. On choisit souvent des valeurs moyennes de conditions de coupe et d'autre part, les machines classiques de l'industrie du bois ne possèdent que rarement la possibilité de variation de la vitesse d'avance ou de la vitesse de coupe. Les nouvelles machines à commande numérique peuvent le permettre, avec cependant un investissement nettement plus important (Aguilera, 2001).

La qualité des produits est un des soucis majeur de tous les responsables de production. Ce souci de qualité est formalisé dans le cahier des charges de chaque produit qui peut être décrit par ses dimensions, sa forme et par ses propriétés physiques et mécaniques. Les surfaces de tous les produits ou éléments doivent pouvoir être qualifiées, pour respecter une qualité d'aspect (visuel et tactile) et les qualités fonctionnelles que sont l'aptitude à recevoir un

traitement de surface (vernis) et l'aptitude à soutenir de manière optimale un usinage de finition (Jodin, 1994).

Se pose alors le problème du contrôle des états de surface des produits. Dans la plupart des cas, le contrôle est fait par l'ouvrier à la sortie de la machine. Selon Lemaster et *al.*, (1985) et Devries et *al.*, (1991), la rugosité superficielle peut être utilisée comme un moyen de contrôle de la performance du procédé d'usinage, permettant de produire des produits finis de bonne qualité qui peuvent être vendus à un prix important. Pour atteindre ces objectifs il faut avoir la compréhension des causes et des effets à l'intérieur du procédé de fabrication ainsi que posséder un critère de mesure de la rugosité.

Les matériaux d'origine biologique tels que le bois, posent des problèmes spécifiques qui sont liés à leur structure anatomique. Du fait, en particulier, de la présence des trachéides dans les bois résineux et des fibres et vaisseaux dans les feuillus, l'opération d'usinage va générer une rugosité qui sera pour partie due uniquement à la structure anatomique et plus particulièrement à la taille des éléments anatomiques.

La rugosité des surfaces fait partie des caractéristiques qui sont immédiatement perçues par l'œil ou le doigt. Dans la société actuelle, dans le secteur de l'ameublement, l'intérêt pour la thématique de l'analyse sensorielle sera de plus en plus important, du fait que pour un consommateur potentiel, l'analyse subjective de la surface d'une pièce en bois finie est un élément déterminant dans sa sélection et acquisition éventuelle. Apparaît ainsi la nécessité de faire appel, dans ce travail, aux méthodes d'analyse subjective viso tactile par un panel d'observateurs, puisqu'on prétend, à travers cette thèse, étudier les corrélations entre les conditions d'usinage du bois, la préparation de la surface et la qualité d'une finition et accéder à la compréhension de l'effet des paramètres clefs sur l'aspect objectif et la perception subjective de la finition.

### 3 Objectifs

La finition, application d'un revêtement décoratif et protecteur sur la surface d'un matériau est la dernière opération du processus de production d'un objet. La qualité d'une finition peut être mesurée par la quantification des paramètres objectifs de performances correspondant à l'utilisation de l'objet fini. Cependant, l'aspect d'une finition et sa perception par les utilisateurs sont également importants. L'aspect ne résulte pas seulement des caractéristiques techniques du produit appliqué, mais aussi des conditions de l'application. Les opérations préliminaires à la finition : usinage et préparation de la surface ont aussi une influence sur l'aspect final.

Un des objectifs de ce travail est d'étudier les corrélations entre les conditions d'usinage du bois, la préparation de la surface et la qualité d'une finition et d'accéder à la compréhension de l'effet des paramètres clefs sur l'aspect objectif et la perception subjective de la finition. La qualification de l'état de la surface a été réalisée d'une part par une approche objective, d'autre part par une approche subjective. La caractérisation objective de la surface a été obtenue par des mesures de la mouillabilité, de la brillance et de la *pseudo-rugosité*. Un système de vision artificielle a été utilisé pour la détermination de la *pseudo-rugosité* des surfaces de bois. L'évaluation de la perception de l'état de la surface et de la qualité subjective d'une finition a été effectuée à travers de méthodes de perception visuelle et tactile (panel d'observateurs) à partir d'enquêtes auprès d'un échantillonnage d'utilisateurs experts et non experts.

Il sera alors possible d'obtenir les informations nécessaires pour le développement de modèles, c'est à dire des équations de prévision, qui permettront d'estimer la qualité finale d'une surface à partir des conditions opératoires. La connaissance et l'expérience acquise seront employées afin d'élaborer une liste de recommandations qualitatives qui permettent de meilleures pratiques opératoires et une meilleure conception de l'équipement utilisé.

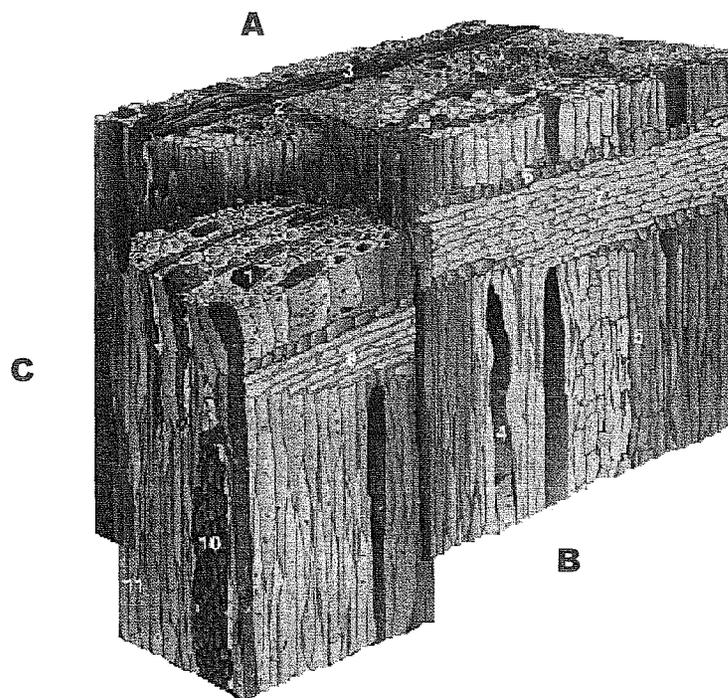
L'objectif final de cette étude est l'optimisation des opérations industrielles engagées dès l'usinage jusqu'à la finition d'un produit en bois. Les résultats peuvent avoir un grand impact en termes pratiques par rapport à l'approche empirique des choix types de produit/usinage qui est réalisée dans l'industrie, du fait de l'absence d'un support scientifique et technologique.

## **Chapitre II - Étude Bibliographique**

## 1 Essences

### 1.1 Les feuillus (Angiospermes)

Ils représentent le groupe végétal le plus diversifié qui réunit les plantes à fleurs, dont la grande majorité sont des plantes herbacées et des arbres. On dénombre environ 240 000 espèces dont les 2/3 vivent dans un climat tropical. Pour le tiers restant, elles se sont quasiment adaptées à tous les types d'environnement, à l'exception des régions polaires, du sommet des hautes montagnes et de certains déserts. On trouve dans les zones tempérées de nombreux feuillus comme le Charme, le Chêne, le Hêtre, le Merisier, les Peupliers, le Robinier, etc. On les reconnaît par la forme de leurs feuilles qui sont couramment plates, minces et larges d'où leur appellation de bois feuillus. En général dans les zones tempérées ces arbres perdent leurs feuilles en hiver. A l'échelle microscopique, la structure anatomique du bois de feuillus présente une grande diversité dont le caractère essentiel est la présence de vaisseaux (figure II.1).



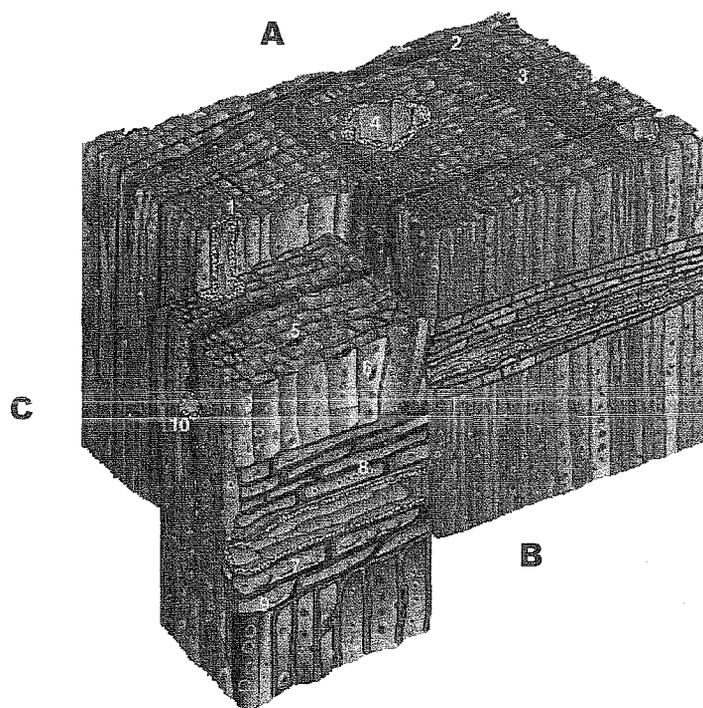
A - **Section transversale** : 1 - vaisseau; 2 - parenchyme longitudinal; 3 - rayon ligneux; B - **Section radiale** : 4 - élément vassal; 5 - parenchyme longitudinal; 6 - cellules droites; 7 - cellules procumbentes; 8 - rayon ligneux hétérogène; 9 - fibres-trachéïdes; C - **Section tangentielle** : 10 - rayon ligneux plurisériel; 11 - fibres-trachéïdes. (Esteban L. G. et al., 2003)

Figure II.1 Structure anatomique du bois de feuillus

Le stade d'évolution des Angiospermes est supérieur à celui des Gymnospermes car deux types cellulaires se partagent les deux fonctions de soutien (fibres) et de conduction de la sève brute (vaisseaux).

## 1.2 Les résineux (Gymnospermes)

Ils regroupent environ 700 espèces qui vivent pour la grande majorité en groupe et forment de grandes forêts. Les Gymnospermes se subdivisent en 7 classes, dont celle des Conifères qui représente environ les 3/4 soit 550 espèces comme l'Epicéa commun, le Pin maritime, le Sapin pectiné, le Séquoia, etc. On les reconnaît par la forme de leurs feuilles. Ce sont des aiguilles ou écailles résineuses (d'où leur appellation courante de bois résineux) qui, sauf exception, persistent tout au long de l'année. A l'échelle microscopique, la structure anatomique du bois de résineux est simple, uniforme et régulière. Le bois de résineux est principalement constitué de trachéides qui assurent la double fonction de soutien et de conduction de la sève brute (figure II.2).



A - **Section transversale** : 1 - canal résinifère longitudinale; 2 - rayons ligneux; 3 - trachéides longitudinales; 4 - cellules épithéliales résinifères; 5 - section de ponctuation aréolée; B - **Section radiale** : 6 - ponctuations aréolées en trachéides longitudinales; 7 - ponctuations type simple; 8 - trachéides radiales; 9 - cellules du parenchyme radial; C - **section tangentielle** : 10 - canal résinifère transversale. (Esteban L. G. et al., 2003)

Figure II.2 Structure anatomique du bois de résineux

### 1.3 Structure de la paroi cellulaire et composition chimique

Le bois est constitué d'holocellulose (cellulose et hémicelluloses) et de lignines, sa composition varie selon les genres et les espèces feuillues ou résineuses. Dans une proportion beaucoup plus faible, les fibres de bois contiennent aussi des extractibles, des protéines et certains composés inorganiques (Rowell *et al.*, 1997). Chaque fibre se présente sous la forme d'un composite multicouches dans lequel la lignine joue le rôle d'une matrice enrobant un élément structurant très rigide qu'est la cellulose. Contrairement aux autres composantes des fibres qui possèdent une structure amorphe, la cellulose possède une structure en grande partie cristalline. La cellulose cristalline est l'un des polymères ayant le module d'élasticité le plus élevé, soit environ 136 GPa à comparer aux 75 GPa de la fibre de verre. Cette rigidité provient de la structure cristalline qui suit un agencement supramoléculaire hélicoïdal très ordonné. Il est important de noter que cette structure moléculaire particulière entraîne lors d'une elongation des fibres, un couplage torsion/traction qui peut avoir des conséquences sur l'interface, sur la déformation ou sur les mécanismes de rupture du matériau. A l'intérieur de la fibre, les chaînes cellulosiques sont réunies en micro fibrilles qui en s'agglomérant forment des fibrilles sur plusieurs couches (figure II.3).

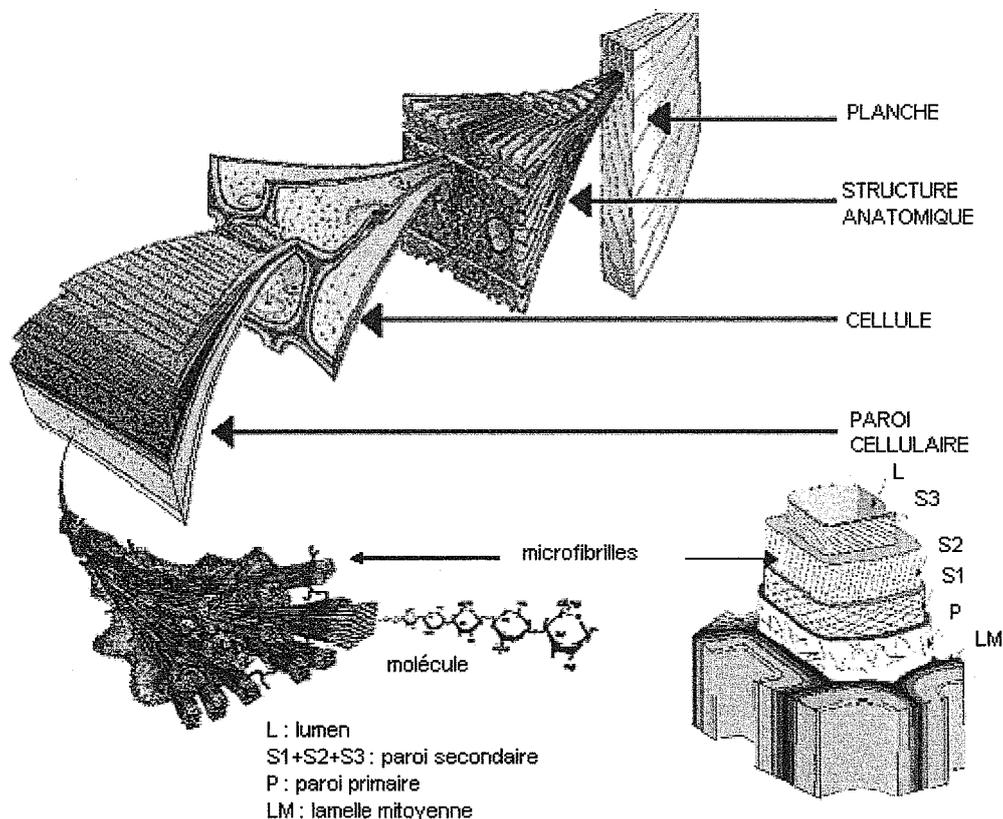


Figure II.3 Structure du bois - observations multi échelles (d'après Harrington, 1998)

Dans la structure de la paroi cellulaire nous pouvons distinguer trois couches, la lamelle mitoyenne, la paroi primaire et la paroi secondaire (figure II.3).

La lamelle mitoyenne, aussi appelée couche intercellulaire, est disposée entre deux cellules adjacentes et est constituée principalement de lignine (environ de 80%) et d'hémicelluloses. La cellulose est pratiquement ou totalement absente de sa constitution (Forest Products Laboratory, 1999). La seconde couche, la paroi primaire a une lignification particulièrement forte et contient une quantité considérable d'hémicelluloses. Selon Kollmann et Côté (1984), dans cette couche la teneur en cellulose est relativement basse en ne dépassant pas les 20 à 25%. Finalement la paroi secondaire est formée presque exclusivement par de la cellulose bien qu'elle puisse contenir de petites quantités d'hémicelluloses et de lignine. La paroi secondaire est constituée de trois couches, appelées *S1*, *S2* et *S3*, avec différentes orientations selon les différents angles que les micro fibrilles de cellulose font avec l'axe de la cellule.

L'angle qui existe entre ces éléments très structurés et l'axe de la fibre conditionne la rigidité de la fibre (Pavithran et *al.*, 1987 ; Mukhersee et Satyanarayana, 1986). Les liaisons hydrogènes qui s'établissent le long et entre les chaînes cellulosiques sont à la base des bonnes propriétés des fibres cellulosiques (English et *al.*, 1994). Ce sont ces différences, constitutives ainsi qu'anatomiques, qui vont donner la grande variabilité des propriétés physico-mécaniques des fibres naturelles (Rowell et *al.*, 1997 ; Banks et Lawther, 1994).

#### 1.4 Le hêtre (*Fagus sylvatica* L.)

Le *Fagus sylvatica* ou Hêtre Commun (figure II.4), existe à l'état spontané en Europe.



Figure II.4 Futaie de hêtres (Auteur : Robbez-Masson, n° 2063, 31/08/2003)

On peut classer les hêtres en trois groupes, selon leur répartition géographique : les hêtres d'Europe, ceux d'Amérique du Nord et ceux d'Extrême-Orient. La famille des Fagacées est la plus importante pour la production des bois feuillus de climat tempéré.

Les appellations synonymes courantes sont Fayard, fau, faou et fouteau.

### *Aire de répartition*

Le hêtre habite l'Europe occidentale, depuis environ le 60° parallèle nord correspondant au sud de la Suède et à la Baltique, jusqu'à la Méditerranée, et de la côte Atlantique à la Pologne et à la Russie occidentale. Il est abondant en Hollande, Danemark, Allemagne, Suisse, Autriche, Tchécoslovaquie et dans les Balkans, en Yougoslavie et Roumanie. Les plus beaux peuplements de hêtres se trouvent dans les Carpathes, vestiges d'anciennes forêts vierges. Dans les régions méridionales il est relégué en montagne.

### *L'arbre et la grume*

Le hêtre est un arbre de haute taille (30 à 40 m à la cime), avec un fût très droit et très cylindrique, ne présentant pratiquement jamais de gourmands, contrairement au chêne. Le diamètre du tronc peut atteindre et dépasser 1,30 m à la base, lorsque l'arbre est adulte.

Les grumes de hêtre sont en général bien conformées, assez droites, de section bien circulaire et de bonne longueur (6 à 15 m). Le diamètre est moyen (0,40 m) à fort (0,90 m à 1,00 m).

Leurs défauts sont moins nombreux et moins fréquents que ceux des grumes de chêne. Les gélivures, cadranure et roulures sont rares, de même que la fibre torse. Le principal défaut du hêtre est le « cœur rouge ». Il est la conséquence d'une réaction physiologique à l'attaque de champignons qui ne sont pas identifiés actuellement et, par opposition avec le duramen des essences à aubier distinct, il se reconnaît à son contour irrégulier et non pas sensiblement circulaire. Il ne se traduit pas par une altération de la structure chimique du bois, mais les vaisseaux du cœur rouge sont anormalement obstrués par des thylles et des résines, ce qui rend cette partie du bois réfractaire à l'imprégnation et, en conséquence, impropre par exemple à la fourniture de traverses de chemin de fer ou à la fabrication de bois imprégné bakéliné. De plus le « cœur rouge » du hêtre est plus nerveux et plus fragile aux chocs, bien qu'il soit aussi résistant aux charges statiques que le hêtre normal. C'est un défaut qui affecte

souvent les arbres âgés, il est également plus fréquent chez les hêtres de haute futaie que chez ceux de taillis sous futaie.

Les contraintes internes de croissance sont souvent présentes, et parfois intenses, dans le hêtre sur pied. Elles peuvent provoquer des éclatements brutaux lors de l'abatage ou au tronçonnage des grumes. Elles entraînent également des difficultés au sciage, avec risque d'éclatement des plateaux débités ou de déformations brusques.

### 1.4.1 Description du bois - aspect et propriétés

#### *Aspect du bois*

Le bois de hêtre est homogène (figure II.5), sans aubier distinct, de teinte mate allant du blanc grisâtre au rosé clair, parfois marqué de plages rougeâtres au cœur. Il est à grain très fin et de fil droit. Les cernes annuels sont peu distincts, marqués seulement en fin d'accroissement de fibres, en section transversale leur contour apparaît finement arqué entre les rayons les plus épais, sur lesquels s'appuient ces arcs concaves.

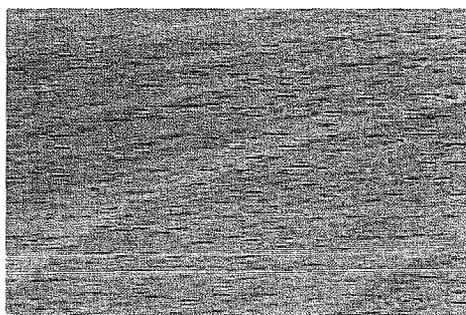


Figure II.5 Bois de hêtre (*Fagus sylvatica*)

Les rayons ligneux (figure II.6), sont de tailles très inégales, en majorité très fins, unisériés et seulement visibles à la loupe en section transversale, d'autres sont assez épais ou très épais (jusqu'à 1 mm) et longs de 1 à 4 ou 5 mm, donnant en section radiale une maillure brillante, plutôt lâche et inégale. Leurs sections orthogonales apparaissent sur dosse comme de petites lentilles plus colorées sur le fond du bois, de hauteur et d'épaisseur très variables, bien caractéristiques de l'essence.

Les vaisseaux (figure II.6), invisibles à l'œil nu, sont diffus, un peu plus nombreux et un peu plus gros au début de l'accroissement.

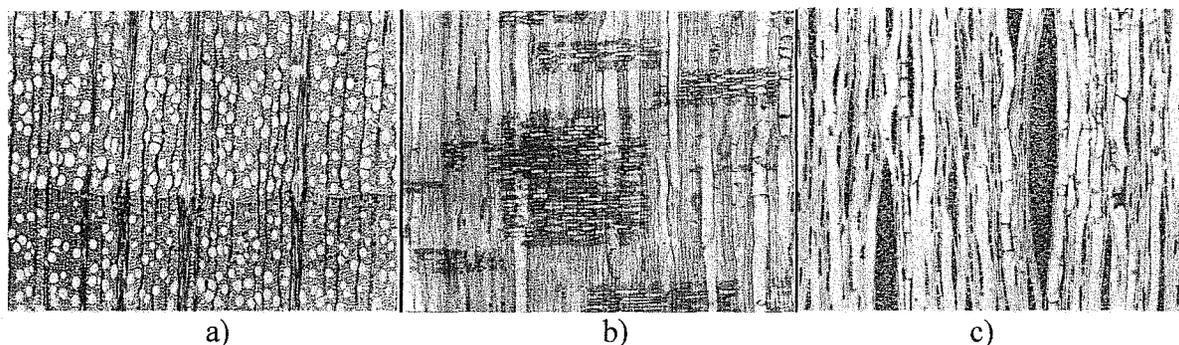


Figure II.6 a) - Plan transversale, b) - Plan radial, c) - Plan tangentiel, du hêtre (*Fagus sylvatica*) (Esteban L. G. et al., 2003)

Les arbres dont le houppier est bien développé, isolés ou en réserve de taillis sous futaie, ont une croissance plus rapide et fournissent un bois plus tendre, à retrait moyen et peu nerveux, et en général exempt de contraintes internes de croissance. C'est un bois « doux » où la proportion des vaisseaux par rapport aux fibres est importante. Au contraire, les arbres qui sont dominés dans les peuplements, à croissance lente, dont le houppier est réduit par l'environnement, développent relativement peu de tissu vasculaire par rapport aux fibres (structure forte) et leur bois est dur et nerveux, avec des contraintes internes importantes.

Le hêtre présente assez souvent du bois de tension, dont les fibres héli-cellulosiques entraînent un retrait longitudinal anormal, cause de fentes importantes et de déformations.

### ***Propriétés physiques***

Bois mi-lourd à lourd et dur, dont la masse volumique est comprise entre 600 et 700 kg/m<sup>3</sup> à 12% d'humidité et varie avec les conditions de végétation. Les bois les plus lourds et les plus durs sont habituellement fournis par les arbres à croissance lente.

Le retrait total en volume est souvent élevé (entre 18 et 22%) et la nervosité est généralement forte, de 0,60 à 0,70%, le point de saturation des fibres étant aux environs de 30%. Mais tous deux varient suivant les conditions de croissance et la provenance : les terrains calcaires de l'est de la France fournissent des hêtres « doux », à bois clair, relativement léger et facile à travailler, à retrait modéré ; ils sont plus nerveux sur les sols siliceux. Le hêtre de Pyrénées ou de Corse est plus dense, souvent difficile à utiliser à cause de son fort coefficient de rétractibilité, pouvant atteindre 0,25% dans le sens radial et 0,55% dans le sens tangentiel, pour une variation de 1% de l'humidité du bois.

***Durabilité naturelle – Imprégnabilité***

Le hêtre est non durable, prompt à s'échauffer et à pourrir en milieu humide, mais il peut être facilement imprégné dans toute sa masse par les produits de préservation, en raison de sa forte porosité (sauf le cœur rouge). Comme pour tous les feuillus à bois homogène et à grain fin, le faible diamètre des vaisseaux ne permet par la ponte du lyctus. Mais il peut être attaqué par les vrillettes s'il n'a pas été traité préventivement.

***Caractéristiques mécaniques***

Les caractéristiques mécaniques du hêtre sont bonnes, eu égard à la densité, notamment dans le sens axial, en compression, traction et flexion. Cependant, il est plutôt raide et parfois cassant, ce qui peut résulter quelque fois d'une échauffure ou encore d'un séchage trop brutal à température élevée. Il casse alors sous une flèche réduite, ce qui le fait écarter des emplois en charpente. Adhérent et peu fissile, il résiste bien au cisaillement longitudinal.

Les valeurs qui sont indiquées ci-après (tableau II.1) correspondent à des éprouvettes normalisées sans aucun défaut et de faibles dimensions.

Tableau II.1 Caractéristiques physiques et mécaniques du hêtre (à 12% d'humidité) (d'après Martin, 1983 - A.R.B.O.L.O.R)

<b>Caractéristiques</b>	<b>Moyennes</b>
Masse volumique [kg/m <sup>3</sup> ]	680
Retrait linéaire total tangentiel [%]	12
Retrait linéaire total radial [%]	6
Résistance en compression axiale [MPa]	54
Flexion statique [MPa]	152
Module d'élasticité longitudinal [MPa]	14 000
Résistance en traction transversale [MPa]	4,5
Cisaillement longitudinal [MPa]	9
Energie de rupture dynamique de l'éprouvette normalisée [J]	35

***Usinage***

Les conditions favorables pour le sciage du bois sec, à la scie circulaire, notamment pour le délignage, sont intermédiaires entre celles qui conviennent pour les bois tendres les plus

fermes (pour les hêtres « doux » de Haute Marne par exemple) et celles appropriées aux bois durs (pour les hêtres des Pyrénées). Par rapport aux premiers, il convient, pour les seconds, de réduire l'angle d'attaque de la denture, de diminuer la voie et de réduire aussi un peu la vitesse de coupe. Avec son grain fin, homogène et de fil régulier, le hêtre est l'un des bois indigènes qui permet de réaliser la meilleure qualité de surface et la plus grande précision de profil au rabotage, au moulurage et au toupillage, comme lors du tenonnage, du mortaisage ou du perçage. Il se travaille très bien à la défonceuse, l'angle de bec de la mèche devant être sensiblement plus fort que pour le travail en bois tendre, de préférence de 25 ou 30°.

### ***Finition***

La grain homogène permet de réaliser un ponçage très fin. Assez absorbant, le hêtre prend bien et uniformément la teinte, les colorants à l'eau étant plutôt conseillés. Les finitions façon acajou, merisier, noyer, palissandre, etc. sont courantes. Toutefois, pour ces imitations, on devra éviter les grandes surfaces sur quartier, la fixation moindre de la teinte par les rayons ligneux faisant alors ressortir la maille par rapport au fond.

Le bois peut être verni directement, sans bouche-porage, mais, pour le laquage il faut appliquer d'abord une couche d'apprêt précédant l'application de deux couches successives de laque, après ponçage soigneux de l'enduit d'apprêt.

## **1.5 Le pin maritime (*Pinus pinaster*)**

Les Pinacées (figure II.7), constituent de très loin la famille des Conifères la plus importante pour la production du bois.



Figure II.7 Futaie de pin maritime (Origine : Académie de Rennes)

On y trouve les essences qui fournissent les bois résineux les plus utilisés dans le monde entier : les pins, les épicéas, les sapins, les hemlocks, les mélèzes, les cèdres. Cependant, les bois de toutes ces espèces diffèrent et n'ont entre eux qu'un nombre limité de caractères communs, en dehors de ceux qui sont propres aux bois de tous les conifères. C'est à dire que la famille des Pinacées est assez hétérogène en ce qui concerne le bois, si on la compare aux autres familles de conifères.

L'appellation « Pin de Landes » est réservée, en France, au pin maritime de la côte de Gascogne.

### *Aire de répartition*

Le pin maritime est une essence spontanée dans tout le bassin de la Méditerranée occidentale. A l'état naturel, on le rencontre en France dans les massifs des Maures et de l'Estérel, ainsi que dans les basses montagnes du Var et des Alpes-Maritimes. Il est commun en Corse, ainsi qu'en Espagne, au Portugal et en Italie. Il est plus rare en Afrique de Nord (région de Bône en Algérie et dans le Moyen Atlas au Maroc).

Mais son aire de végétation a été fortement étendue par plantation. En France d'abord, principalement dans les Landes de Gascogne, puis tout le long de la côte Atlantique, des Pyrénées à la Bretagne. Le pin maritime a été choisi en raison de son fort enracinement traçant, qui assure une bonne fixation du sable des dunes du littoral et parce qu'il s'accommode de sols pauvres, pourvu qu'ils ne soient pas calcaires.

La forêt portugaise, en 1999, présentait une surface forestière de 3.2 millions d'hectares, soit 36 % de la surface totale. Cette surface forestière est partagée entre les propriétaires privés (85,4%), les collectivités locales (11,9%) et l'état (2,7%).

Le pin maritime représentait, en 1999, une surface forestière de 1.027 millions d'hectares (1.249 millions d'hectares en 1992), soit 32 % de la surface forestière. Les peuplements de pin sont aujourd'hui en forte diminution au profit de l'Eucalyptus, et ceci pour des raisons économiques. Il est cultivé soit en peuplement pur, soit en peuplement mixte avec l'eucalyptus. On le trouve essentiellement cultivé dans le nord et le centre du Portugal, et plus rarement dans le sud où les chênes prédominent.

### *L'arbre et la grume*

L'arbre est de taille moyenne (15 à 25 m), de croissance rapide et de longévité assez faible.

Les rameaux portent de longues aiguilles (15 à 20 cm), épaisses et rigides, d'un vert foncé luisant. Elles sont groupées par deux dans une même gaine d'insertion sur le rameau. Les cônes du pin maritime sont volumineux (10 à 18 cm de longueur), couleur brun luisant, courtement pédonculés. L'écorce du pin maritime est d'un rouge violacé sombre, noirâtre en surface et profondément gercée et très écaillée à la base du fût, où elle ressemble à celle du pin sylvestre, en plus grossier et plus épais.

Sur la découpe, le bois apparaît avec un aubier distinct, blanc-jaune, souvent très large et un duramen beaucoup plus coloré, rougeâtre clair. Dans les arbres gemmés, le duramen est très résineux, de couleur rouge et la texture est plus forte. La section des grumes fraîchement abattues est très résineuse et l'odeur caractéristique de térébenthine du pin maritime est forte et persistante.

Les défauts des grumes que l'on est le plus à même de rencontrer sont d'abord les nœuds, verticillés, souvent assez gros et nombreux, puis les défauts de rectitude et la décroissance assez forte, qui conduisent à les tronçonner en faibles longueurs (à partir de 2 m), ensuite les poches de résine, l'excentricité de la moelle, les veines rouges de bois de compression et, surtout le bleuissement de l'aubier. L'échauffure et diverses pourritures du cœur sont assez fréquentes chez les arbres qui sont conservés sur pied au-delà de leur âge normal d'exploitation, c'est à dire après 75 ou 80 ans.

#### **1.5.1 Description du bois - aspect et propriétés**

##### *Aspect du bois*

Le duramen du pin maritime est rougeâtre à rouge-brun clair, habituellement assez résineux. Les cernes sont nettement tranchés, en général plutôt larges, parfois très larges, jusqu'à 10 mm. Le grain est donc, la plupart du temps, assez grossier et la structure très hétérogène (figure II.8).



Figure II.8 Bois de pin maritime (*Pinus pinaster*)

L'aubier est abondant, blanc-jaune, avec un veinage de bois final de teinte rouille. Il est facilement sujet au bleuissement en milieu humide.

On peut assez facilement distinguer le bois du pin maritime de celui des autres pins par les caractères suivants :

- le duramen est habituellement plus coloré que celui de la plupart des autres pins, si ce n'est le pin laricio et le pitchpin. Les zones de bois final sont généralement larges et contrastées par rapport au bois initial, mais la transition à partir de ce dernier est un peu moins tranchée que chez le pin sylvestre. Le veinage, plus foncé, est bien apparent, ramageux sur dosse, en bandes rectilignes et parallèles sur quartier ;
- les canaux résinifères (figure II.9) sont nombreux, gros ou très gros, isolés et bien visibles à l'œil nu. En section transversale, ils apparaissent comme des points blanchâtres, localisés surtout à la limite entre zones initiale et finale. En sections longitudinales, dosse ou quartier, ils sont également très visibles, comme des lignes brunes, droites et assez courtes. Le bois est généralement assez résineux, parfois très résineux, et possède une odeur bien caractéristique de térébenthine, forte à l'état frais et persistant longtemps après séchage ;
- certains rayons ligneux renferment un canal résinifère transversal microscopique (figure II.9), comme chez les autres pins, mais chez le pin maritime, cela fait apparaître sur quartier une faible maillure foncée plus ou moins espacée.

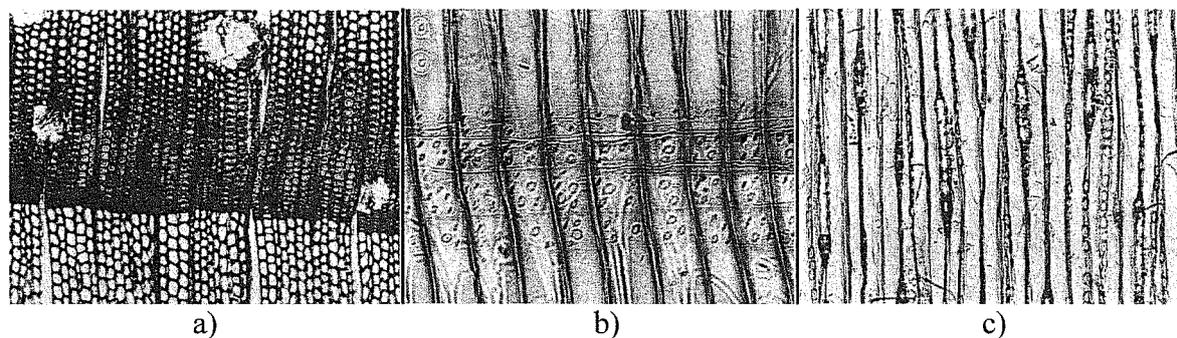


Figure II.9 a) - Plan transversale, b) - Plan radial, c) - Plan tangentiel, du pin maritime (*Pinus pinaster*) (L. G. Esteban et al., 2003)

Le fil est droit, dans l'ensemble, mais souvent dévié ou interrompu par les nœuds, en général assez gros et nombreux, groupés en verticilles.

Le bois des arbres qui ont été gemmés est plus coloré et plus dense, avec des zones de bois final épaisses et foncées. Il est toujours imprégné de résine qui lui donne sa teinte rougeâtre, parfois même l'aspect de la corne, tout comme certains sciages de pin laricio ou pitchpin résineux. On peut aussi reconnaître le pin maritime gemmé à la largeur inégale des cernes, qui sont plus serrés pendant les années de gemmage.

### *Propriétés physiques*

La masse volumique du pin maritime est très variable avec les conditions de croissance, entre 450 et 650 kg/m<sup>3</sup> à 12% d'humidité (en moyenne 550). Mais les bois gemmés peuvent être beaucoup plus denses, jusqu'à 750 kg/m<sup>3</sup>. Comparativement au pin sylvestre, la densité du pin maritime est du même ordre ou légèrement supérieure, bien que la croissance soit plus rapide. C'est que, pour cette essence, la texture, dont dépend la densité, paraît moins directement liée à la largeur des cernes que pour la plupart des autres conifères, notamment pour le pin sylvestre.

La dureté est fonction de la densité, faible à moyenne. Mais étant donné la largeur et l'irrégularité des cernes, il existe des différences importantes suivant les échantillons et entre l'aubier et le duramen, l'indice de dureté normalisé N variant de 2 à 5. Bien que pouvant être encore considéré comme un bois tendre ou au plus mi-dur, la dureté du pin maritime est suffisante pour son utilisation en parquet, de préférence au pin sylvestre.

Le retrait total en volume est moyen, seulement un peu supérieur à celui du pin sylvestre, ce qui permet l'utilisation du pin maritime en bois rond (poteaux par exemple) sans risques

importants de fente. Mais, comme le point de saturation est assez bas, il se révèle plus nerveux en service (coefficients de rétractibilité : en volume 0,40 à 0,50%, radial 0,15 à 0,25% et tangentiel 0,25 à 0,35%).

### ***Durabilité naturelle – Imprégnabilité***

La résistance naturelle du duramen du pin maritime à l'attaque des agents biologiques est assez bonne, les bois rouges, résineux, et les bois gemmés se montrant les plus résistants. Mais l'aubier est abondant et ne peut être éliminé. Il est très altérable, sujet au bleuissement, comme à l'échauffure et à la pourriture. Un trempage des sciages frais dans un produit «anti-bleu» en solution aqueuse permet de protéger temporairement l'aubier contre les dyscolorations et éventuellement la piqûre noire durant leur séchage naturel à l'air ; mais un traitement ultérieur insecticide préventif des pièces de charpente ou d'ossature s'impose avant leur mise en œuvre pour les protéger contre les attaques du capricorne. Il peut être aussi recommandé pour les lames de parquet. Ce traitement est facile à réaliser, éventuellement par simple trempage, étant donnée la bonne perméabilité de l'aubier. Quant au duramen, il n'est que peu ou moyennement imprégnable, sous vide et pression.

### ***Caractéristiques mécaniques***

Les caractéristiques mécaniques du pin maritime varient selon la densité, laquelle est fonction des conditions de croissance, de la largeur moyenne des cernes (ou «grain») et de la texture. Les résistances à la rupture et le module d'élasticité, déterminés sur des éprouvettes normalisées de petites dimensions en bois sans défaut, sont élevés, assez souvent supérieurs à ceux obtenus avec le pin sylvestre, notamment en compression axiale. Les échantillons les plus denses de pin maritime ont même des caractéristiques mécaniques qui seraient comparables à celles du mélèze de montagne et même supérieures, pour les bois gemmés de très forte densité.

Cependant, en pratique, dans les pièces de dimensions et choix courants du commerce, les nœuds ou la pente de fil réduisent fortement les contraintes de travail admissibles, en particulier en traction axiale ou en flexion selon le fil. D'autre part le pin maritime est moins élastique et plus cassant que le pin sylvestre tout en étant moins fissile (voir tableau II.2).

Tableau II.2 Caractéristiques physiques et mécaniques du pin maritime (à 12% d'humidité) (d'après Martin, 1983 - A.R.BO.LOR)

<b>Caractéristiques</b>	<b>Moyennes</b>
Masse volumique [kg/m <sup>3</sup> ]	620
Retrait linéaire total tangentiel [%]	9
Retrait linéaire total radial [%]	6
Résistance en compression axiale [MPa]	54
Flexion statique [MPa]	130
Module d'élasticité longitudinal [MPa]	11 500
Résistance en traction transversale [MPa]	2,4
Cisaillement longitudinal [MPa]	6
Energie de rupture dynamique de l'éprouvette normalisée [J]	14

### *Usinage*

L'usinage du pin maritime en bois sec n'offre pas de difficultés, le matériau étant assez tendre et non abrasif. Cependant la fréquence des nœuds, plutôt durs, peut amener à renforcer l'angle de bec des dentures de scies à déligner, au détriment de l'angle d'attaque, par comparaison avec le profil qui convient pour le sciage longitudinal des bois tendres, plus homogènes.

Au tronçonnage, en coupe de finition, la denture doit être fine, avec un pas inférieur à 15 mm, un léger angle d'attaque et un biseau frontal alterné.

Pour rabotage, les caractéristiques de l'outil seront celles adoptées en général pour les bois tendres ou mi-durs, sans qu'il soit nécessaire de ménager de contre-biseau, comme pour les bois à fort contre-fil, bien que les irrégularités du fil à proximité des nœuds puissent entraîner quelques arrachements de fibres ou éclats. Les vitesses d'aménage seront toutefois plus faibles que pour le sapin, l'épicéa ou le pin sylvestre.

### *Finition*

La finition dépend beaucoup de la structure. Lors de la préparation des surfaces des ouvrages en pin maritime, si on pratique un ponçage, même à grain moyen, le papier abrasif peut s'encrasser assez vite et s'échauffer à cause de la résine. On recommande un passage légèrement oblique par rapport au fil, d'autant que les emplois habituels du pin maritime requièrent assez rarement un ponçage très fin, sauf pour le meuble. Le peinture, comme le

vernissage en bois apparent donnent d'assez bons résultats, lorsque le matériau n'est pas trop hétérogène (grain moyen). Par ailleurs le pin maritime s'imprègne assez bien aux lasures.

La présence de résine à la surface du bois peut contrarier le mouillage lors de l'application de la couche d'impression ou de la première couche de vernis, si le produit utilisé ne comporte pas un solvant de la résine. Mais c'est surtout ultérieurement, par exposition au soleil ou à une autre source de chaleur, que les inconvénients de la résine peuvent surtout se manifester. Celle-ci, fluidifiée par la chaleur, est expulsée par la dilatation de l'air inclus dans le bois et elle forme des cloques sous le film de peinture ou de vernis qu'elle ramollit. Elle peut même exsuder en coulées jaunâtres. Ce sont surtout les pièces dites en bois rouge ou celles à veine colorée, ou bien encore celles présentant de gros nœuds ou des poches de résine, qui donnent lieu à ces inconvénients. Ceux-ci sont d'ailleurs pratiquement supprimés lorsque le bois a été au préalable séché à plus de 70°C. A défaut, le brûlage de la surface à la lampe à souder réduit les risques d'exsudation ultérieure (le nettoyage de la surface au solvant est possible, mais donne souvent de moins bons résultats en raison de l'étalement de la résine au lieu de son élimination complète).

De toute manière, il est préférable d'écarter, pour la peinture ou le vernissage, les pièces en bois rouge, très résineux, à toucher «gras».

## 2 Usinage du bois

Le matériau bois est un mélange hétérogène et complexe de polymères, composés de cellulose, d'hémicellulose et de lignine. Les caractéristiques de la surface sont influencées par plusieurs facteurs intrinsèques du matériau tels que la morphologie des polymères, la densité, la texture, les extraits, l'humidité et également par les conditions d'usinage (Côté, 1983). L'état de la surface dépend fondamentalement de la structure du bois et de l'usinage et a un effet important dans la sélection, l'application et la vie en service des finitions (Williams et *al.*, 1996). La préparation des surfaces pour la réception des produits de finition est effectuée après la conclusion des opérations de définition géométrique des surfaces, par l'usinage avec des outils de forme géométrique globale cylindrique (corroyeuse) et l'atténuation essentielle des irrégularités par des "outils" abrasifs (ponçage).

Bien sûr, une préparation déficiente est une cause habituelle des défauts de finition. Elle se traduit par des irrégularités inévitables du film protecteur que les produits de revêtement doivent constituer. Il peut alors se produire qu'un produit d'excellente qualité mène à des échecs si la surface de support n'est pas préparée dans de bonnes conditions. L'état de la surface du bois après l'usinage (corroyeuse, ponçage) peut donc influencer l'aptitude de la surface à la réception des produits de finition (Coelho et *al.*, 2004, 2005a et 2005b).

L'automatisation du processus de ponçage a été limitée essentiellement par l'absence d'informations sur l'effet des paramètres clefs de l'opération et leurs interactions (Taylor et *al.*, 1999; Carrano, 2000 et 2004). Le nombre élevé de paramètres de l'opération et l'interdépendance existant entre eux, rendent l'étude de l'influence d'usinage sur l'état de la surface du bois, très complexe. Quelques études ont été effectuées afin d'établir la relation entre les divers paramètres des opérations d'usinage et l'évaluation de la surface du bois par des paramètres objectifs, tels que la rugosité apparente. Ces études ont considéré que les paramètres les plus importants de l'opération de corroyage sont l'essence du bois, l'orientation du bois, la profondeur de coupe, la vitesse de rotation et la vitesse de coupe (Aguilera et *al.*, 2001), et dans l'opération de ponçage, l'essence bois, la tension dans les bandes, le type de matériel abrasif, l'orientation du ponçage, la vitesse d'avance et la taille du grain (Taylor et *al.*, 1999). Cependant, les travaux qui relient l'usinage du bois avec la qualité de la finition sont rares (Fujiwara et *al.*, 2001). D'autre part, seulement quelques études ont considéré la

caractérisation subjective de la surface du bois, telle qu'elle est évaluée par les consommateurs.

Un premier travail exploratoire réalisé à l'ENSTIB (École Nationale Supérieure des Technologies et Industries du Bois), a démontré que certains paramètres comme le grain de ponçage, l'épaisseur du copeau, la vitesse d'avance d'usinage et l'épaisseur du film du produit, ont une influence appréciable sur la qualité du finition, évaluée soit par des paramètres objectifs, soit par des paramètres subjectifs (panel d'observateurs) (Moitie, 1998).

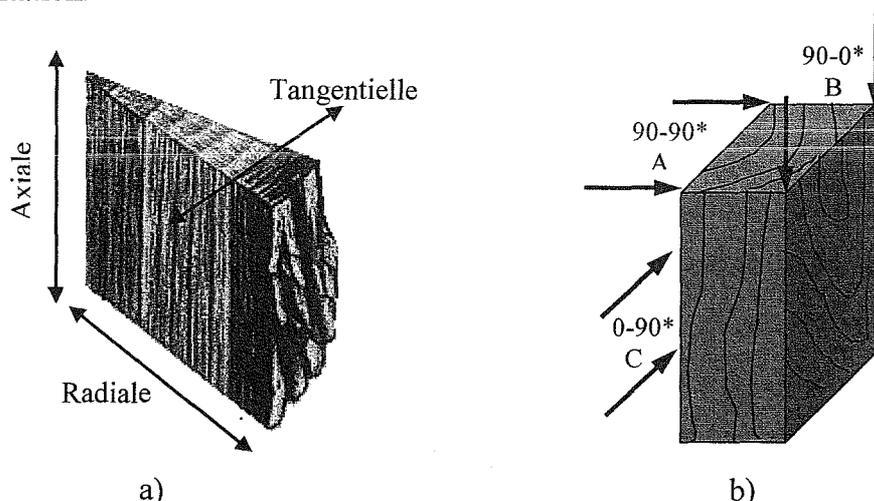
## 2.1 Coupe du bois

### 2.1.1 Théorie générale

Le bois est un matériau anisotrope, c'est à dire que ses constituants comme les fibres et rayons médullaires sont orientées dans trois directions principales (figure II.10a) :

- une direction axiale ou longitudinale, suivant l'orientation des fibres ;
- une direction radiale, perpendiculaire à la direction axiale ;
- une direction tangentielle, perpendiculaire aux deux précédentes.

La conséquence de l'anisotropie est une différence de comportement du matériau suivant le sens de sollicitation.



\* la notation des modes de coupe à base de deux nombres s'explique ainsi : le premier représente l'angle formé entre la direction de l'arête de coupe et le fil du bois ; le second est celui formé entre la direction de déplacement de l'outil et le fil du bois.

Figure II.10 Principales directions d'anisotropie (a) et de coupe (b) (Kivimaa, 1950)

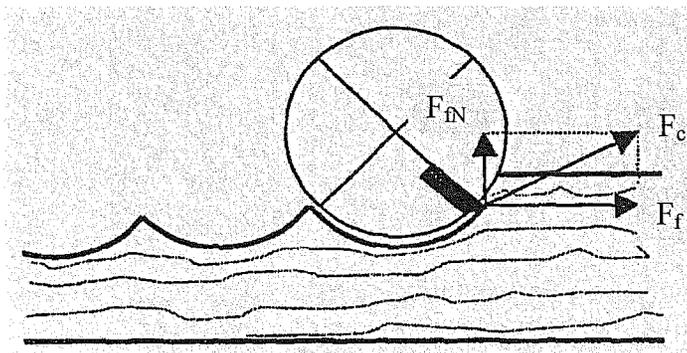
Nous avons ainsi pour l'usinage du bois défini trois directions principales (figure II.10b), une direction perpendiculaire aux fibres, appelée coupe 90-90 où l'arête de coupe est aussi perpendiculaire aux fibres (coupe transversale), aussi appelée coupe A, qui correspond au tronçonnage ou au tenonnage avec plateau, une direction parallèle aux fibres (coupe longitudinale) appelée coupe 90-0 ou coupe B correspondant au sciage, au toupillage ou au rabotage qui est la coupe utilisée dans cette étude et enfin la direction tangentielle, appelée coupe 0-90 ou coupe C correspondant au tranchage – déroulage.

Dans la pratique, la coupe du bois ne s'effectue que rarement suivant une seule de ces directions. Souvent l'arête ainsi que la face d'attaque des outils sont inclinées par rapport aux fibres suivant un angle dit de déviation.

### 2.1.2 Les efforts de coupe

Pour que la dent puisse pénétrer dans la matière et détacher un copeau, elle doit exercer un effort supérieur à la cohésion du matériau. Cet effort est la résultante de la force nécessaire pour faire fléchir les fibres, la force de coupe par cisaillement et les frottements qui s'exercent sur les faces de l'outil.

Il est possible de décomposer l'effort de coupe  $F_c$  selon deux composants: une orthogonale à la vitesse d'avance – l'effort normal  $F_{fN}$ , l'autre suivant la vitesse d'avance – l'effort tangentiel ou axial  $F_f$  (figure II.11). L'importance de  $F_{fN}$  influe sur le couple que doit développer le moteur actionnant l'outil.  $F_f$  caractérise la résistance à l'avancement, donc l'effort que doit vaincre le moteur d'avance. Les efforts de coupe sont directement influencés par les facteurs inhérents au matériau et à l'outil, ainsi que par les conditions de travail (Koch, 1964).



$F_c$  = effort de coupe  
 $F_{fN}$  = effort normal  
 $F_f$  = effort tangentiel

Figure II.11 Décomposition de l'effort de coupe (Koch, 1964)

Donc, toutes ces forces vont être rassemblées dans l'effort de coupe, fonction des paramètres liés au matériau usiné, facteurs liés aux conditions de travail et aux paramètres propres de l'outil.

### Paramètres liés au matériau usiné

En ce qui concerne la masse volumique, on peut dire que la dureté du bois liée à sa densité influence fortement les efforts de coupe qui dépendent linéairement de l'infradensité que ce soit  $F_f$  ou  $F_{fN}$  (Martin et al., 1994). Une recherche bibliographique sur l'influence du matériau bois dans le calcul de l'effort de coupe montre qu'il existe différentes théories sur la densité et son influence sur l'effort de coupe.

La plupart de ceux qui ont travaillé sur les relations qui peuvent exister entre la densité et l'effort de coupe en son arrivé à la conclusion suivante : plus la densité augmente, plus l'effort de coupe nécessaire à l'usinage du bois est important.

Ainsi, on peut citer quelques travaux réalisés là-dessus :

Il sort de la thèse de Thibaut (1988) que les efforts de coupe varient fortement avec l'essence et notamment avec la densité. Ceci a été démontré par les travaux de Keller (1979, à l'INRA) qui réalisa des essais de déroulage sur des résineux hétérogènes tels de Douglas, le Pin sylvestre, l'Épicéa ou le Pin Maritime et qui a mis en évidence la concordance entre le profil densitométrique du copeau et l'enregistrement de l'effort de coupe (figure II.12).

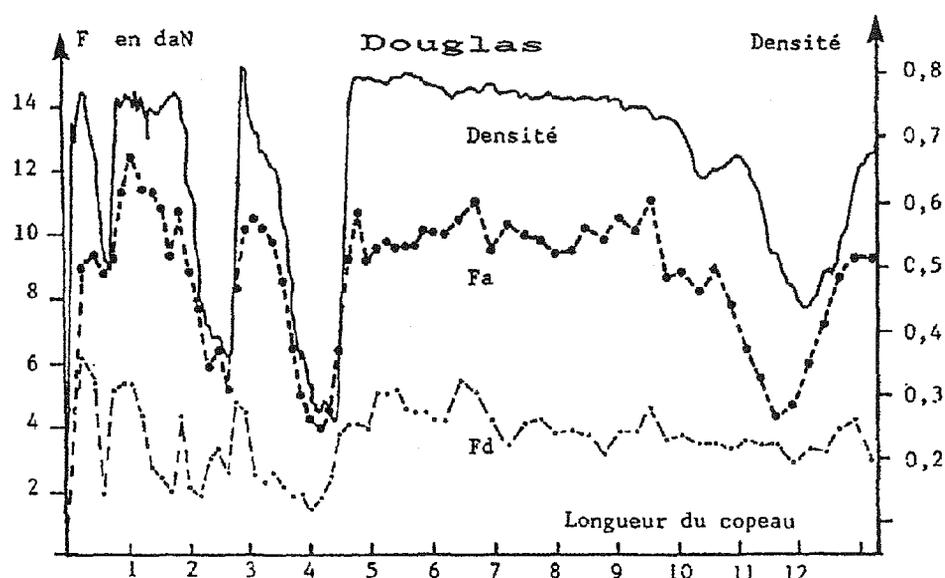


Figure II.12 Evaluations simultanées de la densité et des efforts de coupe pour le Douglas

Dans le rapport de Thomas (1984), il ressort que l'effort de coupe est fonction de l'infradensité (rapport de la masse anhydre sur le volume saturé). En effet, une infradensité élevée signifie moins de cavités et plus de parois cellulaires dans le bois, donc des efforts supérieurs pour mouvoir l'outil. Tout ceci se justifie par les essais de Kivimaa, qui nous montrent l'évolution de l'effort de coupe  $F_c$  en fonction de l'infradensité  $S_{12}$  (figure II.13).

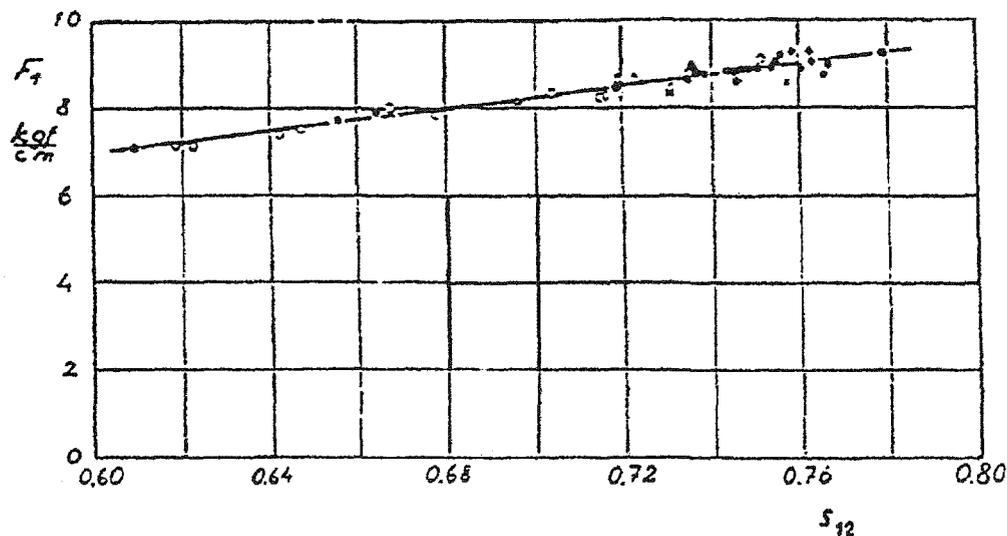


Figure II.13 Evolution de l'effort de coupe  $F_c$  en fonction de l'infradensité  $S_{12}$  (cas du bouleau (Bétula), à 11% d'humidité usiné en mode de coupe A)

Pour McKenzie (1993), suite à des essais concernant l'influence de la densité, il conclue que plus la densité du bois est forte, plus la puissance nécessaire pour l'usiner est importante, jusque là rien de plus classique, par contre, quelque chose de nouveau, est qu'il affirme que plus la densité est grande, plus il sera facile d'obtenir une surface propre (lisse).

Une étude menée par Gonçalves et al., (1997), portant sur 10 essences de bois différentes a abouti à la conclusion suivante : en règle générale, plus un bois est dense, plus la puissance nécessaire pour l'usiner est importante, avec néanmoins un certain nombre d'exceptions relevées. Par exemple, le pin, qui pourtant avait la densité la plus faible, demande une puissance égale à la moyenne sur l'ensemble des espèces. Ou encore, un châtaignier de densité 0,77 présentait une puissance nécessaire plus faible qu'un pin de densité 0,55.

Les travaux de Eyma (2002), réalisées sur 17 essences différentes ont montré que les efforts de coupe dépendent directement de trois facteurs importants: l'infradensité et le module de

Young de l'essence, facteurs correspondant directement aux caractéristiques "statiques" de l'interaction outil matière et de la ténacité en mode I, facteur correspondant à la phase dynamique de cette interaction. La prédiction recherchée de l'effort de coupe a montré que les paramètres statiques ont un poids important dans la détermination de cet effort, mais ne sont pas les seuls critères pouvant être retenus. En effet, deux essences avec une même densité peuvent se retrouver avoir des efforts différents. Eyma (2002) a recherché un critère dynamique permettant de caractériser la coupe du bois. La ténacité mode I, par ailleurs utilisée dans l'analyse du comportement dynamique de structures, a été choisie dans le but d'expliquer la notion de cisaillement et de fissuration du copeau. Il est à remarquer que chaque facteur, pris indépendamment des autres, a une importance plus faible que l'ensemble. C'est bien la notion globale de la résistance mécanique, sous sa forme statique à travers la densité et le module de Young et sous sa forme dynamique à travers le coefficient de pente de la partie élastique qui caractérise le comportement de l'arête de coupe lors de l'usinage du bois.

En conclusion, nous pouvons dire que l'ensemble des travaux qui ont été réalisés sont unanimes sur un point : plus un bois est dense, plus la tendance de la puissance nécessaire lors de son usinage donnera une augmentation de celle-ci, même si cela n'explique pas tout.

Par rapport à la nature de l'essence, il existe un nombre indéfinissable de singularités pouvant avoir une influence sur l'usinage, les plus connus étant les nœuds, le contre-fil, le bois de tension/compression, entre autres.

Les constatations qui ont pu être faites à partir des travaux de Movassaghi (1985) et Mothe (1988), ont montré que plus un bois était homogène, plus la densité avait d'influence sur les efforts de coupe.

D'autre part, d'après le rapport de Thomas (1984), la texture du bois pourrait, elle aussi (avec l'infradensité), avoir une influence sur les efforts de coupe. Une texture fine correspondrait à un bois plus dense, et donc, à un effort de coupe nécessaire plus important.

On peut conclure que les paramètres liés au matériau usiné sont des facteurs encore très difficiles à prendre en compte.

L'humidité est aussi un facteur important sur les efforts de coupe, puisque les efforts de coupe sont liés aux propriétés mécaniques du bois (copeau obtenu par cisaillement, compression,...) et que l'humidité influence grandement ces propriétés, il est légitime que l'effort varie avec

l'humidité. Les principaux travaux qui ont été réalisés sur ce facteur l'ont été par Kivimaa (1950) qui a montré comment l'effort variait avec l'humidité.

Cet auteur a été le premier à étudier l'influence de l'humidité sur l'effort de coupe dans des conditions normales d'acuité d'arête et dans les modes de coupe A, B et C pour différentes épaisseurs (voir figure II.14). Ces essais ont permis de déterminer le coefficient d'humidité  $K_h$  (voir figure A1.1 de l'annexe 1). Cependant, il y a d'autres affirmations concernant l'humidité qui ont été faites :

Pour McKenzie (1993) par exemple, l'humidité est un facteur aussi important que la densité, alors que pour Negri (1997), il n'existe pas d'autres propriétés influençant l'effort de coupe autre que la densité.

Les travaux menés par Gonçalves et *al.*, (1997) confirment bien, eux aussi, les résultats obtenus par Kivimaa (1950) dans la mesure où ils arrivent à la conclusion que : la puissance diminue quand l'humidité du bois augmente, avec toujours des exceptions (cas où l'humidité est inférieure à 10% en mode B par exemple, ceci est tout à fait en accord avec les travaux de Kivimaa (1950), figure II.14).

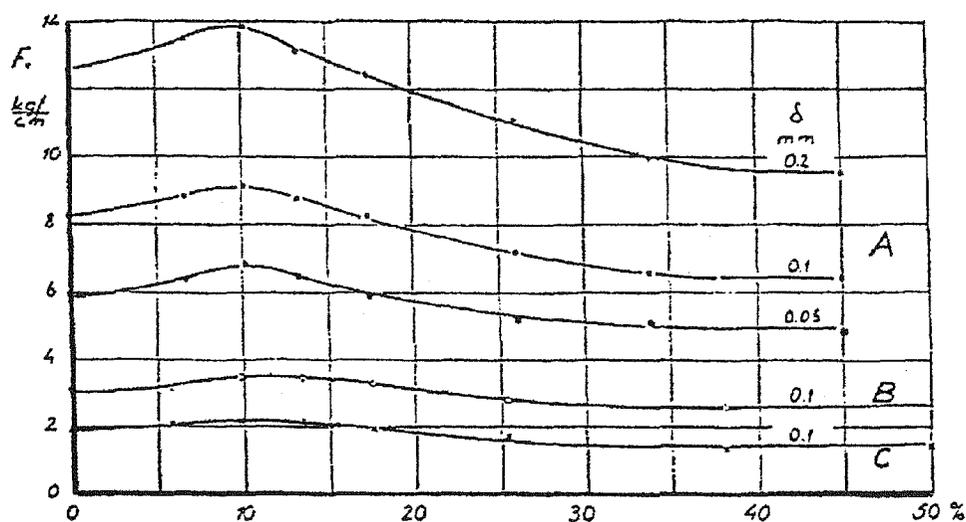


Figure II.14 Évolutions de l'effort de coupe  $F_c$  en fonction de l'humidité (cas du bouleau (Bétula), avec une infradensité  $S_{12}=0,7$ )

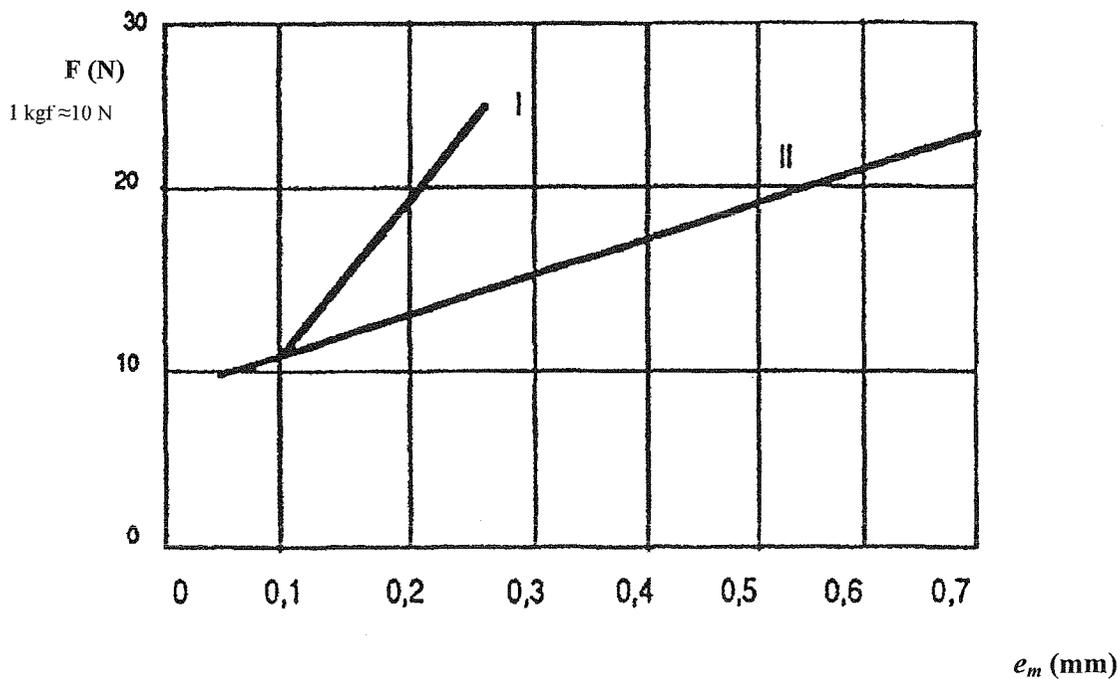
Pour P. Koch l'influence de l'humidité est loin d'être négligeable, en effet il a mis en évidence le fait que les facteurs tels l'humidité ou la température jouaient un rôle important

sur les propriétés mécaniques (élastiques) du bois, et ainsi pouvaient entraîner des variations d'efforts de coupe non négligeables (voir figure A1.2 de l'annexe 1).

### *Facteurs liés aux conditions de travail*

L'effort ne varie pas de la même façon quand on travaille en avalant (même sens outil et bois) ou en opposition.

Ceci est montré dans la figure II.15, qui présente la force nécessaire à la coupe suivant direction et en fonction de l'épaisseur moyenne de copeau –  $e_m$  (cas du hêtre à 12% d'humidité, outil usé à 50%).



I – coupe en avalant ; II – coupe en opposition

Figure II.15 Influence du sens de travail de l'outil sur l'effort de coupe (d'après la thèse de Eyma, 2002)

La profondeur de passe est nécessaire afin de déterminer la quantité de matière qui va être séparée de la pièce sous forme de copeau. La combinaison de vitesse d'avance et de la profondeur de passe permet de déterminer le volume du copeau.

La largeur et la hauteur de coupe influent proportionnellement sur la valeur de l'effort.

L'épaisseur du copeau ( $e_m$ ), est le facteur le plus important, les efforts en dépendent directement. En effet,  $e_m$  a une grande influence sur l'état de surface mais également sur les efforts, qui varient linéairement en fonction de celui-ci. On estime que l'effort de coupe se décompose de la manière suivante :

- $F_e$ , effort nécessaire pour séparer les fibres qui dépend uniquement de la qualité de l'affûtage et de l'essence.
- Un effort de cisaillement qui dépend de l'épaisseur.
- Un fractionnement du copeau qui dépend de la nature du bois, de sa résistance au cisaillement, de la forme, de la denture et de l'épaisseur.
- Un effort d'évacuation des copeaux qui dépend de  $e_m$ .
- Un effort de frottement lié à  $e_m$ , à l'humidité et à l'état de l'outil.

La vitesse de coupe ( $V_c$ ), est le bois travaillé par l'outil en une seconde. La vitesse de coupe est relative au diamètre de l'outil et à la vitesse de rotation (trs/min) de la machine. Les efforts sont indépendants de la vitesse de coupe, la vitesse de coupe n'a que peu d'influence sur la valeur de l'effort de coupe mais elle conditionne tout de même la qualité de l'état de surface ainsi que le rendement de la machine.

### ***Paramètres propres à l'outil***

En ce qui concerne les angles de l'outil de coupe (figure II.16):

- L'angle d'attaque ( $\gamma$ ), ou angle de coupe, c'est l'angle le plus important dans l'outil, de lui dépendent en grande partie la qualité du travail exécuté et la puissance nécessaire. L'effort de coupe décroît en même temps que l'angle d'attaque augmente jusqu'à ce que cet angle ait une valeur d'environ  $45^\circ$  (figure II.17). Un angle compris entre  $25$  et  $30^\circ$  est utilisé dans le cas du rabotage du bois massif.

- L'angle de dépouille ( $\alpha$ ), cet angle est sans grande influence sur les efforts de coupe dans la limite où il évite le talonnage de l'outil et n'affaiblit pas l'angle de taillant. Les angles de dépouille sont compris entre  $7$  et  $25^\circ$  où un angle de  $15^\circ$  est souvent utilisé dans l'usinage du bois massif.

- L'angle de taillant ( $\beta$ ), cet angle conditionne la résistance mécanique et la flexibilité du bec de l'outil. Les outils ayant des angles de taillant trop petits se détériorent très rapidement. Dans le but d'éviter une détérioration trop rapide de la partie active et une qualité de travail médiocre, la valeur de l'angle de taillant ne doit pas être en dessous d'une valeur critique. Cette valeur dépend du matériau travaillé, de la constitution de l'outil, de l'épaisseur du copeau et de la direction de coupe. Dans le cas du rabotage du bois massif, un angle de  $20^\circ$  est couramment utilisé.

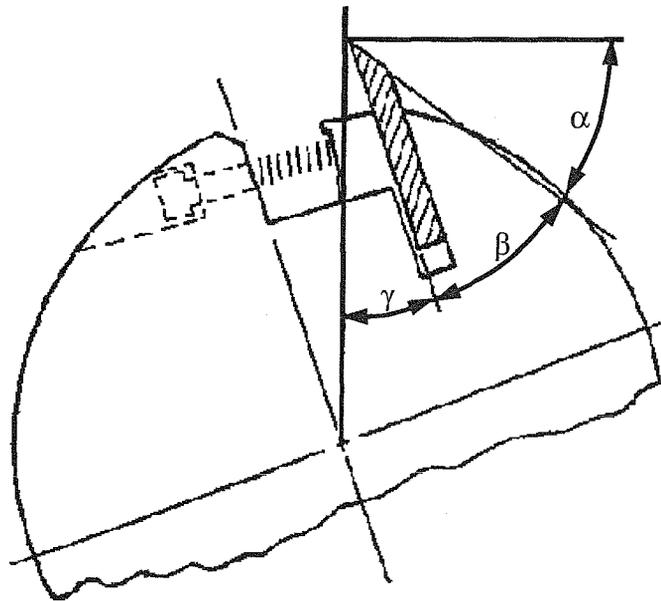


Figure II.16 Les angles de l'outil de coupe

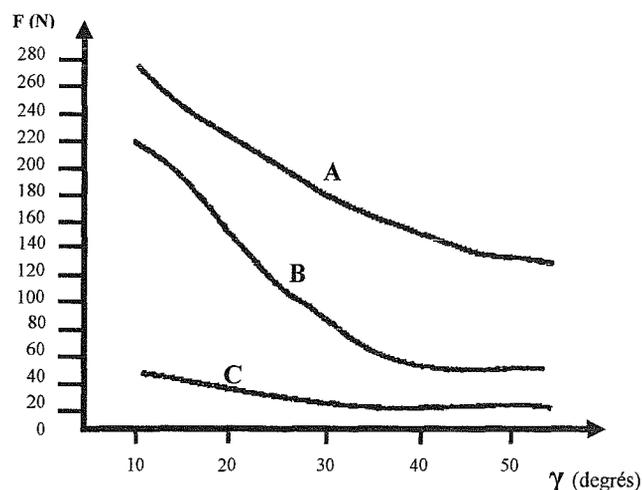


Figure II.17 Influence de l'angle d'attaque sur les efforts de coupe suivant les directions de coupe A, B, C (voir figure II.1) pour le hêtre (à 12% d'humidité, copeau de 0,2 mm d'épaisseur, outil usé à 50%) (d'après la thèse de Eyma, 2002)

Sur l'acuité de l'arête de coupe, l'augmentation de l'effort de coupe est rapide au début de l'usinage, puis une stabilisation s'opère, l'outil n'étant alors plus parfaitement aigu. Le mode de coupe A est celui provoquant l'usure la plus rapide, ensuite vient C puis B.

Par rapport au nombre d'arêtes tranchantes ( $Z$ ), on peut dire que le nombre de dents d'un outil contribue fortement à la surface obtenue alors qu'il n'a que peu d'influence sur l'effort et la puissance de coupe. Néanmoins, on le prend tout de même en considération dans les calculs.

Dans le rapport entre la géométrie de l'arête et l'effort de coupe, les lois de la coupe montrent que l'effort imposé à une dent décroît d'une façon continue quand l'angle de coupe augmente. Pour l'angle de dépouille, l'effort de coupe ne varie pas d'une façon significative (Chardin et al., 1968). Kivimaa (1950) ajoute que la vitesse varie entre 5 à 50 m/sec.

### ***Influence de la température***

Selon Koch, en jouant sur les propriétés mécaniques du bois, la température joue un rôle non négligeable dans la variation des efforts de coupe.

Lorsque l'on usine du bois sec, la température n'a pas d'influence sur les efforts de coupe. Par contre, lorsqu'il est humide, l'effort décroît. Entre 0 et 80°, les efforts décroissent d'une façon linéaire de 10% suivant les directions de coupe A et B, et de 40% suivant C, c'est ce que nous montre les travaux de Kivimaa (1950), (figure A1.3 de l'annexe 1). Ces courbes indiquent qu'en fait, la température n'a pas d'influence sur l'effort de coupe pour les faibles épaisseurs (mode A). De plus, il est à noter que la pente la plus prononcée, quoique peu différente celle de B, est celle de C, (voir figure A1.3 de l'annexe 1).

### **2.1.3 La formation du copeau**

La plupart des opérations d'usinage forment des copeaux (figure II.18). L'analyse de leur forme et de leurs dimensions nous montrent, dans certains cas, la cause des défauts. Les conséquences directes de l'épaisseur moyenne du copeau sont principalement la qualité de la surface engendrée et la puissance absorbée (Kivimaa, 1950).

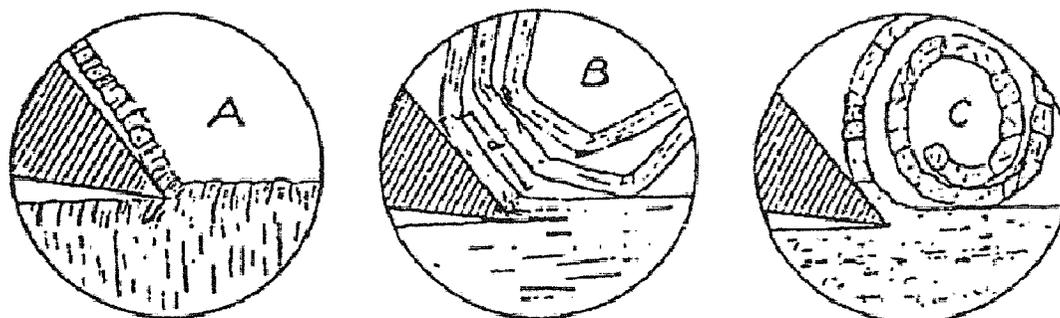


Figure II.18 Allure du copeau suivant les modes de coupe A, B et C (Thomas, 1984)

### *Mouvement de coupe rectiligne*

Le mécanisme de formation du copeau est souvent expliqué (sauf en déroulage) par l'analyse des phénomènes de sa formation dans le bois massif avec un mouvement de coupe rectiligne (coupe B, direction de coupe 90-0), (McKenzie, 1961).

Le premier phénomène nommé fendage, qui se présente dans ce type de coupe est l'apparition d'une fente lorsque l'outil pénètre la matière pour la séparer. Celle-ci se propage en avant de l'arête de coupe si l'effort normal est très important par rapport à la cohésion de la matière et si l'épaisseur du copeau est aussi d'une magnitude importante. Le résultat de ce type de copeau est des éclats et arrachements de matière en produisant un état de surface très dégradé (figure II.19 et II.20).

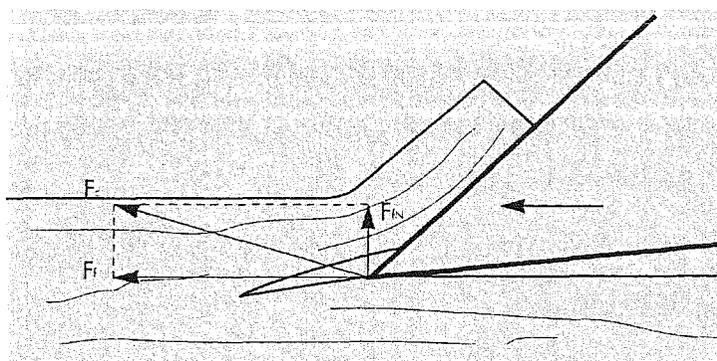


Figure II.19 Copeau obtenu par fendage (d'après Koch, 1964)

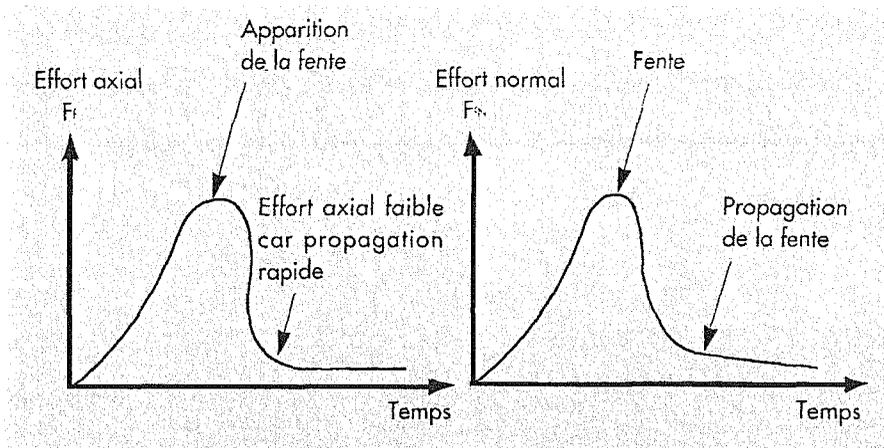


Figure II.20 Diagramme effort de coupe/temps (d'après Koch, 1964)

La deuxième forme de formation du copeau est obtenue par compression des fibres jusqu'à sa rupture. Ce type de copeau génère un état de surface de qualité. L'effort de coupe est alors orienté principalement dans la direction des fibres, donc avec un effort normal faible ou négatif (figure II.21 et II.22).

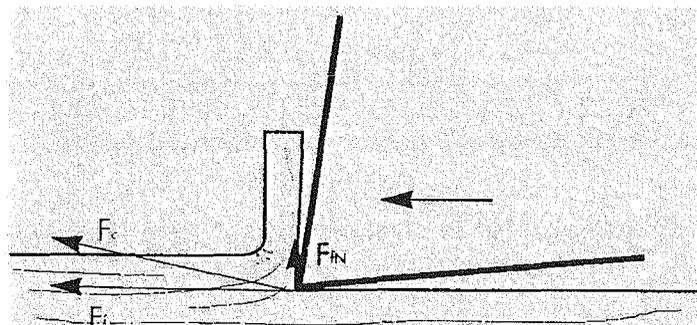


Figure II.21 Copeau obtenu par compression (d'après Koch, 1964)

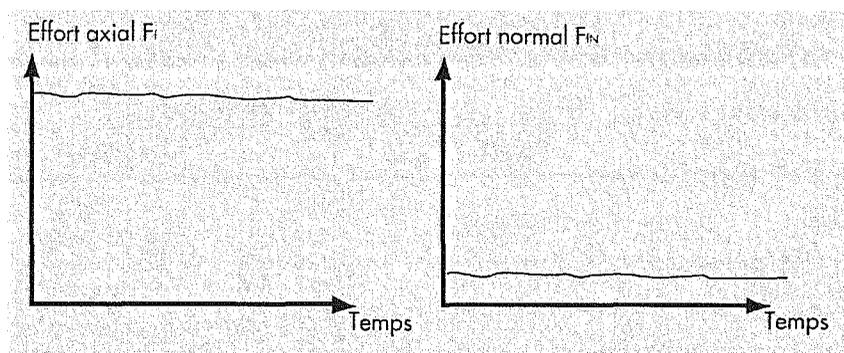


Figure II.22 Diagramme effort de coupe/temps (d'après Koch, 1964)

Le troisième type de copeau est appelé flambage. Le flambage est la particularité d'une pièce longue et mince de se plier sous une charge axiale, c'est à dire qui génère un copeau qui ne se comprime pas, si non il fléchit, ce qui entraîne sa rupture (figure II.23). Pour qu'il se produise

ce type de copeau, deux conditions sont nécessaires : il doit être très mince et l'effort normal doit être important (figure II.24). De cette façon, le copeau se détache en avant de la dent, il se comprime, sinon il fléchit et génère un état de surface de moyenne qualité.

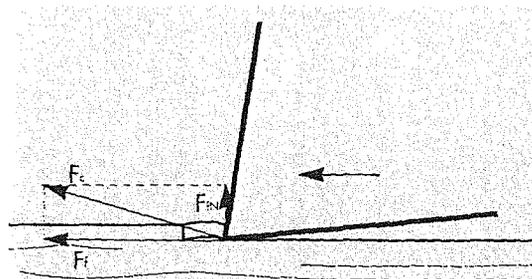


Figure II.23 Copeau obtenu par flambage (d'après Koch, 1964)

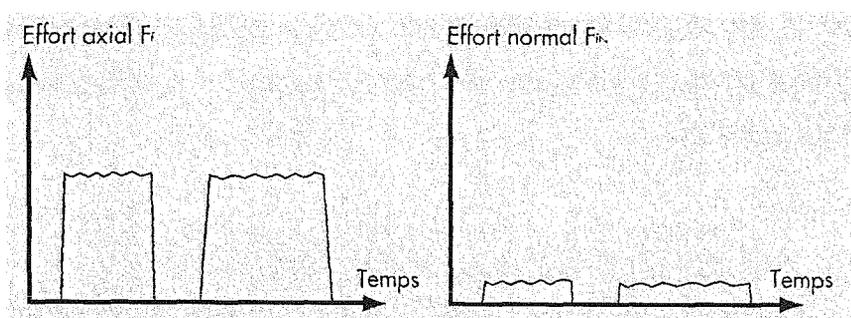


Figure II.24 Diagramme effort de coupe/temps (d'après Koch, 1964)

Le tableau II.3 illustre l'influence des deux paramètres : l'angle de coupe  $\gamma$  et l'épaisseur du copeau.

Tableau II.3 Influence de l'épaisseur du copeau et de l'angle de coupe sur la forme du copeau (d'après CTBA, 1999)

ÉPAISSEUR DU COPEAU	ANGLE DE COUPE $\gamma$	
	Faible	Élevé
Faible	Flambage	Fendage (peu d'éclats)
Moyenne ou élevée	Compression	Fendage (éclats nombreux et importants)

Lorsque le bois n'est pas de « droit fil », c'est à dire que ses fibres sont inclinées par rapport à la surface usinée, cet angle d'inclinaison peut modifier le type de copeau. En effet, le paramètre important est l'angle de levage -  $\phi$  : c'est l'angle de coupe  $\gamma$  augmenté ou diminué de la valeur de l'angle d'inclinaison des fibres (figure II.25). Il est certain que l'on a toujours

intérêt à le diminuer plutôt qu'à l'augmenter. Tous les compagnons le savent et c'est pourquoi ils orientent favorablement les bois avant de les travailler. Ce n'est pourtant pas toujours possible, tant pour des raisons techniques qu'économiques.

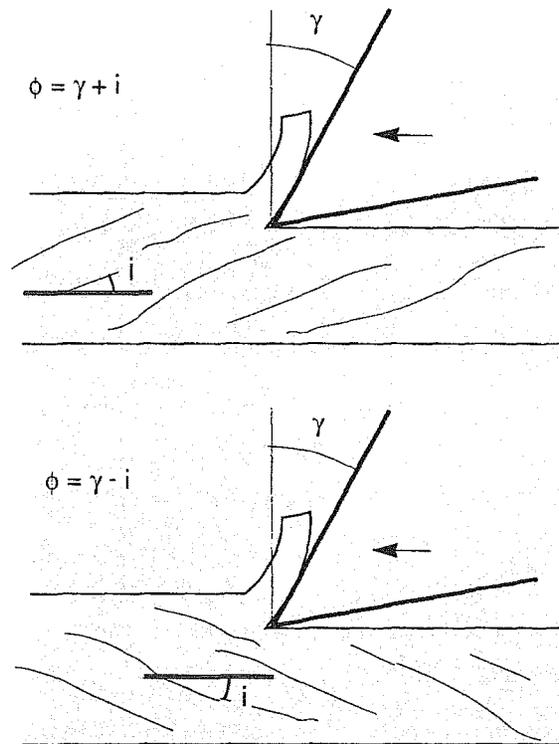


Figure II.25 Evolution de l'angle de levage  $\phi$  en fonction de l'angle de coupe  $\gamma$  et de celui d'inclination des fibres  $i$  (d'après Koch, 1964)

Dans le cas du mouvement circulaire, la différence avec le mouvement rectiligne est l'épaisseur de copeau variable et la direction de l'effort de coupe changeant continuellement. Ces deux effets ont des conséquences sur la formation du copeau, mais confirment l'existence des trois types de copeau décrits précédemment.

### *Le travail en opposition*

La rotation de l'outil est opposée au sens d'avance du bois (figure II.26). Ce système garantit une meilleure longévité des outils, mais nous avons une qualité de coupe moins fine principalement pour la coupe contre les fibres du bois. Pour une avance manuelle il est seulement permis d'utiliser de ce type d'avance.

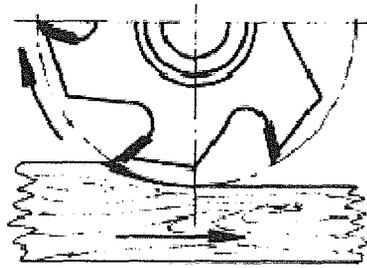
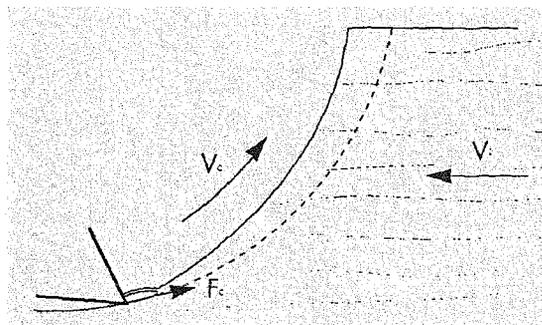


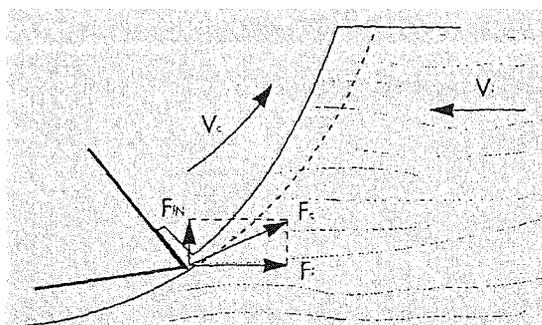
Figure II.26 Le travail en opposition

Le cycle de travail se décompose en trois phases.

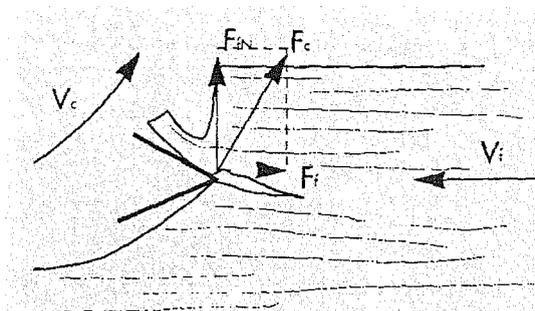
Pendant la phase 1 (figure II.27) le copeau est très mince, l'effort de coupe est peu incliné : les deux conditions nécessaires pour la formation de copeau par flambage sont réunies.

Figure II.27 1<sup>ère</sup> phase - flambage (d'après Koch, 1964)

Pendant la phase 2 (figure II.28) l'épaisseur du copeau augmente, l'effort de coupe s'incline, mais cet angle est encore limité, la composante  $F_{FN}$  est donc faible. Le copeau est ainsi formé par compression.

Figure II.28 2<sup>ème</sup> phase - compression (d'après Koch, 1964)

Pendant la phase 3 (figure II.29) le copeau commence à être assez épais, l'effort de coupe est nettement incliné. La composante  $F_{FN}$  est élevée. La coupe se fait par fendage.

Figure II.29 3<sup>ème</sup> phase - fendage (d'après Koch, 1964)

Ces trois phases se succèdent, et chacune d'entre elles est ou moins longue selon les caractéristiques du bois (essence, humidité, direction du fil), de l'outil (angle de coupe, état de l'arête de coupe) et des conditions de travail (épaisseur de copeau).

Il est indispensable de retarder au maximum (et même d'éviter) l'apparition de la troisième phase. En effet, la fente qui se propage en avant de l'arête de coupe peut aller en-dessous du plan d'usinage. Elle n'est alors pas effacée par les coupes suivantes et un arrachement apparaît (figure II.30). Lorsque ce défaut se manifeste, il faut réduire l'angle de coupe et/ou diminuer l'épaisseur de copeau.

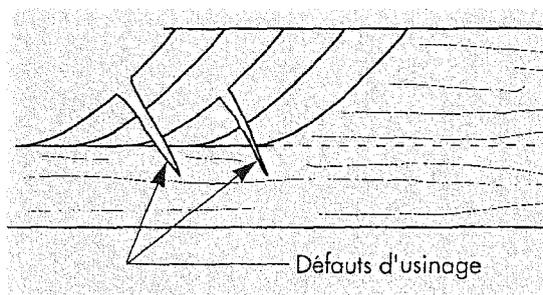


Figure II.30 Défauts d'usinage dus à la coupe par fendage (d'après Koch, 1964)

Il est souhaitable d'éviter une première phase trop longue, parce que la coupe n'est pas excellente et que les outils s'éroussent rapidement.

### ***Le travail en avalant***

La rotation de l'outil est identique au sens de l'avance (figure II.31). Permet d'obtenir des surfaces de très bonne finition, tout en ayant une forte puissance absorbée.

Cette avance seulement est possible avec machines totalement automatisées.

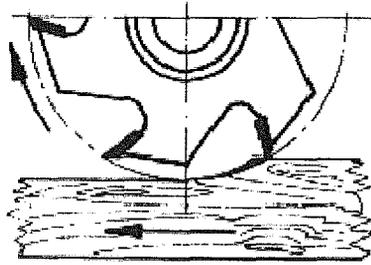


Figure II.31 Le travail en avalant

Dans ces conditions, ces trois phases n'existent plus, car le bois est toujours comprimé par l'outil. Dans un premier temps, qui couvre la quasi-totalité du cycle, la coupe se fait par compression car le copeau est épais et la composante normale de l'effort de coupe est négative. Arrivé sur la fin de sa trajectoire, le copeau est mince et une coupe par flambage peut apparaître.

L'absence de fendage explique pourquoi il n'y a pas d'arrachements, mais le travail des bois tendres par compression importante génère un état de surface pelucheux. En raison de l'usure très rapide de l'outil et des chocs répétés, ce mode d'usinage n'est à envisager que pour des travaux difficiles à réaliser autrement.

### 2.1.4 L'opération de rabotage

Le rabotage est l'opération d'usinage la plus importante après le sciage dans une usine de transformation du bois, en effet, tout le bois d'œuvre doit subir un travail de finition donnant à la pièce l'épaisseur et la largeur, tout en aplanissant la surface. Le rabotage constitue un excellent moyen d'ajouter de la valeur aux produits. Les dimensions recherchées de la pièce, peuvent être faites dans une unique opération, à la corroyeuse (figure II.32), avec la possibilité de faire travailler ces quatre outils de coupe, c'est à dire, le dégauchisseur inférieur, le dresseur de chant, le raboteur de largeur et le raboteur supérieur (figure II.33).

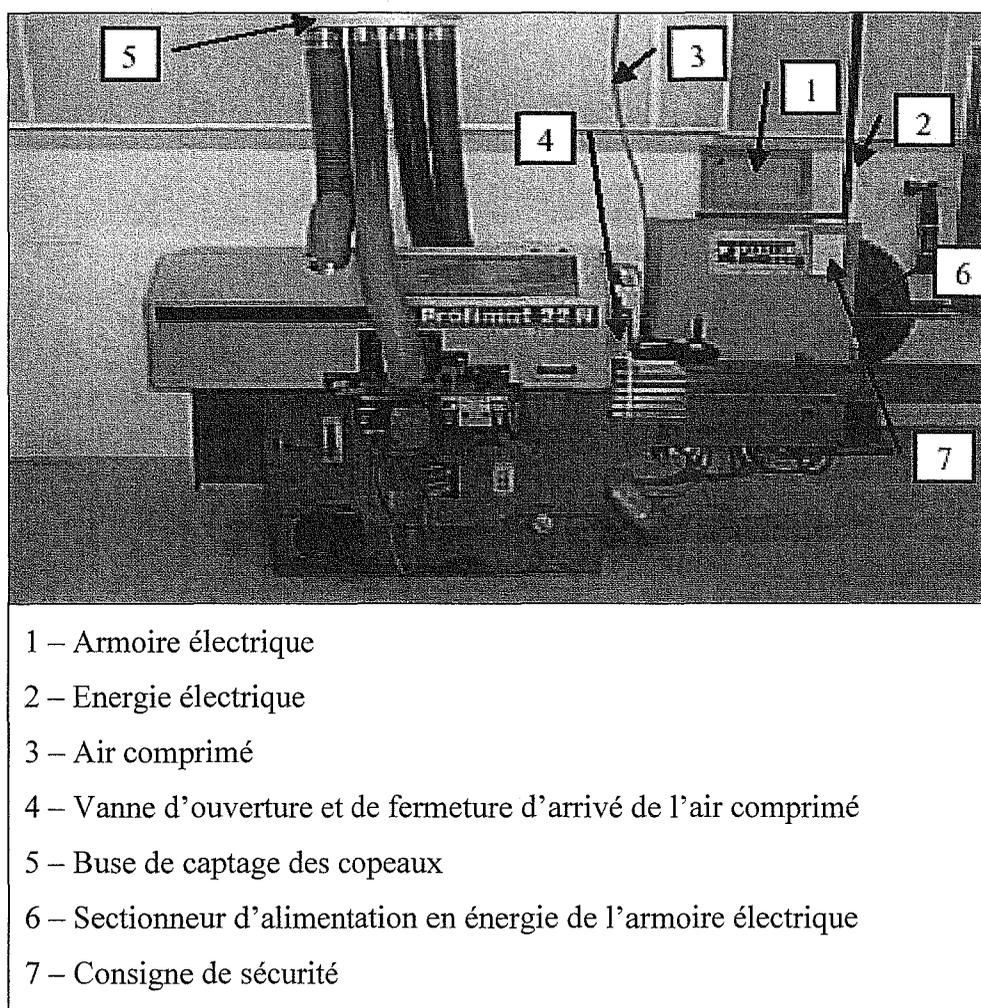


Figure II.32 Vue d'ensemble de la corroyeuse

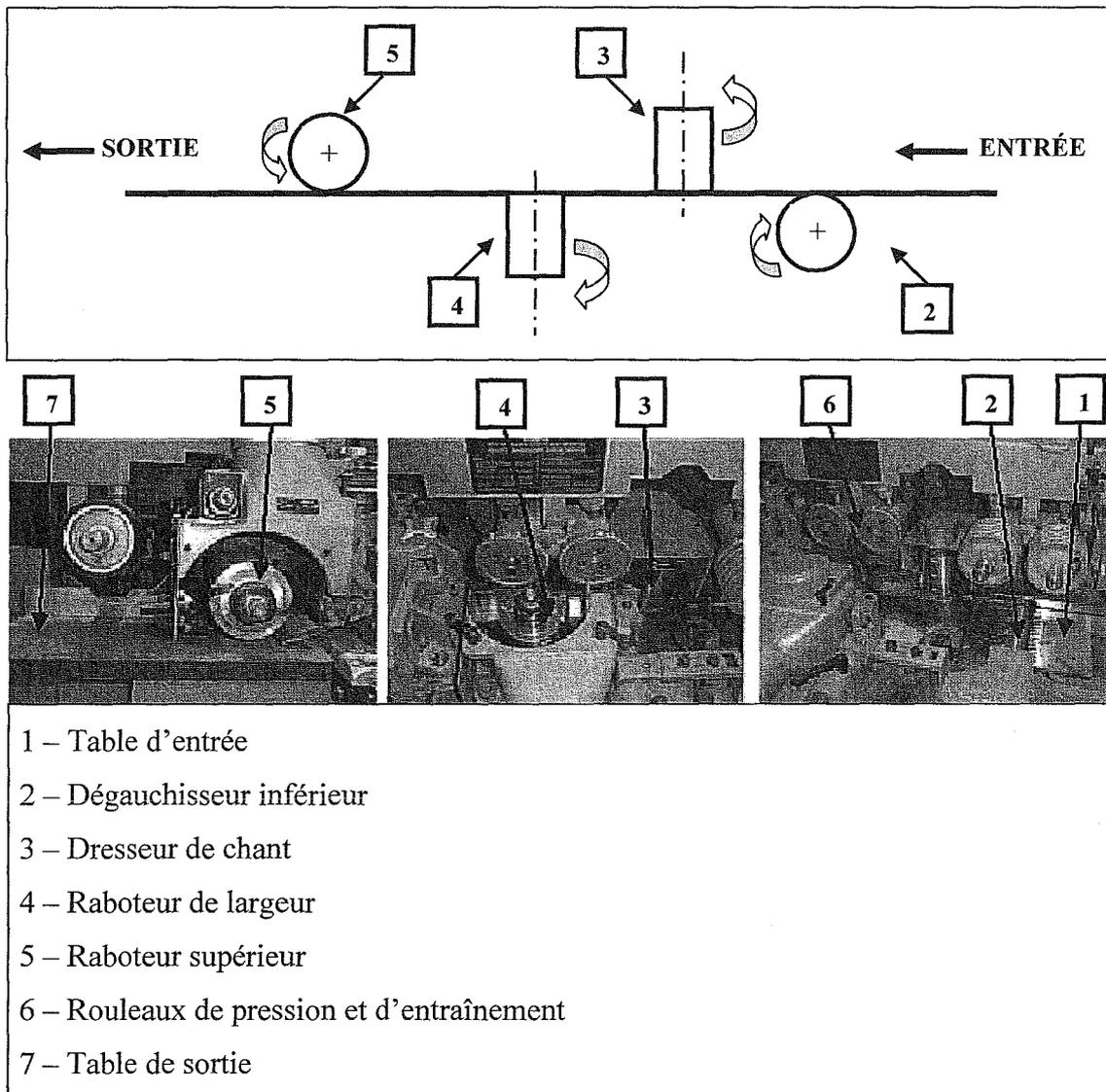


Figure II.33 Représentation conventionnelle et organes d'usinage de la corroyeuse

Un système est un ensemble de constituants organisés pour atteindre un but. Ces constituants au sein du système accomplissent des tâches en relation avec une suite chronologique d'événements caractérisant le processus de réalisation de la fonction globale du système.

On peut regarder dans la figure II.34, la représentation graphique de l'étude fonctionnelle du système de la corroyeuse.

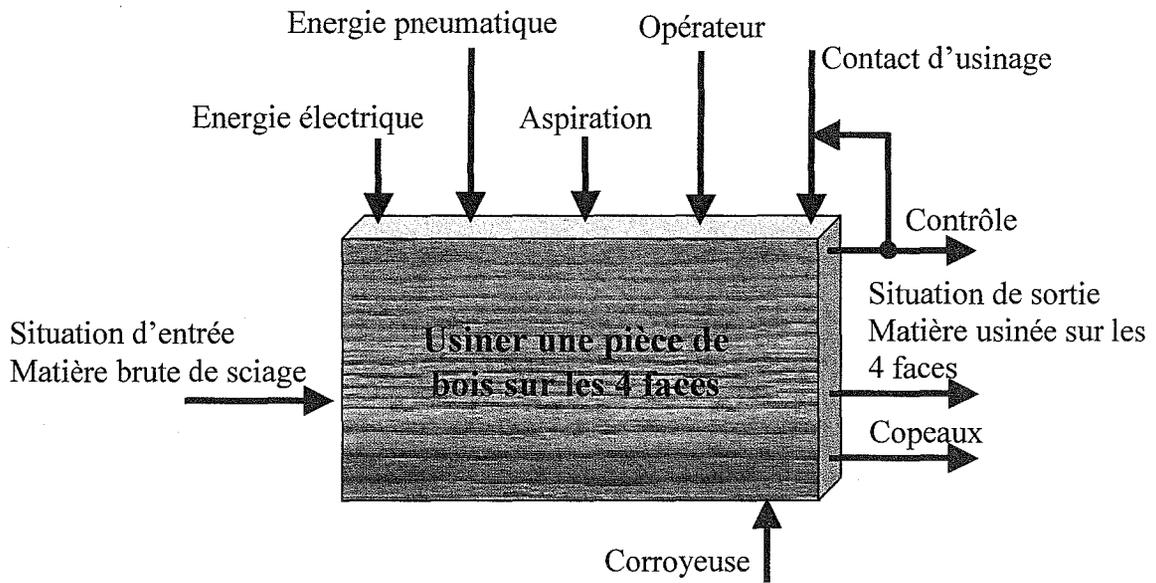


Figure II.34 L'étude fonctionnelle du système de la corroyeuse

### 3 États de surface – caractérisation objective

La caractérisation objective de la surface du bois peut être quantifiée par des propriétés objectives tels que l'ondulation et la rugosité avant et après la finition de la surface.

La détermination de ces propriétés est une tâche complexe, car, comme cela a déjà été signalé, l'ondulation et la rugosité du bois dépendent à la fois de la structure cellulaire et de l'usinage.

Plusieurs techniques, développées pour d'autres matériaux, ont été appliquées pour évaluer la rugosité du bois, ce sont les rugosimètres qui fonctionnent par contact (palpage mécanique, pneumatique, émission acoustique) ou sans contact (optique) et chacun d'entre eux a ses avantages et ses inconvénients (Lemaster, 1995). La technique la plus habituelle utilise une sonde de palpage (stylus) qui mesure mécaniquement la hauteur de la surface le long d'une ligne. À partir du profil obtenu plusieurs paramètres sont déterminés pour évaluer la rugosité, mais, dans le cas d'une surface de bois la relation entre les paramètres calculés et l'état réel de surface n'est pas complètement comprise (Krisch et *al.*, 1999). Ainsi, un ensemble de paramètres qui soient capables de distinguer les types particuliers de rugosité résultant de l'usinage du bois devra être établi (Faust et Rice, 1986; Lemaster et Taylor, 1999), de façon que cette rugosité soit différenciée de la rugosité d'anatomie du bois. Un paramètre ne pourra jamais à lui seul décrire la qualité d'une surface de bois (Triboulot et *al.*, 1991).

Autre limitation dans l'évaluation de la rugosité du bois est qu'il n'y a ni une instrumentation spécifique ni des méthodes et des paramètres universels n'ont encore été développés (Funck et *al.*, 1992; Lavery et *al.*, 1995; Lundberg et Porakiewicz, 1995; Hiziroglu, 1996; Lemaster, 1997; Krisch et *al.*, 1999; Fujiwara, 1999, Sandak et *al.*, 2003; Fujiwara et *al.*, 2004).

Les filtres décrits dans les normes ISO 11562 et ISO 13565-1, ont des limitations quand appliqués à la surface du bois (Gurau et *al.*, 2001 et 2005), dû aux distorsions du profil issue de l'anatomie du bois (creux profonds).

Pour évaluer la qualité de la surface du bois une méthodologie capable de simuler la perception visuelle et/ou tactile, tel qu'elle est appréhendée par un observateur doit être utilisée. À l'ENSTIB, deux méthodes ont été développées (Gross et *al.*, 1996). L'une repose sur la caractérisation des surfaces par l'analyse du frottement (TOPOSURF®) et l'autre est un système de vision artificielle (TOPOVISE®). Par comparaison avec la mesure mécanique

conventionnelle (stylus), cette dernière méthode a l'avantage d'être rapide, peu onéreuse et l'analyse peut être faite selon deux directions. Un des objectifs de ce travail est le perfectionnement du système d'analyse de surface par vision de l'ENSTIB, pour la caractérisation objective de l'état de la surface du bois.

Existe aussi une étude de Kumar *et al.*, (2005), dans laquelle a été utilisé un système de vision artificielle. Néanmoins il est limité à des surfaces usinées et la méthode présentée est assez dépendante des caractéristiques naturelles de la surface, en particulier des variations chromatiques de la même.

### 3.1 États de surface

La rugosité superficielle selon Lemaster *et al.*, (1985) et Devries *et al.*, (1991) peut être utilisée comme un moyen de contrôle de la performance du processus, permettant de produire des produits finis de haute qualité qui peuvent se vendre à un prix élevé. Pour atteindre ces objectifs il est nécessaire d'avoir un système de mesure, une compréhension des causes et des effets à l'intérieur du processus de fabrication ainsi que de posséder un critère de mesure de la rugosité.

#### 3.1.1 Paramètres des surfaces

Les surfaces sont caractérisées par trois paramètres principaux, la rugosité, l'ondulation, et les erreurs de forme, contenus dans les données de profil d'une surface nominale plate. L'erreur de forme représente les plus fortes déviations de longueur d'onde d'une surface correspondante à la surface nominale suivie de l'ondulation et puis de la rugosité.

La rugosité représente les irrégularités les plus fines de la texture de surface qui résultent habituellement de l'action inhérente au processus d'usinage ou de l'état du support (ASME B46.1 : 1995). L'ondulation décrit un composant plus largement espacé sur la surface, avec de plus grandes dimensions, par exemple, la déviation de la planéité. Ainsi, on peut considérer l'ondulation comme une sorte d'onde porteuse et la rugosité est la modulation sur celle-ci. Les erreurs de forme sont définies selon la direction principale de la texture de surface. Ceci est souvent déterminé par la méthode de production, telle que la direction de travail. Ces caractéristiques de surface sont représentées schématiquement sur la figure II.35.

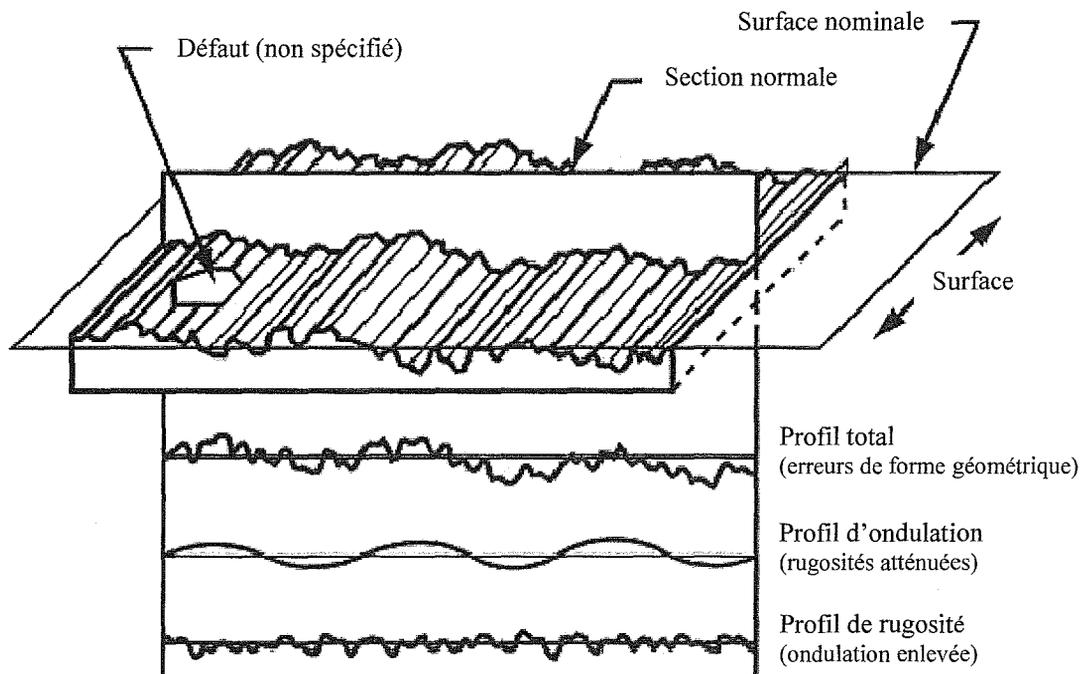


Figure II.35 Diagramme schématisé des caractéristiques de la surface (ASME B46.1, 1995)

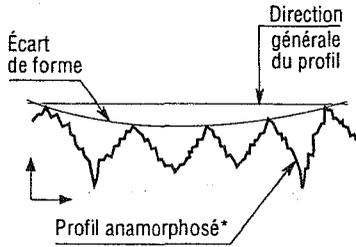
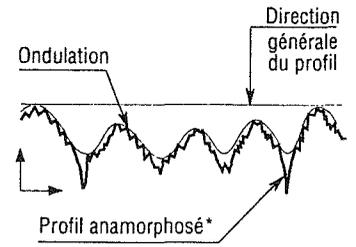
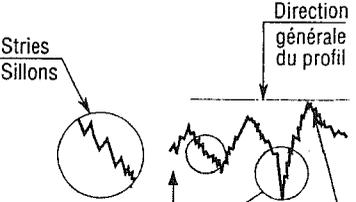
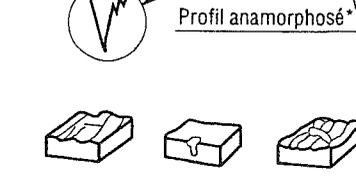
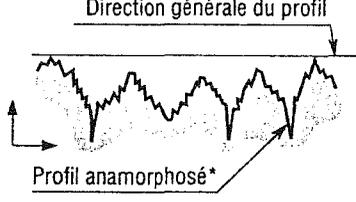
Les données de mesure de l'ondulation et de la rugosité peuvent être séparées par filtrage, respectivement par un filtre à large bande et un filtre à bande étroite. Les paramètres de rugosité sont déterminés par des modèles statistiques.

### 3.1.2 Classification des défauts de la surface

Les défauts résultant du processus d'usinage d'une pièce mécanique peuvent être classés en deux catégories, soit en quatre niveaux d'ordres (tableau II.4) : les défauts de forme - 1<sup>er</sup> ordre (l'écart de forme et de position) ; les défauts d'état de surface, divisés en deux groupes : les défauts macro géométriques - 2<sup>ème</sup> ordre (l'ondulation) et les défauts micro géométriques - 3<sup>ème</sup> ordre (la rugosité) et enfin les défauts de 4<sup>ème</sup> ordre (la rugosité résiduelle).

Ainsi, et d'après la norme NFE 05 015, le terme état de surface englobe les écarts géométriques d'une surface usinée par rapport à la surface géométriquement idéale (défauts d'ordre 1 à 4), voir tableau II.4.

Tableau II.4 Défauts de surface classés par nature et par numéro d'ordre

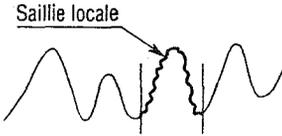
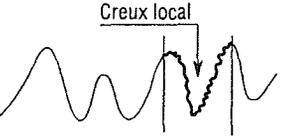
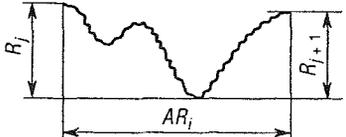
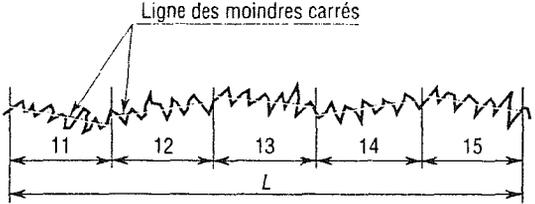
N° d'ordre/ Désignation	Illustration	Définition
<p>1<sup>er</sup> Écart de forme</p>		<p><b>Défauts du premier ordre</b></p> <p>Ce sont des défauts dus à des écarts de forme (rectitude, circularité, etc.) et de position (perpendicularité, parallélisme, etc.). Ils proviennent de la déformation de la pièce pendant et après l'usinage, des défauts de bridage, de la flexion des éléments de machine ou d'un mauvais guidage des parties mobiles de la machine-outil...</p>
<p>2<sup>ème</sup> Ondulation</p>		<p><b>Défauts du second ordre</b></p> <p>Ce sont des défauts plus petits ayant l'aspect général d'une ondulation. Ils sont provoqués très souvent par des vibrations de basse fréquence de la pièce ou de l'outil ou de l'avance par tour en fraisage.</p>
<p>3<sup>ème</sup> Rugosité: Strie, sillon (périodique ou pseudopériodique)</p>		<p><b>Défauts du troisième ordre</b></p> <p>Ce sont des stries et sillons dus à l'avance de l'arête coupante de l'outil, ou à l'avance par tour de la pièce, ou à des vibrations haute fréquence.</p>
<p>4<sup>ème</sup> Arrachement, marque d'outil et fente, piqûre, etc. (apériodique)</p>		<p><b>Défauts du quatrième ordre</b></p> <p>Ce sont des fentes et piqûres dues à des marques d'outils ou à des vibrations haute fréquence. L'ensemble des défauts du troisième et quatrième ordre constitue la rugosité de la surface.</p>
<p>Somme des écarts du 1<sup>er</sup> au 4<sup>ème</sup> ordre Profil total</p>		<p>Ensemble des défauts de surface dont l'analyse permet de déterminer leur influence spécifique sur une ou plusieurs fonctions données.</p>

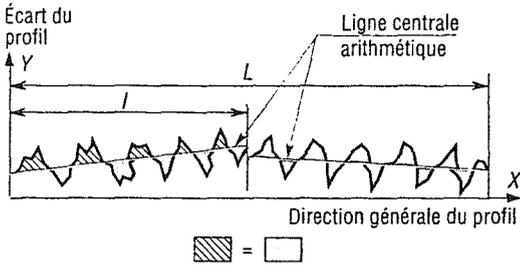
\* Un profil anamorphosé est un profil enregistré avec des échelles horizontale et verticale différentes.

### 3.1.3 Caractéristiques du profil de la surface

Pour caractériser les différents défauts de surface, les normes proposent plusieurs de critères de profil ainsi qu'un certain nombre de facteurs de forme. Pour une meilleure compréhension on présente dans le tableau II.5 les caractéristiques du profil (selon NFE 05 015).

Tableau II.5 Caractéristiques du profil

Désignation	Illustration	Définition
Saillie locale		Partie du profil comprise entre deux minima adjacents.
Creux local		Partie du profil comprise entre deux maxima adjacents.
Motif local		Portion de profil comprise entre les points les plus hauts de deux saillies locales du profil, consécutives ou non.  Un motif est caractérisé par: - sa longueur $AR_j$ - ses deux profondeurs $R_j$ et $R_{j+1}$ - la valeur T égale à la plus petite des deux profondeurs $R_j$ et $R_{j+1}$
Longueur d'évaluation ( $L = \ell m$ )		Longueur mesurée suivant la direction générale du profil et utilisée pour le calcul des paramètres.
Longueur de base ( $l = \ell m$ )	La longueur de base $\ell e$ est la partie de la longueur d'évaluation utilisée pour séparer les irrégularités du profil : $\ell m = n \cdot \ell e$	

<p><b>Lignes de référence :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ligne des moindres Carrés</li> <li>- Ligne centrale arithmétique</li> </ul>		<p>Lignes de référence ayant la forme du profil géométrique et qui divisent le profil de telle sorte qu'à l'intérieur de la longueur de base:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1 - la somme des carrés des écarts par rapport à cette ligne soit minimale;</li> <li>2 - les sommes des aires comprises entre elles et le profil soient égales de part et d'autre.</li> </ol>
<p><b>Ligne enveloppe :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Supérieur (LES)</li> <li>- Inférieure (LEI)</li> </ul>		<p>LES : segments de droite joignant les points les plus hauts des saillies locales de profil.</p> <p>LEI : segments de droite joignant les points les plus bas des creux locaux de profil.</p>

### 3.1.4 Paramètres de rugosité

#### Rugosité moyenne ( $R_a$ )

C'est la moyenne arithmétique de la valeur absolue de la différence d'ordonnée ( $y_i$ ), entre les points du profil de rugosité et la ligne moyenne sur la longueur d'évaluation ( $\ell_m$ ). Cette grandeur peut correspondre à la hauteur d'un rectangle dont la longueur est la longueur d'évaluation ( $\ell_m$ ) et dont l'aire est égale à la somme absolue des aires délimitées par le profil de rugosité et par la ligne moyenne. Ce paramètre est connu comme la rugosité moyenne -  $R_a$  (figure II.36), (utilisé par les normes ASME B46.1 : 1995, ASME B46.1 : 1985, ISO 4287-1997, ISO 4287/1-1984 et ISO 13565-1996).

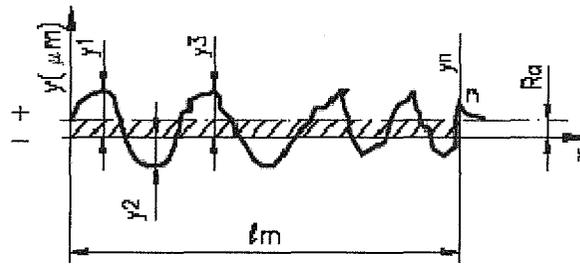


Figure II.36 Rugosité moyenne (Ra)

$$Ra = \frac{y_1 + y_2 + \dots + y_n}{n} \quad (2.1)$$

$$Ra = \frac{1}{\ell_m} \int_0^{\ell_m} |r(x)| dx \quad (2.2)$$

$\ell_m$  - longueur d'évaluation

$r$  - hauteur du profil de rugosité

$x$  - coordonnée dans la direction du mouvement du capteur de mesure

Ra est le paramètre de mesure le plus utilisé dans le monde. Il est applicable à la majorité des processus de fabrication. En raison de son utilisation fréquente, presque tous les équipements de mesure fournissent ce paramètre. Les défauts superficiels résultant du procédé d'usinage ne modifient pas beaucoup sa valeur.

Par contre la valeur de Ra sur une longueur de base correspond à la moyenne de la rugosité. Donc, si un sommet ou un creux non typique apparaît sur la surface, la valeur de la moyenne ne souffrira pas une grande modification, occultant ainsi le défaut.

La valeur de Ra ne définit pas la forme des irrégularités du profil. De ce fait, deux surfaces d'usinages différents peuvent fort bien avoir le même Ra, et donner des résultats d'exploitation complètement divergents.

Aucune distinction n'est faite entre les saillies et les creux.

Pour quelques procédés de fabrication qui produisent une fréquence très élevée de creux ou de saillies, le paramètre n'est pas approprié, la distorsion provoquée par le filtre conduisant à un niveau d'erreur très important.

### Mesure de la rugosité $R_a$

Pour la mesure de la rugosité, les valeurs suivantes sont recommandées pour la longueur de base, (tableau II.6).

Tableau II.6 Longueur de base (*cut off*)

Rugosité $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	Longueur de base minimum $\ell_e$ - <i>cut off</i> ( $\mu\text{m}$ )
$0 < R_a < 0,1$	0,25
$0,1 < R_a < 2$	0,8
$2 < R_a < 10$	2,5
$R_a > 10$	8

### Rugosité maximale ( $R_y$ )

La rugosité maximale  $R_y$  est définie comme la plus grande valeur des rugosités partielles ( $Z_i$ ) qui se présentent dans la longueur d'évaluation ( $\ell_m$ ). Par exemple, dans la figure II.37, la plus grande valeur partielle est  $Z_3$ , qui est localisée dans la 3<sup>ème</sup> longueur de base (*cut off*), et qui correspond à la rugosité  $R_y$  (utilisé par la norme ISO 4287/1-1984).

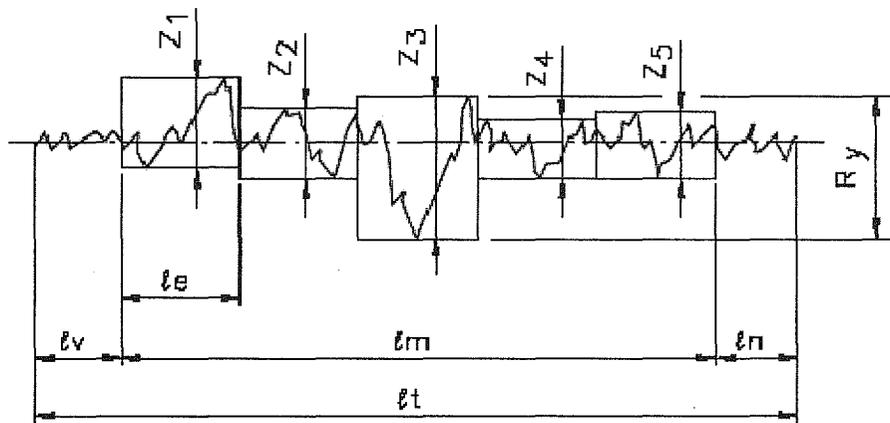


Figure II.37 Rugosité  $R_y$  défini par la rugosité partielle (à ce cas  $Z_3$ )

$$R_y = \max [R_{y_i}], 1 \leq i \leq M \quad (2.3)$$

$i$  - correspond à la longueur du  $i$ -ème échantillon dans une longueur d'évaluation

$M$  - nombre de longueurs d'échantillon dans une longueur d'évaluation (presque toujours 5)

Ry donne une information sur le maximum de la détérioration de la surface verticale de la pièce. Il est facile à obtenir quand l'équipement de mesure fournit le graphique de la surface. Il fournit des informations complémentaires au paramètre Ra (qui atténue la valeur des saillies et des creux).

En revanche tous les équipements de mesure ne fournissent pas directement ce paramètre. Pour l'évaluer à partir d'un profil, il faut avoir la certitude que le profil enregistré est un profil de rugosité. Dans le cas d'un profil effectif (sans filtrage), un filtrage graphique devra être réalisé.

Ry peut donner une image fautive de la surface, parce qu'il évalue des erreurs qui bien souvent ne représentent pas l'ensemble de la surface. Par exemple, une trace causée après l'usinage et qui ne caractérise pas le procédé.

Individuellement, Ry ne donne pas d'informations suffisantes sur la surface ni sur la configuration de la surface. La figure II.38 illustre cette idée : diverses formes de rugosité peuvent avoir la même valeur pour Ry.

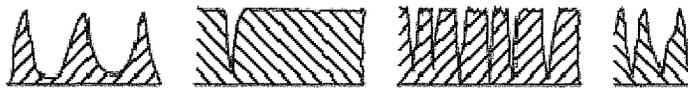


Figure II.38 Diverses formes de rugosité peuvent avoir la même valeur pour Ry

Note : Le paramètre Ry substitue le paramètre Rmáx

### **Rugosité totale (Rt)**

Rt correspond à la distance verticale entre le sommet le plus haut et le creux le plus bas rencontrés sur la longueur d'évaluation ( $\ell_m$ ), indépendamment des valeurs de rugosité partielle ( $Z_i$ ). Sur la figure II.39, on peut observer que le sommet le plus haut est dans le rectangle  $Z_1$ , et que le creux plus bas se trouve dans le rectangle  $Z_3$ . Les deux grandeurs déterminent la profondeur totale de la rugosité Rt (figure II.39), (utilisée par les normes ASME B46.1 : 1995, ISO 4287-1997).

La rugosité maximale Rp est la hauteur de la saillie la plus élevée dans le profil de rugosité sur la longueur d'évaluation ( $p_1$  - figure II.39). De même, Rv est la profondeur du creux la plus profond dans le profil de rugosité sur la longueur d'évaluation ( $v_1$  - figure II.39). La

rugosité totale  $R_t$ , est la somme de ces deux grandeurs, ou la distance verticale du creux la plus profond à la saillie la plus élevée.

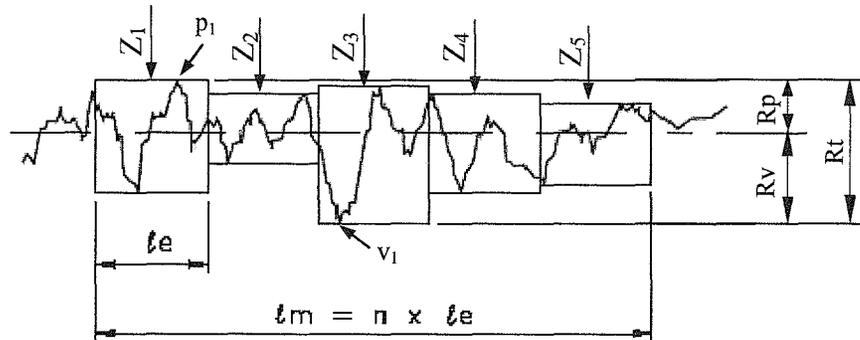


Figure II.39 Rugosité  $R_t$ . Distance entre le sommet le plus haut ( $p_1$ ) et le creux le plus bas ( $v_1$ )

$$R_v = |\min [r(x)]|, \quad 0 < x < \ell_m \quad (2.4)$$

$$R_p = |\max [r(x)]|, \quad 0 < x < \ell_m \quad (2.5)$$

$$R_t = R_v + R_p \quad (2.6)$$

$\ell_m$  - longueur d'évaluation

$r$  - la hauteur du profil de rugosité

$x$  - coordonnée dans la direction du mouvement du capteur de mesure

Le paramètre  $R_t$  a la même application que  $R_y$ , mais avec une plus grande rigidité.

$R_t$  est un paramètre plus rigide dans l'évaluation que  $R_y$ , parce qu'il considère tout la longueur d'évaluation et non seulement la longueur de base (une valeur de *cut off*).

Il est plus facile d'obtenir le profil de surface avec  $R_t$  qu'avec le paramètre  $R_y$ . Par contre dans quelques cas, la rigidité de l'évaluation conduit à des résultats trompeurs.

### **Rugosité moyenne ( $R_z$ )**

$R_z$  correspond à la moyenne arithmétique des cinq valeurs de rugosité partielle mesurées dans la longueur d'évaluation. La rugosité partielle ( $Z_i$ ) est la somme des valeurs absolues des ordonnées des points les plus éloignés, au-dessus et au-dessous de la ligne moyenne, existant dans la longueur de base (*cut off*). Dans la représentation graphique du profil, (figure II.40)

cette valeur correspond à la hauteur entre les points maximum et minimum du profil, dans la longueur de base ( $l_e$ ).

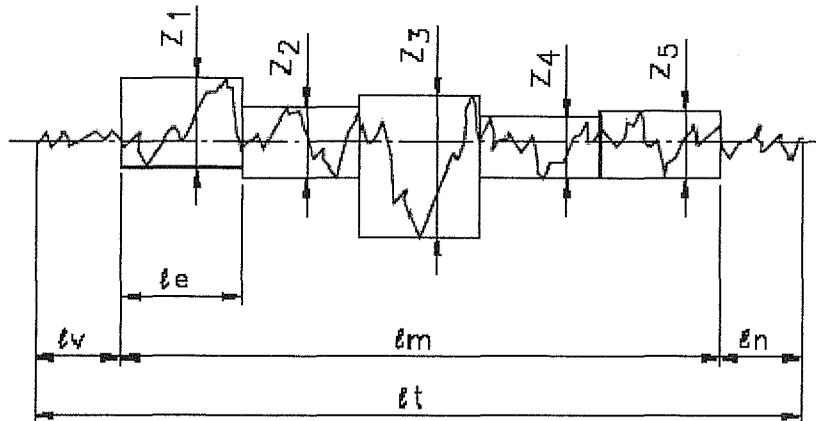


Figure II.40 Rugosité partielle  $Z_i$  pour définir  $R_z$

$$R_z = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5}{5} \quad (2.7)$$

$Z$  - "hauteur" d'une surface à un point particulier ( $x, y$ ) ou hauteur de profil tracé

$R_z$  renseigne sur la distribution moyenne de la surface verticale.

Il est facile à obtenir à l'aide des équipements de mesure qui fournissent des graphiques. Dans le cas de profils périodiques, il définit très bien la surface.

Des marques isolées seront considérées seulement partiellement, en fonction de leur nombre et de leur répartition sur la longueur d'évaluation.

En effet un point isolé ne sera considéré que pour 20%, selon la division en 5 parties de la longueur d'évaluation.

Tout comme  $R_y$ ,  $R_z$  ne fournit aucune information sur la forme du profil, ainsi que sur la distance entre les sillons. Tous les équipements de mesure ne permettent pas d'accéder à ce paramètre.

### ***Rugosité moyenne de dix points $R_z$ (ISO) ou Rugosité moyenne du troisième sommet et creux $R_{3Z}$***

Il s'agit de la moyenne arithmétique des valeurs de rugosité partielle ( $3Z_i$ ), correspondants à chacun des cinq modules (*cut off*). Dans chaque module ont été tracées les distances entre le

troisième sommet le plus haut et le troisième creux le plus bas, dans le sens parallèle à la ligne moyenne. Dans la figure II.41 sont représentés cinq modules avec les valeurs  $3Z_i$  ( $i = 1$  à 5), (utilisé par la norme ISO 4287/1-1984).

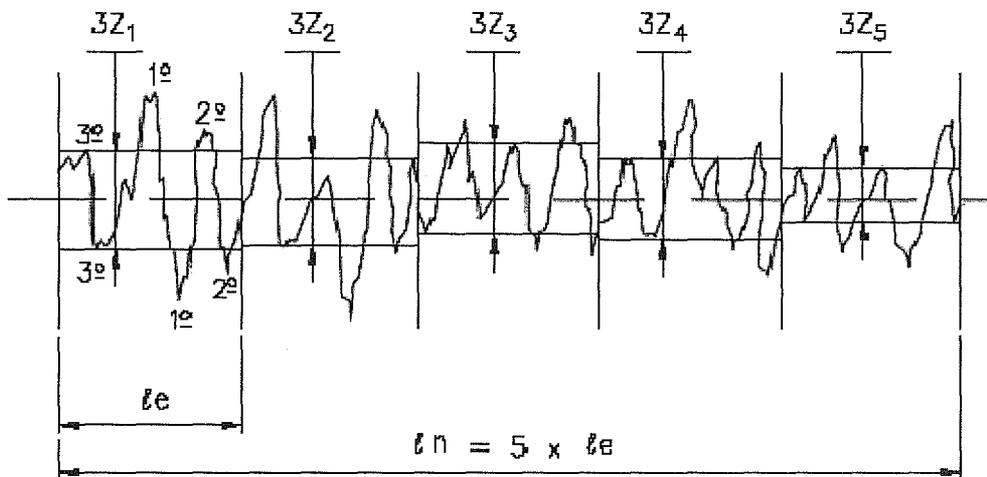


Figure II.41 Rugosité moyenne du troisième sommet et creux ( $R_{3Z}$ )

$$R_{3Z} = \frac{3Z_1 + 3Z_2 + 3Z_3 + 3Z_4 + 3Z_5}{5} \quad (2.8)$$

$R_{3Z}$  est la moyenne des valeurs de  $R_{3Z_i}$ ,

$$R_{3Z} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M R_{3Z_i} \quad (2.9)$$

$i$  - correspond à la  $i$ -ème longueur d'échantillon dans une longueur d'évaluation

$M$  - nombre de longueurs d'échantillon dans une longueur d'évaluation (presque toujours 5)

$z$  - "hauteur" d'une surface à un  $(x, y)$  particulier ou hauteur de profil tracé

$R_{3Z}$  ne considère pas de saillies et de creux qui ne soient pas représentatives de la surface. Il caractérise très bien une surface qui présente une certaine périodicité du profil sillonné. Il est facile à obtenir avec un équipement de mesure qui fournit une représentation graphique du profil.

Par contre, il ne fournit pas d'informations sur la forme du profil ni sur la distance entre les sillons.

Peu d'équipements de mesure fournissent directement ce paramètre de forme.

### Autres paramètres de rugosité

Des renseignements intéressants concernant la caractérisation des surfaces peuvent être apportés par l'utilisation de paramètres sans dimension tels que l'obliquité (*Skewness*) et la finesse (*kurtosis*).

Le paramètre d'obliquité (*Skewness*) -  $R_{sk}$  caractérise la symétrie de la courbe de densité des hauteurs de la distribution considérée par rapport à la courbe gaussienne, (figure II.42), (utilisé par les normes ASME B46.1 : 1995, ISO 4287-1997 et ISO 4287/1-1984).

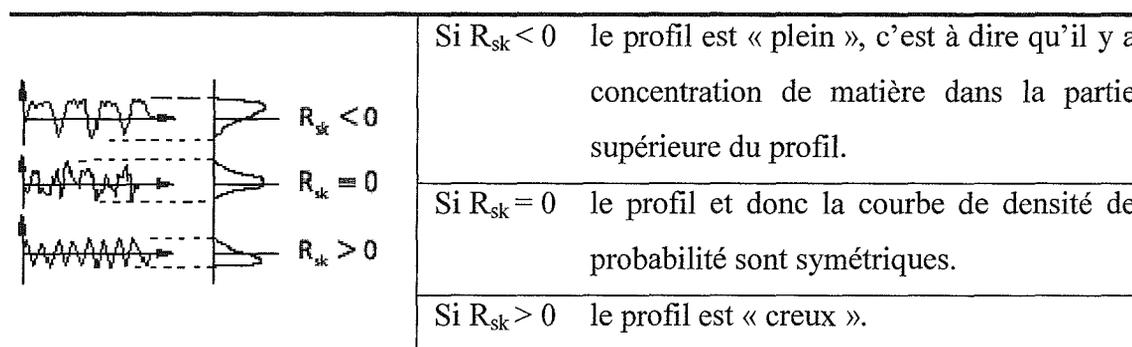


Figure II.42 L'obliquité (*Skewness*) -  $R_{sk}$

$$R_{sk} = \frac{1}{NR_q^3} \sum_{n=1}^N r_n^3 \quad (2.10)$$

où,  $R_q$  correspond à la rugosité moyenne de la racine de la moyenne quadratique (*root-mean-square - rms*) d'une surface calculée à partir d'une autre intégrale du profil de rugosité.

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{\ell_m} \int_0^{\ell_m} r^2(x) dx} \quad (2.11)$$

L'équivalent numérique normalement utilisé est:

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N r_n^2} \quad (2.12)$$

$\ell_m$  - longueur d'évaluation

- x - coordonnée dans la direction du mouvement du capteur de mesure  
 n - correspond au i-ème point individuel dans une trace digitalisée  
 N - nombre de points digitalisés dans un profil  
 r - hauteur de profil de rugosité

Le paramètre de finesse (*kurtosis*) -  $R_{ku}$  caractérise la finesse, l'aplatissement du profil de surface. Ce paramètre permet de chiffrer la finesse de la courbe de densité par rapport à la courbe gaussienne, (figure II.43), (utilisé par les normes ASME B46.1 : 1995 et ISO 4287-1997).

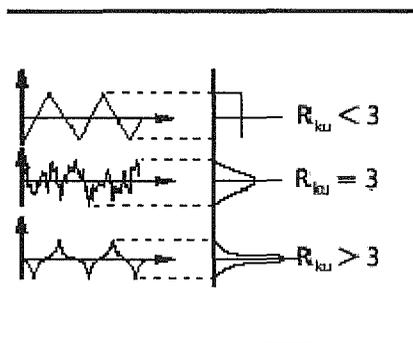
	<p>Si <math>R_{ku} &lt; 3</math> la répartition est plus étendue (spectre plus large) que la répartition gaussienne.</p> <p>Si <math>R_{ku} = 3</math> la distribution est normale. La loi de répartition des ordonnées est gaussienne.</p> <p>Si <math>R_{ku} &gt; 3</math> la répartition est plus serrée (spectre plus pointu) que la répartition gaussienne.</p>
--	--

Figure II.43 La finesse (*kurtosis*) -  $R_{ku}$

$$R_{ku} = \frac{1}{NR_q^4} \sum_{n=1}^N r_n^4 \quad (2.13)$$

- n - correspond au i-ème point individuel dans une trace digitalisée  
 N - nombre de points digitalisés dans un profil  
 r - hauteur de profil de rugosité

Le « *Skewness* » et le « *kurtosis* » sont fortement influencés par les sommets et les creux isolés, ce qui réduit leur importance pratique.

### 3.2 Systèmes d'analyse de la surface bois

La qualification par un observateur des propriétés d'une surface est un phénomène complexe qui fait intervenir à la fois la perception visuelle et le toucher, on parle de phénomène visotactile.

Concernant l'aspect visuel, l'œil est le capteur unique de radiations optiques (domaine de sensibilité :  $400\text{nm} < \lambda < 700\text{nm}$ ) qui permet au cerveau d'interpréter qualitativement la couleur et les théories de la couleur donnent une interprétation de la correspondance physiologique associée aux phénomènes physiques. Par contre, il n'existe toujours pas de modèle simple qui relie les propriétés de surface du matériau aux sensations physiologiques de toucher perçues par le doigt.

En effet, contrairement à l'œil dans lequel seulement deux types de cellules (les bâtonnets et les cônes) sont sensibles à un phénomène physique unique et bien identifié (l'intensité lumineuse), le doigt perçoit simultanément plusieurs types d'informations par plusieurs types de capteurs différents (capteurs de forme, capteurs de chaleur,...) ce qui empêche toute compréhension simple et précise du « réflexe tactile ».

Diverses méthodes d'analyse ont été développées qui permettent une quantification objective de l'état de surface (par palpation, vision artificielle, frottement) et une qualification plus subjective peut être réalisée par la méthode visotactile.

#### 3.2.1 Le palpation mécanique

De même que le doigt détecte les hauteurs d'aspérités des surfaces, les appareils actuels de palpation mécanique transforment les mouvements verticaux du palpeur (stylet explorateur de surface) au moyen d'un convertisseur, en une grandeur électrique (généralement la tension) qui est amplifiée et enregistrée. Il est alors possible d'évaluer le profil mesuré avec un ou plusieurs critères statistiques ( $R_a$ ,  $W_a$ ,...).

Des récents perfectionnements ont été apportés (Mignot, 1983 et Mathia, 1983) à cette technique et ont permis d'accéder à l'étude d'un profil surfacique voire même à une représentation graphique tridimensionnelle de la surface (cas du rugosimètre électronique à capteur du Centre Technique des Industries Mécaniques (CETIM), Riout, 1985).

Suivant les caractéristiques de surface que l'on veut prendre en compte, le choix du palpeur est essentiel. A ce titre, Triboulot (1984) montre que le rayon de la pointe du palpeur et la charge appliquée sur celle-ci influencent les résultats.

D'après les conclusions des plusieurs auteurs, on peut relever comme avantage la possibilité d'accéder à l'aide du palpeur mécanique à des résultats quantitativement précis suivant l'ordre (1<sup>e</sup>, 2<sup>e</sup>, 3<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup>) des défauts que l'on veut mettre en évidence. Cette méthode semble particulièrement adaptée aux surfaces de bois présentant un profil surfacique relativement homogène (MDF, résineux, certains feuillus à pores diffus).

Le domaine d'utilisation du palpement mécanique reste néanmoins limité. Suite à ses investigations, Triboulot (1984) conclut à l'inefficacité du palpement mécanique sur les feuillus à zone initiale poreuse. En effet, pour les surfaces cumulant différents types d'anisotropie (dues à l'anatomie, aux conditions d'usinage du bois), la répétabilité des mesures n'est pas bonne.

D'un point de vue pratique, les mesures se font par contact ; ce qui peut modifier localement l'état de surface (échauffement de la surface, déformations liées au contact bois-palpeur,...). D'autre part, le domaine d'intégration (longueur de palpement) est limité.

La vitesse maximale du palpeur est de 20 mm/min, or la vitesse moyenne d'avance des pièces usinées dans l'industrie du bois est de l'ordre de 20 m/min soit 1000 fois plus grande, c'est pourquoi une application industrielle de ce type de système, est peu envisageable.

### **3.2.2 La vision artificielle**

Par analogie à l'œil qui capte les radiations optiques, une caméra digitale CCD joue le rôle de capteurs d'image. Ces images sont traitées et analysées de manière informatique par l'intermédiaire d'une carte d'acquisition (digitalisation de l'image) et d'un logiciel interactif de traitement de l'image.

Le principe consiste à éclairer la surface étudiée à l'aide d'une lumière rasante; les creux seront alors dans une zone d'ombre et les pics éclairés.

L'étape suivante consiste à prendre une image de la surface et à l'analyser afin d'en estimer la rugosité. L'utilisation d'un laser (Lepetit et *al.*, 1990) comme source lumineuse comporte certains avantages : d'une part, le laser ne crée pas de gradient de lumière entre le début et la

fin de la surface à analyser ; d'autre part la couleur rouge du laser utilisé permet de filtrer de légères différences de coloration du bois.

Pour faciliter l'analyse d'images, Gross et *al.*, (1996) a étudié les niveaux de gris au long d'une droite (plutôt que d'une surface) au centre du trait laser par l'intermédiaire d'une caméra matricielle (matrice de dimension 512\*512, information codée sur 8 bits (256 niveaux de gris)). La courbe obtenue caractéristique des niveaux de gris est ensuite lissée par la courbe réelle ; enfin on calcule l'écart-type de la courbe résultat. C'est ce critère qui est retenu comme critère principal de qualification de l'état de surface.

Quant à Lepetit, Martin et Triboulot (1990), ils ont mesuré l'écart maximal entre les points de la courbe du profil caractéristique des niveaux de gris (distance mesurée par un comptage de pixels) et ont retenu le critère Rtv (équivalent optique du critère normalisé Rt (rugosité totale)).

Comme avantages, on peut dire que les profils obtenus par traitement d'images s'apparentent en fait à ceux obtenus par palpation mécanique mais avec la différence fondamentale qu'ils s'affranchissent des problèmes inhérents au contact bois/palpeur.

De plus ce type de système permet de réaliser des mesures rapides aussi bien sur une ligne que sur une surface.

Contrairement au palpation mécanique, les résultats obtenus ne sont pas l'illustration d'une rugosité normalisée de surface au sens strict, mais il s'agit bien de qualité d'état de surface (au sens le plus général) évalué de manière quantitative.

Les systèmes de traitement d'images sont compatibles avec une application industrielle : imaginons le cas d'une production en continu avec prises d'images successives et traitement rapide de l'information.

Néanmoins, il y a aussi des inconvénients, bien adaptée aux matériaux qui ont une couleur suffisamment homogène, l'analyse d'images reste encore difficilement applicable aux surfaces présentant des variations locales de couleur (maillure de chêne, cernes d'accroissement des résineux).

Au stade de l'expérimentation, la mise au point de la mesure demeure encore longue et aléatoire et reste très sensible au bon réglage de la lumière laser et de son angle d'incidence.

### 3.2.3 Les procédés pneumatiques

Le principe de ces méthodes repose sur les propriétés des écoulements des fluides à travers des orifices (figure II.44).

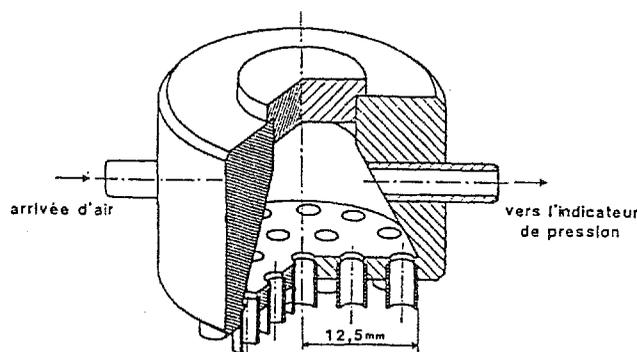


Figure II.44 Buse du rugosimètre pneumatique (d'après Bonac, 1979, cité par Mothe, 1985)

Ces méthodes basées sur l'hypothèse que la fuite d'air est proportionnelle à la qualité d'état de surface, ont d'abord été utilisées en industrie papetière puis dans l'industrie des panneaux de fibres et de particules.

On compare la fuite entre un gicleur de forme généralement annulaire posé sur la surface à examiner et une fuite étalon (méthode Nicholau (Riout, 1985) par l'emploi du micromesureur Solex). Cette comparaison s'effectue par une mesure de pression d'une chambre située entre l'orifice mesure et l'orifice étalon. Cette méthode permet d'approcher la valeur de la profondeur d'aplanissement  $R_p$ .

Mothe (1985) réalise une étude comparative entre la rugosité que mesure l'appareil pneumatique et deux méthodes sensorielles (visuelle et tactile) et montre l'efficacité de cet appareillage pour des surfaces de matériaux non poreux.

Il subsiste toutefois un problème majeur lié à la porosité du bois. Dans le cas des essences à zone initiale poreuse, l'appareil pneumatique ne peut pas caractériser la rugosité de la surface de bois.

Les palpeurs pneumatiques permettent des mesures surfaciques d'état de surface. Dans ces conditions, l'anisotropie du matériau est prise en compte.

D'après Mothe (1985), ces techniques de mesure présentent deux qualités indéniables : un coût de fabrication peu élevé et la rapidité des mesures (quelques secondes par mesure).

Cependant, il y a des inconvénients, l'anatomie de certaines essences rend inutilisable la méthode pneumatique. En effet, la porosité importante des espèces à zone initiale poreuse et la maillure de certains feuillus induisent des fuites d'air non caractéristiques de l'état de surface.

D'autre part, Mothe (1985) a montré que l'appareil pneumatique est plus sensible aux propriétés du plan ligneux qu'aux caractéristiques de l'usinage.

D'un point de vue fonctionnel, l'utilisation des méthodes pneumatiques n'autorise pas des mesures en continu.

### 3.2.4 Le frottement

Conformément à la quatrième loi du frottement sec énoncée par Coulomb (1785), qui stipule que le coefficient de frottement dépend de la nature des matériaux en contact et de leur état de surface, le principe de ce système vise à caractériser l'état de surface par frottement de glissement d'un palpeur sur les surfaces de bois.

En mesurant la force de traction horizontale nécessaire au glissement du patin (frottement par glissement) de manière informatique (cellule de charge, carte d'acquisition, logiciel interactif), il est possible d'évaluer l'état de surface.

Le frottement désigne les phénomènes qui naissent dans les zones superficielles de deux corps appuyant l'un sur l'autre et où déplacement relatif n'entraîne ni usure exagérée, ni modification des structures ou élévation de température dommageables. Le frottement a notamment pour effet le vieillissement des surfaces, l'apparition de contraintes qui provoquent l'écaillage, la création de quantité de chaleur qui provoque un auto-relâchement des contraintes résiduelles, etc.

Léonard de Vinci et M. Amontons (*Encyclopedia Universalis*) ont été les premiers à remarquer, d'une part la proportionnalité entre la force de frottement (force de traction) et le pondération total du corps en appui (bille – figure II.45), et d'autre part l'indépendance de cette force par rapport à la grandeur de la surface d'appui. Pour eux, seul l'effort à fournir pour faire franchir aux deux corps en contact leurs aspérités respectives intervient dans la genèse de la force de frottement.

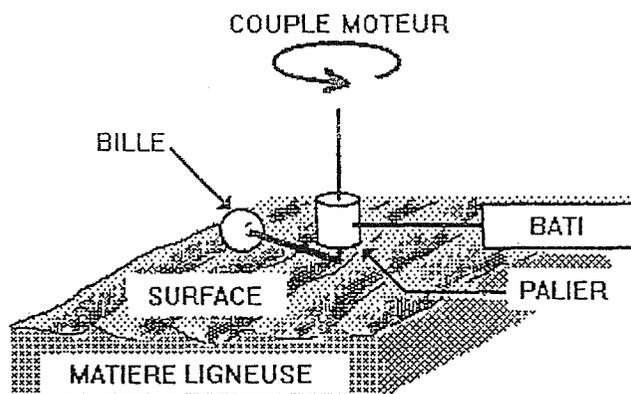


Figure II.45 Principe de la mesure du frottement

Ceci est aussi le principe de TOPOSURF<sup>®</sup>, dont son principe s'inspire d'une approche «pseudo tactile» qui se propose de reconstituer le mouvement tournant d'un doigt de la main sur une surface et d'en déduire les composantes topographiques caractéristiques de l'état de surface. Cette mesure intègre en une seule mesure l'anisotropie de surface et permet un classement quantitatif.

On peut indiquer comme avantages du frottement, contrairement au palpeur mécanique qui évalue une géométrie des surfaces liée à l'anatomie du matériau, la mesure par frottement intègre aussi d'autres caractéristiques de l'état de surface (la déformation élastique voire plastique du matériau,...).

Enfin, l'utilisation de ce type de capteur est tout à fait envisageable dans le cadre de la vérification de la qualité de surface en sortie de machine d'usinage (raboteuse, ponceuse) comme c'est le cas dans cette thèse.

En ce qui concerne les inconvénients, les mesures se font par contact ce qui peut altérer superficiellement l'état de surface ou bien même entraîner une usure du patin qui se caractérise par une dérive des mesures. De plus, les mesures se font en discontinu.

### 3.2.5 La méthode viso-tactile

L'objectif de ce test est de donner un classement de référence. En effet, le contrôle viso-tactile étant le seul moyen d'évaluation de la qualité de la surface dans la filière bois, c'est la référence que nous devons adopter pour être en conformité avec les besoins des industriels.

D'autre part, l'appréciation visuo-tactile est aussi celle du client pour lequel l'aspect esthétique de la surface est le premier critère de choix.

La qualité d'une surface finie dépend non seulement de la structure du matériau, c'est à dire de l'essence, mais aussi de son usinage. L'appréciation de cette surface relève à la fois de l'esthétique et de la technique.

L'esthétique d'une surface est appréciée par trois de nos cinq sens : la vue, le toucher et quelquefois l'odorat. Le classement s'effectue suivant plusieurs facteurs, comme la couleur, la brillance, la disposition et l'orientation des fibres, la rugosité des surfaces, l'homogénéité de la finition, etc. Mais cette appréciation est très subjective et dépend beaucoup plus de la personne.

La technique, en revanche, représente plus le point de vue du fabricant. Elle se réfère à critères comme, le choix du produit de finition, sa quantité (grammage), l'état de surface, l'accrochage de la finition, etc.

La méthode visuo-tactile consiste simplement en un palpé de la surface par le doigt en rotation (figure II.46).

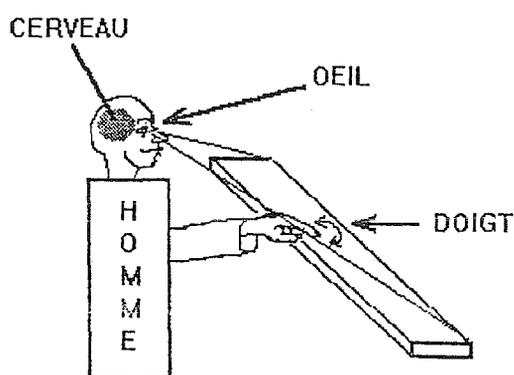


Figure II.46 La méthode visuo-tactile

En pratique, pour évaluer la rugosité on procède généralement par comparaison par rapport à des échantillons étalons de type rugotest du Laboratoire Central de l'Armement (Riout, 1985). Ces échantillons sont exprimés en fonction d'un critère statistique d'état de surface (souvent le Ra) et ils sont utilisés dans la plupart des entreprises aussi bien au niveau de l'étude, de la fabrication que du contrôle (Riout, 1985).

En ce qui concerne les avantages, on peut dire que le principe d'appréciation permet de reconnaître des rugosités relativement faibles. Les limites de la perception ont été estimées par Schmaltz (1936) à une rugosité de 0,5  $\mu\text{m}$  voire même 0,1  $\mu\text{m}$  avec de l'entraînement pour le toucher et à 0,1  $\mu\text{m}$  pour la vue.

La simplicité et la rapidité des mesures constituent les points forts de cette méthode d'évaluation d'état de surface. Par un mouvement rotatif du doigt sur la surface, la méthode viso-tactile permet également d'intégrer l'anisotropie surfacique due à l'usinage ou à l'anatomie du matériau bois.

On doit relever quelques inconvénients. Bien qu'utilisée dans l'industrie du bois pour le contrôle des produits usinés, il faut reconnaître que la méthode viso-tactile est liée à la subjectivité de l'opérateur. En effet, celui-ci attachera plus ou moins d'importance aux caractéristiques de surface : aspects esthétiques (brillance, couleur...), type d'usinage (sciage, rabotage, ponçage,...) et à l'anatomie du bois (zone initial poreuse, largeur des cernes, maillures,...).

Deux études récentes ont permis de montrer certaines particularités de la méthode. Triboulot et Zerizer (1991) ont montré que les aveugles (sens tactile très développé) peuvent évaluer de manière très différente des surface classées par des voyants. Sadoh a observé des corrélations différentes pour les feuillus et les résineux entre la rugosité sensorielle et les propriétés anatomiques du bois. La sensation de rugosité serait due, pour les feuillus, aux vaisseaux, alors que ce sont les ondulations provoquées par les cernes qui seraient prises en compte pour les résineux.

Les résultats des mesures par cette méthode relèvent du qualitatif et en aucun cas du quantitatif, cependant cette méthode a été utilisée dans cette étude pour sa complémentarité par rapport aux méthodes quantitatives et aussi pour déterminer les corrélations avec les données quantitatives sur l'état de la surface.

### ***Résumé des systèmes d'analyse de la surface bois***

Le bois est un matériau composite anisotrope. Aussi, une caractérisation juste de son état de surface implique la prise en compte de son anisotropie surfacique dans le principe de mesure. Cette anisotropie peut être scindée en deux :

- l'anisotropie intrinsèque du bois ;

- l'anisotropie liée à l'usinage qui se matérialise par la présence de pas d'usinage régulièrement répartis sur la surface du bois.

Tous les systèmes de caractérisation de surface entrevus dans ce paragraphe, sont susceptibles d'intégrer l'anisotropie du bois dans leur domaine d'utilisation.

Le récapitulatif qui suit (tableau II.7), présente les moyens permettant la prise en compte de l'anisotropie par chaque méthode et les limites de cette intégration.

Tableau II.7 Méthodes d'analyse de la surface bois et ses limites

Méthodes	Moyen	Limite
<b>Palpage mécanique</b>	Prise de plusieurs mesures unidirectionnelles de manière à décrire un cercle.	Prise en compte de l'anisotropie très longue; les problèmes de mesure liés aux feuillus à zone initiale poreuse subsistent.
<b>Vision artificielle</b>	Plutôt que d'étudier les niveaux de gris d'une droite, on étend le domaine d'intégration à une surface.	Sur une surface, des problèmes d'homogénéité d'éclairage se posent; l'analyse d'image des surfaces présentant des variations de couleurs n'est pas encore au point.
<b>Pneumatique</b>	Le principe même intègre l'anisotropie du bois.	La porosité du bois massif rend difficile l'utilisation de cette méthode.
<b>Frottement</b>	Juxtaposition de plusieurs mesures unidirectionnelles de manière à décrire un cercle.	Prise en compte de l'anisotropie expérimentalement très longue.
<b>Viso-tactile</b>	Palpage du doigt en rotation.	L'évaluation reste qualitative.

Une analyse de ce récapitulatif montre que :

- la prise en compte de l'anisotropie est expérimentalement contraignante (palpage mécanique, vision artificielle, frottement) ;
- certaines caractéristiques anatomiques et esthétiques du bois restreignent le domaine d'utilisation de certaines méthodes (palpage mécanique, vision artificielle, méthode pneumatique).

On remarque que le frottement est la seule méthode d'évaluation quantitative d'état de surface qui ne soit pas limitée par certaines singularités du bois.

En revanche, la prise en compte de l'anisotropie du bois avec ce principe de mesure est longue, ceci n'existe pas pour la vision artificielle, méthode qui va être utilisée dans cette étude.

### 3.3 Traitement du profil de la surface

#### 3.3.1 Filtres

Un profil de surface peut être composé de toute une gamme de composantes de fréquence. Les composantes de haute fréquence (ou onde courte) correspondent à des fréquences qui sont perçues pour une surface rugueuse et par conséquent elles sont appelées "rugosité". Les composantes de basse fréquence (ou onde longue) correspondent à des changements plus progressifs dans le profil et sont souvent associées aux termes "ondulation" ou même "forme". Notons que la rugosité et l'ondulation sont des termes relatifs, tout comme les mots "hauts", "bas", "courts" et "longs".

Le filtrage est un procédé qui permet de séparer certains composantes de fréquence d'un profil de surface. Selon la composante désirée, l'opération de filtrage peut être :

- Passe-court, ou passe-haut : laisse passer les composantes de courte longueur d'onde (fréquence haute), donc le profil de rugosité est extrait ;
- Passe-long, ou passe-bas : laisse passer les composantes de grande longueur d'onde (fréquence basse), donc le profil d'ondulation est extrait ;
- Passe-bande : extrait un profil de largeur de bande spécifié en appliquant les filtres passe-haut et passe-bas, permettant ainsi de manipuler la largeur de bande du profil.

Le terme "cut-off" indique numériquement la fréquence limite au-dessous ou au-dessus de laquelle les composantes sont extraites ou éliminées.

Le choix des méthodes de filtrage a une influence importante sur la caractérisation de la surface.

Quand on parle de topographie de la surface, il est question des structures micro-géométriques de différentes formes et profondeurs provenant de l'effet intégré de nombreux facteurs dans le

procédé d'usinage. Elle peut objectivement transmettre l'information appropriée sur la génération de la surface et directement influencer l'exécution fonctionnelle des surfaces manipulées (Jiang *et al.*, 2000).

La caractérisation de la surface est basée sur une séparation efficace et fiable des composantes des profils de surfaces. Pour cela, plusieurs types de filtres ont été utilisés, mais le filtre de Gauss reste le plus connu.

Le filtrage Gaussien a résolu les problèmes de la déformation de phase et de la conception complexe dans le filtrage traditionnel. Il peut efficacement séparer la rugosité et l'ondulation quand les erreurs non pertinentes de forme et de conversion ont été éliminées de l'ensemble de données mesurées (ISO 11562, 1996). Cependant, il a été montré que la performance du filtrage Gaussien sera affectée dans certaines conditions, particulièrement en cas de multitraitement et pour les surfaces usinées où apparaissent des signaux anormaux, tels que les sillons, les rayures et les incisions. L'effet des erreurs de mesure et des valeurs caractéristiques anormales inévitablement apportées par les signaux eux-mêmes, entraîne la déformation du résultat de filtrage à proximité des signaux anormaux. Comparée avec les résultats idéalisés, la ligne de référence réelle est tirée vers le signal anormal (voir figure II.47a) et le profil résiduel est déformé dans la direction opposée (voir figure II.47b) après le filtrage Gaussien. Dans le cas d'un signal anormal simple, la déformation sera maximale à l'emplacement du signal anormal et est étendue à toute la gamme dans la largeur de la fenêtre de pondération de la fonction Gaussienne (Li *et al.*, 2004).

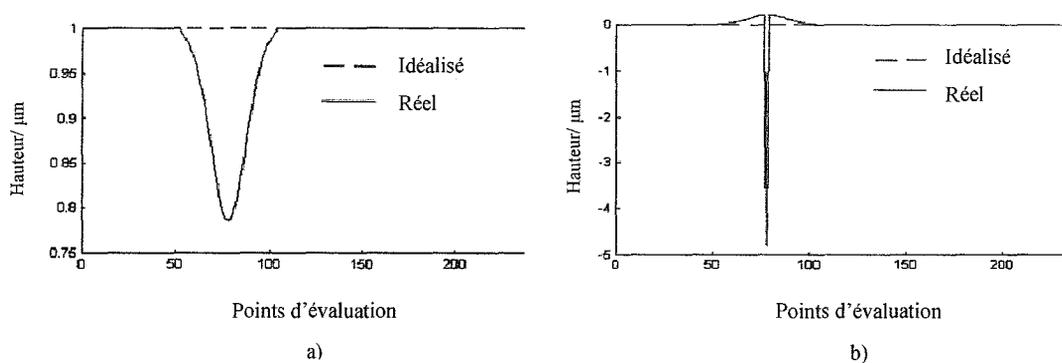


Figure II.47 a) Déformation de la ligne de référence du filtrage Gaussien; b) Déformation résiduelle après le filtrage Gaussien (adaptée de Li *et al.*, 2004)

Pour les raisons ci-dessus, le filtre  $R_k$  utilisant le filtrage Gaussien en deux étapes est recommandé par ISO 13565-1 (1996). Mais, il ne peut pas toujours surmonter l'influence des

caractéristiques anormales et le problème d'effet de bord existe pour lui. Le filtrage robuste avec rayures surmonte ce problème tout en étant robuste contre les creux profondes (Raja et *al.*, 2002).

Li et *al.*, (2004) introduit l'estimation de M (méthode du maximum de vraisemblance généralisé) pour résoudre le problème des signaux anormaux. Selon la valeur de M, différentes fonctions robustes de pondération peuvent mener à des résultats diamétralement différents quand le même signal observé est traité. Pour rendre le filtrage Gaussien adaptable à une application pratique généralisée, Li et *al.*, (2002) ont comparé plusieurs fonctions typiques de pondération: WLAV, Huber, Hampel, Tukey, Andrews, Fair, Danmark, IGGI et QC. Ils proposent une nouvelle fonction robuste de pondération nommée ADRF (voir figure II.48). Les résultats montrent que le filtrage robuste ADRF possède la même efficacité que le filtrage Gaussien dans des conditions normales, mais il améliore l'efficacité du filtrage Gaussien dans des conditions anormales.

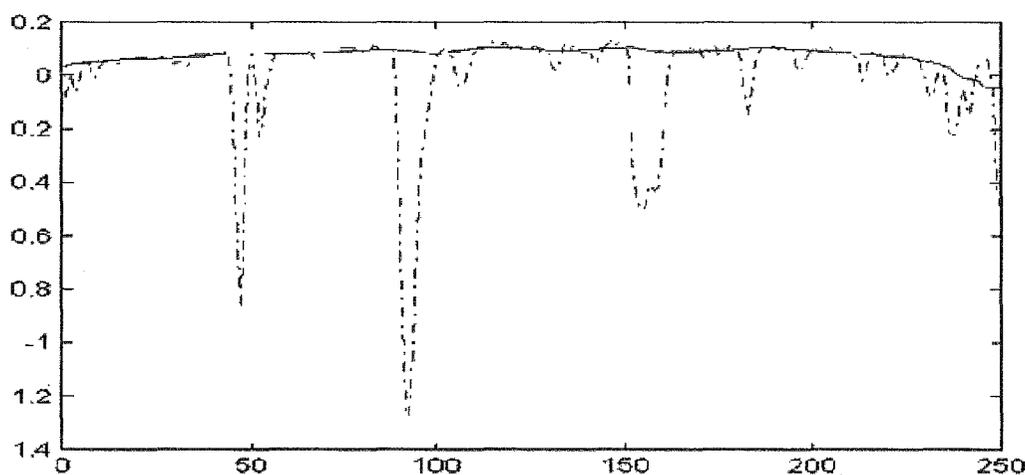


Figure II.48 Références de filtrage après traitement robuste avec une fonction de pondération ADRF (X- points d'évaluation ; Y- hauteur ( $\mu\text{m}$ )) (adaptée de Li et *al.*, 2004)

### 3.3.2 Application au cas du bois

Les surfaces de bois contiennent des irrégularités dues au processus d'usinage et à sa propre anatomie, ainsi, pour que la surface soit correctement évaluée, il faut que les données quantitatives de mesure de la surface soient filtrées pour enlever les erreurs de forme et l'ondulation.

Comme les auteurs cités précédemment l'ont trouvé, les filtres normalisés décrits par ISO 11562 et par ISO 13565-1 ont des limitations quand ils sont appliqués aux surfaces de bois. La longueur utilisable du profil filtré est plus courte que les données originales, et les surfaces bois présentent des déformations dans les profils qui correspondent à des creux profonds au-dessous d'un plateau relativement lisse (Gurau et *al.*, 2005). Donc, il faut développer un filtrage qui évite ces limitations et fournit une méthode fiable d'obtenir un profil de rugosité du bois.

Quand la rugosité anatomique est plus grande que la rugosité issue de l'usinage, les filtres standards de profil, de type ISO 11562 (1996), présentent un type de déformation connu sous le nom de "push-up" (Anonyme, 2002 ; Krish et Chiha, 1999), qui peut être vu dans le profil de surface correspondant à la figure II.49, particulièrement là où il y a des pores groupés.

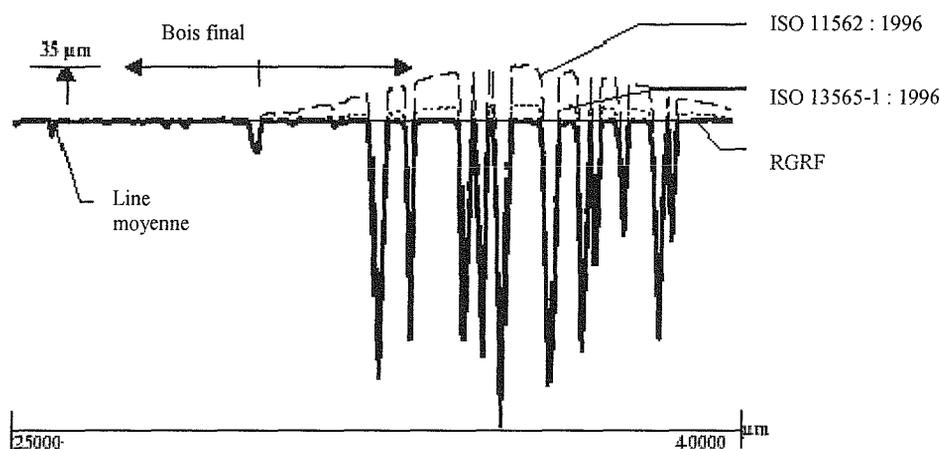


Figure II.49 L'effet de "push-up" sur un profil de rugosité, avec différentes méthodes de filtrage (adaptée de Gurau et *al.*, 2002)

En plus, les longueurs de "cut-off" de la première et de la dernière moitié du profil filtré ne peuvent pas être employées pour d'autres évaluations du fait des "effets de bout" présentés par ces filtres (figure II.50).

Une nouvelle norme en préparation, ISO/NP TS 16610-31:2004, basée sur une méthode proposée par Brinkmann (Brinkmann et *al.*, 2000, 2001), présente un filtre Gaussien robuste de régression (RGRF) pour réduire l'influence des creux profonds et des saillies élevées qui causent la déformation dans un profil de rugosité. Ce filtre a été testé avec succès pour les surfaces de bois (Gurau et *al.*, 2002). La fonction principale de ce filtre est une modification du filtre Gaussien d'ISO 11562 (1996) qui enlève les effets de bout (figure II.50).

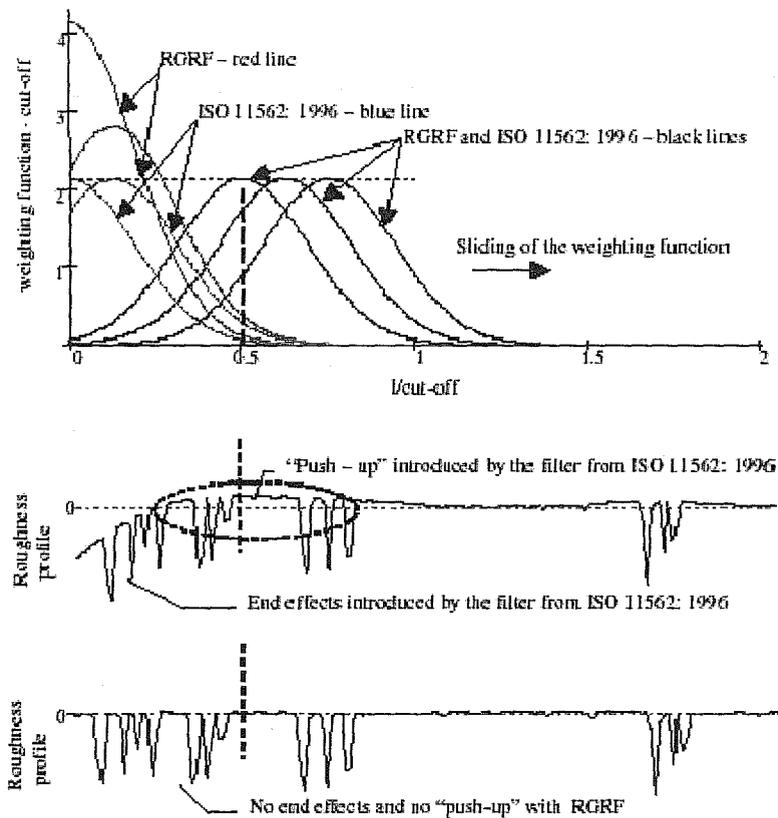


Figure II.50 Comparaison des fonctions principales d'ISO 11562 : 1996 et RGRF et leur effet sur les demi longueurs marginales du "cut-off" du profil. Longueur de profil 15 mm. (Les lignes verticales marquent le niveau de demi longueur de "cut-off" du filtre) (Adaptée de Gurau et *al.*, 2002)

Le "push-up" produit par ISO 11562 (1996) et ISO 13565-1 (1996) est entièrement corrigé avec RGRF (figure II.49), grâce à une fonction principale supplémentaire, qui élimine le bruit hors de la bordre calculée. Le filtre est appliqué itérativement au profil primaire jusqu'à ce que la ligne moyenne soit convergente.

Fujiwara et *al.*, (1999) ont aussi proposé une méthode de filtrage numérique pour réduire au minimum le "push-up", ce qui élimine les creux profonds provoqués par des vaisseaux localisés sur le gradient des côtés de pores. Le filtre était particulièrement sensible au choix de la valeur-bord du gradient.

Une fois qu'un profil approprié de rugosité a été obtenu, une évaluation correcte de la qualité d'une surface usinée implique que des irrégularités dues à l'anatomie du bois sont exclues de la caractérisation numérique du traitement (Westkämper et Riegel, 1993; Magross et Sitkei, 1999; Schadoffsky, 2000). Pour séparer la rugosité anatomique et la rugosité issue de

l'usinage, des méthodes mécaniques et numériques ont été utilisées avec des degrés de succès variables. Les méthodes mécaniques se rapportent à des modifications des appareils de mesure de la rugosité, spécifiquement au stylus de l'appareil de mesure de contact. Des rayons non standard du stylus ont été employés (Ehlers, 1958; Peters et Cumming, 1970; Peters et Mergen, 1971; Usenius, 1975; Pohl, 1999; Wieloch et Pohl, 1999) ou même une modification de sa géométrie (Heisel et Krondorfer, 1995a, 1995b). L'erreur de forme et l'ondulation doivent être exclues de la sortie des données. En tenant compte de la variété des singularités anatomiques entre les espèces et de la gamme possible des tailles du grain, il ne semble pas réalisable de proposer un filtre mécanique simple.

Une approche numérique qui a été appliquée par un certain nombre d'auteurs utilise la courbe d'Abbot (Westkämper et Riegel, 1993; Westkämper et Schadoffsky, 1995a, 1995b; Krisch et Csiha, 1999; Magross et Sitkei, 1999). La courbe d'Abbot est une courbe de distribution cumulative définie dans l'ISO 13565-2 (1996), une norme destinée aux profils contenant des creux profonds en-dessous d'un plateau finement usiné. La courbe d'Abbot est obtenue en rangeant toutes les valeurs d'ordonnée du profil de rugosité dans l'ordre décroissant (figure II.51). La courbe permet de déterminer les paramètres caractéristiques  $R_k$ ,  $R_{vk}$  et  $R_{pk}$ , en divisant le profil en trois sections : les saillies, un plateau moyen et les creux. Les aires contenues dans les triangles ombragés sont identiques aux aires délimitées par les parties correspondantes de la courbe.

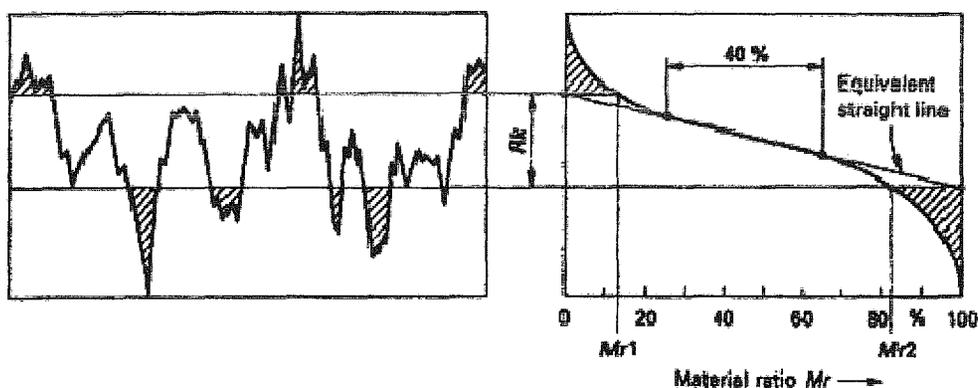


Figure II.51 Définition des paramètres  $R_k$ ,  $R_{vk}$  et  $R_{pk}$  (de la figure 1 d'ISO 13565-2, 1996)

Les paramètres  $R_k$ ,  $R_{vk}$  et  $R_{pk}$  peuvent être interprétés en tant que mesures des aspects particuliers d'une surface de bois. Par exemple, pour un spécimen avec des pores profonds et un grain de taille fine, le paramètre  $R_k$  peut être entendu comme la rugosité issue de l'usinage

(Westkämper et Riegel, 1993),  $R_{vk}$  comme la rugosité anatomique et  $R_{pk}$  comme caractérisant la fibre torse. Cependant, Riegel (1993) affirme que cette différenciation n'est pas étayée par des mesures précises de l'anatomie du bois. Dans une approche alternative qui combine le filtrage et la séparation, Schadoffsky (2000) a appliqué des techniques d'analyse d'image aux mesures en différentes zones de la surface. Des valeurs au-dessous d'un certain seuil ont été considérées comme anatomiques et ont été exclues, de sorte que des paramètres standards de rugosité puissent être calculés à partir du profil modifié. Le procédé est laborieux s'il n'est pas automatisé, et le calcul du seuil de signification semble être moins fiable pour des bois tendres et des espèces à pores diffus que pour des bois durs avec de grands vaisseaux.

### 3.4 Mouillabilité de la surface bois

Le phénomène de mouillabilité est normalement défini comme des manifestations macroscopiques résultant de l'interaction moléculaire entre les liquides et les solides dans un contact direct à l'interface entre eux (Berg, 1993). Ces manifestations impliquent la formation d'un angle de contact à l'interface solide/liquide, l'étalement du liquide à la surface du solide et sa pénétration dans un solide poreux. La mouillabilité peut être caractérisée en utilisant des paramètres thermodynamiques, comme par exemple les angles de contact, l'énergie libre de la surface et le travail d'adhésion.

Pour une compréhension plus profonde du phénomène de la mouillabilité on doit aller à la nature des forces intermoléculaires. Des théories sur ces interactions se trouvent en Jensen (1991), Lee (1991), Mittal et Anderson (1991), Mittal (1993), Oss van (1994), Good (1993) et Berg (1993).

L'angle de contact du liquide sur la surface d'un solide est généralement considéré comme une mesure convenable de la mouillabilité (Hora de Carvalho, 1990). La relation qui décrit la forme d'une goutte de liquide sur la surface d'un solide parfaitement lisse, en présence de la vapeur du liquide a été introduite par Young. Le modèle d'Young exprime le bilan des forces superficielles pour la goutte en équilibre (figure II.52).

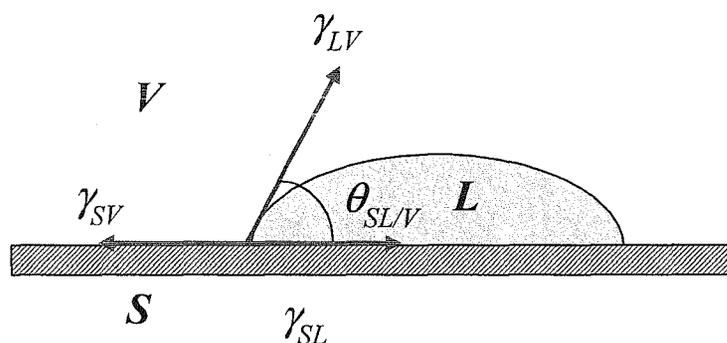


Figure II.52 Le modèle d'Young

$\gamma_{SV}$  - énergie libre de surface du solide en présence de vapeur de liquide

$\gamma_{LV}$  - énergie libre de surface du liquide

$\gamma_{SL}$  - énergie libre interfaciale solide/liquide

Dans la pratique  $0 < \theta < 180^\circ$ , et on considère que le liquide n'a pas tendance à mouiller la surface du solide si  $\theta > 90^\circ$ . Si la mouillabilité complète, alors  $\theta = 0^\circ$ .

Dans le processus de mouillabilité par un solide poreux par un liquide, la variation de l'angle de contact en fonction du temps est une fonction décroissante. Quand la goutte est déposée sur une surface poreuse, se produisent simultanément la pénétration du liquide et son étalement (figure II.53).

Dans la phase initiale du processus de mouillabilité, l'angle de contact de la goutte liquide diminue rapidement (phase d'étalement). Au fur et à mesure que le temps s'écoule, l'angle de contact diminue plus lentement (phase de diffusion). L'état d'équilibre liquide/solide est défini à la transition entre la phase d'étalement et la phase de diffusion. (Sheldon *et al.*, 2001).

Dans la première phase, l'étalement est privilégié et donc la goutte s'étale sur la surface, en augmentant son diamètre, tandis que dans la seconde phase, dans laquelle il y a la diffusion du liquide, son diamètre se maintient et sa hauteur diminue. (Sheldon *et al.*, 2001).

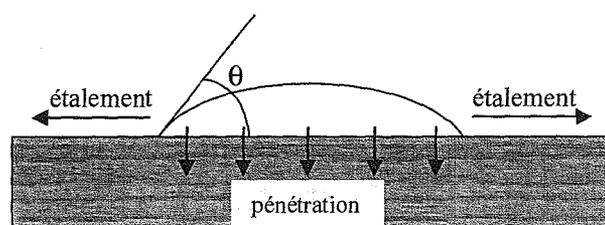


Figure II.53 Processus de mouillabilité d'un liquide dans une surface poreuse (adaptée de Sheldon *et al.*, 2001)

Le modèle d'Young a été établi en considérant des surfaces solides propres et parfaitement planes. Cependant, la surface du bois présente toujours un certain niveau de rugosité, inhérent à sa structure. Le bois est aussi un solide poreux et hétérogène.

Wenzel (1936) a montré que pour un solide rugueux, l'angle de contact réel  $\theta_r$  du liquide sur le solide, est relié à l'angle de contact théorique  $\theta_0$  (ou intrinsèque), qu'adopterait le liquide déposé sur une surface lisse du même solide, par la relation:

$$r = \frac{\cos \theta_r}{\cos \theta_o} \quad (2.14)$$

dans laquelle  $r$  est le facteur de rugosité, qui représente le rapport entre l'aire de l'interface solide/liquide réelle et l'aire apparente (géométrique) de cette interface.

Pour une surface lisse,  $r = 1$  et pour une surface rugueuse  $r > 1$ . Donc, si  $\theta \leq 90^\circ$ , le liquide pénètre dans le solide et va remplir les espaces vides, conduisant à la formation d'une surface qui appartient au solide mais aussi au liquide lui-même, et donc l'angle de contact va diminuer. Si  $\theta \geq 90^\circ$ , le liquide n'a pas tendance à pénétrer dans les espaces vides, et l'angle de contact va être rapporté à une surface composée air/solide, donc il va augmenter (Hora de Carvalho, 1990).

Le bois présentant une rugosité orientée, on peut parler d'anisotropie de l'angle de contact. En effet, l'étalement selon le fil du bois est privilégié, et la goutte prend la forme elliptique (figure II.54):

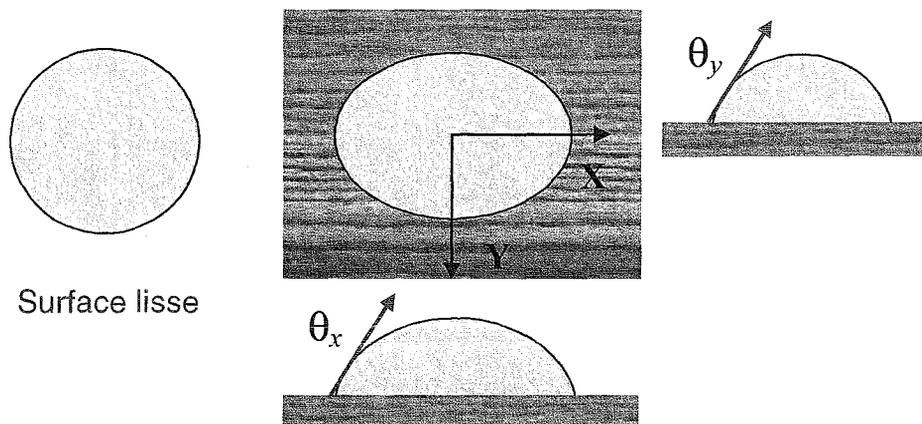


Figure II.54 L'anisotropie de l'angle de contact dans le bois

Rosumek (1983) a montré que  $\theta_x$  ne subit pas l'influence de la rugosité du support, et donc la mesure de  $\theta_x$  donnera une mesure de l'angle intrinsèque liquide/bois.

Neumann et Good (1979) ont révisé les techniques de mesure des angles de contact classiques. La technique plus utilisée, en ce qui concerne le bois, considère des mesures directes de l'angle par le profil de la goutte déposée dans une surface horizontale ou inclinée, qui est rapportée comme la méthode de la goutte. Des techniques semblables considèrent

l'analyse d'images digitales, des dimensions du profil de la goutte, à partir desquelles l'angle de contact peut être calculé. D'autres techniques sont la méthode Wilhelmy (voir Johnson et Dettre, 1969 et 1993 et Andrade et *al.*, 1985), ascension capillaire dans une plaque verticale (voir Neumann et Good, 1979) et colonne ou filtre (voir Oss van et *al.*, 1992).

Selon plusieurs auteurs (Gray, 1962 ; Herczeg, 1965 ; Jordan et Wellons, 1977 ; Nguyen et Johns, 1979 ; Liptáková et Kúdela, 1994), la méthode de la goutte (*sessile drop method*) est le plus utilisé pour la détermination de la mouillabilité du bois. Dans notre étude c'est cette méthode, qui a été utilisée, à l'aide d'un goniomètre modèle OCA de Dataphysics, existant au LEPAE (FEUP).

Selon, Andrade (1985) et Good (1993), quelques causes importantes de l'hystérésis des angles de contact sont la rugosité et l'hétérogénéité de la surface, l'orientation des molécules et la présence de groupes fonctionnels et la pénétration, l'adsorption et l'étalement. Dans le cas du bois, une mesure précise des angles de contact pour la détermination des caractéristiques thermodynamiques de la surface, présente des difficultés importantes en raison de son hétérogénéité chimique, de sa rugosité, de sa porosité et de sa nature hygroscopique (Marian et Stumbo, 1962a, 1962b). En dehors les mesures des angles de contact, d'autres techniques existent pour évaluer les propriétés de mouillabilité, énergie de surface, composition de la surface, par exemple la chromatographie gazeuse inverse (IGC), la résonance magnétique nucléaire (NMR), spectroscopie électronique (ESCA), la spectroscopie infra-rouge à transformée de Fourier (FTIR), (voir Loyd et *al.*, 1989). Des autres techniques comme la microscopie de force atomique (AFM), la microscopie de force interfaciale (IFM) et la microscopie confocale permettent aussi de mesurer les forces d'adhésion à l'échelle moléculaire (Chehimi, 1999).

## 3.5 Apparence visuelle de la surface bois

### 3.5.1 Généralités

On peut définir l'apparence d'un objet par l'aspect que l'on perçoit visuellement de celui-ci. Sève (1996) définit 5 classes d'apparence: forme, texture, brillance, transparence et couleur. Les premières classes d'apparence sont plus des attributs géométriques et les dernières sont plus liées à la nature de l'objet. Mais ces classes sont loin d'être indépendantes les unes par rapport aux autres.

La mesure physique permet d'obtenir une quantification objective de l'apparence. Ainsi on exprime par des nombres ce que le langage aurait beaucoup de difficultés à décrire avec précision. La mesure répond en fait à des problèmes que l'œil et le cerveau seuls n'auraient pu résoudre aussi précisément.

Il nous a semblé important de consacrer une partie indépendante à la mesure de l'apparence visuelle. Il s'agit de répondre à la question : comment mesurer ce que l'on voit?

La difficulté est d'intégrer les différents éléments intervenant dans la perception d'un objet, c'est à dire l'éclairage, les interactions de la lumière avec la matière éclairée, la réception du signal lumineux par l'œil et son interprétation par le cerveau.

Normalement la détermination des caractéristiques et les systèmes de représentation de l'aspect visuel des vernis, prennent en compte trois facteurs essentiels d'apparence:

- la mesure de la couleur, ou colorimétrie, qui est déjà bien définie et normée notamment par le Comité International de l'Eclairage (CIE);
- la mesure de la brillance qui est beaucoup moins normée et consiste, d'un point de vue physique, à caractériser la réflexion spéculaire;
- la translucidité qui est une notion plus difficile à caractériser car, contrairement à la couleur et à la brillance, la mesure en un seul point de l'échantillon n'est pas suffisante.

Dans le cadre de notre projet, la mesure de brillance est très importante. En effet, c'est un critère rapidement perçu par le consommateur et qui, à notre avis, à une grande importance dans sa perception de la qualité d'un produit. Nous allons donc aborder quelques aspects de la brillance.

### 3.5.2 Mesure de la brillance

La quantification de la brillance est beaucoup moins standardisée que celle de la couleur.

D'un point de vue physique, il s'agit de caractériser le flux réfléchi dans la direction spéculaire. Une première approche consiste à effectuer des mesures pour un certain nombre de configurations géométriques souvent propres au matériau étudié. Une caractérisation plus précise de la forme et de la taille du pic spéculaire est possible grâce au développement des mesures et des simulations bidirectionnelles.

D'un point de vue physiologique, si la plupart des mécanismes de la brillance sont connus et expliqués, aucun système de représentation cohérent et unificateur n'a pu, à ce jour, être proposé.

#### 3.5.2.1 Caractérisation de la brillance

La brillance est définie par la CIE comme "un attribut d'apparence par lequel des points de haute luminosité sur un objet sont perçus comme superposés à sa surface à cause des propriétés de réflexion directionnelle sur cette surface" (CIE 845-04-73). Cette définition est très liée à la notion de perception. Comme les termes ne sont pas suffisamment distincts, la confusion existe souvent entre celle brillance "perçue" et la brillance spéculaire plus directement mesurable. Cette dernière est elle-même objet de diverses interprétations. C'est pourquoi la CIE (Christie, 1986) distingue la réflexion spéculaire en accord avec les lois optiques pour la réflexion et la brillance spéculaire, "luminance de surface perçue associée à la réflexion spéculaire".

Sève (1993) fait un très bon bilan des travaux en essayant de relier les aspects perceptif et physique notamment à l'aide d'analyses multidimensionnelles.

L'œil humain arrive à distinguer un grand nombre de nuances de brillance. Quelques unes d'entre elles ont été associées à un nom et permettent d'établir une échelle subjective. Ces distinctions peuvent se faire d'abord d'un point de vue quantitatif : mat/ satiné/ brillance. Mais les différences sont également d'ordre qualitatif. Ainsi, une surface peut être scintillante, perlée, nacrée, métallisée...

La représentation de la brillance doit sans doute faire appel à un espace multidimensionnel.

**Le triplet illuminant - objet – observateur**

La brillance n'est pas intrinsèque à l'objet. Elle dépend plus globalement du triplet illuminant - objet – observateur (figure II.55) :

- L'illuminant intervient de manière sensible : suivant que l'éclairage est diffus ou directionnel, un objet pourra paraître mat ou brillante.
- La brillance d'un objet dépend en grande partie de la nature du matériau et surtout de son état de surface.
- Tous les observateurs ne perçoivent pas la brillance d'un objet de la même manière. Leur perception dépend de leurs caractéristiques physio-psychologiques.

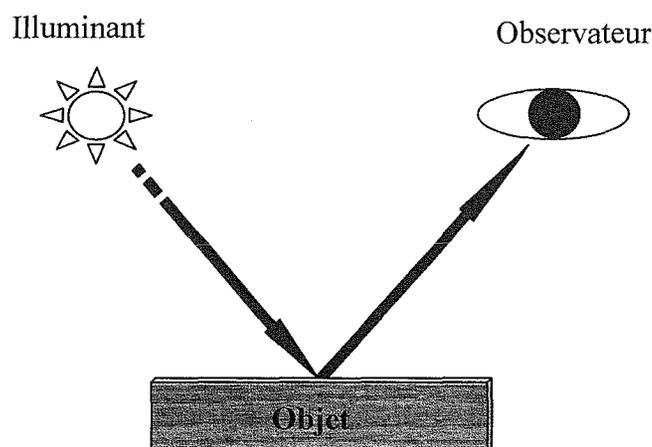


Figure II.55 Le triplet : illuminant - objet - observateur

Certains articles (Czepluch, 1976 ; McCamy, 1998 ; Sève, 1993) soulignent l'importance souvent sous-estimée de la vision binoculaire. De plus, de façon plus sensible que pour la couleur, l'aspect brillance d'un objet peut être complètement différent selon qu'on l'observe à une distance de plusieurs mètres ou de quelques centimètres.

Enfin la géométrie d'illumination - observation est très importante. Cela comprend les angles  $(\theta_i, \varphi_i)$  et  $(\theta_r, \varphi_r)$  mais aussi les angles solides  $\Omega_i, \Omega_r$  (voir figure II.56).

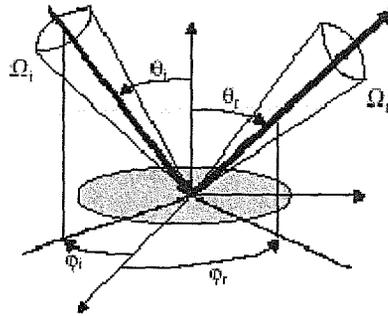


Figure II.56 Goniospectrophotométrie - Notation des angles

### 3.5.2.2 Les différents paramètres de mesures de la brillance

Les études limitent souvent le problème en considérant des angles solides imposés. Cinq paramètres sont à considérer : la longueur d'onde  $\lambda$ , les angles d'incidence  $\theta_i$  et  $\varphi_i$  et les angles de réception  $\theta_r$  et  $\varphi_r$ .

La longueur d'onde peut être imposée si l'on a vérifié que la forme du spectre n'est pas modifiée par un changement angulaire (absence de « gonio-chromatisme » (McCamy, 1996)). On peut choisir par exemple une longueur d'onde médiane du visible ( $\approx 550$  nm) ou une longueur d'onde correspondant à un maximum du spectre. Il est possible également de considérer un flux lumineux limité à un domaine spectral (l'ensemble du visible 380-780 nm par exemple) ou des grandeurs qui dépendent de ce flux : la coordonnée Y du système XYZ ou la clarté  $L^*$  du système  $L^*a^*b^*$ , par exemple. Généralement, les angles d'incidence ( $\theta_i$ ,  $\varphi_i$ ) sont de plus imposés par la géométrie de l'appareil.

Toujours dans le but de réduire les données et de représenter la brillance uniquement par quelques valeurs, deux stratégies sont possibles : faire quelques mesures bien choisies ou analyser l'indicatrice de diffusion à l'aide de quelques grandeurs discriminantes.

#### *Mesures de la réflexion spéculaire*

Ces mesures permettent de distinguer quantitativement différentes sortes de brillance. Sève (1993) pense que trois choix d'angles sont nécessaires parmi les suivants :  $0^\circ$  ;  $13,5^\circ$  ;  $20^\circ$  ;  $30^\circ$  ;  $45^\circ$  ;  $60^\circ$  ;  $75^\circ$  ;  $85^\circ$ . Il recommande le choix de  $30^\circ$  pour les surfaces à brillance élevée,  $60^\circ$  pour les surfaces satinées,  $75^\circ$  pour les surfaces mates. Il ajoute  $85^\circ$  pour le cas du *sheen* (forte réflexion en lumière rasante). Filosa (1995) propose  $20^\circ$ ,  $60^\circ$  et  $85^\circ$  et précise que des

géométries spécifiques existent pour l'industrie :  $45^\circ$  pour les céramiques et les plastiques,  $75^\circ$  pour le papier.

La mesure de la réflexion spéculaire est faite à l'aide d'un brillancemètre. Cet instrument permet la mesure de la réflexion spéculaire pour un ou plusieurs angles, généralement 3 (figure II.57).

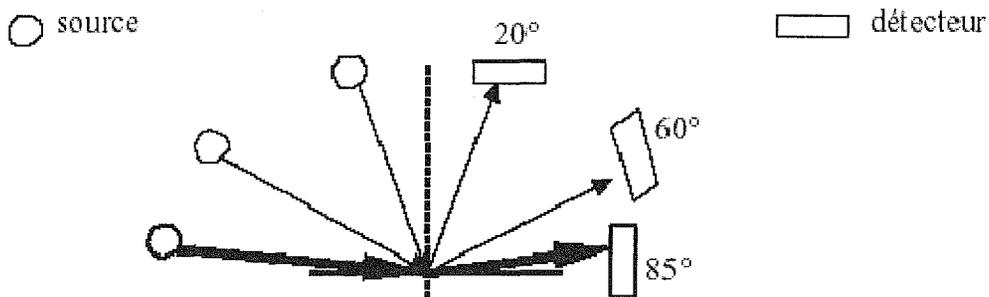


Figure II.57 Exemple de mesures de réflexion spéculaire à  $20^\circ$ ,  $60^\circ$  et  $85^\circ$  (pour le *sheen*)

### Les caractéristiques du pic spéculaire dépendent de l'état de surface

Les caractéristiques du pic spéculaire sont particulièrement liées à l'état de surface. Pour un même matériau, plus la surface est rugueuse, plus le nombre de pentes très inclinées augmente et donc plus la lumière est réfléchie en dehors de la direction spéculaire. Le pic spéculaire est alors plus large mais moins haut (figure II.58).

Il est ainsi possible de relier des mesures goniophotométriques à des mesures de rugosité (Elias, 2000).

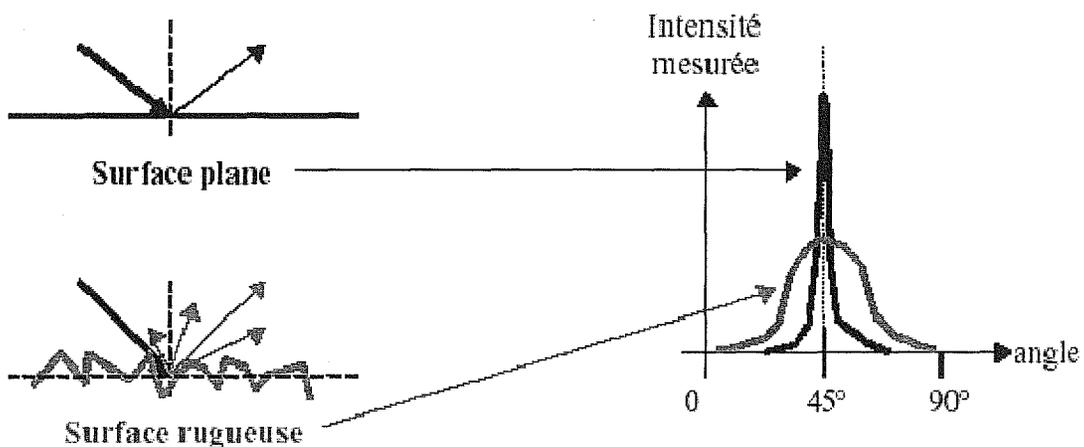


Figure II.58 Réflexion par une surface plane et par une surface rugueuse.  
Pic spéculaire - incidence  $45^\circ$

On peut dire en forme de conclusion que l'apparence constitue la matière première des artistes. Ces derniers utilisent les cinq classes d'apparence (forme, texture, brillance, transparence et couleur). Ils en privilégient parfois une plus qu'une autre. L'exemple du vernis est significatif : il ne sert pas uniquement de couche protectrice, il est aussi volontairement utilisé pour renforcer l'aspect brillance et transparent de la pièce produite. Il modifie également légèrement la couleur du bois.

Dans le domaine industriel, on peut dire d'une manière plus générale, que l'apparence visuelle a un impact réel sur la vente d'un produit quel qu'il soit. Comme on l'a déjà dit l'apparence d'un objet n'est pas intrinsèque à celui-ci. Elle dépend également de l'illuminant et de l'observateur (figure II.55).

L'apparence est donc, par définition, subjective. Elle dépend du système sensoriel de l'observateur mais aussi de sa mémoire. Elle est conditionnée par l'état physiologique et psychique de la personne. L'aspect culturel a également une grande importance.

De cette façon il est fondamental d'avoir recours à l'analyse sensorielle, laquelle est abordée dans la section suivante.

## **4 État de surface – caractérisation subjective**

### **4.1 Analyse sensorielle**

#### **4.1.1 Introduction**

L'évaluation sensorielle ou l'évaluation de la qualité des produits par un panel de testeurs est essentielle dans la plupart des expériences sur les produits, quand il faut répondre à des questions sur la saveur, l'odeur, la texture et l'aspect.

Les principaux développements et applications de l'évaluation sensorielle se situent dans domaine alimentaire, et nous nous en servons comme base pour les adapter à notre étude.

La préférence pour certains produits est conditionnée par plusieurs facteurs, physiologiques, psychologiques et économiques, qui sont déterminés par les habitudes individuelles, par des facteurs génétiques ou de groupe, tels que la localisation géographique, la culture, la classe sociale, la religion et la profession, qui vont se modifier au fur et à mesure que la société évolue, et dans notre société actuelle sous l'influence des médias.

De nos jours, dans le secteur de l'ameublement, l'intérêt pour cette approche et la place qui lui est attribuée sont de plus en plus importants dans la mesure où pour un consommateur potentiel l'analyse subjective de la surface d'une pièce de bois finie est un élément essentiel dans son choix en vue d'un éventuel achat.

Le problème essentiel qui est posé par l'analyse sensorielle est l'évaluation des jugements de testeurs. Le principal objectif de l'analyse sensorielle est de développer et d'expérimenter des méthodes de contrôle subjectif de qualité ajustées aux processus ou aux produits testés. Ceci correspond, en particulier, au choix de panels de testeurs qui permettent d'obtenir des résultats qui puissent être corrélés avec ceux de l'analyse objective afin de pouvoir utiliser les deux méthodes pour caractériser une surface bois.

La Commission Technique Portugaise de Normalisation d'Analyse Sensorielle (CT-114) définit un testeur, comme "participant perspicace, sensible, sélectionné et entraîné pour évaluer en accord avec les organes des sens les caractéristiques organoleptiques d'un produit".

Dans l'analyse sensorielle les panels de testeurs ont un rôle déterminant : sont eux qui se prononcent sur les produits tels qu'ils sont perçus par les sens humains. La fonction principale des testeurs est donc d'évaluer les caractéristiques sensorielles des produits et ils peuvent être envisagés comme des « instruments de mesure » de ces caractéristiques.

Les instruments de mesure classiques sont, normalement, calibrés et contrôlés de manière à garantir que les résultats qu'ils produisent soient fiables. La spécificité des testeurs en tant qu'instruments de mesure ne permet pas, de leur appliquer, au moins de manière directe, les méthodes de calibrage et de contrôle qui s'utilisent pour les instruments de mesure classiques.

La technique du panel de jury d'épreuve peut inclure deux ou trois types d'observateurs : les personnes expertes entraînées pour l'analyse sensorielle, ou juges d'épreuve, des élèves en phase d'entraînement sensoriel et des consommateurs, lesquels ne se soumettent pas à des épreuves de sélection.

La sélection et l'entraîne des observateurs doit obéir aux règles spécifiques, conformément l'objectif de l'analyse sensorielle.

Malgré des potentialités de ce type d'analyse, un problème énorme doit être résolu, l'incapacité d'exprimer mathématiquement les réponses sensorielles. Afin de tenter de réduire la subjectivité de la réponse, l'intensité de chaque attribut apprécié est convertie en une valeur numérique et traitée statistiquement pour déterminer si existent des différences significatives. Néanmoins, la subjectivité n'est pas totalement éliminée, « le cerveau humain est, entre autres choses, un merveilleux instrument d'enregistrement et d'analyse, et les sensations sont une construction multidimensionnelle, complexe et subtile » (Bourre, 1993).

Dans ce contexte, où d'une part, il y a la nécessité de calibrer et de contrôler les testeurs et où d'autre part, il est fondamental de ne pas réduire l'analyse sensorielle à des études purement statistiques (en oubliant sa nature humaine), il est essentiel de connaître, d'une manière plus approfondie, les méthodes existantes et expérimentées dans ce domaine.

Ainsi, le thème de l'analyse sensorielle est abordé dans une approche générale. Il en ressort la préoccupation d'introduire des concepts qui peuvent sembler trop élémentaires, mais qui sont fondamentaux pour la compréhension du thème qui est traité.

### 4.1.2 Définition et objectifs de l'analyse sensorielle

L'analyse sensorielle peut être définie comme « la discipline scientifique utilisée pour évoquer, mesurer, analyser et interpréter les réactions aux caractéristiques de biens alimentaires et autres biens matériels telles qu'elles sont perçues par les sens de la vision, de l'odorat, du goût, du toucher et de l'audition ». Cette définition, adoptée par divers auteurs Stone et Sidel (1999), Lawless et Heymann (1999) et des organisations (*Institute of Food Technologists* - IFT, 1981), révèle le caractère expérimental de l'analyse sensorielle et, parallèlement, fait ressortir ses composantes de perception et de comportement réactif.

La définition présentée met également en évidence la nature multidisciplinaire de l'analyse sensorielle. L'intervention d'aires de la connaissance aussi diverses que la Statistique, la Psychologie, la Chimie ou le *Marketing* est une des explications que Stone et Sidel (1999), avancent pour expliquer que, traditionnellement, les fonctions et les tâches associées à l'analyse sensorielle et à ses différents acteurs, autant dans des environnements académiques qu'industriels, sont difficiles à établir.

O'Mahony (1988) définit l'analyse sensorielle sous une forme plus résumée comme « l'utilisation des sens humains pour mesurer les caractéristiques sensorielles des aliments et d'autres produits » et la divise en deux types, avec des objectifs clairement distincts, qu'il appelle l'analyse sensorielle I et l'analyse sensorielle II.

L'analyse sensorielle I se rapporte à l'analyse sensorielle quand elle est utilisée comme un outil pour étudier des caractéristiques chimiques et/ou physiques des produits. L'accent est donc mis sur les produits, les personnes étant envisagées comme des instruments dont la fonction est d'en mesurer plusieurs propriétés.

Les problèmes posés par une telle approche sont évidents et découlent du fait que des personnes ne peuvent pas être traitées comme des appareils dans certaines situations. Certains de ces problèmes sont :

- le meilleur testeur pour certaines caractéristiques peut ne pas être le meilleur pour autres ;
- les personnes sont influencées par des facteurs externes qui peuvent modifier leurs performances ;
- il est parfois difficile de définir le meilleur testeur en raison de la nature subjective du stimulus.

La solution pour minimiser les difficultés mentionnées est l'utilisation de plusieurs testeurs simultanément.

L'analyse sensorielle II se rapporte à l'analyse sensorielle quand elle est utilisée pour prévoir la réaction des consommateurs aux produits. Un exemple sera de vérifier si les consommateurs détectent la différence entre deux formulations distinctes du même produit. Dans ce cas, l'accent est mis sur les personnes et leur réaction aux produits, et les testeurs doivent être sélectionnés de manière à représenter le plus fidèlement possible la population des consommateurs actuels ou potentiels.

### 4.1.3 Les caractéristiques organoleptiques

Les caractéristiques ou les propriétés organoleptiques d'un produit sont celles qui sont perceptibles par les organes des sens (IPQ – Instituto Português da Qualidade, 1994). Ce sont des propriétés physiques ou chimiques qui deviennent organoleptiques au moment où les personnes en prennent conscience par l'intermédiaire des organes des sens.

#### *Sensation et perception*

Dans la figure II.59, est présenté un schéma où on peut observer, d'une manière simplifiée, la manière dont les produits agissent sur les sens humains.

Les sensations sont les réactions aux stimulus : la sensation est la réaction qui a lieu quand « l'information » contenue dans le stimulus est envoyée des nerfs sensibles (récepteurs neurosensoriels) vers le cerveau. La perception se rapporte à la phase du « décodage » de l'information : sur la base de l'expérience et de la mémoire, la personne reconnaît la sensation en l'interprétant. La perception peut être définie comme « la prise de connaissance des effets du stimulus sensoriels simples ou complexes ».

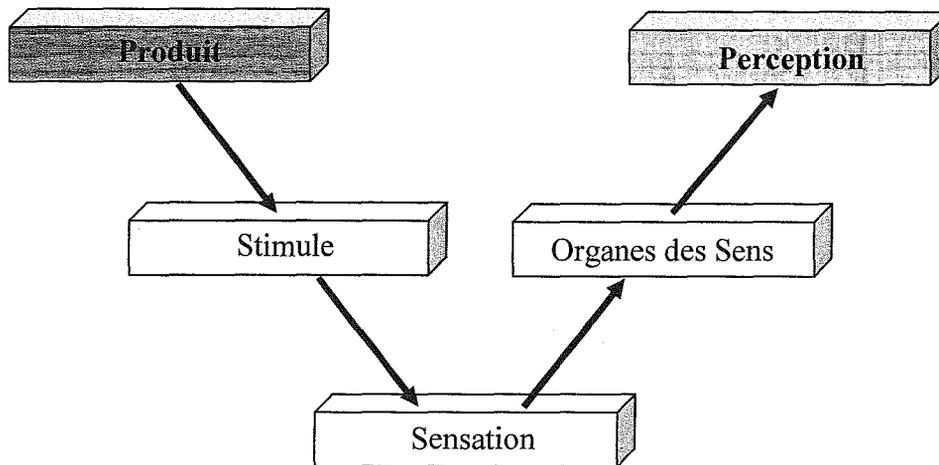


Figure II.59 Schéma du mécanisme des sens humains

À propos de sensation et de perception, Peynaud et Blouin (1997) font ressortir que : « La sensation est inconsciente ; la perception est la prise de conscience... ».

Dans le processus de perception, les caractéristiques organoleptiques des produits se superposent, c'est à dire que le sujet reçoit un ensemble de sensations presque simultanées qui causent chez lui la perception globale du produit.

Un concept qui se trouve étroitement relié à celui de la perception est le seuil. Meilgaard et *al.*, (1987a) définissent le seuil comme la limite des capacités sensorielles d'une personne ou d'une population. Bi et Ennis (1998a) rapportent que les seuils sont souvent envisagés comme la limite inférieure de la sensibilité du système sensoriel.

Il y a deux concepts de seuil, le seuil individuel (qui correspond à ce qui a été défini ci-dessus) et le seuil de groupe. Traditionnellement, le seuil de groupe est défini comme une mesure de la tendance centrale (que peut être la médiane, la valeur attendue, la moyenne géométrique ou une autre valeur qui est justifiée) des membres du groupe (voir ASTM, 1997b).

Indépendamment de la tendance naturelle de percevoir les produits comme un tout, il y a un ordre naturel dans lequel leurs caractéristiques organoleptiques tendent à être perçues : premièrement l'aspect, puis l'odeur, la consistance et la texture et enfin la saveur (si elle existe).

Bien que les expressions précitées (saveur, aspect, odeur, consistance et texture) appartiennent à la langue courante, leur signification en ce qui concerne l'analyse sensorielle est parfois différente de celle utilisée au quotidien. Dans les paragraphes suivants seront présentés d'une manière résumée, les concepts sous-jacents à chacune des caractéristiques énoncées, tels que présentés en Meilgaard et *al.*, (1987a). Dans notre cas, tous ces attributs sont intéressants, à l'exception du premier - la saveur - lequel ne sera pas abordé, dans la mesure où il n'est pas pris en compte pour l'analyse subjective du bois.

### *Aspect*

La première impression qu'une personne retient d'un produit est, presque toujours, son aspect. L'aspect est défini en IPQ (1994) comme « l'ensemble des propriétés visibles d'une substance ou d'un produit ».

Les caractéristiques les plus importantes qui composent l'aspect d'un produit sont par exemple, la couleur, la forme, la texture extérieure, la brillance, etc.

Étant donné que le « bon aspect » des produits est essentiel pour son acceptation par le marché et que cette caractéristique est la première à être appréciée, son évaluation doit, également être la première à être effectuée pendant le processus d'analyse.

### *Odeur*

L'odeur d'un produit est détectée quand ses composants volatils pénètrent dans le nez et sont perçus par le système olfactif.

La sensibilité aux différentes odeurs varie selon les personnes et, pour chaque personne, elle est influencée par des facteurs comme l'humeur, la concentration ou la santé.

### *Consistance et texture*

La texture est définie en IPQ (1994) comme « l'ensemble des propriétés mécaniques, géométriques et de surface d'un produit, détectables par les récepteurs mécaniques et tactiles et, éventuellement, par les récepteurs visuels et auditifs ».

### ***Facteurs qui influencent la perception sensorielle***

Il y a plusieurs facteurs qui vont influencer les résultats, une fois que les testeurs sont envisagés comme des instruments de mesure. Meilgaard et *al.*, (1987a) rapportent : « Les testeurs, envisagés comme des instruments de mesure, sont hautement changeants et très sujets à des erreurs systématiques, mais ils sont les seuls instruments qui mesurent ce que nous voulons mesurer, et nous devons en minimiser la variabilité et contrôler les erreurs systématiques, en utilisant le mieux possible les meilleures techniques existantes... ».

Les facteurs qui influencent la perception sensorielle se divisent en deux grands groupes : les facteurs physiologiques et les facteurs psychologiques.

Les facteurs physiologiques les plus cités dans la littérature sont :

- l'adaptation - modification temporaire de la sensibilité d'un organe sensoriel à un certain stimulus, résultant d'une exposition prolongée au stimulus en cause ou à un stimulus semblable ;
- d'addition/ inhibition - ce facteur correspond aux influences réciproques de stimulus qui se trouvent présents simultanément dans le produit à tester. Il peut prendre la forme d'addition, de synergie ou d'inhibition.

Les facteurs psychologiques rapportés dans la littérature sont nombreux, parmi eux on peut citer :

- l'erreur d'influence - une information concernant les échantillons fournie aux testeurs avant ou pendant l'épreuve peut les induire en erreur ;
- l'erreur d'habitude - ce type d'erreur correspond au fait que des personnes vont avoir tendance à attribuer toujours le même classement, par exemple, à une série de stimulus dont l'intensité grandit lentement. Comme la croissance est lente, la personne s'habitue à attribuer toujours la même cotation. Cette erreur peut être minimisée en variant le type de produits présenté ;
- l'erreur de logique - ce type d'erreur tend à se produire quand deux ou plusieurs caractéristiques se trouvent associées à la conscience du testeur.
- l'erreur d'association - quand sont appréciées plusieurs caractéristiques, l'évaluation de l'une tend à influencer l'évaluation des autres ;
- les erreurs liées à l'ordre de présentation des échantillons - par exemple, l'effet de contraste et l'effet de groupe qui sont des phénomènes inverses. L'erreur de tendance centrale découle

du fait que des échantillons présentés approximativement dans la moyenne d'une série, ont tendance à être mieux cotés que ceux qui sont présentés aux extrémités. L'effet de standard arrive quand se répète un modèle de présentation des échantillons, et les testeurs, légitimement, détectent ce standard. Finalement, l'erreur de temps/position résulte de l'attitude du testeur à souffrir des changements au long d'une série d'épreuves, (il peut alors au final émettre un jugement avec indifférence) ;

- l'erreur de suggestion mutuelle - se rapporte à la situation où la réponse d'un testeur est influencée par la réponse d'un autre ou d'autres ;
- le manque de motivation - provoquant une diminution de la reproductibilité et de la capacité à détecter de petites différences entre stimulus ;
- caprice versus timidité – il peut se révéler quand on utilise un grand nombre de niveaux (par exemple 1 à 7) et quand le testeur tend à abuser de l'utilisation des extrémités de l'échelle (caprice) ou de valeurs centrales (timidité).

#### 4.1.4 Méthodes et techniques utilisées dans l'analyse sensorielle

On peut affirmer que les méthodes d'évaluation sensorielle sont la base de l'analyse sensorielle moderne. Pour le succès d'un quelconque programme d'analyse sensorielle la sélection des essais adéquats à chaque situation est essentielle. Pour que cette sélection soit efficace, il est nécessaire que la personne qui la fait ait une connaissance des potentialités et des limitations des différents essais.

Meilgaard et *al.*, (1987a) rapportent que les essais sensoriels peuvent, légitimement, prendre plusieurs formes, mais que, en pratique, existent des procédures qui ont acquis un statut propre et qui ont une longue histoire d'utilisation. Ces procédures se trouvent déjà extensivement étudiées et les problèmes qui pourront apparaître avec leur application pratique sont déjà référencés dans la littérature spécialisée, dans les normes françaises (AFNOR, 1991) et aussi conseillés par des organisations (ASTM, 1996).

Normalement les méthodes de l'analyse sensorielle sont divisés en trois classes, selon le type d'objectif de l'étude concernée (Meilgaard et *al.*, 1987a ; Stone et Sidel, 1999 ; Lawless et Heymann, 1999) : essais de différenciation, essais descriptifs et essais affectifs.

Les différents essais pour chacun de ces classes, peuvent être observés dans la figure II.60.

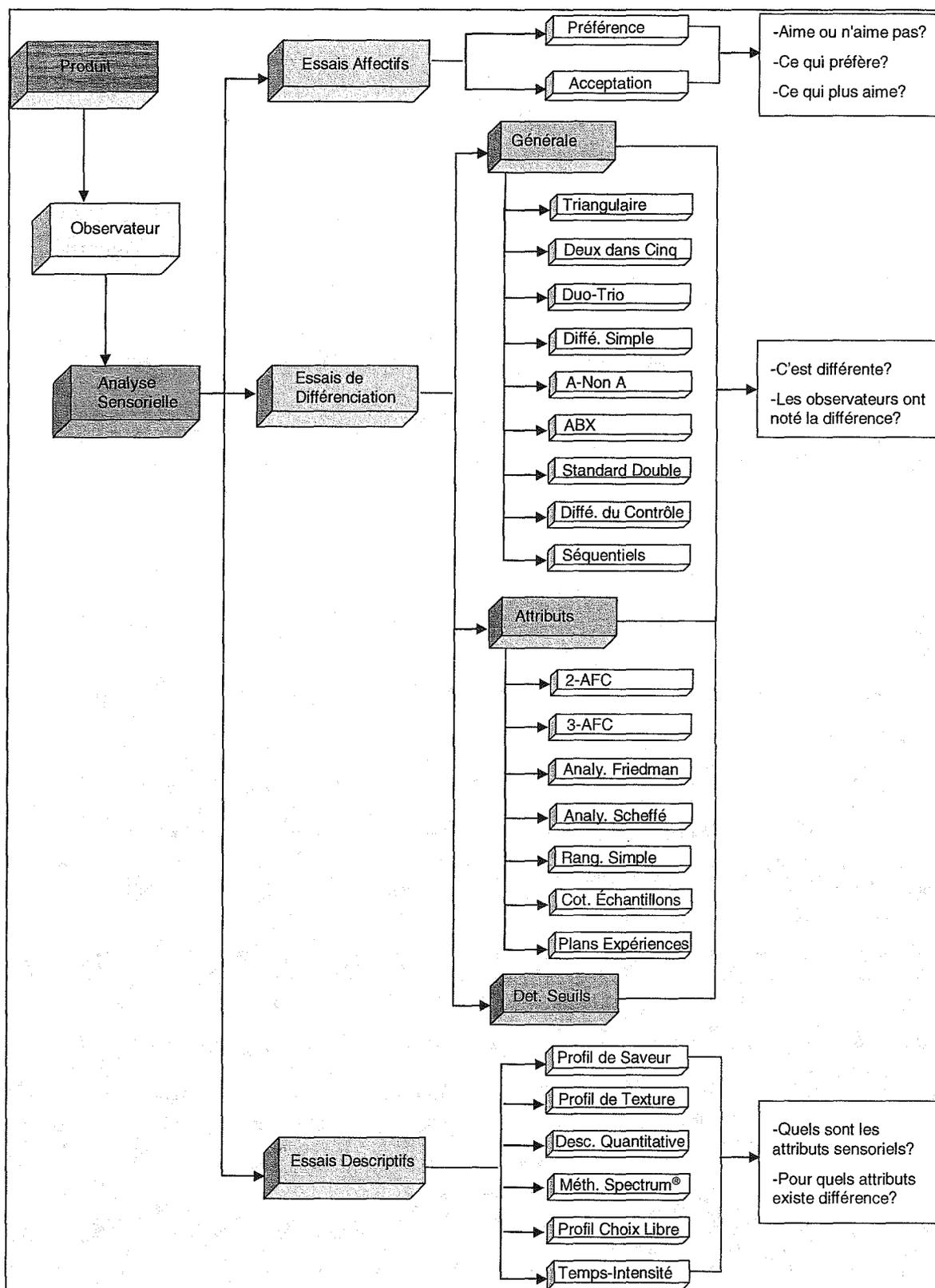


Figure II.60 Organigramme des méthodes d'analyse sensorielle

Les essais de différenciation, aussi appelés tests de différences, impliquent toujours deux ou plusieurs produits distincts et ont pour objet de répondre à la question : « Est-ce qu'il existe quelque différence au niveau sensoriel entre les produits? ».

Lorsque on veut détecter de petites différences entre les produits les stimulus sont de faible intensité. Ce fait induit que les échelles qui s'utilisent normalement dans les procédures de classement (par exemple les nominations multiples) ne soient pas conseillées dans ces cas, étant donné qu'il y a risque que l'erreur de mesure soit supérieure à la différence qu'on prétend mesurer (O'Mahony, 1992). Ainsi, les essais de différences sont, d'une manière générale, adaptés pour la détection d'échantillons égaux et/ou différents d'un échantillon-témoin ou pour le regroupement d'échantillons semblables.

Les essais de différenciation peuvent se diviser en deux groupes : essais de différenciation générale et essais de différenciation d'attributs.

En ce qui concerne les essais descriptifs, on peut dire qu'ils sont des méthodes plus sophistiquées que les essais de différenciation et, dans la plupart des cas, leurs résultats se traduisent par la quantification de l'intensité perçue des caractéristiques sensorielles.

Soit les essais de différenciation, soit les essais descriptifs sont utilisés dans l'analyse sensorielle de type I ou étude analytique.

L'objectif des essais affectifs est de quantifier le degré d'acceptation (aimer plus ou moins) des produits. Donc, ils sont utilisés dans l'analyse sensorielle de type II ou étude hédonique ou affective.

#### **4.1.4.1 Essais de différenciation générale**

L'objectif de ces essais consiste à détecter de la différence/ similitude sensorielle entre échantillons d'une forme non spécifiée, c'est à dire, sans préciser si les échantillons diffèrent ou si ils se ressemblent.

Quand on entend vérifier si existent des modifications ou de petites différences dans les produits qui ne peuvent pas être caractérisées comme affectant seulement un ou deux attributs, ce type d'essais est particulièrement utile. Des exemples d'application sont le contrôle de la stabilité d'un produit, le test d'une nouvelle méthode de production (et la

vérification que le produit garde les mêmes caractéristiques), l'étude de l'effet de la substitution de composants, etc.

Les essais de différenciation générale les plus cités et étudiés dans la littérature sont: triangulaire, deux dans cinq, duo-trio, différence simple, A - Non A, ABX, standard double, différence relative au contrôle et essais séquentiels.

### ***Essai triangulaire***

L'essai triangulaire est, dans les essais de différenciation, le plus connu et le plus utilisé (Hunter, 1996 ou Stone et Sidel, 1999). Dans cet essai, deux échantillons différents d'un certain produit sont présentés au testeur avec un échantillon d'un autre produit, et il lui est demandé de déterminer quel échantillon est différent des autres. Les échantillons doivent préalablement être codifiés et tous présentés dans les mêmes conditions.

### ***Essai deux dans cinq***

Cet essai consiste en la présentation au testeur de cinq échantillons, deux d'un produit et trois d'un autre, et on veut qu'il les regroupe convenablement. L'efficacité statistique de l'essai est nettement plus élevée que celle de l'essai triangulaire.

### ***Essai duo-trio***

Dans cet essai un échantillon-témoin est présenté au testeur, après quoi il lui est demandé d'identifier lequel parmi deux autres échantillons est identique au témoin.

L'efficacité statistique de cet essai est très réduite, la probabilité pour le testeur de réussir en répondant au hasard étant de 50%. Les répliques de l'essai qui devront être faites peuvent être élaborées toujours avec le même produit comme témoin, cas dans lequel l'essai est désigné à référence constante. Alternativement, les deux produits en essai peuvent s'utiliser comme témoin, situation dans laquelle l'essai s'intitule à référence balancée. Normalement l'utilisation de la référence constante est conseillée, étant donné que, quand les testeurs sont, au départ, familiarisés avec un des produits en cause, celui-ci doit être choisi pour référence (Stone et Sidel, 1999 et Lawless et Heymann, 1999).

Une des situations dans lesquelles cet essai est recommandé est lorsqu'on veut introduire des modifications dans la composition de produits qui se trouvent déjà en vente sur le marché, sans que les consommateurs s'aperçoivent de la différence.

### ***Essai de la différence simple***

Selon Meilgaard et *al.*, (1987a), cet essai doit être utilisé pour déterminer si deux produits sont ou non différents du point de vue sensoriel et quand il ne sera pas commode d'utiliser l'essai triangulaire ou le duo-trio, (par exemple, pour des saveurs très fortes ou des échantillons de produits cosmétiques à mettre sur la peau). Généralement cette méthode est utilisée en posant la question à beaucoup de testeurs.

L'essai de la différence simple consiste à présenter aux testeurs plusieurs paires d'échantillons (les uns où les deux échantillons sont du même produit et d'autres où les deux échantillons sont de produits différents) et à leur demander si les échantillons sont égaux entre eux ou différents. Il y a quatre possibilités pour la répartition des échantillons (AA, AB, BA et BB) qui doivent être testés en égal nombre.

### ***Essai A - Non A***

Dans cet essai, est initialement présenté un échantillon-témoin (A), puis suit une série d'autres échantillons que le testeur devra classer comme égal à A ou non égal à A. Dans la réalité, cet essai n'est plus qu'une séquence d'essais de différence simple, dans lequel l'échantillon-témoin est présenté seulement une fois au début du test (et est ensuite enlevé).

### ***Essai ABX***

Cet essai peut être considéré comme l'inverse de l'essai duo-trio. Alors que dans le duo-trio un échantillon-témoin est présenté au testeur et qu'il lui est demandé qu'il identifie quel autre des deux échantillons lui correspond, dans ABX deux échantillon-témoins (A et B) sont présentés ainsi qu'un autre échantillon (X) qui devra être identifié comme égal à A ou comme égal à B.

### ***Essai du standard double***

Dans l'essai du standard double sont initialement présentés au testeur deux échantillons-témoins, un de chaque produit. Sont ensuite, présentés autres deux échantillons dûment codifiés, également un de chaque produit. Le testeur doit associer chacun des échantillons codifiés à un des témoin, mais il ne peut pas associer les deux au même témoin.

### ***Essai de la différence relative au contrôle***

Cet essai consiste en un essai A - Non A, où il est demandé aux testeurs d'évaluer l'amplitude de la différence entre les produits, quand ils la trouvent.

Meilgaard *et al.*, (1987a), suggèrent l'utilisation de cet essai dans les cas où l'essai triangulaire ou le duo-trio ne sont pas conseillés en raison de l'hétérogénéité naturelle des produits.

### ***Essais séquentiels***

Les essais séquentiels s'utilisent quand on prétend réduire le nombre de répétitions d'un essai pour arriver à une conclusion valide (avec un seuil de signification préalablement établi). Un exemple sera d'accepter ou rejeter un lot de produits. Si les premiers  $n$  sont "bons", il n'y a pas nécessité de tester plus, puisque, même si les  $m$  restants sont "mauvais", le lot sera accepté. Ce type de procédure est donc basé sur des essais de différences pour lesquelles il existe une réponse correcte (comme l'essai triangulaire ou le duo-trio).

#### **4.1.4.2 Essais de différenciation d'attributs**

On peut dire que l'objectif de ces essais consiste à détecter ou à la mesurer la différence sensorielle existant entre les échantillons, relativement à un attribut en particulier. Les résultats de ces essais prétendent répondre à la question : "Comment l'attribut X diffère-t-il des les échantillons présentés?"

On remarque que les échantillons peuvent différer les uns des autres par rapport à la forme générale, mais sont comparés seulement sur la caractéristique concernée.

Nous présentons ensuite les essais de différenciation d'attributs les plus cités et étudiés dans la littérature : Comparaison directionnelle par paires (2-AFC), Comparaison directionnelle de trois échantillons (3-AFC), rangement par paires (analyse de Friedman), comparaison par paires de Scheffé, rangement simple, cotation d'échantillons et les essais qui utilisent les plans d'expériences.

### ***Comparaison directionnelle par paires (2-AFC)***

Ce essai, aussi nommé 2-AFC (*Two Alternative Forced Choice*), est un essai très simple, dans lequel deux échantillons (A et B) sont présentés au testeur et où on lui demande de sélectionner celui pour lequel l'intensité de l'attribut en cause est plus grande (exemple : « Ce qui est le plus sucré : A ou B? »).

### ***Comparaison directionnelle de trois échantillons (3-AFC)***

Il s'agit d'un essai identique à l'essai triangulaire, mais la différence existant entre les échantillons est préalablement spécifiée.

Cet essai permet au testeur d'adopter la stratégie *skimming*, dans laquelle il cherche "l'échantillon plus" au lieu de la stratégie de comparaison de distances, dans laquelle il cherche "l'échantillon différent". La première stratégie est plus efficace. De plus, l'essai 3-AFC évite le risque de voir le testeur modifier sa stratégie (de la comparaison de distances pour la *skimming*) au long des répétitions des essais.

### ***Test de rangement par paires (analyse de Friedman)***

Le test de rangement par paires s'utilise quand on prétend comparer plusieurs échantillons (typiquement entre 3 et 6) sur une seule caractéristique. Comme ce test est un essai simple à exécuter, il est indiqué pour les cas où les testeurs n'ont pas beaucoup d'entraînement.

Sont présentées aux testeurs toutes les paires d'échantillons qui est possible de former avec les produits en cause, et il leur est demandé que, pour chaque paire, ils indiquent l'échantillon pour lequel l'intensité de la caractéristique évaluée est la plus forte.

### ***Essai de comparaison par paires de Scheffé***

Il s'agit d'une procédure semblable à l'essai précédent, mais où, au-delà d'indiquer l'échantillon le plus intense, le testeur indique l'amplitude de la différence dans une échelle multinomiale (comme dans l'essai de "différence relative au contrôle").

L'utilisation de cet essai est conseillée quand l'objectif est d'évaluer l'importance de la différence entre plusieurs produits pour la caractéristique en étude.

Les résultats sont analysés à travers l'Analyse de Variance de Scheffé, décrit en Scheffé (1952).

### ***Essai de rangement simple***

Cet essai est un essai facile à exécuter qui permet de comparer plusieurs produits simultanément. Il est demandé aux testeurs de ranger des échantillons des produits relativement à l'intensité de la caractéristique en étude. Ce test ne permet pas de quantifier les différences entre les échantillons et ne doit pas être utilisé quand il y a des "degrés" très prononcés entre les échantillons en ce qui concerne l'intensité de la caractéristique.

### ***Essai de cotation d'échantillons***

Cet essai permet comme dans le cas précédent, de comparer plusieurs échantillons simultanément (typiquement entre 3 et 6, au maximum, 8).

Dans l'essai de cotation d'échantillons il est demandé aux testeurs d'attribuer une notation à chaque échantillon pour la caractéristique étudiée. Les échelles utilisées peuvent être structurées comme, par exemple, les échelles type Likert, où sont utilisées des notations de 1 à 5 (Vavra, 1997), ou non structurées, comme, par exemple, un segment de droite où sont seulement identifiées les extrémités et où la réponse est indiquée graphiquement.

### ***Essais qui utilisent des plans d'expériences***

Ces essais sont utilisés quand il y a une grande quantité d'échantillons à comparer, vu que la capacité des testeurs est limitée. Normalement, dans les essais de comparaison il est conseillé que chaque testeur évalue, au maximum, 6 produits différents dans la même session. Quand le

nombre de produits est supérieur à 6 et inférieur à 16, Meilgaard et *al.*, (1987a), conseillent l'utilisation de plans d'expériences, notamment *Balanced Incomplete Block Designs*, tant pour les essais de rangement que pour les essais de cotation.

Le plan d'expériences appliqué à l'analyse sensorielle a pour objectif réduire le nombre d'échantillons que les testeurs devront analyser. Ainsi, au lieu de présenter à tous les testeurs, tous les  $n$  échantillons simultanément, les échantillons sont présentés en  $b$  blocs plus petits, chacun contenant  $k < n$  échantillons. Chaque testeur évalue un bloc et, comme les blocs diffèrent uns des autres, ce type d'approche exige un nombre considérable de testeurs de façon à permettre que tous les blocs soient justement testés.

En Meilgaard et *al.*, (1987b), sont présentés des méthodes pour planifier les expériences et pour traiter leurs résultats.

#### 4.1.4.3 Essais pour la détermination de seuils

Ces essais, correspondent à des cas particuliers des essais de différenciation. Les seuils sensoriels sont une mesure de la sensibilité des personnes aux stimulus.

Pour la détermination des seuils, sont réalisés des essais sensoriels qui permettent de les détecter. En 1979, l'ASTM a adopté comme méthode standard pour la détermination de seuils la méthode ascendante des limites (ASTM E679-91, 1997a).

Cette méthode est fondée sur une séquence d'essais de choix forcé ( $n$ -AFC). Dans cette séquence, les échantillons sont présentés par ordre croissant de concentrations et le seuil individuel est déterminé en ayant pour base la dernière concentration que le testeur a manqué et la concentration suivante.

Les définitions et les procédures à suivre pour calculer des seuils individuels à partir des résultats d'essais 3-AFC (au minimum 20 essais par personne), sont présentées en ASTM (1997b). Costell et *al.*, (1994) et González-Viñas et *al.*, (1998) présentent et comparent plusieurs méthodes simplifiées pour évaluer les seuils, et concluent que leurs résultats sont semblables.

En ce qui concerne le concept de seuil de groupe, la première norme mentionnée donne comme définition la moyenne géométrique des seuils individuels, tandis que la seconde dit qu'il devra être la valeur qui représente le mieux la tendance centrale de la distribution des seuils individuels des éléments du groupe.

#### 4.1.4.4 Essais descriptifs

Les essais descriptifs sont des essais sensoriels plus complexes et ils impliquent la détection et la description des caractéristiques des produits, qualitatives ou quantitatives, par panels de testeurs entraînés.

Les aspects qualitatifs se rapportent à la définition du produit en termes sensoriels et à sa description, relative notamment aux aspects qui le différencient des autres produits. La sélection des termes à utiliser pour les caractéristiques sensorielles dans les études descriptives est essentielle pour le succès d'un programme d'analyse sensorielle.

Les testeurs devront, au-delà d'être capables d'évaluer les produits d'une manière qualitative, réussir aussi à quantifier l'intensité ou le degré de présence de chaque caractéristique dans les échantillons.

L'exigence d'utiliser des testeurs entraînés, résulte du fait qu'ils comprennent l'objectif de l'étude, qu'ils savent appliquer la terminologie adéquate, qu'ils sont familiarisés avec les produits en étude, qu'ils réussissent à utiliser dûment les échelles (quand elles se révèlent nécessaires) et qu'ils sont dotés de sensibilité aux caractéristiques qu'on veut évaluer.

Sont présentés maintenant quelques uns des essais descriptifs les plus utilisés : le profil de saveur, le profil de texture, l'analyse descriptive quantitative, la méthode Spectrum<sup>®</sup>, le profil de choix libre et l'analyse descriptive de temps-intensité.

##### *Profil de saveur*

La méthode du profil de saveur est la seule technique qualitative formelle et, la plus connue entre les techniques d'analyse descriptive (le terme qualitatif se rapporte, ici, à la forme de présentation des résultats).

Le profil de saveur est une technique de consensus qui utilise un panel de 4 à 6 testeurs sélectionnés et entraînés. Dans la phase d'entraînement, les testeurs, avec l'aide du leader du panel, développent et définissent la terminologie qui doit être adoptée. Il s'agit d'une technique dont les résultats dépendent beaucoup du leader du groupe et de la personnalité de ses membres, étant donné qu'elle impose d'arriver à un consensus.

Neilson et *al.*, (1988) présentent une description suffisamment détaillée de cette méthode.

***Profil de texture***

L'objectif de la méthode de profil de texture est de permettre d'évaluer les caractéristiques de texture d'un produit (voir, par exemple, Stone et Sidel, 1999).

Lawless et Heymann (1999) rapportent qu'il y a des échelles standard spécifiques pour chaque caractéristique associée à la texture et que, au long de chaque échelle, sont définies des valeurs ("ancres") auxquelles sont associés des produits qui ont cette caractéristique comme une de leurs principales composantes.

Les échantillons sont évalués par chaque testeur individuellement et, en fonction du type d'échelles utilisée, les résultats peuvent être obtenus par consensus ou par traitement statistique.

***Analyse descriptive quantitative***

L'objectif du développement de l'analyse descriptive quantitative a été de corriger certaines erreurs détectées dans les méthodes de profil de saveur et des méthodes semblables, notamment l'absence de traitement statistique.

Dans cette technique, les échantillons sont évalués par chaque testeur individuellement dans une série d'attributs préalablement définis par le panel et en ayant recours à une échelle représentée par un segment de droite avec les extrémités "ancrées" par des termes également définis par le panel. Chaque testeur devra répéter son épreuve (d'une manière "aveugle"), dans le but d'évaluer sa consistance.

La sélection et l'entraînement des testeurs sont, encore une fois, des facteurs déterminants pour le succès de cette méthode.

***Méthode Spectrum®***

Cette méthode a été développée avec l'objectif de fournir les outils essentiels à la planification d'une expérience descriptive pour un produit déterminé. En pratique, la méthode permet de choisir le système approprié en prenant en compte le produit étudié, le programme sensoriel dans son ensemble et le type de résultats attendus.

Sa caractéristique principale est de que les participants dans le panel ne développent pas un vocabulaire propre pour décrire les caractéristiques sensorielles des produits, mais utilisent un ensemble de termes pré-définis (voir Meilgaard et *al.*, 1987b).

Les échelles utilisées ont, typiquement, la forme d'un segment de droite au long de laquelle existent plusieurs "ancres", (Meilgaard et *al.*, (1987b). Un des avantages associé au Spectrum<sup>®</sup> est que des "ancres" ont la fonction de calibrer les testeurs, qui, entraînés convenablement, commencent à utiliser l'échelle tous de la même manière et d'une manière cohérente dans le temps.

La planification des essais à élaborer, comme le traitement des résultats, restent à la charge de l'analyste sensoriel, qui devra utiliser le vocabulaire et les "ancres" pré-définies, mais aussi adapter la méthode à ses objectifs spécifiques.

La grande limitation de cette méthode se rapporte à l'entraînement des testeurs, ce qui la rend très dispendieuse.

### ***Profil de choix libre***

Selon Stone et Sidel (1999), la méthode de profil de choix libre, est parue, précisément, pour éviter le désavantage mentionné dans l'alinéa précédent - l'entraînement des testeurs.

Dans cette méthode, les testeurs sont confrontés aux échantillons et les décrivent avec leur propre vocabulaire, leur attribuant, ensuite, une notation (l'échelle utilisée peut être définie par eux-mêmes ou pré-définie par l'organisation).

L'analyse des résultats est faite en faisant appel aux techniques statistiques, qui permettent "de rendre compatibles" les différents descripteurs utilisés par plusieurs testeurs, en attribuant seulement une signification à chaque concept exprimé d'une manière différente par chaque testeur.

Les résultats proprement dits sont, alors, exprimés par un ensemble de facteurs dûment classés qui résultent du consensus entre les testeurs.

### ***Analyse descriptive de temps-intensité***

L'analyse descriptive de temps-intensité diffère des méthodes qui ont été présentées jusqu'ici par le fait d'impliquer une variable supplémentaire - le temps.

Cette méthode comprend l'étude des caractéristiques et de l'évolution de leur intensité au cours du temps. Normalement, il est demandé aux testeurs de se prononcer (dans une échelle appropriée) sur l'intensité des caractéristiques du produit au moment de la consommation ou de l'utilisation et à des instants suivants séparés par des intervalles de temps égaux.

Le nombre de caractéristiques évaluées simultanément ne doit pas être exagéré (entre 3 et 6) et les intervalles de temps entre les appréciations doivent être établis selon le type de produit concerné (typiquement entre 15 et 60 secondes).

Les résultats sont présentés sous la forme graphique - courbe temps-intensité. Lawless et Heymann (1999), commentent largement cette méthode et présentent plusieurs techniques qui peuvent être utilisées pour élaborer les courbes temps-intensité.

#### **4.1.4.5 Essais affectifs**

Quand l'évaluation des produits par les consommateurs est l'objectif de l'étude (l'analyse sensorielle de type I ou l'étude hedónique ou affective), les essais sensoriels sont classés comme des essais affectifs.

Un essai affectif normalement, se rapporte au développement de nouveaux produits, à l'évaluation du potentiel du marché, à l'amélioration du produit ou à sa manutention (voir Meilgaard *et al.*, 1987b).

L'objectif de l'analyse affective est de percevoir jusqu'à quel point le consommateur aime le produit, le préfère relativement à d'autres ou le considère acceptable du point de vue de ses caractéristiques sensorielles.

Les essais affectifs sont effectués avec des consommateurs actuels ou potentiels du produit ou des produits en étude, sans aucun entraînement antérieur.

Il y a deux grands groupes d'essais affectifs : essais de préférence et essais d'acceptation.

Nous présentons, d'une façon succincte, les objectifs et les méthodes correspondant à chacun de ces groupes.

##### ***Essais de préférence***

Ces essais sont utilisés quand l'objectif de l'étude est de déterminer lequel est le produit préféré des consommateurs. Quand deux échantillons seulement sont en cause, l'essai le plus utilisé est la comparaison par paires, où on demande directement aux consommateurs lequel

des deux échantillons ils préfèrent. Quand il y a plus de deux échantillons à évaluer, on peut utiliser la méthode de comparaison par paires de plus de deux échantillons, dans laquelle les échantillons sont évalués par paires, ou la méthode de rangement des échantillons, dans laquelle les testeurs ordonnent les produits selon leur préférence.

Les résultats de ce type d'essais sont traités d'une façon identique à ceux des essais de différences dont le principe leur ressemble.

### ***Essais d'acceptation***

Ces essais ont pour objectif de déterminer le degré d'acceptation d'un produit par les consommateurs. Meilgaard et *al.*, (1987b) disent même que ce type d'essais doit être utilisé quand on prétend déterminer "l'état affectif" d'un produit.

L'échelle hédonique, est l'essai habituellement utilisé dans ces situations, où il est demandé aux consommateurs d'exprimer ce qu'ils ressentent par rapport au produit dans une échelle qui, typiquement, a 9 niveaux. L'échelle est verbale et va de "je n'aime pas" jusqu'à "j'aime très bien".

Fréquemment l'essai se fait sur deux produits simultanément : le produit qu'on veut tester dans la réalité et un autre, la référence, qu'on sait, au départ, être bien accepté par le marché. De cette manière, il est possible de comparer l'acceptation des deux produits et d'analyser le positionnement relatif du produit en étude.

#### **4.1.5 L'analyse statistique des résultats des essais d'analyse sensorielle**

Les méthodes présentées dans la section précédente peuvent, d'une manière statistique, être regroupées selon le type d'échelles qu'ils utilisent. En Guimarães et Cabral (1997), on peut trouver une explication des différents types d'échelles et de leurs caractéristiques. Dans les échelles nominales, les données sont seulement identifiées par l'attribution d'un nom qui désigne une classe et les classes ne sont pas ordonnables. Les échelles ordinales diffèrent des nominales seulement par le fait de pouvoir établir un ordre entre les classes. Cet ordre est établi selon un critère important qui, en analyse sensorielle, correspond au degré de présence de la caractéristique étudiée. Dans la méthode du profil de saveur, par exemple, les classes vont de "l'inexistant", à laquelle correspond le "0", à "l'intensité forte", à laquelle correspond le "3".

Le traitement statistique de données exprimées en échelles nominales ou ordinales est limité. La description des échantillons est, normalement, faite à travers des tableaux de fréquences et/ou d'histogrammes et l'inférence statistique relative à la population est faite avec le recours aux essais d'hypothèses sur les proportions du nombre de cas obtenus dans chaque classe.

Les données quantitatives peuvent être exprimées selon deux types d'échelles : d'intervalle et absolues. Dans les échelles d'intervalle, les données sont différenciées et ordonnées par des nombres exprimés dans une échelle dont l'origine est arbitraire, sur laquelle on peut attribuer une signification à la différence entre les nombres, mais pas à leurs valeurs absolues.

Le traitement statistique des résultats des essais dépend non seulement du type d'échelles utilisées, mais aussi de l'objectif propre de l'étude. Quand on prétend obtenir des informations et tirer des conclusions sur chaque caractéristique du produit ou sur des produits individuellement, il est fait appel à l'analyse univariante qui étudie une variable à chaque fois, malgré que cette variable puisse se rapporter au produit considéré comme un tout. Mais, quand on veut étudier plusieurs caractéristiques conjointement, établir les relations et les degrés de similitude entre elles ou rapporter et comparer les opinions des plusieurs testeurs, il est fait appel à la statistique multivariante.

Dans la plupart des essais de différences et de préférences, sont utilisées des échelles nominales ou ordinales et selon la nature de ces essais - si on étudie un attribut en particulier ou le produit dans son ensemble, sans relier les caractéristiques les unes avec les autres - le traitement statistique des résultats est univariante. La technique statistique plus utilisée dans le traitement de ce type de résultats est l'essai d'hypothèses à la proportion binomiale.

Pour les essais descriptifs et les essais d'acceptation, la situation est différente : des échelles des plusieurs types mentionnés peuvent être utilisées et le traitement statistique des résultats peut être univariante - dans le cas où on prétend décrire le produit caractéristique par caractéristique - ou multivariante - quand l'objectif est de caractériser le produit au travers des interrelations de ses attributs.

Les essais descriptifs et les essais d'acceptation sont utilisés dans les études de nature plus globale que les essais de différenciation ou de préférence. Une raison de ce fait est que les

essais du premier groupe ne se trouvent pas, au départ, aussi bien spécifiés que ceux du deuxième.

En ce qui concerne plus particulièrement les échelles utilisées et les analyses statistiques des résultats, beaucoup de solutions alternatives sont disponibles. Un exemple est la méthode utilisée dans notre étude, pour l'évaluation subjective de la surface du bois, c'est à dire, la méthode du profil de choix libre, où l'échelle à utiliser peut prendre la forme d'une échelle de notation ou d'une échelle avec des ancres, et être pré-définie par l'organisation de l'essai ou définie par les testeurs. Le choix entre les différentes options, tant au niveau des échelles que du traitement des résultats, doit être basé sur l'objectif spécifié de l'étude.

#### **4.1.6 Organisation d'un programme d'analyse sensorielle**

Le succès d'un programme d'analyse sensorielle dépend, clairement de la façon dont il est organisé. Dans Meilgaard et *al.*, (1987a), nous pouvons trouver les étapes fondamentales pour l'organisation d'un programme d'analyse sensorielle, qui se résument ainsi:

- Détermination de l'objectif du projet dans lequel s'insère le programme - se rapporte à la définition de l'objectif global du projet. Des exemples d'objectifs dans les situations réelles sont la substitution d'ingrédients d'un produit, la comparaison entre des produits concurrents, l'amélioration des caractéristiques sensorielles du produit, etc.
- Détermination de l'objectif spécifique du programme sensoriel - cet objectif se rapporte au type d'essais à réaliser, par exemple, évaluer des différences globales ou d'attributs entre les produits, découvrir quelles sont les préférences des consommateurs, ou essayer de prévoir l'acceptation du produit par le marché.
- Étude d'échantillons - les caractéristiques sensorielles des produits à analyser doivent être étudiées avant de définir quels sont les essais spécifiques à réaliser, de manière à éviter les erreurs systématiques dans les réponses des testeurs. Des précautions doivent être prises afin de garantir l'indépendance entre les caractéristiques en évaluation (par exemple, la couleur qui, parfois, influence le jugement sur d'autres caractéristiques).
- Planification de l'essai à effectuer - cette phase est reliée à la sélection des essais à réaliser, à la sélection et à l'entraînement des testeurs impliqués, à la définition de l'enquête, à la spécification des critères pour la préparation des échantillons, à la spécification des conditions

de présentation des échantillons et à la détermination de la manière dont seront analysés les résultats des essais.

- Réalisation de l'essai - il est nécessaire de vérifier que toutes les spécifications définies dans la phase précédente sont prises en compte dans la réalisation effective des essais.
- Analyse des résultats - les procédures à suivre dans cette phase doivent déjà être définies dès la phase de planification de l'essai.
- Interprétation des résultats et élaboration du rapport - l'interprétation des résultats doit être fait avec le maximum de prudence et le rapport doit être succinct et clair.

La discussion détaillée des différentes phases de l'organisation d'un programme d'analyse sensorielle sont hors du contexte de ce travail. Néanmoins, on peut recommander le livre *Sensory Evaluation Practices*, de Stone et Sidel (1999), où ce thème est abordé d'une façon simple et pratique.



## **Chapitre III - Protocoles Expérimentaux**



## 1 Méthodologie

Afin d'établir des corrélations entre les conditions d'usinage du bois, la préparation de la surface et la qualité de la finition, des essais industriels ont été effectués pour l'obtention de plusieurs états de surface. Celles-ci ont été obtenues par la variation des paramètres dans chaque phase du procédé, et ont été finalement caractérisés, par l'intermédiaire d'un système de vision laser. La figure III.1 visualise la séquence des opérations des protocoles expérimentaux.

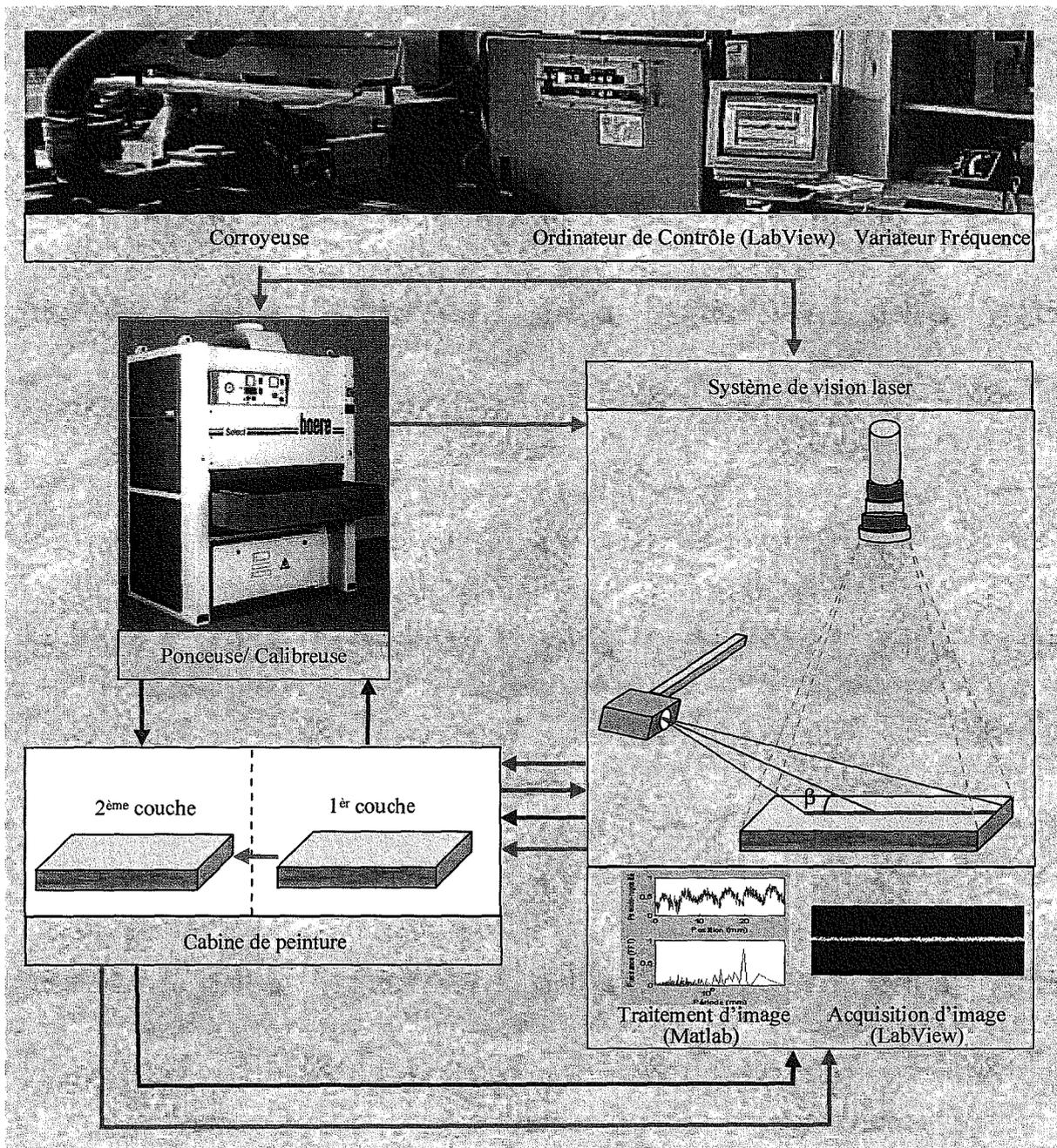


Figure III.1 Séquences des protocoles expérimentaux

Les paramètres pouvant influencer l'état final d'une surface sont présentés dans le diagramme de la figure III.2.

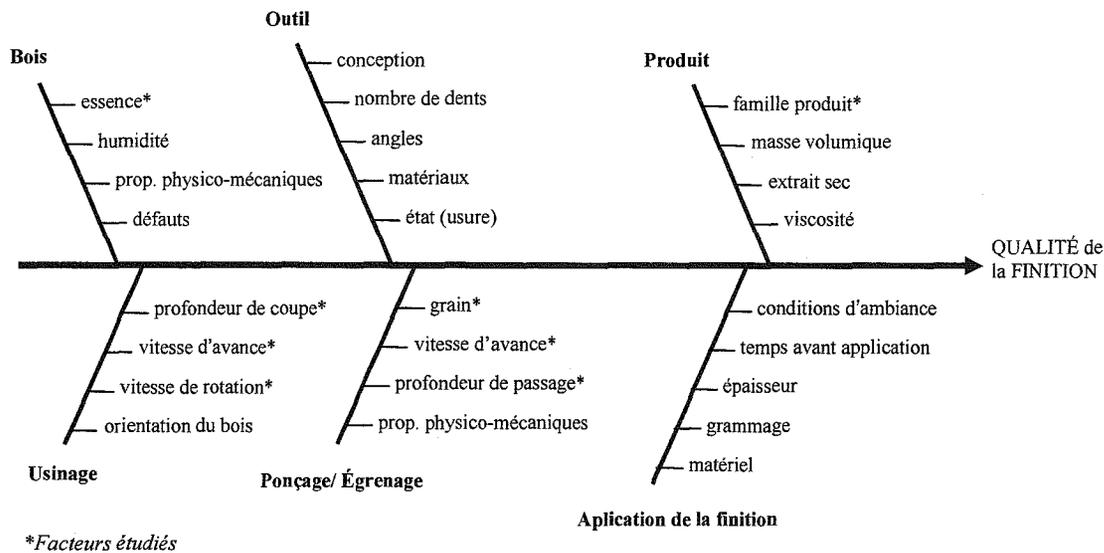


Figure III.2 Diagramme cause-effet des facteurs impliqués dans la qualité de la finition

En raison du grand nombre de paramètres/niveaux concernés, nous avons sélectionné ceux qui semblent les plus significatifs :

- l'essence du bois: pin maritime (*Pinus pinaster*) et hêtre (*Fagus sylvatica*);
- le procédé d'usinage: vitesse de rotation, vitesse d'avance, profondeur de coupe;
- le procédé de ponçage: grain, vitesse d'avance, profondeur de passage;
- le procédé de finition: égrenage entre les couches et type de produit;

et leurs niveaux ont été établis en prenant pour base des conditions courantes utilisées dans l'industrie.

Dans cette étude, nous avons exécuté trois protocoles expérimentaux (essais préliminaires, première série d'expériences et deuxième série d'expériences), dont la description est présentée dans le prochain chapitre. Les essais préliminaires ont eu pour but une première approche au problème de façon à identifier les contraintes de la méthodologie utilisée et essayer tous les équipements. Ce protocole a été modifié (première série d'expériences) en tenant compte des résultats obtenus et finalement une deuxième série d'expériences a été exécuté de façon à valider les résultats.

## 2 Matières premières

### 2.1 Caractérisation du bois

#### 2.1.1 Essences

Les paramètres ont été sélectionnés selon des objectifs spécifiques, c'est à dire, dans le cas des essences, on en a cherché deux avec une grande représentativité en termes d'utilisation par l'industrie au niveau Européen, et aussi qui possèdent des différences significatives au niveau de sa constitution, pour rendre possible l'étude de l'influence du plan ligneux sur l'état de la surface après chaque phase de transformation. On a sélectionnée alors, une essence de la famille des résineux, le pin maritime et une autre de la famille des feuillus, le hêtre.

Il faut rapporter qu'initialement, l'hypothèse d'analyser séparément l'aubier et le duramen avait été avancé, pour des propriétés et des comportements différents. Néanmoins, au-delà de rendre l'étude très complexe, dans l'industrie le bois provenant de l'aubier n'est pas séparé du bois provenant du duramen. Il faut rappeler qu'un des objectifs est précisément d'être le plus proche du procédé d'usinage, tel qu'il est effectué dans l'industrie et ainsi pouvoir fournir les informations pour des améliorations. Il n'était pas donc raisonnable d'utiliser cette procédure qui n'aurait pas eu une faisabilité pratique.

#### 2.1.2 Détermination de la masse volumique

La masse volumique est une propriété du bois avec une grande variabilité, elle varie entre essences, entre arbres et à l'intérieur d'un arbre.

La masse volumique du bois est exprimée en donnant la masse d'un centimètre cube de bois. Pour faire sa détermination, nous avons pris un échantillon de nos éprouvettes. Le calcul qui nous permet de déterminer cette propriété est fait selon la norme NP 616 (1973):

$$M_v = \frac{m}{v} \quad (3.1)$$

où,

$M_v$  = masse volumique en  $g/cm^3$

$m$  = masse de l'éprouvette en g

$v$  = volume de l'éprouvette en  $cm^3$

Nous savons que la densité du bois varie au long de la planche. Donc, pour connaître avec plus précision cette variation, par exemple pour la deuxième série d'expériences, nous avons procédé de la manière suivante : à chaque planche de 2000 x 200 mm a été coupée 100 mm en chaque extrémité et rejetées ; ensuite, elle a été divisée en deux parties égales dans le sens longitudinal (en s'obtenant ainsi deux planches de 1800 x 100 mm chaque), nous avons enlevé d'une planche trois éprouvettes (200 x 100 mm) et après nous avons pris un échantillon (50 x 20 mm) de ces éprouvettes, sur le coté adjacent à l'autre planche (voir figure III.3).

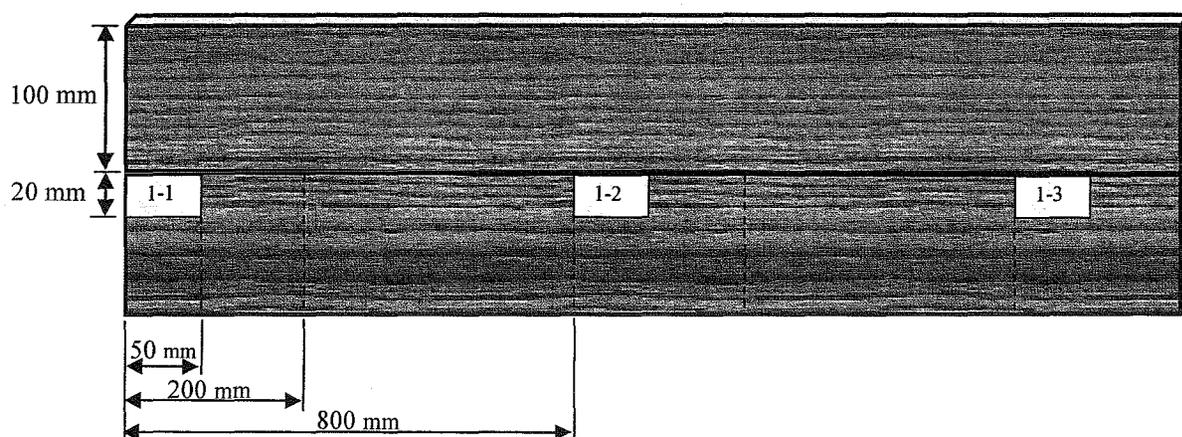


Figure III.3 Débit des éprouvettes pour les essais physico-mécaniques

Les valeurs de la masse volumique calculées pour le pin et pour le hêtre, sont présentées dans le tableau III.1.

Tableau III.1 Détermination de la masse volumique

Essences	Masse volumique ( $kg/m^3$ )		
	Essais préliminaires	Première série d'expériences	Deuxième série d'expériences
Pin	596	610	510
Hêtre	708	750	690

### 2.1.3 Détermination de l'humidité

Le bois est un matériau hygroscopique et donc l'humidité affecte ses propriétés physiques et mécaniques.

L'humidité du bois  $H$ , est déterminée par le rapport entre la masse d'eau contenue dans le bois et la masse anhydre du bois, exprimé en pourcentage, d'accord avec la norme NP 614 (1973), selon l'équation :

$$H = \frac{m_h - m_0}{m_0} * 100 \quad (3.2)$$

où,

$H$  = humidité en %

$m_h$  = masse de l'éprouvette humide en g

$m_0$  = masse de l'éprouvette anhydre en g

Les mêmes échantillons utilisés pour la détermination de la masse volumique, nous ont permis de faire la détermination de l'humidité.

Chaque échantillon a été séché pendant trois jours dans une étuve à 105°C (jusqu'à masse constante), afin d'on pouvoir obtenir bois anhydre.

Les valeurs d'humidité déterminées pour le pin et pour le hêtre, sont présentées dans le tableau III.2.

Tableau III.2 Détermination d'humidité

Essences	L'humidité (%)		
	Essais préliminaires	Première série d'expériences	Deuxième série d'expériences
Pin	11	13	9
Hêtre	11	11	9

## 2.2 Caractérisation des produits de finition

### 2.2.1 Produits de finition

Initialement, nous avons prévu l'utilisation de différents systèmes de finition, un opaque (laque) et deux transparents (cellulosique et acrylique en phase aqueuse). Cependant, nous avons limité notre étude au système transparent, car les conditions idéales du support, ainsi que la méthode de caractérisation objective de la surface, sont différentes pour chacun des systèmes. Donc, pour la finition transparente, Nous avons utilisé deux familles distinctes de produits, un vernis cellulosique et un autre aqueux.

Dans les essais préliminaires, nous avons choisi le vernis cellulosique mate (V1). Transparent, avec une très bonne dureté finale et soyeuse à la touche, il a aussi d'excellentes caractéristiques d'applicabilité (la fiche technique n'est pas disponible - communication personnelle). Nous avons pris également le vernis « *VZ. SAI AQUOSO MATE* », acrylique en phase aqueuse mate (V2), avec une aspect soyeux et bonne dureté superficielle, qui permet d'obtenir des surfaces avec une bonne transparence. Les deux produits sont recommandés pour l'industrie d'ameublement et autres industries du bois (voir annexe 4 - fiche technique). En ce qui concerne les autres deux séries d'expériences, nous avons utilisé le vernis « *CINELOSE CERA* » (VC), à base de résines de nitrocellulose, approprié pour l'intérieur, conférant au bois un aspect soyeux, équivalent à un produit d'application de cire et le « *MOVIDUR AQUA CERA* » (VA), un vernis aqueux transparente cire, recommandé pour la finition intérieure de portes et autres structures du bois et d'ameublement. Il est caractérisé par un film flexible et dur, un séchage rapide, une bonne résistance à l'eau et aux produits courants de nettoyage domestique (voir annexe 4 - fiches techniques).

L'application du produit a été réalisée avec un pistolet *airless* dans une cabine de peinture. L'application de la finition avec ce type de pistolet nécessite une certaine expérience, c'est pourquoi nous nous sommes préalablement entraînés sur des éprouvettes d'essais afin d'obtenir une couche de finition la plus homogène possible et de maîtriser au mieux l'épaisseur de finition appliquée. Pour le contrôle de la masse des films appliqués, nous avons pesé chaque échantillon avant et immédiatement après l'application des vernis. Dans le tableau III.3, nous présentons les valeurs de la masse des films appliquées. Nous pouvons

vérifier que les grammages obtenus se trouvent dans les mentionnés dans les fiches techniques des produits.

Tableau III.3 Détermination de la masse des films

Produits	Masse des films		
	Essais préliminaires	Première série d'expériences	Deuxième série d'expériences
Cellulosique	1,8 g (-) <sup>*</sup>	1,9 g (90-100 g/m <sup>2</sup> )*	1,8 g (90-100 g/m <sup>2</sup> )*
Aqueux	1,5 g (120-140 g/m <sup>2</sup> )*	1,7 g (75-85 g/m <sup>2</sup> )*	1,6 g (75-85 g/m <sup>2</sup> )*

<sup>\*</sup> Communication personnelle ; \* Valeurs recommandées dans les fiches techniques

Chaque vernis a été appliqué sur les pièces usinées de la même façon, pour pouvoir étudier l'influence du produit de finition.

Pour contrôler les produits, l'analyse a été réalisée à travers des essais normalisés de détermination de la viscosité et de la masse volumique

### 2.2.2 Détermination de la viscosité

Pour la détermination de la viscosité d'un produit de finition, on mesure le temps qu'un volume donné de vernis met à s'écouler d'une coupe de géométrie fixée (figure III.4, coupe Ford n°4), à travers d'un orifice calibré à sa partie inférieure, suivant les prescriptions de la norme NP EN ISO 2431 (1998).

L'échantillon réduit de vernis, est placé dans le bain thermostatique jusqu'à attendre 20°C. La coupe, est placée horizontalement et, tout en bouchant l'orifice à sa partie inférieure au moyen d'un doigt, on remplit la coupe à ras bord jusqu'à l'obtention d'un ménisque légèrement convexe.

A l'aide d'une plaque en verre, on enlève l'excès de produit par translation horizontale de celle-ci sur le bord supérieur de la coupe.

On doit déboucher ensuite l'orifice en déclenchant simultanément le chronomètre, et arrêter le chronomètre au moment de la rupture du filet liquide et on a le temps d'écoulement.

Le résultat retenu est la moyenne de trois mesures, pour chaque produit.



Figure III.4 Coupe Ford n°4

Dans le tableau III.4, sont présentées les valeurs de la viscosité des produits en vérifiant qu'elles se trouvaient dans les mentionnés dans les fiches techniques des produits.

Tableau III.4 Détermination de la viscosité

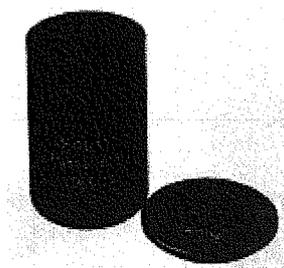
Produits	Viscosité d'application		
	Essais préliminaires	Première série d'expériences	Deuxième série d'expériences
Cellulosique	26'' (-)♦	28'' (25 – 30'')*	27'' (25 – 30'')*
Aqueux	28'' (25±5'')*	86 (80 – 90)* (UK)	86 (80 – 90)* (UK)

♦ Communication personnelle ; \* Valeurs indiquées dans les fiches techniques

### 2.2.3 Détermination de la masse volumique

La masse volumique est le rapport de la masse d'une substance reporté à son volume. La masse volumique du produit est déterminée selon la norme NP ISO 2811-1 (1999) à une température de  $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ .

Nous déterminons la masse volumique du vernis au moyen d'un pycnomètre de métal ( $100\text{ cm}^3$ ), figure III.5.

Figure III.5 Pycnomètre de métal (100 cm<sup>3</sup>)

On doit peser le pycnomètre graduée vide au centième de gramme près ( $m_1$ ), après on peut remplir celle-ci avec le produit à analyser et ensuite peser ( $m_2$ ).

La masse volumique ( $M_v$ ) est calculée selon l'équation :

$$M_v = \frac{m_2 - m_1}{v} \quad (3.3)$$

où,

$m_1$  = la masse du pycnomètre graduée vide en g

$m_2$  = la masse du pycnomètre graduée et du produit à la température d'essai en g

$v$  = le volume du pycnomètre, à la température d'essai en cm<sup>3</sup>

La masse volumique déterminée est la moyenne de deux déterminations, exprimée en g/cm<sup>3</sup>, pour chaque produit. Dans le tableau III.5, on présente les valeurs de la masse volumique des produits et il est possible de vérifier qu'ils se trouvent dans la gamme des valeurs mentionnés dans les respectives fiches techniques.

Tableau III.5 Détermination de la masse volumique

Produits	Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )		
	Essais préliminaires	Première série d'expériences	Deuxième série d'expériences
Cellulosique	0,96 (-) <sup>♦</sup>	0,94 (0,95 ± 0,02)*	0,94 (0,95 ± 0,02)*
Aqueux	1,06 (1,05±0,01)*	1,03 (1,03 ± 0,02)*	1,01 (1,03 ± 0,02)*

<sup>♦</sup> Communication personnelle ; \* Valeurs indiquées dans les fiches techniques

## 3 Procédés d'usinage

### 3.1 Equipement utilisé

#### 3.1.1 Instrumentation de la machine et acquisition de données

Afin de contrôler et de mesurer les paramètres expérimentaux, l'outil supérieur de raboteur d'une corroyeuse à 6 arbres a été instrumenté, permettent de quantifier la profondeur de coupe et également les vitesses d'avance.

L'outil de corroyage est un outil classique (porte outil + fers) de diamètre 125 mm, constitué de 2 fers d'une épaisseur 4 mm avec un angle de coupe  $\gamma$  de  $30^\circ$ . Le moteur électrique de cet arbre inférieur a une puissance nominale de 4 kW (figure III.6).

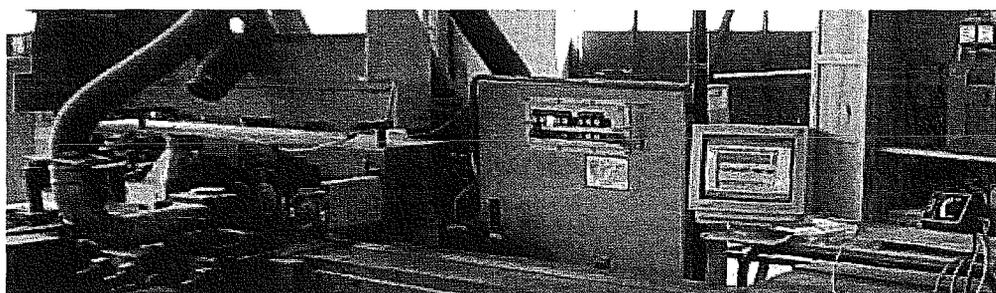


Figure III.6 Corroyeuse instrumentée à 6 arbres

On a utilisé un variateur de fréquence, pour ajuster la vitesse de rotation, un tachymètre optique (développé par nous) pour la mesure de la vitesse effective de rotation, un voltmètre et des ampèremètres pour la mesure d'énergie électrique absorbée. Dans les essais préliminaires, pour l'acquisition des données on a été utilisé une carte d'Advantech PcLabCard<sup>®</sup> – PCL-818L avec une extension extérieure PCLD-8115 et pour le contrôle, une application sous Labtech<sup>®</sup> a été développée, (voir exemple d'exécution dans la figure A1.4 de l'annexe 1). Dans les deux prochaines séries d'expériences, nous avons utilisé un nouveau système d'acquisition basé sur une carte NI-PCI-MIO-16E4 et avec une extension extérieure NI-SCB-68. Pour le contrôle, une application sous LabView<sup>®</sup> a été développée, (voir exemple d'exécution et de diagramme - *Vis* dans la figure A1.5 et A1.6 de l'annexe 1). La substitution de la carte d'acquisition a été faite, parce que le logiciel de l'Advantech<sup>®</sup> ne permettait pas des fréquences de lecture suffisamment élevées (30 kHz).

### 3.1.2 L'opération de ponçage

Pendant les essais préliminaires, l'opération de ponçage a été effectuée en France à l'ENSTIB (École Nationale Supérieure des Technologies et Industries du Bois), sur une ponceuse industrielle de marque "Viet", avec commande de la position verticale, de tension des bandes et de vitesse d'avance. Elle est constituée par trois paires de rouleaux, dans lesquels peuvent être insérées des bandes de ponçage prétendues.

À l'inverse de l'étude préliminaire, le ponçage dans les autres séries d'expériences a été réalisé au Portugal à l'ESTV. Cette opération conduite dans une ponceuse/calibreuse industrielle de marque "Boere", avec des caractéristiques similaires : commande de position verticale, de tension des bandes et de vitesse d'avance. Elle est constituée par deux paires de rouleaux, dans lesquels peuvent être insérées des bandes de ponçage prétendues.

### 3.1.3 L'opération d'égrenage

Dans les essais préliminaires, l'égrenage du vernis (avant l'application de la deuxième couche) a été exécuté sur la même ponceuse que celle utilisée pour le ponçage. Dans le cas des autres séries d'expériences, cette opération a été réalisée avec une ponceuse portable.

## 3.2 Détermination des paramètres et des niveaux d'usinage

### 3.2.1 Détermination des paramètres d'usinage

Dans chaque essai, nous avons enregistré l'intensité du courant ( $i$  en Ampères) et la différence de potentiel du courant électrique ( $v$  en volts); calculé la puissance électrique totale absorbée ( $P_t = v.i$ ). A partir de l'analyse de la courbe de puissance électrique en fonction du temps (voir figure III.7 et tableau A2.2 de l'annexe 2), il a été possible de déterminer  $t_i$  (début de l'interaction entre l'élément de coupe et le bois) et  $t_f$  (fin de l'interaction).

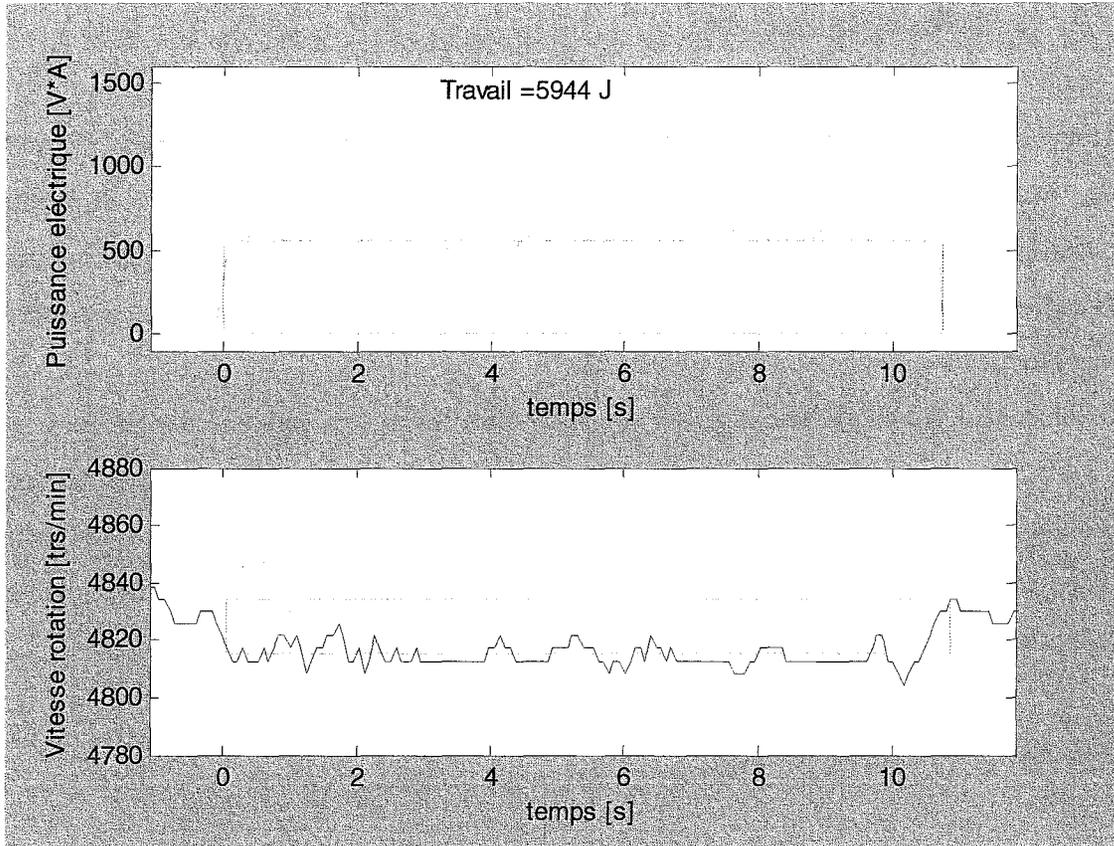


Figure III.7 Puissance électrique totale absorbée et vitesse de rotation instantanée

La vitesse d'avance a été calculée par le rapport entre la dimension linéaire de la pièce et la différence entre  $t_f$  et  $t_i$ , comme dans l'équation suivante:

$$V_f = \frac{L}{t_f - t_i} \quad (3.4)$$

où,

$V_f$  = vitesse d'avance (m/min)

$L$  = dimension linéaire de la pièce (longueur) (m)

$t_i$  = début de l'interaction entre l'élément de coupe et le bois (min)

$t_f$  = fin de l'interaction entre l'élément de coupe et le bois (min)

Pour déterminer la vitesse de rotation, on a utilisé un tachymètre optique (développé par nous) qui nous a permis d'obtenir la vitesse de rotation instantanée (voir figure III.7 et tableau A2.2 de l'annexe 2).

La vitesse de rotation moyenne est calculée à partir de la valeur moyenne de la vitesse de rotation instantanée entre les temps  $t_i$  et  $t_f$ .

Le travail électrique total absorbé a été déterminé à partir du calcul de l'intégrale de la courbe de la puissance effective absorbée entre  $t_i$  et  $t_f$ .

Pour le calcul des intégrales et de la moyenne, nous avons utilisé une méthode simple (règle des trapèzes) et aucun point n'a été pas éliminé (c'est à dire qu'il n'y a pas eu de filtrage des résultats).

### 3.2.2 Détermination des niveaux d'usinage

L'objectif du travail étant d'étudier l'influence de différents paramètres d'usinage sur l'état final de la surface, nous avons cherché à obtenir des qualités différentes de surfaces, correspondant à des niveaux différents d'usinage. L'influence de l'usinage dans la surface dépend de l'interaction entre l'élément de coupe et le substrat et donc les paramètres d'opération suivants : vitesse de rotation, vitesse d'avance, profondeur de coupe, élément de coupe, angle d'attaque, angle de coupe, résistance des éléments de coupe, orientation des fibres et résistance mécanique du substrat. Les trois premiers, normalement sont regroupés dans un paramètre géométrique appelé épaisseur du copeau.

Pour ce paramètre, on a sélectionné trois niveaux, mentionnés dans la bibliographie comme usinage très soigné, usinage soigné et usinage d'ébauche. Les valeurs de référence de l'épaisseur du copeau pour ces niveaux sont:

- $0,05 < e_m < 0,1$  mm → usinage très soigné
- $0,1 < e_m < 0,3$  mm → usinage soigné
- $0,3 < e_m < 0,5$  mm → usinage d'ébauche

Concernant les restants paramètres, on a utilisé dans cette étude préliminaire les éléments de coupe originaux de l'équipement industriel, c'est à dire, fers d'une épaisseur 4 mm, avec un angle de coupe de  $30^\circ$  et un angle de dépouille de  $20^\circ$ , installés dans un arbre cylindrique (porte-outil de diamètre 125 mm et de longueur 250 mm).

Dans les essais préliminaires, une profondeur de coupe a été fixée de 1,5 mm pour les deux essences. Selon quelques auteurs (Lavery et *al.*, 1995), une profondeur de coupe comprise

entre 1 et 2 mm conduit à une meilleure état de surface, tandis qu'une profondeur de coupe supérieur à 2 mm cause défauts dans la surface. Néanmoins, pour les prochaines séries d'expériences la valeur de la profondeur de coupe a été modifiée de 1,5 pour 1 mm, pour les deux essences.

Pour la vitesses de rotation de la machine, et en tenant compte que la vitesse normale de la machine est de 6000 trs/min, on a décidé utiliser cette valeur et encore deux (4500 et 3000 trs/min). La valeur minimum de vitesse de rotation a été fixée après des essais préliminaires réalisés dans l'équipement et en utilisant les mêmes essences de bois avec les mêmes dimensions. Au-dessous des 3000 trs/min (correspondant à une alimentation électrique avec une fréquence inférieure à 25 Hz) la machine ne permet pas de développer une puissance mécanique suffisante pour réaliser la coupe prétendue.

Pour la première et deuxième série d'expériences, nous avons décidé d'utiliser la vitesse normale de la machine, soit initialement 6000 trs/min deux, ensuite 5040 et 4080 trs/min (dans l'étude précédente nous avons utilisé 4500 et 3000 trs/min).

Il était nécessaire de corréler toutes ces données afin d'obtenir des épaisseurs moyennes de copeaux représentatives des trois états d'usinage signalés, à travers de l'équation suivante, utilisée dans le cas du rabotage:

$$e_m \cong \frac{V_f}{N * Z} \sqrt{\frac{H}{D}} \quad (3.5)$$

où,

$e_m$  – épaisseur moyenne de copeau (m)

$V_f$  – vitesse d'avance (m/min)

$N$  – vitesse de rotation (trs/min)

$Z$  – nombre de dents

$H$  – profondeur de coupe (m)

$D$  – diamètre de l'outil (m)

Ainsi, nous avons obtenu les valeurs des paramètres d'usinage, pour chaque niveau.

Dans les essais préliminaires, nous avons fixé pour le niveau 1, la valeur de vitesse d'avance à 7,5 m/min et la vitesse de rotation à 6000 trs/min (50 Hz); pour le niveau 2, 16 m/min et 4500

trs/min (37,5 Hz) et pour le troisième niveau, 22 m/min et 3000 trs/min (25 Hz), (auxquels correspondent les valeurs moyennes de l'épaisseur de copeau pour chacun des intervalles, de 0,07 mm, 0,2 mm et 0,4 mm).

En ce qui concerne la première et deuxième série d'expériences, nous avons fixé pour le niveau 1, la valeur de vitesse d'avance à 6,5 m/min et la vitesse de rotation à 6000 trs/min (50 Hz); pour le niveau 2 la valeur de vitesse d'avance à 11 m/min et 5040 trs/min (42 Hz) et pour le niveau 3 la valeur de vitesse d'avance à 18 m/min et 4080 trs/min (34 Hz), (auxquels correspondent les valeurs moyennes de l'épaisseur de copeau pour chacun des intervalles, de 0,05 mm, 0,1 mm et 0,2 mm).

La vitesse de rotation des éléments de coupe était ajustée à travers de l'ajuste de la fréquence du courant électrique alimentée au moteur triphasé.

Des autres paramètres qui nous permettent d'évaluer la surface usinée est l'avance par dent ( $fz$ ), c'est à dire, la fréquence de l'ondulation et la profondeur des marques ( $t$ ). Nous pouvons ainsi, estimer, pour chaque niveau d'usinage, ces valeurs à travers des équations suivantes:

$$fz \equiv \frac{Vf}{N * Z} \quad (3.6)$$

$$t \equiv \frac{fz^2}{4D} \quad (3.7)$$

où,

$fz$  – avance par dent (m)

$t$  – profondeur des marques de coupe (m)

$Vf$  – vitesse d'avance (m/min)

$N$  – vitesse de rotation (trs/min)

$Z$  – nombre de dents

$D$  – diamètre de l'outil (m)

Ainsi, nous pouvons calculer les valeurs de l'avance par dent, correspondant à ce que la dent laisse comme empreinte dans le matériau, pour chacun des trois niveaux.

Nous pouvons vérifier, si les valeurs de l'avance par dent se trouvent dans les limites présentées dans la figure III.8, ainsi que pour la profondeur des empreintes (figure III.9).

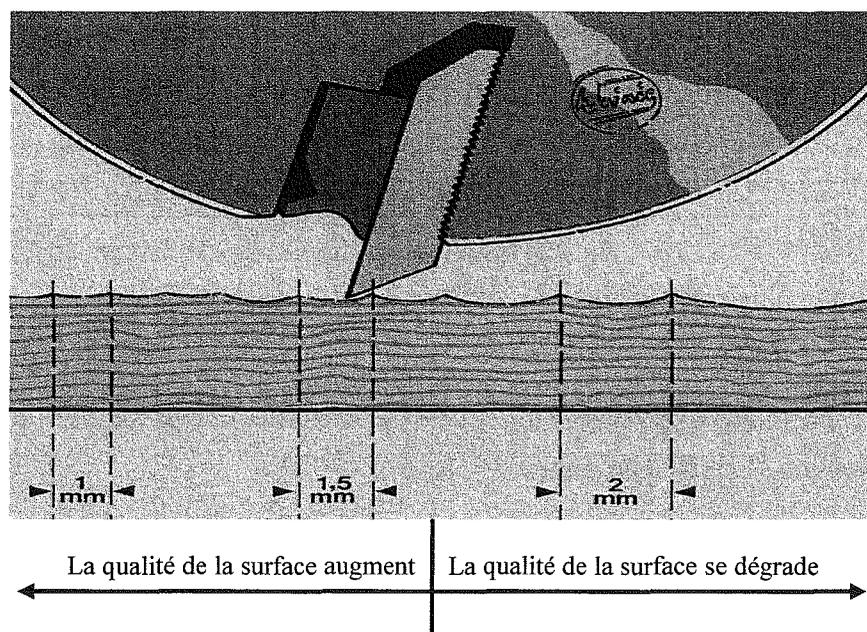


Figure III.8 Rapport entre l'avance par dent et la qualité de la surface usinée du bois (Adapté du manuel de l'équipement industriel réf. WEINIG)

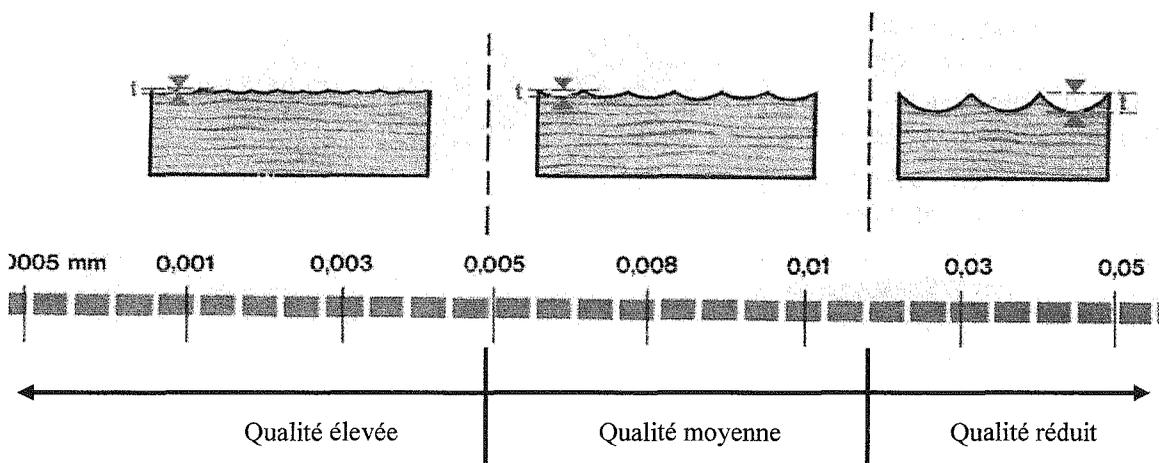


Figure III.9 Rapport entre la profondeur des marques de coupe et la qualité de la surface du bois (Adapté du manuel de l'équipement industriel réf. WEINIG)

Les essais correspondants au troisième niveau, établis dans le protocole préliminaire, n'ont pas été tous réalisés. En fait, quelques essais ont conduit à des surfaces usinées qui présentait des traces d'usinage de très mauvaise qualité allant même jusqu'à l'arrachement de petites quantités de matière ligneuse de la planche usinée. Cela s'est vérifié en particulier pour le hêtre. Des opérations complémentaires d'usinage seraient nécessaires pour "corriger" la

surface finale, ce qui n'est pas recherché dans notre protocole. Ce fait peut être confirmé par l'interprétation des figures précédentes, dans lesquelles nous pouvons classer l'état de la surface de ce niveau d'usinage dans une qualité réduite, assimilé à de l'ébauche.

En ce qui concerne le procédé de ponçage, les paramètres ont été sélectionnés selon les valeurs utilisées dans l'industrie.

Un des objectifs de ce travail étant d'évaluer la nécessité de réalisation d'opérations complémentaires de préparation de la surface (ponçage), il est nécessaire de comparer les procédés qui incluent ou non cette opération. Dans les essais préliminaires, nous avons opté, essentiellement pour des raisons opérationnelles, pour deux niveaux de ponçage correspondants (non poncés (G0) ou poncés (G1)) avec une bande de grain 120, une vitesse d'avance de 10 m/min et une profondeur de passe de 0,3 mm. Pour les deux autres séries d'expériences, nous avons seulement changé la profondeur de passe, qui a la valeur de 0,5 mm.

Ces valeurs ont été fixées d'après la recherche d'informations dans les entreprises et confirmé par des essais préliminaires.

Dans tous les séries d'expériences, nous avons utilisé la finition transparente, avec deux familles distinctes de produits appliqués, le vernis cellulosique (V1, VC) et le produit aqueux (V2, VA).

Comme nous voulons aussi étudier l'influence de l'égrenage entre les couches du vernis, nous avons considéré pour ce facteur deux niveaux différents: un niveau avec égrenage effectué avec un abrasif de grain 320 (E1) et un niveau sans égrenage (E0). Dans la première et deuxième série d'expériences, l'égrenage est effectué avec un abrasif de grain 400 (E1).

#### **4 Système de vision artificielle pour la caractérisation objective de la surface**

La caractérisation objective de la surface usinée du bois peut être quantifiée par des propriétés objectives telles que l'ondulation et la rugosité avant et après la finition de la surface.

La détermination de ces propriétés est très complexe, car, comme cela a déjà été signalé, l'ondulation et la rugosité du bois dépendent à la fois de la structure cellulaire du matériau et de l'usinage.

Dans une première phase, la caractérisation objective de la surface a été effectuée grâce à l'équipement TOPOVISE<sup>®</sup> existant à l'ENSTIB.

Le processus utilisé met en œuvre des méthodologies de vision artificielle pour la détermination de la rugosité des surfaces de bois. Le principe est d'éclairer la surface étudiée avec un faisceau de lumière laser rasante, avec un angle d'environ 15°. Dans l'image obtenue, les zones éclairées correspondent à des pics et les ombres à des creux. L'installation (voir figure III.10) est constituée d'une caméra Sony XC-55, qui permet l'acquisition d'images avec des tailles de 640\*480 pixels (à chaque pixel correspond un niveau de gris compris entre 0-noir et 255-blanc). Chaque pixel a une dimension de 7,4  $\mu\text{m}$ . L'objectif utilisé a une focale de 16 mm et une bague supplémentaire qui permet le grossissement pour une longueur de 8 mm, la distance entre bois et objectif étant de 7 mm. Le caisson dans lequel la caméra est installée n'est pas spécialement dédié à ce type de mesures. Cependant, au-delà de la fonction de support de l'équipement, il réduit au maximum l'éclairage extérieur pendant l'acquisition d'image (ses dimensions sont environ de 1 m de haut, 70 cm de large et longueur).

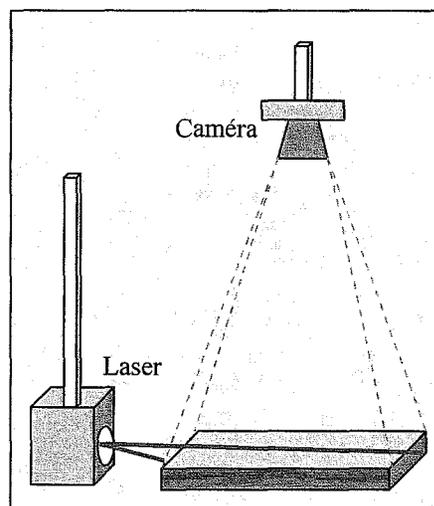


Figure III.10 Schéma du système de vision laser

L'enregistrement du signal vidéo de la caméra a été exécuté à l'aide d'une carte d'acquisition vidéo et le traitement numérique de l'image a été réalisé par une application développée sous MatLab (voir tableau A2.1 de l'annexe 2).

Matlab est un environnement de programmation, conçu en particulier pour la modélisation, la simulation et le traitement du signal. En effet, il existe un grand nombre de fonctions Matlab utiles au traitement des signaux et en plus, il existe des bibliothèques supplémentaires de fonctions appelées *toolboxes* qui viennent enrichir la version de base : les *toolboxes* « *Signal Processing* » et « *Image Processing* » (Mat, 2005).

Une des caractéristiques très utile du Matlab sont les fonctions de filtrage du signal (*filter*), nommément la transformée rapide de Fourier (*Fast Fourier Transform* - FFT) qui est implémentée sous le Matlab (fonction *fft*).

Le but principal de l'utilisation du Matlab 7, dans notre étude a été le développement d'un outil de traitement et de visualisation interactive des données obtenues par les expériences réalisées, soit des opérations d'usinage, soit de l'acquisition d'image laser de la surface du bois. Ça a été possible, grâce à un développement continu de cet outil, notamment en ajoutant des modules expérimentaux (reposant sur de nouveaux modèles statistiques) et en enrichissant les fonctionnalités de simulation.

En France, pendant l'étude préliminaire, 504 (9x56) images ont été effectuées, toutes avec des incidences sur des endroits différents (cette valeur n'inclut pas les images du niveau 3, ultérieurement éliminé de l'étude, d'après les raisons mentionnées auparavant).

Nous avons appliqué plusieurs méthodologies de traitement d'images, en essayant d'obtenir des critères de *pseudo-rugosité* compatibles avec la situation réelle.

Nous avons appliqué plusieurs systèmes de filtrage. Dans une première approche, nous voulions trouver des corrélations entre les paramètres d'usinage et les différents critères obtenus.

Le principal problème était de transformer une image en deux dimensions, qui devrait correspondre à une surface 3D, dans un repère scalaire. Ainsi, nous avons essayé d'abord de réduire notre image 2D par un profil linéaire.

La première contrainte à surmonter a été l'inclinaison du laser par rapport à l'horizontal passant par la surface à mesurer. Le deuxième problème se situait dans la dispersion transversale du laser et de ce fait, la diminution de sa puissance.

Après avoir essayé différentes approches, nous avons vérifié que la meilleure solution est de réaliser un ajustement linéaire des maximums à chaque position axiale.

Toute l'image a été tournée, de telle sorte que l'horizontal reste parallèle à la ligne d'ajustement.

Pour résoudre le deuxième problème, nous avons essayé différentes méthodes afin de réduire la dispersion du profil transversal. La solution trouvée a été l'utilisation de la ligne centrale.

Pour résoudre le problème de la diminution de la puissance du laser, nous avons essayé aussi de chercher une façon de compenser cette perte de puissance (et aussi l'interférence de la lumière extérieure), mais nous n'avons pas réussi à trouver une bonne solution. Cependant, ce problème n'est pas important avec le choix de la transformée rapide de Fourier (FFT), car pour ce genre de filtre le deuxième problème apparaît comme bruit de basse fréquence.

Parmi les diverses méthodes appliquées, celle qui a présenté les meilleurs résultats a été la conversion des images dans un profil de *pseudo-rugosité*, auquel a été appliquée une transformée rapide de Fourier (FFT). Cela a permis le calcul de deux critères d'évaluation de la qualité de la surface: la fréquence moyenne et l'intensité moyenne des ondes mesurées sur la surface. La fréquence moyenne pour chaque gamme de fréquences est définie comme la moyenne des fréquences des ondes dont la fréquence est égale ou inférieure à la même. L'intensité moyenne pour chaque fréquence est définie comme l'intégrale de la puissance de FFT pour toutes les ondes dont la fréquence est égale ou inférieure à la même. Le choix de ces critères est dû essentiellement à la méthode d'obtention des profils de *pseudo-rugosité* qui ne permet pas d'analyser le profil selon la méthode conventionnelle, par exemple par le calcul de Ra (moyenne arithmétique des valeurs absolues des ordonnées dans le segment analysé du profil de rugosité) ou le Rq (moyenne quadratique des valeurs des ordonnées dans le segment analysé du profil de rugosité), (EN ISO 4287). En effet, l'intensité des pics (niveaux des gris) est dépendante des conditions expérimentales d'obtention des images. En conséquence, l'analyse ne peut être faite que dans le domaine des fréquences.

Comme déjà signalé précédemment, la caractérisation objective de la surface a été effectuée sur l'équipement TOPOVISE® existant à l'ENSTIB. L'objectif était d'acquérir de l'expérience

et de la connaissance avec l'utilisation de l'équipement, tant au niveau des conditions externes de la mesure, que des limitations de celui-ci afin de perfectionner notre système. À partir de cette expérience, il a été possible de concevoir et de monter un nouvel équipement dans les espaces du laboratoire du LEPAE (FEUP).

L'installation initiale, utilisée dans l'étude précédente (essais préliminaires), a été redéfini pour cette nouvelle étude (première série d'expériences), en s'appliquant les respectives modifications, avec l'objectif d'un perfectionnement et d'une meilleure adéquation pour l'analyse des plusieurs états de surfaces en bois.

La nouvelle installation (figure III.11) est constituée d'une caméra Sony XC-ST30, équipée d'une objectif VZM 300 et d'un laser Micro VLM 10° line.

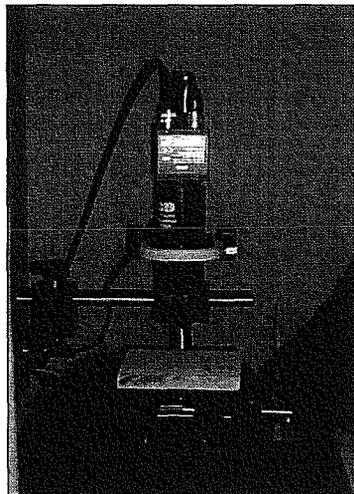


Figure III.11 Photographie du système de vision laser

L'enregistrement du signal vidéo de la caméra a été exécuté à l'aide d'une carte d'acquisition NI-IMAQ PCI-1407 et le traitement numérique de l'image a été réalisé par une application développée sous MatLab.

En utilisant l'équipement installé, 528 (4x132) images ont été effectuées avec des incidences sur des endroits différents.

Les images obtenues ont été converties en profils de *pseudo-rugosité*, sur lesquels ont été appliquées des transformées de Fourier (FFT), ce qui a permis le calcul de huit critères pour évaluer la qualité de surface.

Dans cette phase, les critères ont été appelés de  $K_1$  jusqu'à  $K_8$ . Néanmoins, dans les phases suivantes, il a été possible d'attribuer des relations avec les caractéristiques de la surface, ( $K_{\text{ond}}$  - critère d'ondulation,  $K_{\text{rug}}$  - critère de rugosité et  $K_{\text{sub}}$  - critère d'analyse subjective).

Les divers critères ont été calculés à partir de la courbe de puissance de FFT (figure III.12) comme suit:

$K_{\text{ond}}$  – valeur du pic plus haut;

$K_{\text{rug}}$  – intégrale de la courbe;

$K_{\text{sub}}$  – rapport entre l'intégral pour longueurs d'onde inférieures à 1 mm et  $K_{\text{rug}}$ ;

$K_4$  – longueur d'onde correspondant à  $K_{\text{ond}}$ ;

$K_5$  – valeur moyenne pour longueurs d'onde supérieures à 1 mm;

$K_6$  – écart type pour longueurs d'onde supérieures à 1 mm;

$K_7$  – valeur moyenne pour longueurs d'onde inférieures à 1 mm;

$K_8$  – écart type pour longueurs d'onde inférieures à 1 mm.

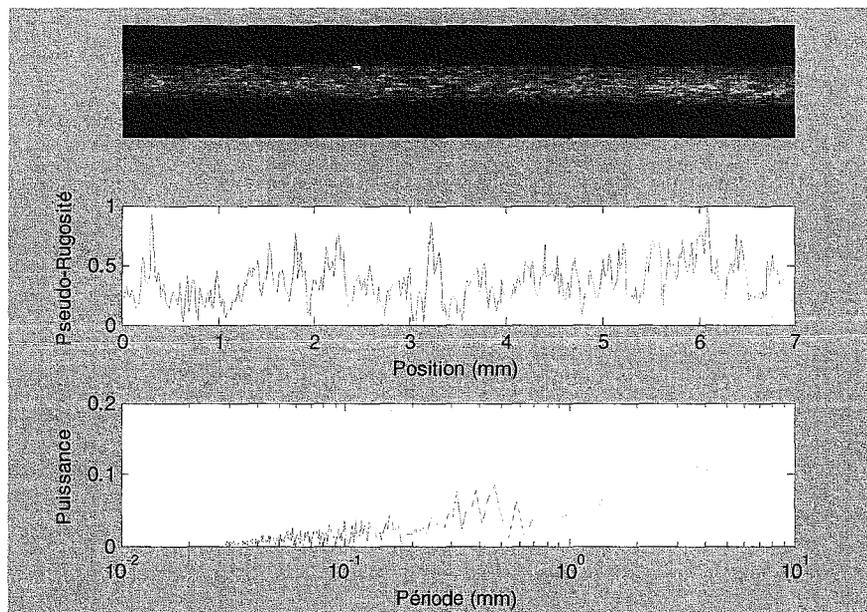


Figure III.12 Image de la surface d'une éprouvette, profil de *pseudo-rugosité* et courbe de puissance (FFT)

Le choix de ces critères est dû essentiellement à la méthode d'obtention des profils de *pseudo-rugosité* que ne permet pas d'analyser le profil de la forme classique. Par exemple, le calcul de  $R_a$  ou de  $R_q$  (EN ISO 4287), est obtenu avec l'intensité arbitraire des pics (niveaux de gris,

dépendant des conditions expérimentales d'obtention des images). Ainsi, nous avons opté pour réaliser l'analyse des profils de "pseudo-rugosité" dans le domaine des fréquences.

Après l'installation du nouvel équipement ainsi que le développement d'une application informatique pour le traitement des images, nous avons réalisé une étude sur l'influence des angles d'inclinaison de la caméra et d'incidence du laser, par rapport à la surface du bois, avec l'objectif de paramétrer son influence soit dans la qualité de l'image, soit dans la corrélation entre celles-ci et la qualité de la surface.

Nous avons effectué une étude sur l'influence des angles d'inclinaison de la caméra et d'incidence du laser dans la qualité des plusieurs critères.

Sur des éprouvettes sélectionnées (obtenus avec le protocole préliminaire), plusieurs images ont été acquises, avec de différents angles d'inclinaison, pour le laser et pour la caméra, en faisant attention que l'incidence soit toujours dans les mêmes endroits des éprouvettes.

En maintenant la caméra fixe, nous avons fait varier l'angle de surface du bois soit dans l'axe x, soit dans l'axe y ( $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$ ) ainsi que l'angle d'incidence du laser ( $5^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $35^\circ$ ). Nous avons trouvé que les meilleures images étaient obtenues avec la caméra perpendiculaire à la surface du bois et pour les angles d'inclinaison du laser entre  $5^\circ$  et  $20^\circ$ . Pour cette raison, nous avons opté pour maintenir la valeur de l'angle d'incidence.

Dans cette étude préliminaire et en faisant attention que la longueur d'onde d'ondulation de surface obtenue soit référencé par rapport à chacun des niveaux d'usinage (N1 de 0,6 mm ; N2 de 1,8 mm ; N3 de 3,7 mm), nous sommes arrivés à la conclusion que la meilleure distance entre la caméra et l'éprouvette était de 41,6 cm. Nous obtenons, ainsi, une image avec une longueur de 29,5 mm. Avec ces valeurs, il est possible de capter des ondulations avec une longueur d'onde maximale de 4,9 mm (correspondant environ à deux fois la longueur d'onde maximale attendue dans cette étude).

Il a été nécessaire de concevoir, dimensionner et construire des adaptateurs pour le système caméra/lentille, afin de permettre les distances précédemment citées.

En ce qui concerne l'étude de détermination du meilleur angle d'incidence du laser, nous avons effectué une étude systématique et plus rigoureuse pour lequel nous avons utilisé trois angles d'incidence.

Le laser a été placé à une distance de la ligne centrale de l'image de façon à ce que toute la zone captée (29,5 mm dans la zone centrale) se trouve parfaitement illuminée. Ainsi, et pour les angles d'incidence étudiés ( $13,7^\circ$ ,  $8,5^\circ$ ,  $4,6^\circ$ ) et en sachant que la valeur de l'ouverture de l'angle d'incidence est par défaut de  $5^\circ$  pour chaque côté de la ligne centrale, cette distance a été fixée en 150 mm.

Dans la figure III.13, on peut observer un schéma du système de vision laser et dans le tableau III.6 les respectives dimensions, utilisées pour l'acquisition d'images.

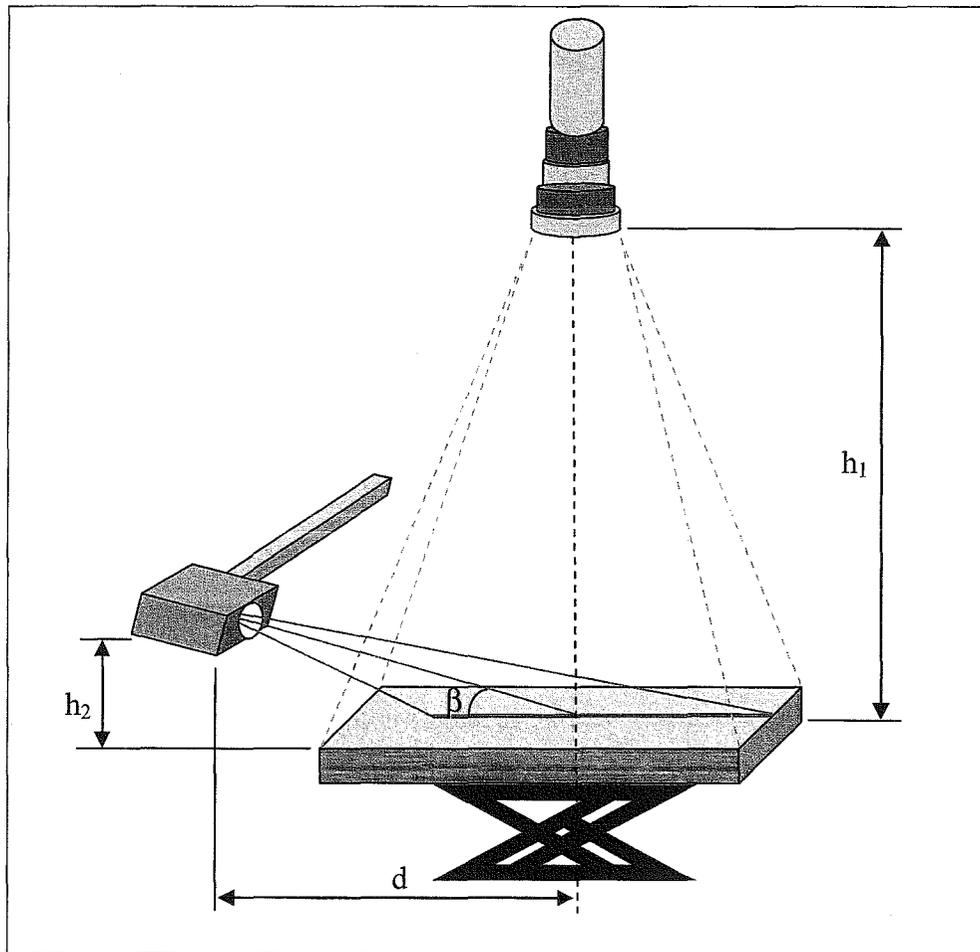


Figure III.13 Schéma du système de vision laser

Tableau III.6 Caractéristiques du système de vision laser

	Angles étudiés		
	A	B	C
$\beta$ (°)	13,7	8,5	4,6
$h_1$ (mm)	416	416	416
$d$ (mm)	150	150	150
$h_2$ (mm)	36,5	22,5	12

À partir des images obtenues de chaque éprouvette, nous avons effectué le traitement décrit auparavant de façon à calculer les différents critères.

Nous avons calculé les coefficients de corrélation entre chacun de ces critères et les niveaux d'usinage, ainsi que les niveaux de ponçage.

En ce qui concerne la deuxième série d'expériences, le même équipement que pour les essais précédents a été utilisé, mais, avec quelques adaptations, en respectant les conclusions obtenues par l'étude sur l'influence des angles d'inclinaison de la caméra et d'incidence du laser (figure III.14).

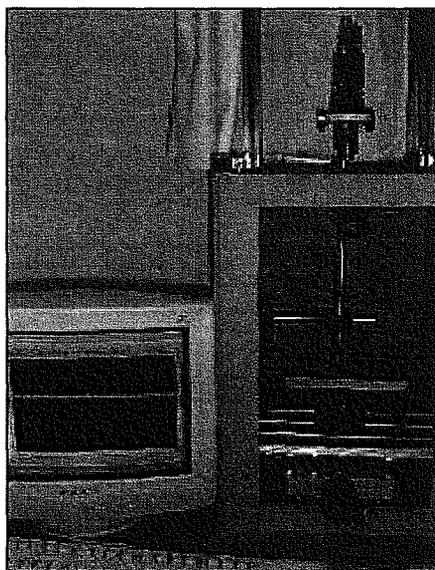


Figure III.14 Photographie du système de vision laser

Après les nouvelles modifications sur le système de vision laser, 528 (4x132) images ont été effectuées avec des incidences dans des endroits différents.

Nous avons appliquée les mêmes méthodologies de traitement d'images, pour obtenir des critères de *pseudo-rugosité* compatibles avec la situation réelle.

Les images obtenues ont été converties en profils de *pseudo-rugosité*, sur lesquels ont été appliquées des transformées de Fourier (FFT). Ce qui a permis le calcul de trois critères pour évaluer la qualité de surface au lieu de huit, comme dans l'étude précédente. Nous avons donc considéré le  $K_{\text{ond}}$  et le  $K_{\text{rug}}$ , pour lesquels existait une bonne corrélation avec les paramètres d'usinage et ainsi le  $K_{\text{sub}}$  pour lequel nous avons trouvé une bonne corrélation avec les résultats de l'analyse subjective.

Ces différents critères ont été calculés à partir de la courbe de puissance de FFT (figure III.12) comme suit:

$K_{\text{ond}}$  – valeur du pic plus haut;

$K_{\text{rug}}$  – intégrale de la courbe;

$K_{\text{sub}}$  – rapport entre l'intégral pour longueurs d'onde inférieures à 1 mm et  $K_{\text{rug}}$ .

Comme dans l'étude précédente, nous avons opté pour analyser l'analyse des profils de *pseudo-rugosité* dans le domaine des fréquences.

## 5 La mouillabilité de la surface

L'étude de la mouillabilité du bois a été réalisée, comme une méthode complémentaire de caractérisation des surfaces par rapport à l'évaluation de la rugosité par analyse d'image. La compréhension de ce phénomène dans le bois est importante pour améliorer l'interaction entre le bois et les produits de finition. Nous avons voulu déterminer l'influence de l'usinage dans la valeur de l'angle de contact de l'eau sur le bois. En théorie, cela corrobore l'adhésion de la finition, bien que dans quelques cas, tout ne vérifie pas cette théorie (Zerizer, 1991).

La mouillabilité du bois a été évaluée en utilisant la méthode de la goutte (*sessile drop method*). Les angles de contact des gouttes déposées sur la surface ont été mesurés à l'aide d'un goniomètre modèle OCA de la Dataphysics (figure III.15), existante dans le laboratoire LEPAE (FEUP). Les conditions de réalisation des essais ont été les suivantes : le liquide de mouillage était de l'eau à la température ambiante, la goutte appliquée avait un volume constante de 10  $\mu\text{l}$  et les mesures ont été réalisées dans la direction axiale du bois.

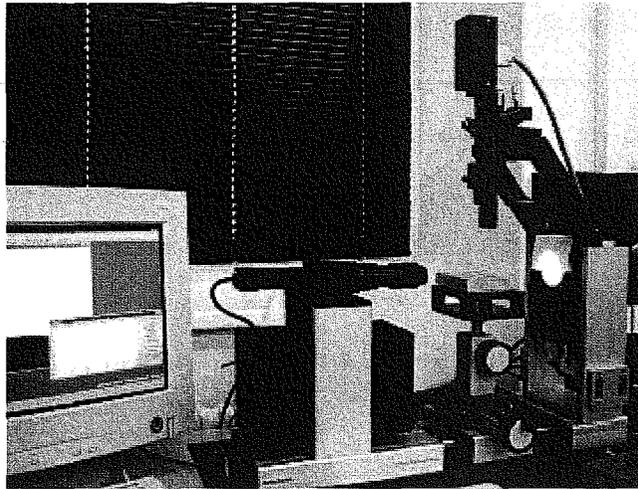


Figure III.15 Goniomètre

Dans chaque essai nous avons enregistré la variation de l'angle de contact en fonction du temps. L'angle de contact d'équilibre est calculé en tenant compte du pont d'interception des deux droites obtenues par ajustement des données expérimentales relatives à chacune des phases, étalement/diffusion, dans lesquelles ces phénomènes se trouvent parfaitement développés (figure III.16).

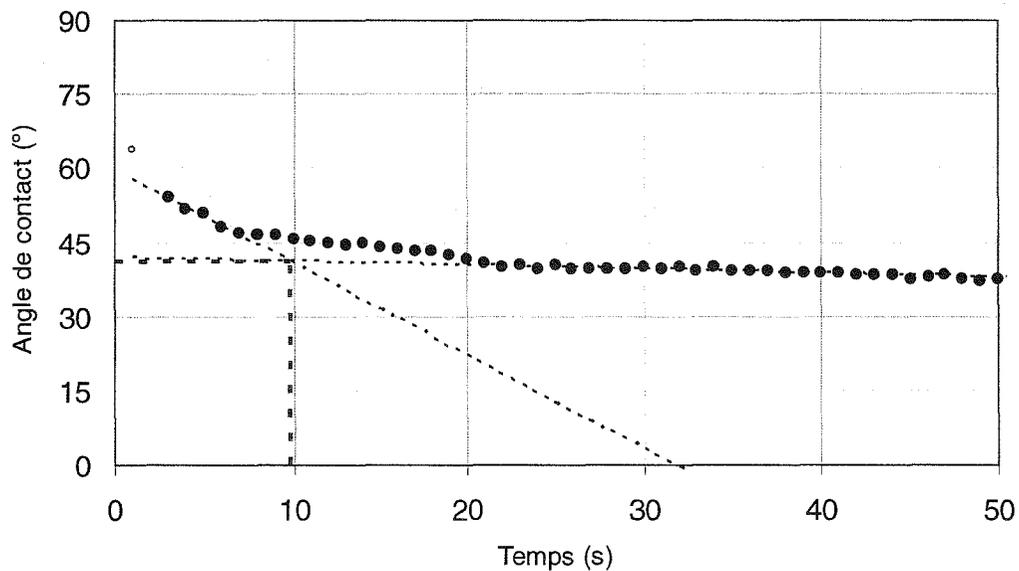


Figure III.16 Exemple de la détermination de l'angle d'équilibre pour une éprouvette de hêtre (N3-essai 9, après 12 jours)

Neuf mesures d'angle ont été effectuées pour chaque essence et niveau d'usinage pour obtenir une moyenne. L'acquisition était faite chaque seconde.

Cette procédure a été suivie dans les essais préliminaires. En ce qui concerne la première série d'expériences, des problèmes sur une partie de l'équipement ont empêché de faire les essais. Cela fut possible seulement 3 mois (88 jours), après la préparation des échantillons, qu'il a été possible de mettre en marche cette détermination. Les conditions de réalisation de ces essais ont été les mêmes, à l'exception du volume qui a été de 7  $\mu\text{l}$  et de l'acquisition qui était réalisé toutes les demi seconde.

Dans la deuxième série d'expériences, nous avons suivi la même procédure que dans la première série.

Dû au fait que dans le secteur industriel, les pièces usinées ne suivent pas toujours un cycle continu de production. En effet, les pièces attendent quelque temps entre la phase de préparation de la surface et celle de l'application du produit de finition. Aussi, nous avons voulu étudier l'influence du vieillissement de la surface usinée dans la mouillabilité. Cette étude peut aussi être complétée avec les données de la mouillabilité du protocole précédent, réalisé après 3 mois.

Pour cela, une nouvelle détermination de l'angle de contact a été réalisée, avec 9 essais pour chaque essence et niveau d'usinage et des éprouvettes semblables à celles de l'étude précédente (provenant de la même pièce de bois), stockées pendant 12 jours, dans des conditions semblables à celles du secteur industriel.

## **6 La brillance spéculaire de la surface**

Dans le contexte de notre étude, la mesure de la brillance est un essai important, en prenant en compte que la brillance est une caractéristique de la surface rapidement appréhendée par le consommateur et qui a une grande importance dans l'évaluation de la qualité d'un produit.

La détermination de la brillance spéculaire de la surface du bois, pour les trois protocoles expérimentaux, a été réalisée en respectant la norme NP EN ISO 2813 (2001), et en utilisant une brillancemètre modèle Micro-Tri-Gloss de la marque GARDNER (figure III.17), existante dans le LAAM (Laboratoire de Colles et Finitions en Bois), à l'ESTV.

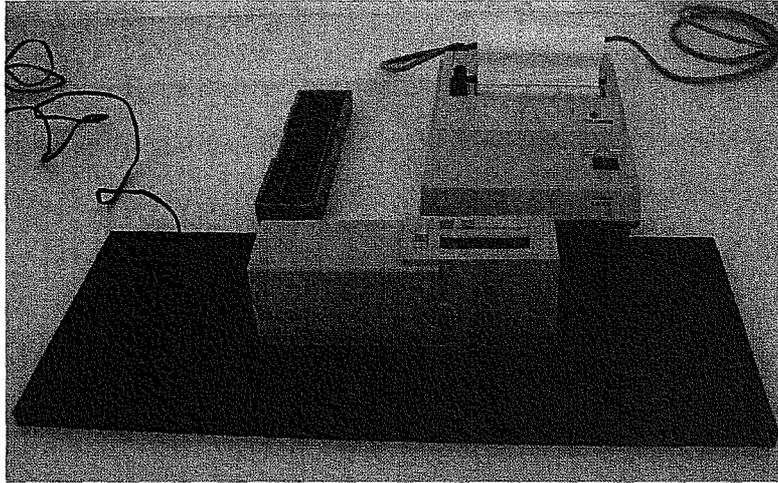


Figure III.17 Brillancemètre

Cet essai consiste dans l'évaluation de la réflexion produite par la surface, à travers la mesure de la brillance spéculaire dans des conditions définies.

Les essais ont été effectués avec un angle d'incidence de  $60^\circ$ . Pour obtenir une valeur de brillance représentative sur toute l'éprouvette, nous avons réalisé six mesures à des endroits différents et nous avons calculé la moyenne (figure III.18).

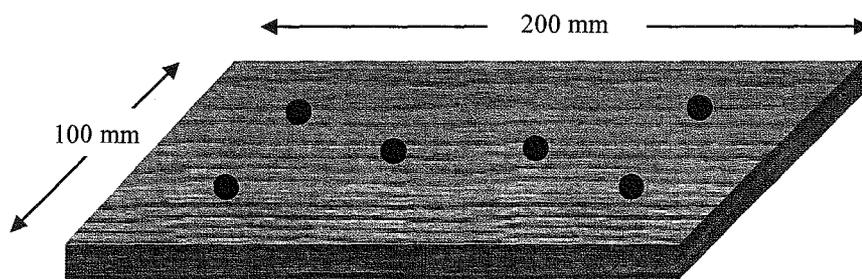


Figure III.18 Endroits de détermination de la brillance spéculaire

Nous avons fait une analyse de l'influence des facteurs de l'usinage et de l'essence dans la brillance présentée par la surface, à travers d'un test de *t*-Student à 5%, entre les pièces soumises à l'égrenage (E1) et celles non soumises à cette opération (E0), pour chaque type de produit.

## 7 Analyse subjective

Le but de l'analyse subjective était de vérifier non seulement la correspondance entre la caractérisation objective, et la qualité visuelle et tactile des surfaces, mais aussi, s'il existe une corrélation entre les critères considérés dans l'évaluation objective de la surface et les critères considérés dans l'évaluation subjective.

Pour réaliser cette étude, nous avons fait des enquêtes à un panel d'observateurs. Postérieurement, il a été également établi des corrélations entre les paramètres objectifs et ceux subjectifs d'évaluation de la surface.

Le protocole expérimental d'analyse subjective a été établi de façon à être d'accord avec les normes ISO sur l'analyse sensorielle, notamment à la ISO 4121 : 2003, la ISO 5492 : 1992, la ISO 5495 : 1983, la ISO 6658 : 1985 et à la ISO 11056 : 1999, (choix du panel d'observateurs, méthodologie d'essai, préparation du modèle d'enquête, etc...), avec les adaptations nécessaires à ce cas.

Pour démarrer cette analyse, nous avons choisi la méthode de profil de choix libre qui a été adapté.

Dans cette méthode, les observateurs sont confrontés à des éprouvettes et les évaluent selon leur propre sensibilité leur attribuant, ensuite, une classification. De cette façon, nous avons surmonté le désavantage exigé dans la plupart des essais – l'entraînement des observateurs et de l'existence d'un standard.

Nous avons alors, élaboré une première fiche d'enquête (tableau III.7), pour l'évaluation subjective de l'ondulation visuelle (OV) et tactile (OT), ainsi que de la rugosité visuelle (RV) et tactile (RT), sur 18 éprouvettes, avec une population de 20 observateurs, desquels 5 experts et les autres avec un peu d'expérience dans le domaine du bois (élèves finalistes du Cours Génie du Bois).

Tableau III.7 Fiche d'enquête - 1

**Classez les éprouvettes en utilisant l'échelle de 1 (mauvais) à 5 (excellent) pour l'analyse visuelle et tactile de l'ondulation et de la rugosité**

	1 <sup>ère</sup> Analyse		2 <sup>ème</sup> Analyse	
	Visuelle		Tactile	
N° Éprouvette	Ondulation	Rugosité	Ondulation	Rugosité
1				
...				
...				
18				

À travers l'analyse des résultats de cette première fiche d'enquête, nous avons conclu que les observateurs n'ont pas réussi distinguer l'ondulation et la rugosité, que ce soit au niveau de l'analyse visuelle ou que ce soit au niveau tactile.

Devant ces difficultés, nous avons procédé à la modification de la fiche d'enquête - 1, dans laquelle nous avons considéré l'évaluation de la qualité visuelle et de la qualité tactile de la surface, sans distinction entre l'ondulation et la rugosité. L'introduction d'une nouvelle colonne a été réalisée pour l'évaluation globale de la surface, c'est à dire, l'analyse visuelle en simultané avec le toucher (tableau III.8), laquelle est instinctivement faite par un utilisateur d'une surface finie en bois.

Tableau III.8 Fiche d'enquête - 2

**Classez la surface des éprouvettes comme Bonne, Acceptable ou Mauvaise pour l'analyse visuelle, tactile et après en simultané (visuelle et tactile)**

N° Éprouvette	1 <sup>ère</sup> Analyse			2 <sup>ème</sup> Analyse			3 <sup>ème</sup> Analyse		
	Visuelle			Tactile			Visuelle et Tactile		
	Bonne	Acceptable	Mauvaise	Bonne	Acceptable	Mauvaise	Bonne	Acceptable	Mauvaise
1									
...									
...									
18									

Les résultats de cette enquête ont ensuite eu un traitement numérique simple. À chacun des classements a été attribuée une valeur numérique: 1 - Bonne; 2 - Acceptable; 3 - Mauvaise.

Pour chaque éprouvette, nous avons calculé la moyenne de toutes les enquêtes. Trois moyennes ont été calculées : la moyenne des valeurs attribuées par les experts, la moyenne des valeurs attribuées par les non-experts et la moyenne globale.

Ainsi que nous l'avons déjà dit précédemment, un des objectifs de ce travail était de vérifier que non seulement les différences trouvées dans l'analyse objective correspondent aux différences de qualité visuelle et tactile des surfaces, mais aussi, qu'il existe une corrélation entre les critères considérés dans l'évaluation objective de la surface et les critères considérés dans l'évaluation subjective.

Ainsi, nous avons fait la confrontation entre les résultats de l'analyse subjective avec ceux de l'analyse objective utilisés dans les critères, définis et utilisés dans l'analyse objective ( $K_{\text{ond}}$ ,  $K_{\text{rug}}$  et  $K_{\text{sub}}$ ).

---

## **Chapitre IV - Résultats et Discussion**

## 1 Essais préliminaires

Dans un premier temps, nous avons établi un protocole expérimental (essais préliminaires) dont l'objectif était non seulement d'initier toutes les méthodologies, mais aussi d'identifier les secteurs les plus robustes.

### 1.1 Plan des expériences

Dans le tableau IV.1, nous présentons les niveaux d'usinage, dont les valeurs ont été obtenues à partir de l'équation 3.5.

Ainsi, pour le niveau 1, nous avons fixé la valeur de vitesse d'avance à 7,5 m/min et la vitesse de rotation à 6000 trs/min (50 Hz), pour le niveau 2 les valeurs de 16 m/min et 4500 trs/min (37,5 Hz) et enfin pour le troisième niveau, les valeurs de 22 m/min et 3000 trs/min (25 Hz), auxquels correspondent les valeurs moyennes de l'épaisseur de copeau dans chacun des intervalles, soit 0,07 mm, 0,2 mm et 0,4 mm.

Tableau IV.1 - Paramètres et niveaux d'usinage

Longueur du porte-outils (mm)	250		
Diamètre D (mm)	125		
Nombre de dents Z	2		
	<b>Niveau 1</b>	<b>Niveau 2</b>	<b>Niveau 3</b>
Vitesse de rotation N (trs/min)	6000	4500	3000
Vitesse d'avance Vf (m/min)	7,5	16	22
Fréquence du courant électrique (Hz)	50	37,5	25
Profondeur de coupe H (mm)	1,5	1,5	1,5
Épaisseur moyenne de copeau $e_m$ (mm)	0,07	0,2	0,4

Nous avons obtenu, à travers des équations 3.6 et 3.7, les valeurs suivantes des marques d'usinage (tableau IV.2), pour chacun des niveaux.

Tableau IV.2 - Marques d'usinage

	<b>Niveau 1</b>	<b>Niveau 2</b>	<b>Niveau 3</b>
Profondeur des marques t (mm)	0,0008	0,0060	0,0270
Avance par dent fz (mm)	0,625	1,780	3,670

Nous pouvons aussi vérifier, que les valeurs obtenues pour chaque niveau se trouvent dans les limites présentées dans la figure III.8 du chapitre III en ce qui concerne l'avance par dent, ainsi que pour la profondeur des marques (figure III.9 du même chapitre).

Les essais correspondants au troisième niveau, n'ont pas été réalisés dans la totalité, parce que la surface usinée présentait des qualités de surface de mauvaise qualité avec des arrachements, en particulier pour le hêtre, et qui exigeraient des opérations complémentaires de correction de la surface, lesquelles n'entraient pas dans le protocole précédemment décrit. Ce fait peut être confirmé par l'interprétation de la figure III.8 et III.9 du chapitre III, dans lesquelles nous pouvons classer l'état de la surface de ce niveau d'usinage en qualité réduite et vérifier qu'il y a une diminution des efforts de coupe (arrachement de copeau). Nous avons effectué quelques photographies de ces pièces, pour chaque niveau. Les images de la figure IV.1, correspondantes au niveau trois, ainsi que sa comparaison avec les images des deux autres niveaux (figure IV.2 et IV.3), permettent de visualiser ces effets et donc de justifier l'élimination du troisième niveau.

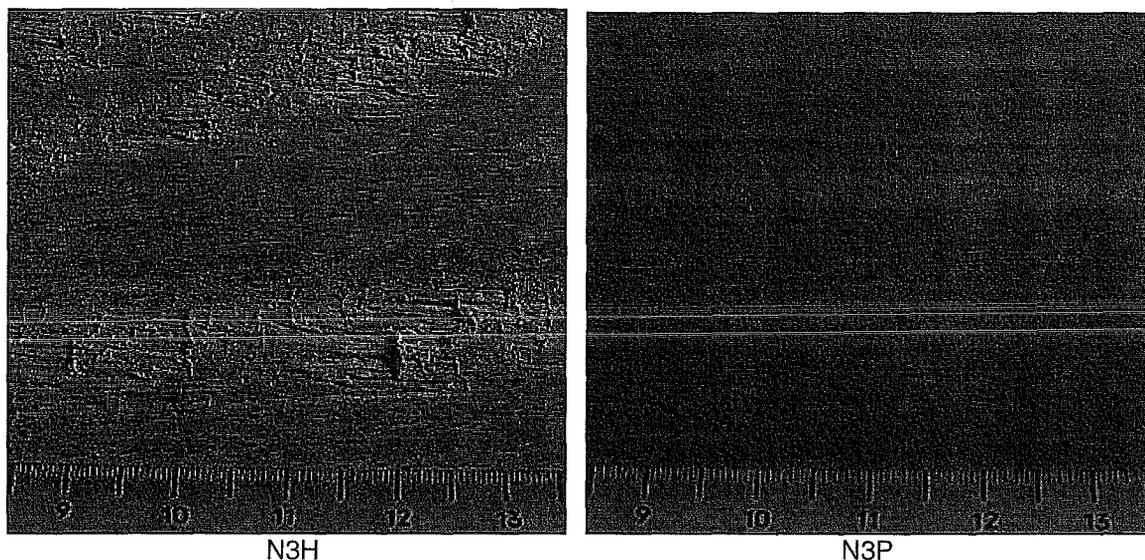


Figure IV.1 - Surface de hêtre (H) et du pin (P), avec l'usinage au niveau 3 (N3)

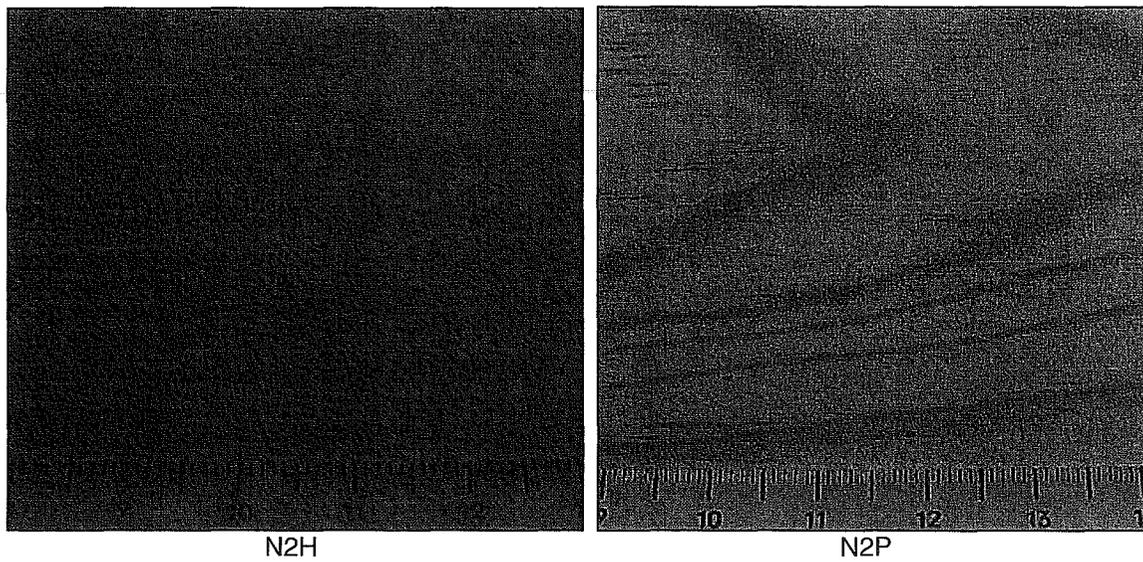


Figure IV.2 - Surface de hêtre (H) et du pin (P), avec l'usinage au niveau 2 (N2)

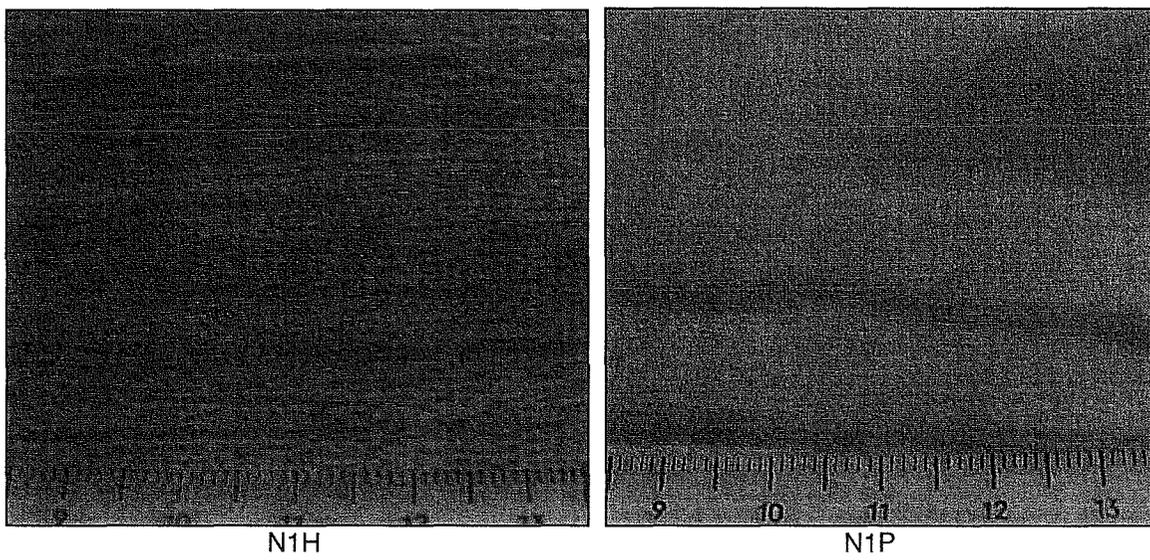


Figure IV.3 - Surface de hêtre (H) et du pin (P), avec l'usinage au niveau 1 (N1)

Le tableau IV.3 donne les facteurs, les niveaux choisis et leurs valeurs et codes respectifs.

Tableau IV.3 - Facteurs et niveaux

Facteurs		Niveaux/Codes	
		P	H
Essences		Pin	Hêtre
		Usinage	
		N1	N2
Vitesse de rotation	N (trs/min)	6000	4500
Vitesse d'avance	Vf (m/min)	7,5	16
Profondeur de coupe	H (mm)	1,5	1,5
		Ponçage	
		G0	G1
Grain		—	120
Vitesse d'avance	Vf (m/min)	—	10
Profondeur de passage	H (mm)	—	0,3
Nombre de passages		—	2
		Égrenage	
		E0	E1
Grain		—	320
Vitesse d'avance	Vf (m/min)	—	10
Profondeur de passage	H (mm)	—	0,1
Nombre de passages		—	1
		Vernis	
		Cellulosique	Acrylique phase aqueuse
		V1	V2
Nombre de couches		1+1	1+1

Avec toutes les combinaisons possibles, nous avons obtenu la table suivante L32 [2x2x2x2x2]

– Plan factoriel complet (tableau IV.4).

Tableau IV.4 - Plan factoriel complet

N°	Facteurs					Code
1	N1	P	G0	V1	E0	-----
2	N1	P	G0	V1	E1	-----+
3	N1	P	G0	V2	E0	----+-
4	N1	P	G0	V2	E1	----++
5	N1	P	G1	V1	E0	--+--
6	N1	P	G1	V1	E1	--++
7	N1	P	G1	V2	E0	--+-
8	N1	P	G1	V2	E1	--++
9	N1	H	G0	V1	E0	-+---
10	N1	H	G0	V1	E1	-+--+
11	N1	H	G0	V2	E0	-+-+
12	N1	H	G0	V2	E1	-++
13	N1	H	G1	V1	E0	-++-
14	N1	H	G1	V1	E1	-+++
15	N1	H	G1	V2	E0	-+++
16	N1	H	G1	V2	E1	-++++
17	N2	P	G0	V1	E0	+----
18	N2	P	G0	V1	E1	+---+
19	N2	P	G0	V2	E0	+--+-
20	N2	P	G0	V2	E1	+---+
21	N2	P	G1	V1	E0	+--+-
22	N2	P	G1	V1	E1	+---+
23	N2	P	G1	V2	E0	+--+-
24	N2	P	G1	V2	E1	+---+
25	N2	H	G0	V1	E0	++---
26	N2	H	G0	V1	E1	++--+
27	N2	H	G0	V2	E0	+++-
28	N2	H	G0	V2	E1	++--+
29	N2	H	G1	V1	E0	+++--
30	N2	H	G1	V1	E1	+++--+
31	N2	H	G1	V2	E0	+++--
32	N2	H	G1	V2	E1	+++++

Néanmoins, pour réduire le nombre d'essais, dans cette phase exploratoire et de conception du protocole expérimental, et en raison du grand nombre de paramètres/niveaux concernés, la méthode de Taguchi a été utilisée pour mettre en place un plan d'expériences, selon la table L8 suivante (tableau IV.5).

Tableau IV.5 - Table Taguchi

N°	Facteurs				Code
1	N1	P	G0	E0	----
2	N1	P	G1	E1	--++
3	N1	H	G0	E1	-+--
4	N1	H	G1	E0	-++-
5	N2	P	G0	E1	+--+
6	N2	P	G1	E0	+--+
7	N2	H	G0	E0	++--
8	N2	H	G1	E1	++++

L'analyse des résultats a été effectuée à travers d'une analyse de variance (ANOVA), afin d'évaluer le niveau de signification des effets des différents facteurs.

## 1.2 Essais - Préparation des échantillons

Tout le procédé d'usinage a été réalisé au LTIM (Laboratoire de Technologie des Industries du Bois) de l'École Supérieure de Technologie de Viseu.

Pour la préparation des échantillons, nous avons utilisé des planches du bois de pin et de hêtre débitées tangentiellement pour une épaisseur de 22 mm, préalablement séchées dans une étuve et maintenues dans un environnement climatisé, de façon à obtenir des valeurs d'humidité couramment utilisées dans l'industrie de l'ameublement. L'humidité déterminée selon la norme NP 614, a été réalisée pour les deux essences pour une valeur de 11%.

Ensuite, nous avons effectué un pré-usinage. Les planches ont été passées à la corroyeuse (2,30 x 0,11 x 0,02 m), pour garantir que les planches possédaient des états de surface initiaux similaires et d'égale géométrie. Ensuite, les échantillons ont été préparés selon le protocole décrit (tableau IV.3).

Le ponçage a été effectué avec une vitesse d'avance de 10 m/min, en utilisant la première paire de rouleaux, équipée avec des bandes de grain 120. Les pièces ont été soumises à deux passages dans la ponceuse. En effet, pour l'usinage avec le niveau 2 (voir tableau IV.3), les marques d'usinage sont bien visibles à œil nu et au touché. Un seul passage (correspondant à une diminution de l'épaisseur de 0,3 mm) n'était pas suffisant pour enlever ces défauts. Cela a

été évité pour les éprouvettes usinées selon le niveau 1 avec une vitesse de rotation plus élevée et une vitesse d'avance plus petite (pratiquement la moitié). Ainsi, les marques d'usinage n'existaient que faiblement, et donc un seul passage était suffisant. Cependant, pour avoir une cohérence entre les opérations effectuées sur toutes les pièces (c'est à dire, une variation minimale d'épaisseur entre les pièces), nous avons décidé de faire le même nombre de passages sur la ponceuse.

L'application du produit a été réalisée avec un pistolet airless. L'égrenage du vernis a été exécuté sur la même ponceuse utilisée pour le ponçage, en utilisant le troisième élément équipé d'une bande de grain 320, avec une vitesse d'avance égale à celle du ponçage (10 m/min) et une profondeur de passage de 0,1 mm.

Dans la dernière phase, nous avons appliqué une deuxième couche de vernis sur toutes les éprouvettes, dans des conditions semblables à la première couche.

Dans chaque phase du procédé, nous avons enlevé sur chaque planche préparée selon le protocole décrit (tableau IV.5) de petites éprouvettes de 8 cm de longueur. Un total de 56 éprouvettes (figure IV.4) a été obtenu (8 R1, 16 R2, 16 R3 et 16 R4), et ultérieurement soumis à la caractérisation objective.

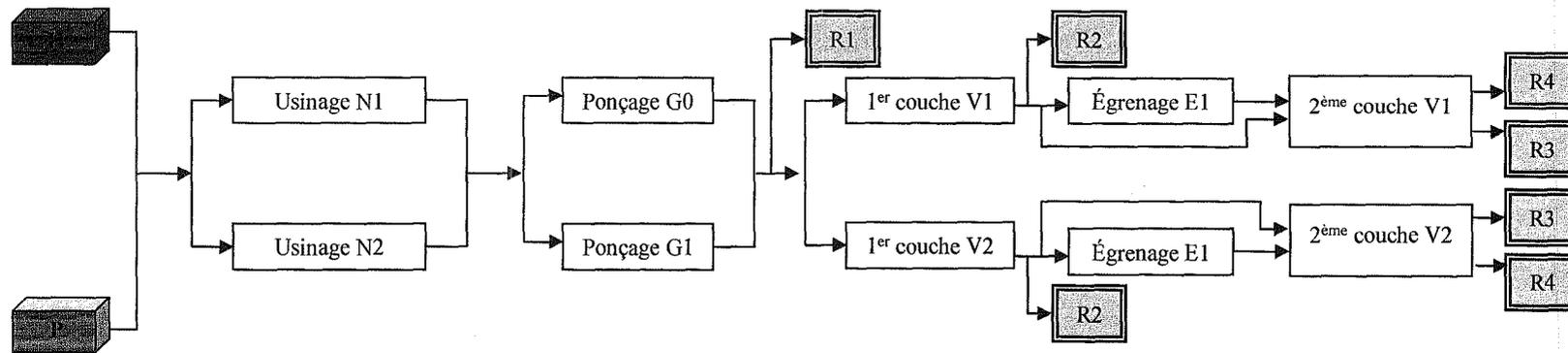


Figure IV.4 - Séquence opératoire pour l'obtention des éprouvettes

La dimension des éprouvettes a été choisie de manière à ce que chaque série d'essais correspondait à une seule planche du bois (en diminuant ainsi la variabilité associée au matériel). Après chaque phase de préparation de la surface, nous avons enlevé les éprouvettes nécessaires à la caractérisation physico mécanique et à la caractérisation de la surface (R1, R2, R3 et R4). Nous avons encore l'exigence d'une longueur minimum pour qu'une pièce puisse être usinée par la ponceuse (35-40 cm), fait aggravé par celle de l'opération finale, où la planche possède des dimensions réduites.

### 1.3 Caractérisation objective de la surface

La caractérisation objective de la surface du bois peut être quantifiée par des propriétés objectives, tels que l'ondulation et la rugosité avant et après la finition, la mouillabilité avant la finition et la brillance de la surface finie.

#### 1.3.1 Influence des facteurs étudiés dans l'analyse objective

Dans ce qui suit sont présentés les résultats obtenus dans le travail exploratoire qui a eu comme objectif de maîtriser l'influence des nombreux facteurs étudiés dans la caractérisation objective de l'aspect d'une finition, mais aussi de déterminer les limites et les potentialités de la méthodologie utilisée pour caractériser la *pseudo-rugosité* du bois.

Sur les figures IV.5 et IV.6, nous pouvons observer les images, les profils de *pseudo-rugosité* et la courbe de puissance de la FFT pour les échantillons de pin obtenus avec les deux niveaux d'usinage considérés (éprouvettes N° 1 et 5 du tableau IV.5). En termes globaux, nous observons qu'il y a une quantité élevée de bruit lié à cette méthode, correspondant aux plus hautes fréquences (basses puissances de FFT).

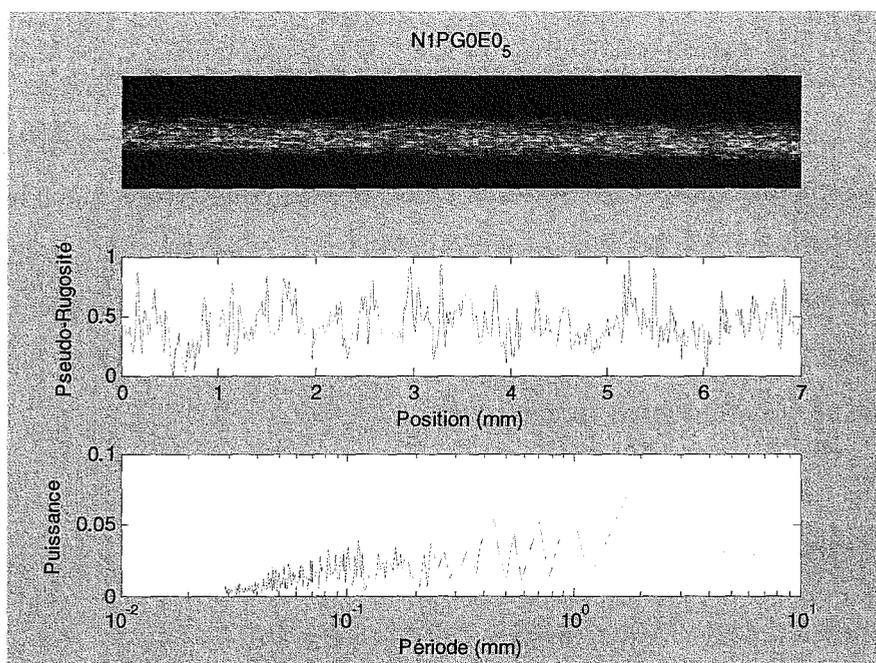


Figure IV.5 - Image de la surface, profil de *pseudo-rugosité* et courbe de puissance (FFT) pour une éprouvette de pin, obtenue avec le niveau d'usinage N1

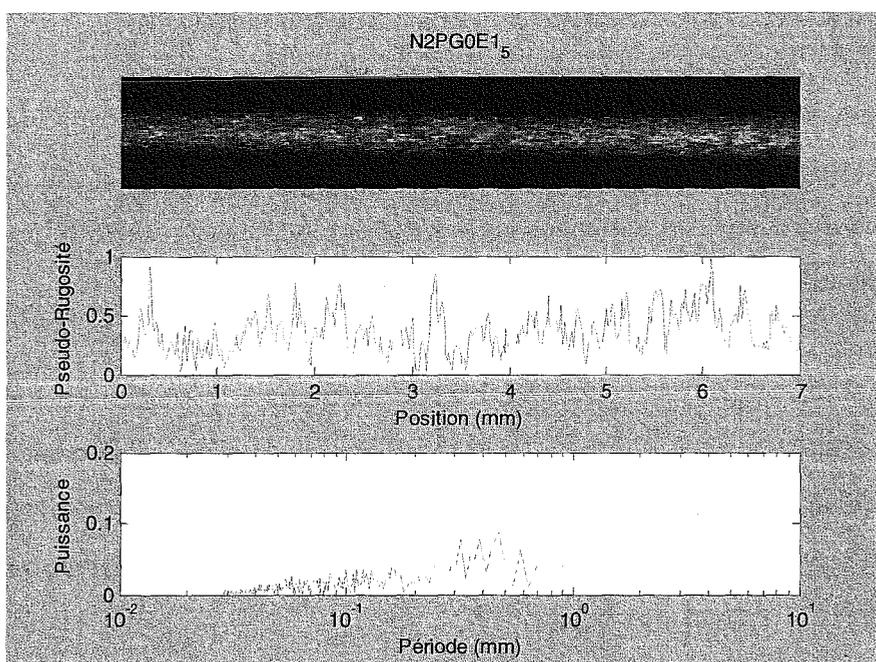


Figure IV.6 - Image de la surface, profil de *pseudo-rugosité* et courbe de puissance (FFT) pour une éprouvette de pin, obtenue avec le niveau d'usinage N2

En comparant les deux figures, nous observons des différences significatives pour les fréquences les plus basses, normalement associées aux ondulations, ce qui peut signifier que cette méthode permet d'évaluer correctement l'état de la surface, une fois que nous obtenons

comme espéré, pour le niveau d'usinage N1 (vitesse de rotation élevée et faible vitesse d'avance) les fréquences en moyenne plus hautes (c'est à dire les ondulations de période plus basse).

Sur la figure IV.7, il est présenté le seuil de signification, pour lequel nous pouvons affirmer qu'un paramètre déterminé influence la qualité de la surface, en fonction des deux critères de qualité de la surface considérée, la fréquence moyenne et la puissance moyenne. Ces figures démontrent qu'on peut distinguer clairement deux zones différentes (4-6 cycles/mm et 25-27 cycles/mm) où l'influence des quatre facteurs est significative. Dans la première, il y a une influence plus grande de l'égrenage et de l'essence pour la fréquence moyenne puis du ponçage et de l'essence pour la puissance moyenne. Dans la deuxième, tous les effets sont significatifs pour la fréquence moyenne, mais seulement le ponçage dans le cas de la puissance moyenne.

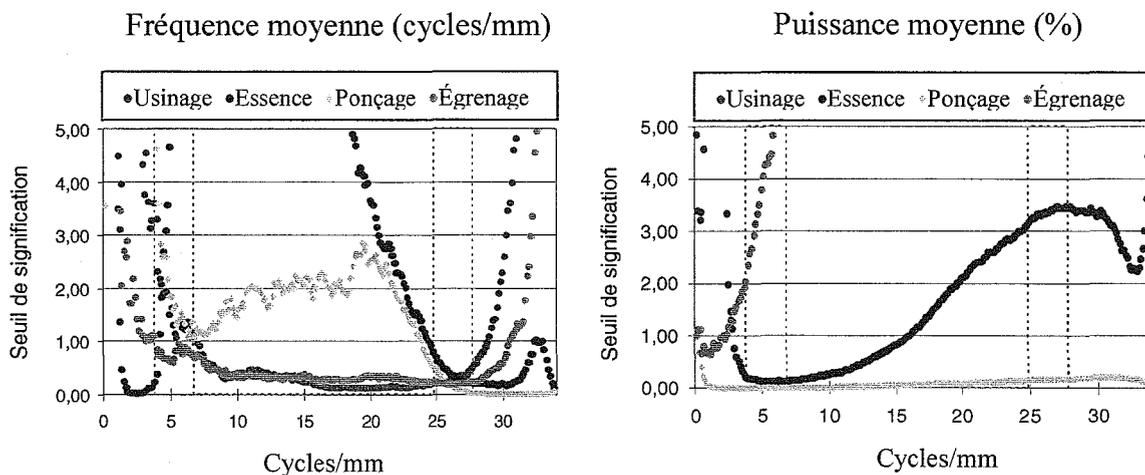


Figure IV.7 - Niveau de signification des facteurs pour la fréquence moyenne et la puissance moyenne des profils de *pseudo-rugosité*

Dans les tableaux IV.6 et IV.7, les conclusions de l'étude (seuil de signification statistique) de chacun des facteurs étudiés sont résumées pour les deux critères considérés pour l'évaluation de la qualité objective de la surface. Nous en concluons que cette méthode permet de visualiser les différences dans la qualité de la surface pour les niveaux et les facteurs analysés. Il sera nécessaire de vérifier ultérieurement si aux différences trouvées il correspond ou non des différences en ce qui concerne la qualité visuelle et tactile des surfaces.

Tableau IV.6 - Signification statistique des facteurs pour la fréquence moyenne des profils de *pseudo-rugosité* (+5%, ++1%, +++0,1%)

Gammes (cycles/mm)	Niveau	Essence	Ponçage	Égrenage
4-6	+	++	+	++
25-27	++	++	+++	++

Tableau IV.7 - Signification statistique des facteurs pour la puissance moyenne des profils de *pseudo-rugosité* (+5%, ++1%, +++0,1%)

Gammes (cycles/mm)	Niveau	Essence	Ponçage	Égrenage
4-6	+	++	+++	+
25-27	+	+	++	+

### 1.3.2 Mouillabilité de la surface

Sur le tableau IV.8 et IV.9, se présentent les valeurs d'angle de contact pour chaque essence et niveau d'usinage (3 éprouvettes x 3 mesures). L'acquisition était faite dans chaque seconde, mais nous avons constaté que dans quelques essais, le système n'était pas capable de se stabiliser. Cela serait dû à des variations brusques de l'angle de contact (qui se produisaient par exemple dans les échantillons très poreux tel que le pin), rendant impraticable ainsi tout l'essai.

Tableau IV.8 - Moyenne des valeurs des angles de contact pour le hêtre

Niveau d'usinage	Angles de contact (°)									Moyenne
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
N1	30	25	23	35	—	24	29	31	29	<b>28,3</b>
N2	16	19	15	20	—	—	—	—	—	<b>17,5</b>
N3	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

— erreur du système; \* non mesurable (surface mauvais)

Tableau IV.9 - Moyenne des valeurs des angles de contact pour le pin

Niveau d'usinage	Angles de contact (°)									Moyenne
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
N1	17	16	—	—	—	—	—	17	18	<b>17,0</b>
N2	—	12	7	7	6	7	6	—	—	<b>7,5</b>
N3	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

— erreur du système; \* non mesurable (surface mauvais)

De l'analyse des valeurs moyennes de l'angle de contact (tableau IV.8 et IV.9), nous pouvons conclure, tel qu'il est visible dans la figure IV.8, qu'il y a des différences significatives entre les angles de contact des échantillons correspondants à différents niveaux d'usinage. Nous avons obtenu des valeurs d'angles de contact plus élevées pour le niveau 1 (meilleure qualité de surface). La mouillabilité est donc moindre. Ces résultats sont en accord avec une surface plus rugueuse et une plus grande mouillabilité (Martin *et al.*, 1998). Ce fait a été aussi constaté par Wehle (1979) et Bogner (1991) qui ont rapporté une augmentation de l'angle de contact avec la diminution de la rugosité sur des surfaces sciées, rabotées ou poncées de hêtre et de spruce.

Entre les essences, nous avons vérifié clairement la mouillabilité pour le pin plus grande (figure IV.8), ce qui peut être attribué à sa structure anatomique, notamment sur le fait que sa porosité est supérieure à celle du hêtre.

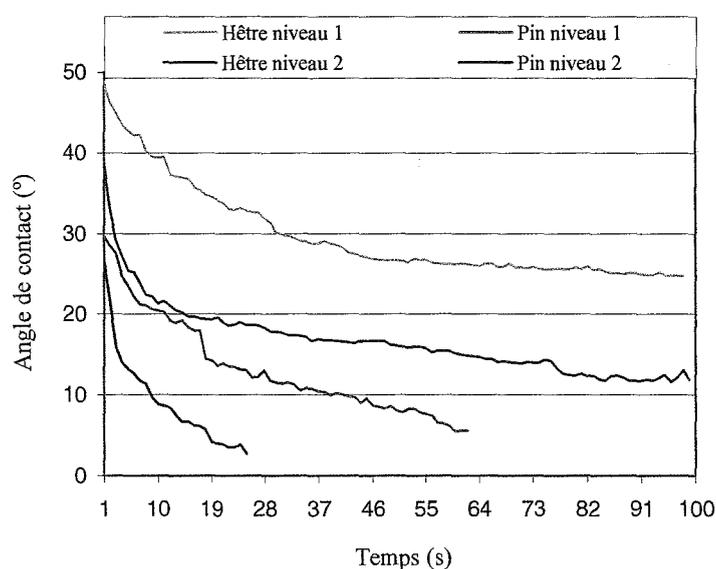


Figure IV.8 - Évolution de l'angle de contact en fonction du temps pour le pin (P) et le hêtre (H) usinée avec le niveau N1 et N2 (après 1 jour)

### 1.3.3 Brillance spéculaire de la surface

Les essais ont été effectués avec un angle d'incidence de 60°. Pour obtenir une valeur de brillance représentative de toute l'éprouvette, nous avons réalisé six mesures en des endroits différents et nous avons calculé la moyenne.

Le tableau IV.10 présente les résultats des essais pour chaque éprouvette. Nous pouvons vérifier qu'il n'existe pas de différence significative entre les pièces soumises à l'égrenage (E1) et celles qui n'ont pas été soumises à cette opération (E0) ; cela étant confirmé à travers un test de *t*-Student à 5% ( $t_{obs}=0,536$ ;  $t_{0,025, 7}=2,365$ ) réalisé pour les échantillons obtenus avec le vernis cellulosique (V1).

Tableau IV.10 - Moyenne des valeurs de la brillance spéculaire avec et sans égrenage

Éprouvettes	Moyenne de la brillance (60°)	
	Égrenage (E0)	Égrenage (E1)
N1HG0V1	6,1	5,5
N1HG1V1	5,6	5,4
N1PG0V1	6,8	6,8
N1PG1V1	6,1	6,7
N2HG0V1	4,7	5,9
N2HG1V1	5,1	5,6
N2PG0V1	8,0	6,7
N2PG1V1	5,9	7,0
N2HG0V2	12,5	15,3
N2HG1V2	12,9	16,6
N2PG0V2	14,9	15,9
N2PG1V2	15,4	15,2

Après l'analyse des résultats regroupés par produit (figure IV.9), nous avons vérifié qu'il y a des différences significatives entre produits, du fait que le vernis aqueux (V2) donne une finition plus brillante. Il n'est donc pas raisonnable de comparer les niveaux d'usinage ou le type d'essence sans tenir compte du produit.

Nous avons analysé aussi l'influence de l'essence dans la brillance présentée par la surface.

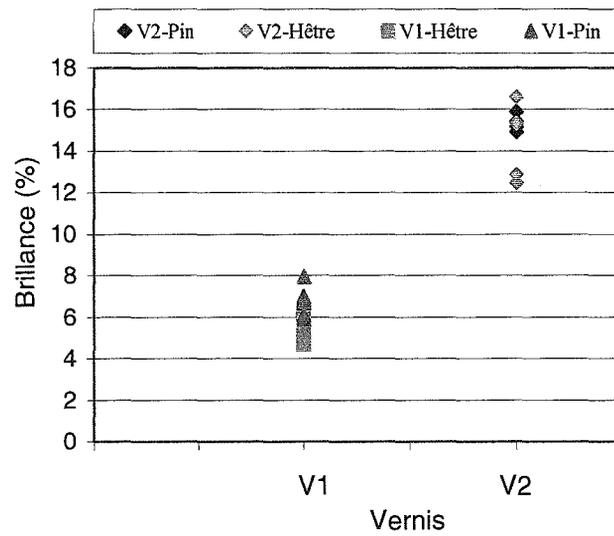


Figure IV.9 - Influence du type de vernis dans la brillance de la surface du bois du pin et de hêtre

## 1.4 Conclusions

Pour une meilleure compréhension des effets des paramètres clefs de l'usinage du bois et son interaction dans la qualité d'une finition, quatre facteurs (usinage, essence, ponçage et égrenage) ont été considérés à deux niveaux.

La quantification de l'état de surface utilise un système de vision artificielle pour la détermination de la *pseudo-rugosité* des surfaces de bois. Les critères suivants de l'évaluation ont été utilisés : la fréquence moyenne et la puissance moyenne de FFT du profil de *pseudo-rugosité*. Nous pouvons en conclure que ces critères sont influencés essentiellement par le ponçage, mais également par l'usinage, l'essence et le niveau d'égrenage. Il sera nécessaire de vérifier dans le futur non seulement si aux différences trouvées correspondent des différences en ce qui concerne la qualité visuelle et tactile des surfaces, mais aussi s'il y a corrélation entre les critères considérés pour la caractérisation objective de la surface et les critères d'évaluation subjective.

Postérieurement, des corrélations seront établies entre les conditions d'usinage (corroyage, ponçage) du bois et la qualité d'une finition, évaluée soit par des paramètres objectifs, soit par des paramètres subjectifs. Une fois identifiés les points les plus significatifs, le protocole expérimental sera redéfini, en considérant d'autres facteurs (par exemple type de produit de finition) et des niveaux différents. Il sera alors possible d'obtenir les informations nécessaires pour le développement de modèles, c'est à dire des équations de prévision, qui permettront d'estimer la qualité finale d'une surface à partir des conditions opératoires.

La connaissance et l'expérience acquises seront employées afin d'élaborer une liste de recommandations qualitatives qui permettent les meilleures pratiques opératoires et une meilleure conception de l'équipement utilisé.

L'objectif final de cette étude est l'optimisation des opérations industrielles engagées dès l'usinage jusqu'à la finition d'un produit en bois. Les résultats peuvent avoir un grand impact en termes pratiques par rapport à l'approche empirique des choix type de produit/usinage qui est réalisée dans l'industrie, du fait de l'absence d'un support scientifique et technologique.

## 2 Première série d'expériences

### 2.1 Plan des expériences

Au travers de l'équation 3.5, nous avons obtenu les valeurs suivantes des paramètres d'usinage (tableau IV.11), pour chacun des niveaux.

Ainsi, nous avons fixé pour le niveau 1, la valeur de vitesse d'avance à 6,5 m/min et la vitesse de rotation à 6000 trs/min (50 Hz), pour le niveau 2 de 11 m/min et 5040 trs/min (42 Hz) et pour le troisième de 18 m/min et 4080 trs/min (34 Hz), auxquels correspondent les valeurs moyennes de l'épaisseur de copeau dans chacun des intervalles, soit 0,05 mm, 0,1 mm et 0,2 mm.

Tableau IV.11 - Paramètres et niveaux d'usinage

Longueur du porte-outils (mm)	250		
Diamètre D (mm)	125		
Nombre de dents Z	2		
	<b>Niveau 1</b>	<b>Niveau 2</b>	<b>Niveau 3</b>
Vitesse de rotation N (trs/min)	6000	5040	4080
Vitesse d'avance Vf (m/min)	6,5	11	18
Fréquence du courant électrique (Hz)	50	42	34
Profondeur de coupe H (mm)	1	1	1
Épaisseur moyenne de copeau $e_m$ (mm)	0,05	0,1	0,2

Nous avons obtenu, à travers des équations 3.6 et 3.7, les valeurs suivantes des marques d'usinage (tableau IV.12), pour chacun des niveaux.

Tableau IV.12 - Marques d'usinage

	<b>Niveau 1</b>	<b>Niveau 2</b>	<b>Niveau 3</b>
Profondeur des marques t (mm)	0,0006	0,0024	0,0097
Avance par dent fz (mm)	0,542	1,091	2,206

Nous pouvons aussi vérifier, que les valeurs obtenues pour chaque niveau se trouvent dans les limites présentées dans la figure III.8 du chapitre III pour l'avance par dent, ainsi que pour la profondeur des marques (figure III.9 du même chapitre).

Nous avons effectué quelques photographies des pièces (figures IV.10, IV.11 et IV.12), pour chaque niveau, pour obtenir une meilleure observation des différents états de la surface obtenue pour chaque niveau d'usinage. Il est possible de visualiser macroscopiquement l'avance par dent (fz), et donc de mesurer la fréquence d'ondulation. Comme espéré, nous pouvons vérifier que l'avance par dent augmente avec le niveau d'usinage. La valeur plus basse est obtenue avec le niveau 1, représentant un meilleur état de surface, pour les deux essences.

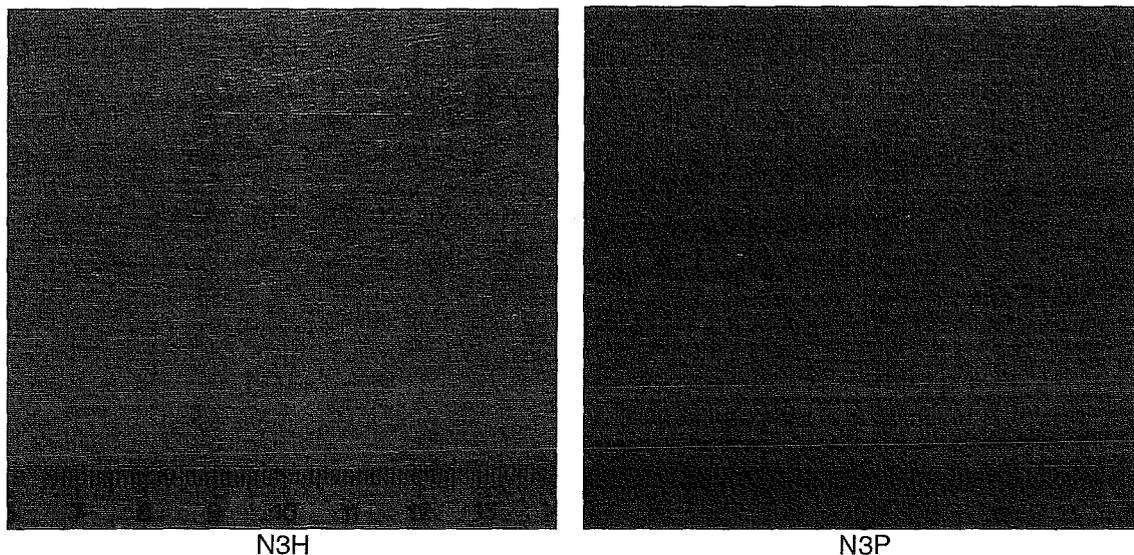


Figure IV.10 - Surface de hêtre (H) et du pin (P), avec l'usinage au niveau 3 (N3)

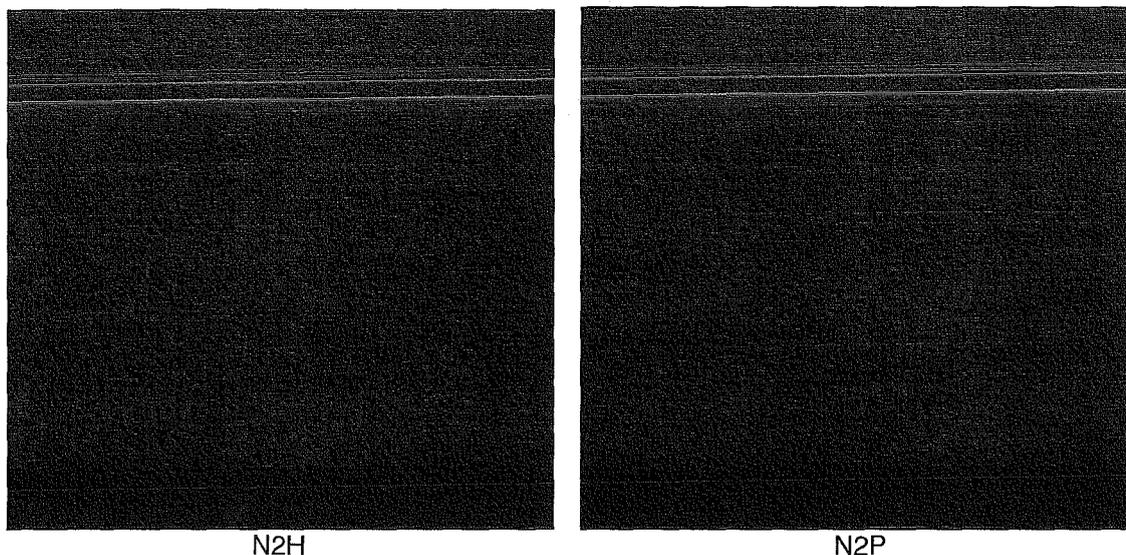


Figure IV.11 - Surface de hêtre (H) et du pin (P), avec l'usinage au niveau 2 (N2)

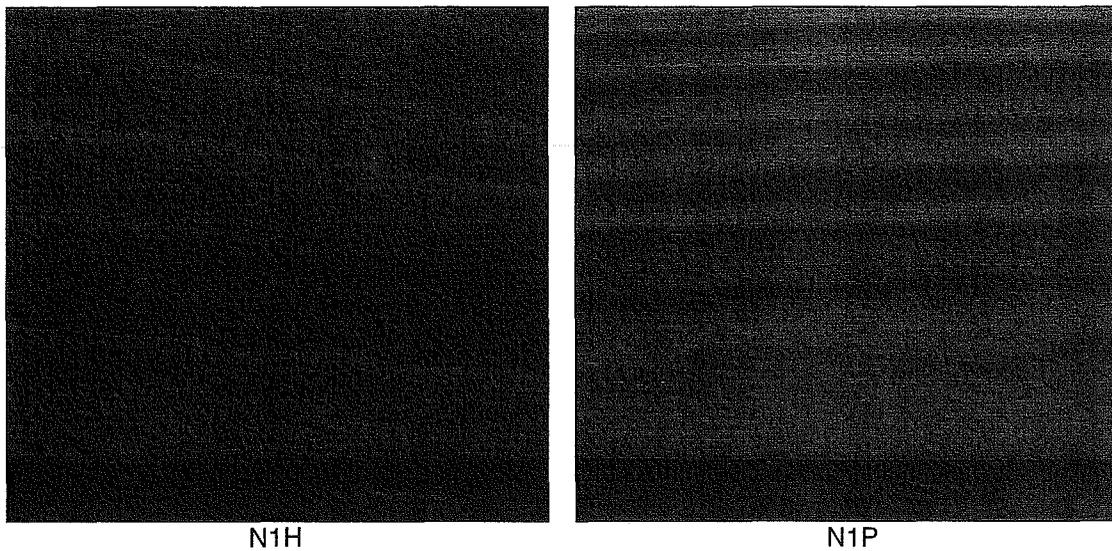


Figure IV.12 - Surface de hêtre (H) et du pin (P), avec l'usinage au niveau 1 (N1)

Dans le tableau IV.13, les facteurs, les niveaux choisis et leurs valeurs et codes respectifs sont référencés de la façon suivante :

Tableau IV.13 - Facteurs et niveaux

Facteurs		Niveaux/Codes		
		P	H	
Essence		Pin	Hêtre	
		Usinage		
		N1	N2	N3
Vitesse de rotation	N (trs/min)	6000	5040	4080
Vitesse d'avance	Vf (m/min)	6,5	11	18
Profondeur de coupe	H (mm)	1	1	1
		Ponçage		
		G0	G1	
Grain		—	(80, 120)	
Vitesse d'avance	Vf (m/min)	—	10	
Profondeur de passage	H (mm)	—	0,5	
Nombre de passages		—	1	
		Égrenage		
		E0	E1	
Grain		—	400	
		Finition		
		VC	VA	
Vernis		1+1	1+1	
Nombre de couches		1+1	1+1	

En considérant toutes les combinaisons possibles, nous avons obtenu la table L48 [3x2x2x2x2] suivante – Plan factoriel complet (tableau IV.14).

Tableau IV.14 - Plan factoriel complet

N°	Code	Facteurs				
		Niveau	Essence	Ponçage	Égrenage	Vernis
1	1+++	N1	P	G1	E0	VC
2	1---+	N1	H	G0	E0	VC
3	1+++	N1	P	G0	E0	VC
4	1+++	N1	H	G1	E0	VC
5	3++-	N3	P	G0	E1	VA
6	3+++	N3	H	G0	E1	VC
7	2---+	N2	H	G0	E0	VC
8	3----	N3	H	G0	E0	VA
9	3++++	N3	P	G1	E1	VC
10	3+++	N3	P	G0	E1	VC
11	3----	N3	P	G0	E0	VA
12	1--++	N1	H	G0	E1	VC
13	1+---	N1	H	G1	E0	VA
14	3+++	N3	P	G1	E1	VA
15	2----	N2	H	G0	E0	VA
16	1----	N1	P	G0	E0	VA
17	1+++	N1	P	G1	E0	VA
18	2--++	N2	H	G0	E1	VC
19	2++++	N2	P	G1	E1	VC
20	3+++	N3	P	G1	E0	VA
21	3+--	N3	H	G1	E0	VA
22	1++++	N1	P	G0	E1	VC
23	2+++	N2	P	G1	E0	VC
24	2+++	N2	P	G1	E0	VA
25	2+--	N2	H	G1	E0	VA
26	3++++	N3	H	G1	E1	VC
27	2--+	N2	H	G0	E1	VA
28	3++-	N3	H	G1	E1	VA
29	2++-	N2	H	G1	E1	VA
30	1+++	N1	P	G1	E1	VA
31	3---+	N3	H	G0	E0	VC
32	1++-	N1	P	G0	E1	VA
33	3+++	N3	P	G0	E0	VC
34	3+++	N3	H	G1	E0	VC
35	2+++	N2	P	G0	E0	VC
36	1--+	N1	H	G0	E1	VA
37	2+++	N2	H	G1	E1	VC
38	1++++	N1	P	G1	E1	VC
39	1+++	N1	H	G1	E1	VC
40	2+++	N2	H	G1	E0	VC
41	1---	N1	H	G0	E0	VA
42	3+++	N3	P	G1	E0	VC
43	3+--	N3	H	G0	E1	VA
44	2----	N2	P	G0	E0	VA
45	2+--	N2	P	G0	E1	VA
46	2+++	N2	P	G0	E1	VC
47	2+++	N2	P	G1	E1	VA
48	1++-	N1	H	G1	E1	VA

En raison du grand nombre de paramètres/niveaux concernés, la méthode de Taguchi a été utilisée pour mettre en place un plan d'expériences. Dans ce cas, nous avons utilisé une table L18 (tableau IV.15) et non une L8 comme dans l'étude précédente (préliminaire).

Tableau IV.15 - Table Taguchi

N°	Facteurs					Code
1	P	N1	G0	E0	VC	----+
2	H	N1	G1	E1	VA	+--+
3	P	N1	G1	E1	VA	--+-
4	H	N1	G0	E0	VC	+---
5	P	N1	G1	E0	VA	--+-
6	H	N1	G0	E1	VC	+--+
7	P	N2	G0	E1	VC	-0++
8	H	N2	G1	E0	VA	+0--
9	P	N2	G0	E1	VA	-0+-
10	H	N2	G1	E0	VC	+0+-
11	P	N2	G1	E0	VC	-0+-
12	H	N2	G0	E1	VA	+0+-
13	P	N3	G1	E1	VC	-++++
14	H	N3	G0	E0	VA	++---
15	P	N3	G0	E0	VA	-+---
16	H	N3	G1	E1	VC	+++++
17	P	N3	G0	E0	VA	-+---
18	H	N3	G1	E1	VC	+++++

L'analyse des résultats a été effectuée en utilisant une analyse de variance (ANOVA), afin d'évaluer le niveau de signification des effets des différents facteurs.

## 2.2 Essais - Préparation des échantillons

Tout le procédé d'usinage, a été conduit au même endroit, c'est à dire, au LTIM (Laboratoire de Technologie des Industries du Bois) de l'École Supérieure de Technologie de Viseu.

Pour la préparation des échantillons, nous avons utilisé des planches du bois de pin et de hêtre débitées tangentiellement en 22 mm d'épaisseur, préalablement séchées dans une étuve et maintenus dans un environnement climatisé, de telle manière à ce que l'humidité soit en correspondance avec les valeurs courantes utilisés dans l'industrie de l'ameublement. L'humidité déterminée selon la norme NP 614, était de 13% pour le pin et 11% pour le hêtre.

Ensuite, nous avons effectué un pré-usinage et les planches ont été passées à la corroyeuse (2,00 x 0,11 x 0,02 m), pour garantir que les planches possédaient des états de surface initiaux similaires et une égale géométrie. Alors, les échantillons ont été préparés selon le protocole décrit (tableau IV.13) et nous avons obtenu à partir des 18 planches initiales 150 éprouvettes (voir figure IV.13 et IV.14).

Le ponçage a été effectué avec une vitesse d'avance de 10 m/min, avec le premier rouleau, équipé avec une bande de grain 80 et le deuxième rouleau avec une bande de grain 120. Nous avons fait un seul passage dans la ponceuse.

L'application du produit a été réalisée avec un pistolet airless. L'égrenage du vernis a été réalisé en tenant compte des modifications concernant l'étude préliminaire, elle a été réalisée avec une ponceuse mécanique portable, avec un abrasif de grain 400.

Dans la dernière phase, nous avons appliqué une deuxième couche de vernis sur toutes les éprouvettes, dans les conditions semblables à celles de la première couche.

À partir des 18 planches initiales, dans chaque phase du procédé, nous avons effectué sur chaque planche préparée selon le protocole décrit (tableau IV.15), de petites éprouvettes de 20 cm de longueur et non de 8 cm comme dans l'étude précédente. Nous avons déterminé 18 éprouvettes pour la caractérisation physico mécanique. Le restant, soit 132 éprouvettes (y compris trois répliques) pour la caractérisation objective et subjective de la surface, donnant à la fin, les 150 éprouvettes (18 + 44 x 3), pour le pin et le hêtre, respectivement (voir figure IV.13 et IV.14).

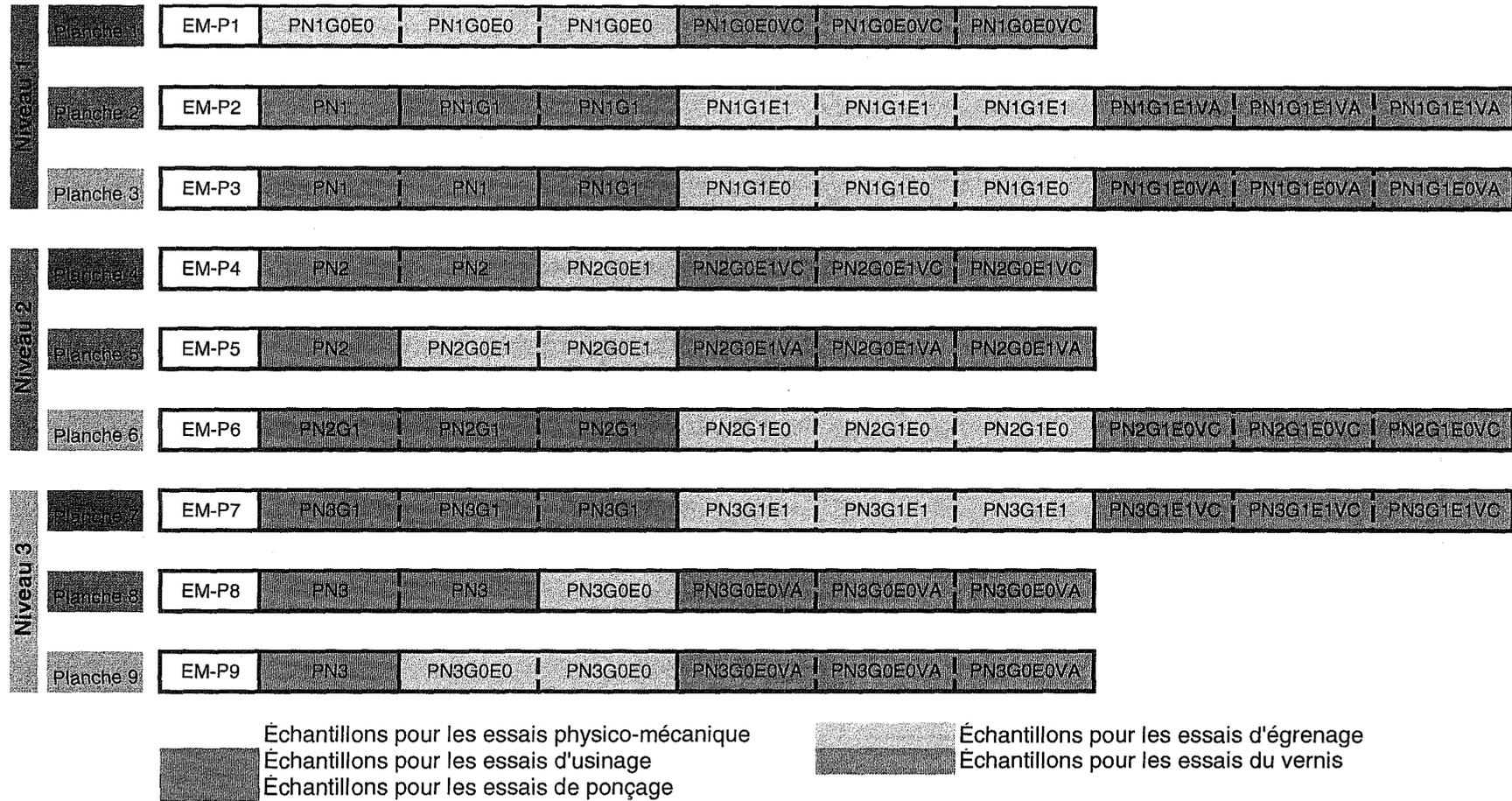


Figure IV.13 - Plan de coupe des éprouvettes de pin

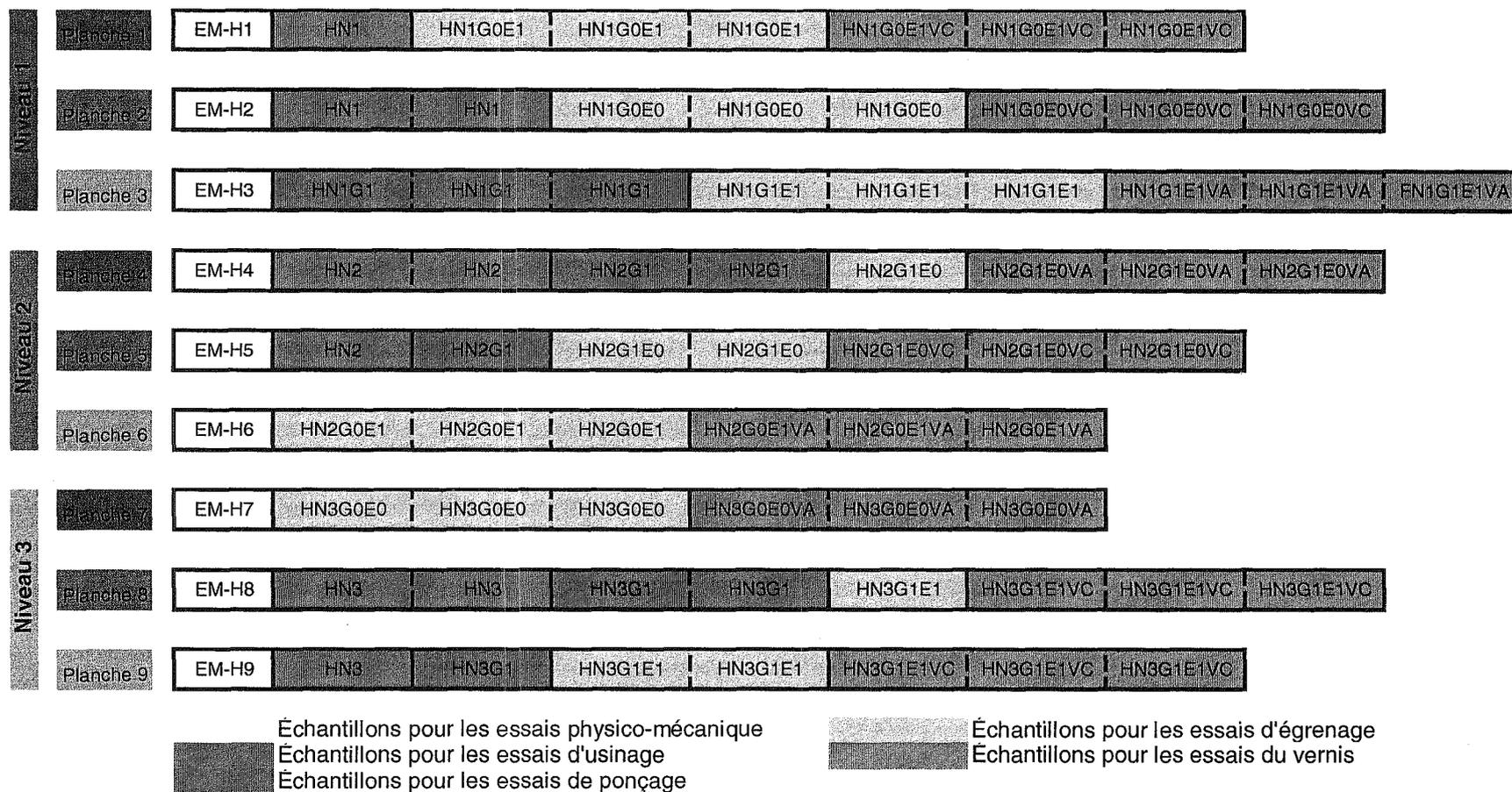


Figure IV.14 - Plan de coupe des éprouvettes de hêtre

## 2.3 Procédés d'usinage

Nous avons fait une étude sur le procédé d'usinage, concernant l'interaction entre l'élément de coupe et le substrat. Ceci est influencé par les paramètres suivants: vitesse de rotation, vitesse d'avance, profondeur de coupe, élément de coupe, angle de coupe, résistance des éléments de coupe, orientation des fibres et résistance mécanique du substrat.

Nous avons mis en œuvre l'usinage des planches, conformément au protocole établi précédemment (tableau IV.13), et un ensemble de données considérées pertinentes a été acquis (soit l'intensité du courant consommée, la vitesse de rotation et la vitesse moyenne d'avance).

Ensuite, nous avons effectué plusieurs études parcellaires ayant pour objectif la validation des données (étude de la reproductibilité) et l'évaluation de la relation entre l'énergie consommée et le type de surface obtenue (analyse de l'effet des niveaux d'usinage et analyse de l'influence de l'essence).

### 2.3.1 Reproductibilité du système d'acquisition

Dans les figures IV.15, IV.16, IV.17, IV.18, IV.19 et IV.20, nous présentons les valeurs de la puissance électrique consommée, le travail électrique développé et la perte de rotation de l'équipement industriel pour chacune des trois répliques des six essais réalisés (2 essences x 3 niveaux).

Nous vérifions que les valeurs de toutes les propriétés déterminées sont très semblables dans chaque essai. Cependant, à cause de la variabilité naturelle du matériel étudié, des anomalies surviennent, comme dans le cas des éprouvettes N2P-1 et N2H-1, qui présentaient dans la surface usinée un nombre significatif de singularités (nœuds, bois de réaction), qui pourront servir de justification dans les différences présentées pour ces essais (figures IV.17 et IV.18).

Globalement et malgré le nombre réduit de répliques, nous pouvons conclure que cette méthode a une reproductibilité suffisamment acceptable, soit au niveau de la puissance électrique consommée, soit au niveau du travail mécanique développé.

Quand nous comparons les figures relatives à la variation de la puissance électrique consommée avec ceux de la variation de la perte de vitesse de rotation, nous vérifions une évolution pratiquement symétrique dans les deux propriétés. Cela nous permet de conclure que la puissance électrique consommée était une mesure effective de la puissance mécanique consommée (variation de la quantité de mouvement).

Pendant la réalisation de ces essais, nous avons trouvé des difficultés inattendues dans la détermination de la vitesse de rotation (trop de bruit électrique).

De façon à surmonter ces difficultés, mises en évidence pour la détermination expérimentale de la vitesse de rotation, nous avons effectué des améliorations dans le système d'acquisition. Les différentes étapes d'amélioration ont consisté à concevoir et construire un système de lecture optique, réaliser la substitution de la carte d'acquisition et le développement de plusieurs applications informatiques (Labtech<sup>®</sup> et LabView<sup>®</sup>). Néanmoins, et dans la version finale, l'erreur de lecture était encore de l'ordre de  $\pm 10$  trs/min. Ce fait, associé à la forte relation entre la puissance électrique consommée et la variation de la vitesse de rotation, nous a forcé à ne pas considérer la mesure de la vitesse de rotation dans l'analyse des résultats.

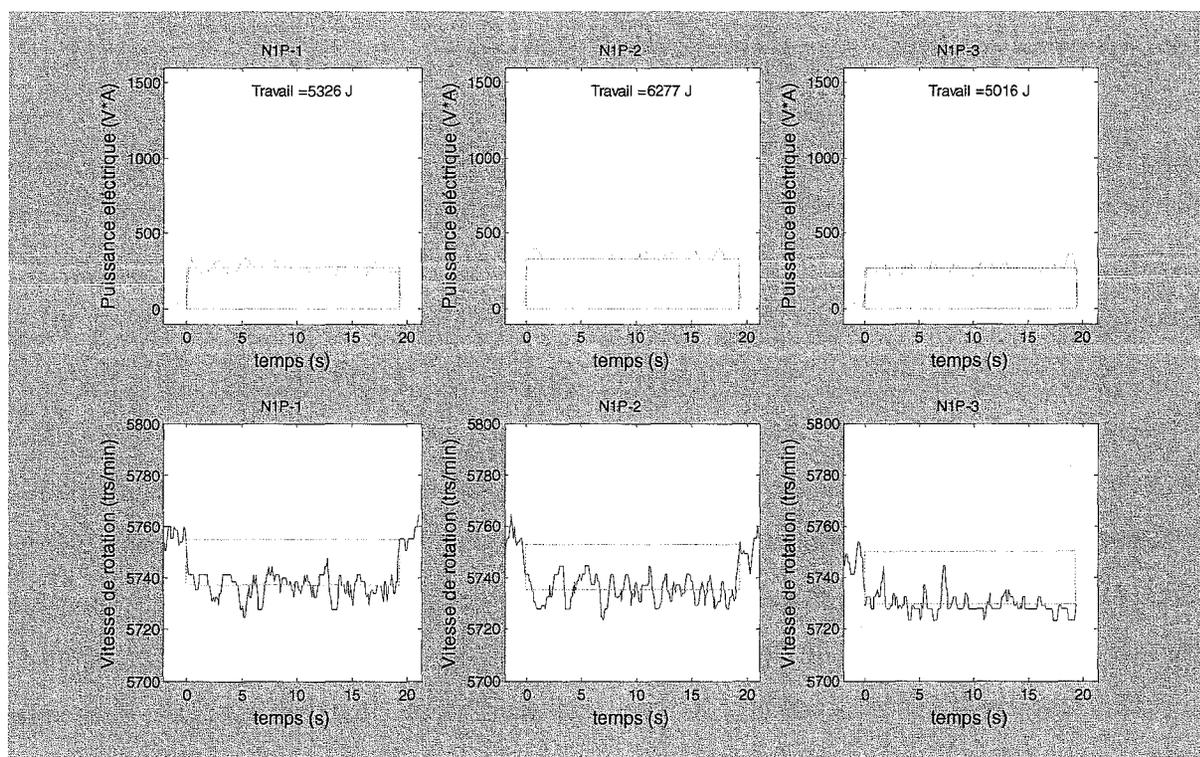


Figure IV.15 - Reproductibilité du système pour le niveau d'usinage 1, pour les trois planches de pin

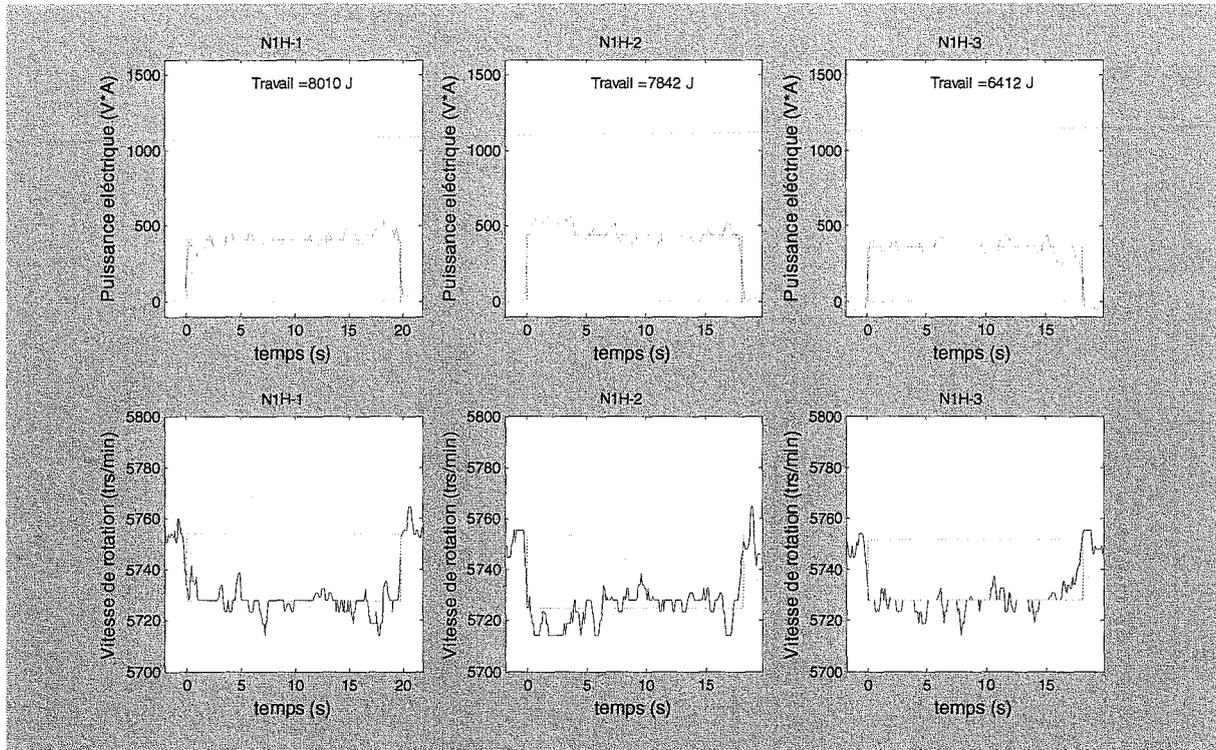


Figure IV.16 - Reproductibilité du système pour le niveau d'usinage 1, pour les trois planches de hêtre

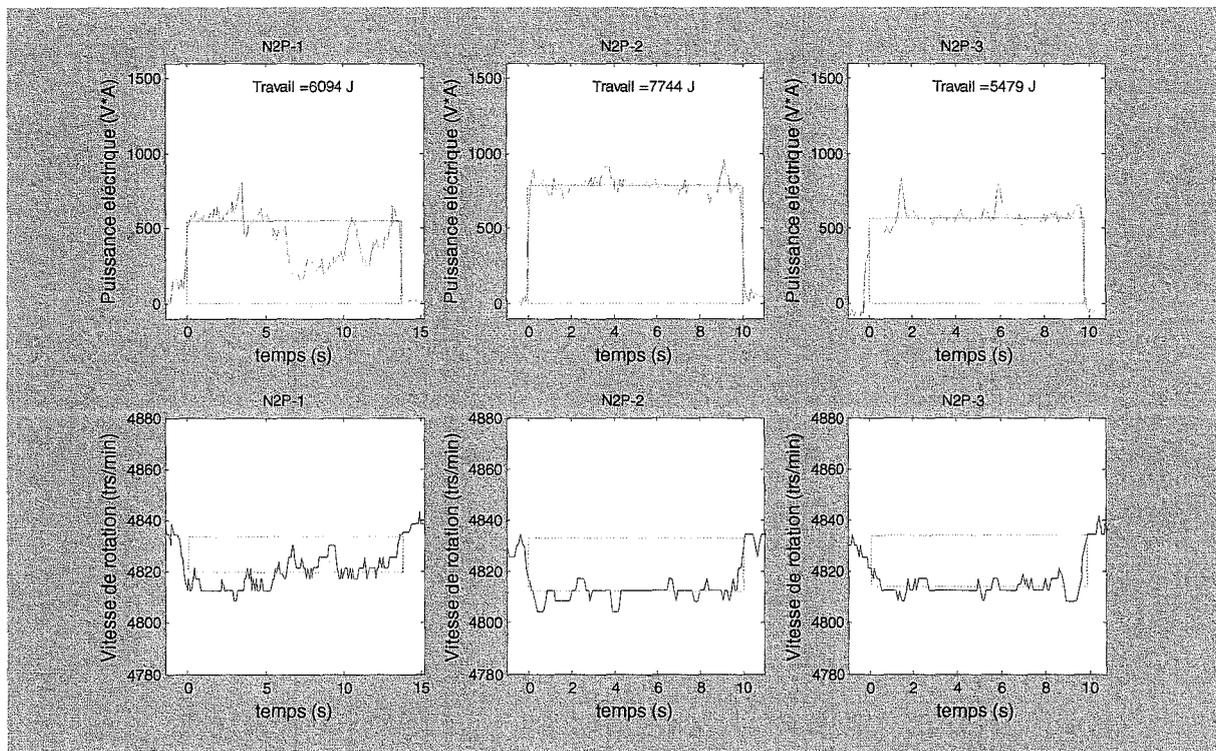


Figure IV.17 - Reproductibilité du système pour le niveau d'usinage 2, pour les trois planches de pin

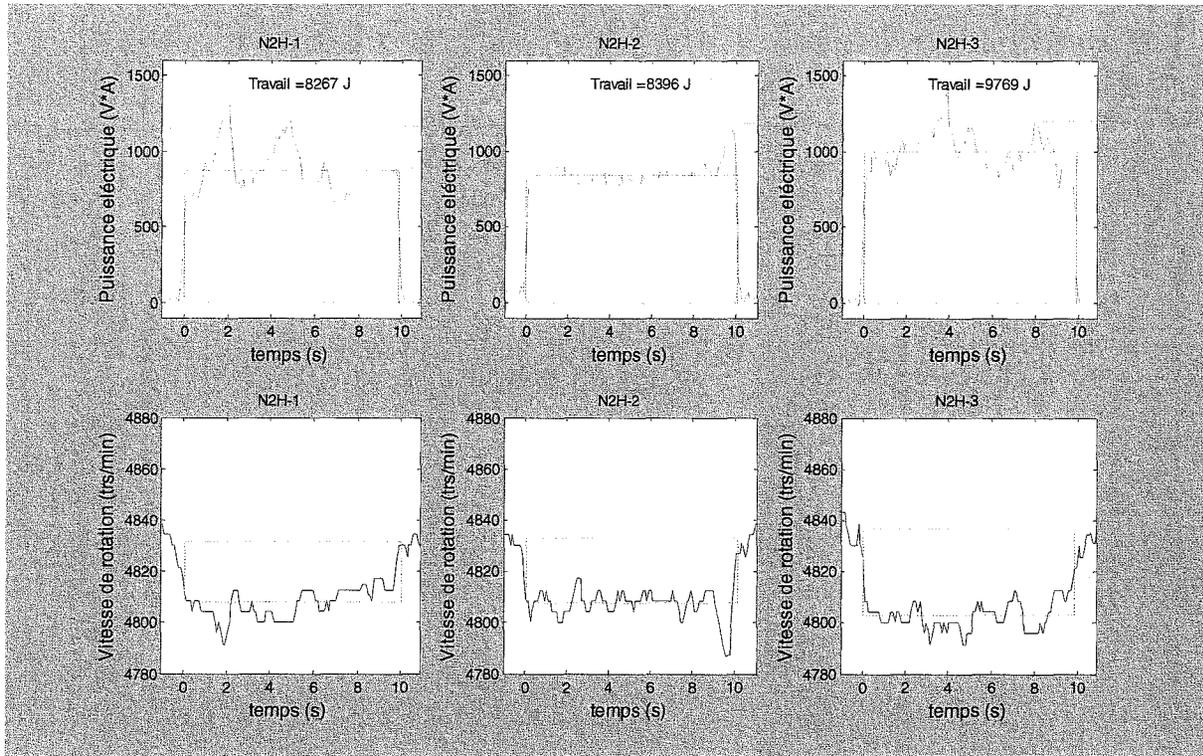


Figure IV.18 - Reproductibilité du système pour le niveau d'usinage 2, pour les trois planches de hêtre

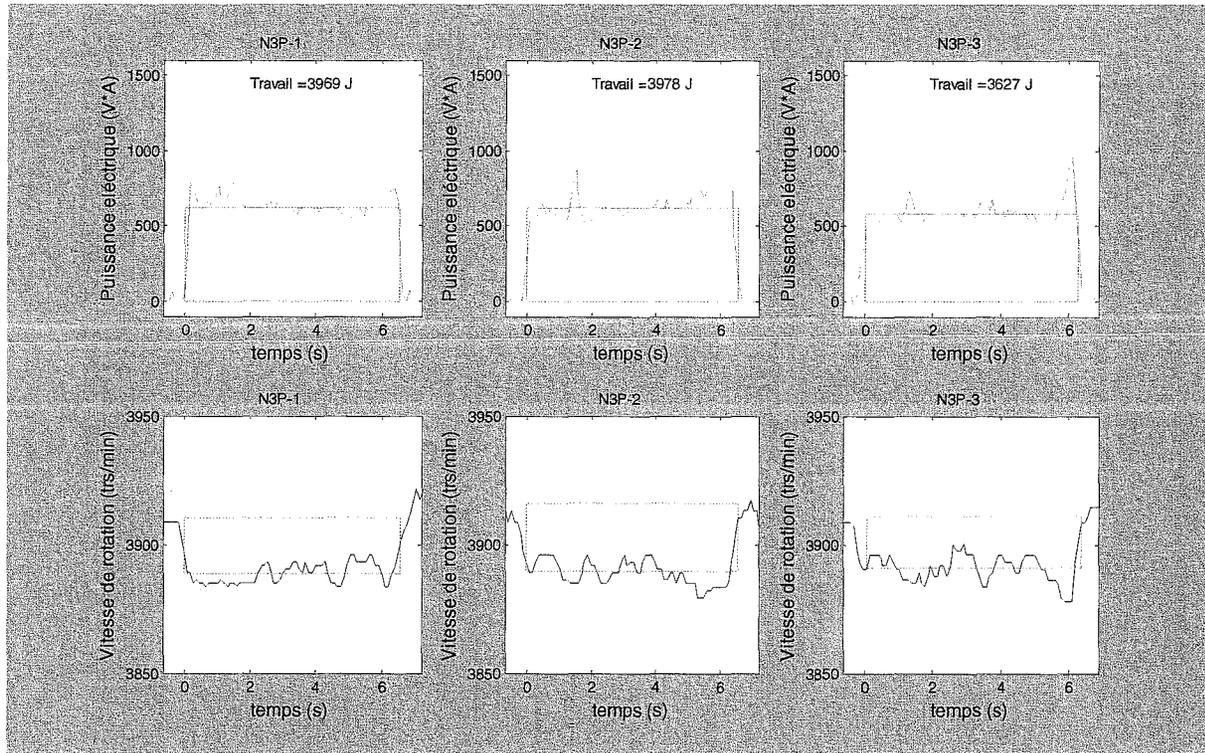


Figure IV.19 - Reproductibilité du système pour le niveau d'usinage 3, pour les trois planches de pin

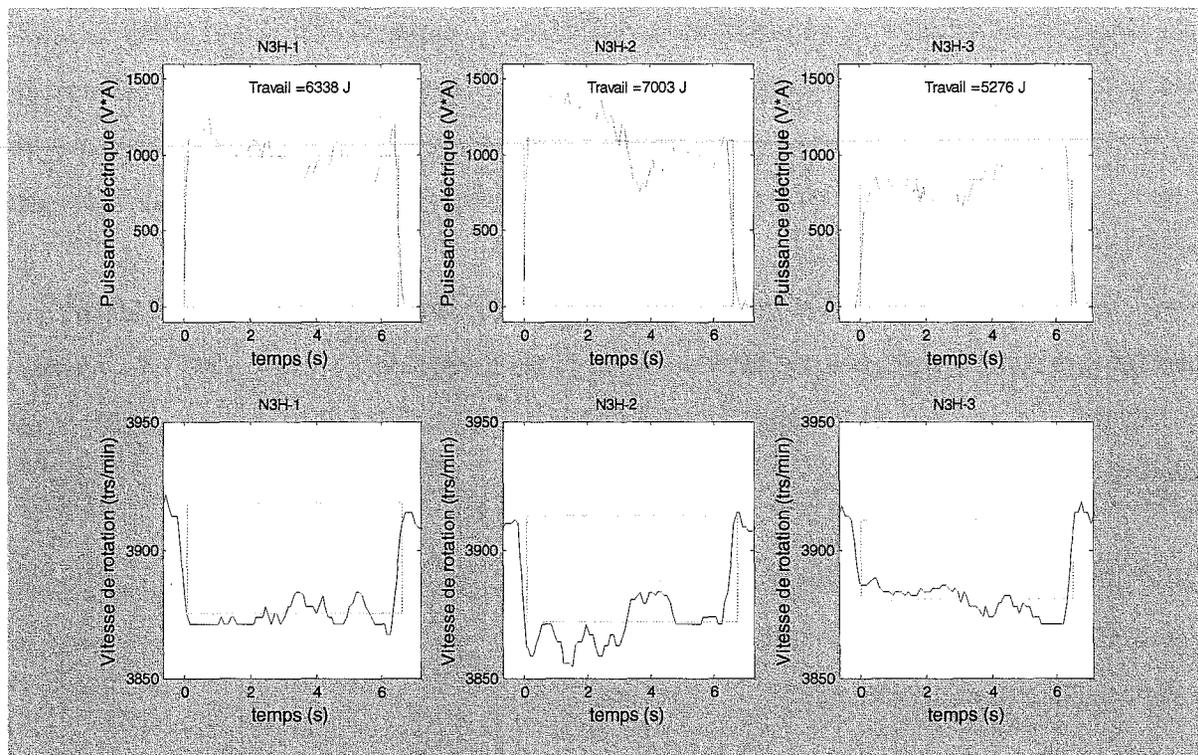


Figure IV.20 - Reproductibilité du système pour le niveau d'usinage 3, pour les trois planches de hêtre

### 2.3.2 Effet des niveaux d'usinage

Dans les figures IV.21 et IV.22, nous présentons les influences du niveau d'usinage dans la puissance électrique consommée, dans le travail électrique développé et dans la variation de la rotation nominale de l'équipement industriel utilisé pour les deux essences (pin et hêtre).

Il se vérifie pour la puissance électrique qu'il y a une augmentation significative du niveau 2 par rapport au niveau 3, sachant que l'écart entre le niveau 2 et le niveau 3 est beaucoup plus faible, en grande partie à cause de l'erreur associée à cette méthode (voir paragraphe 2.3.1).

En ce qui concerne le travail électrique développé, nous vérifions qu'il existe une forte augmentation du niveau 2 par rapport au niveau 1 ; mais, du niveau 3 par rapport au niveau 2, il y a une réduction accentuée.

Notre explication se pose sur les phénomènes suivants : pendant l'opération deux phénomènes distincts se déroulent, la coupe des fibres et l'arrachement du copeau. Le premier phénomène se passe surtout au niveau 1, et il a besoin d'une quantité d'énergie plus grande que le deuxième phénomène qui a lieu essentiellement au niveau 3.

Les deux phénomènes sont physiquement différents. Lorsque l'opération s'effectue selon l'axe longitudinal du bois, l'arrachement du copeau correspond à la rupture de liaisons de cohésion (interfibres), tandis que selon les directions transversales, la coupe correspond à la rupture de fibrilles de cellulose (constitutif de la fibre) dont la résistance est beaucoup supérieur aux forces de cohésion.

Ainsi, la tension de rupture en traction perpendiculaire aux fibres (qui évalue l'adhérence interfibre) est de 4,5 MPa pour le hêtre et de 2,4 MPa pour le pin (Martin, 1983). La tension de rupture à la coupe longitudinale est de 9 MPa pour le hêtre et de 6 MPa pour le pin (Martin, 1983).

Les figures relatives à la variation de la perte de vitesse de rotation pendant l'usinage sont présentées avec les mêmes objectifs précédemment mentionnés (comparaison avec la puissance électrique consommée).

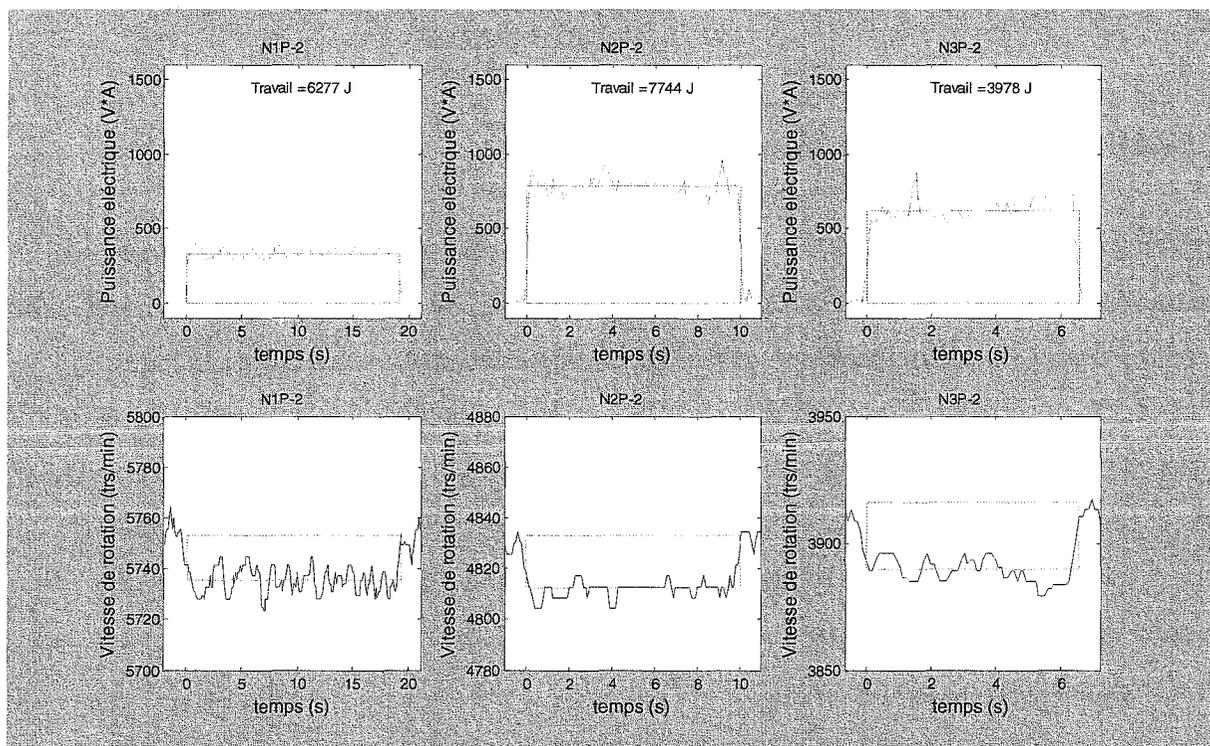


Figure IV.21 - Monitorisation d'usinage – Pin

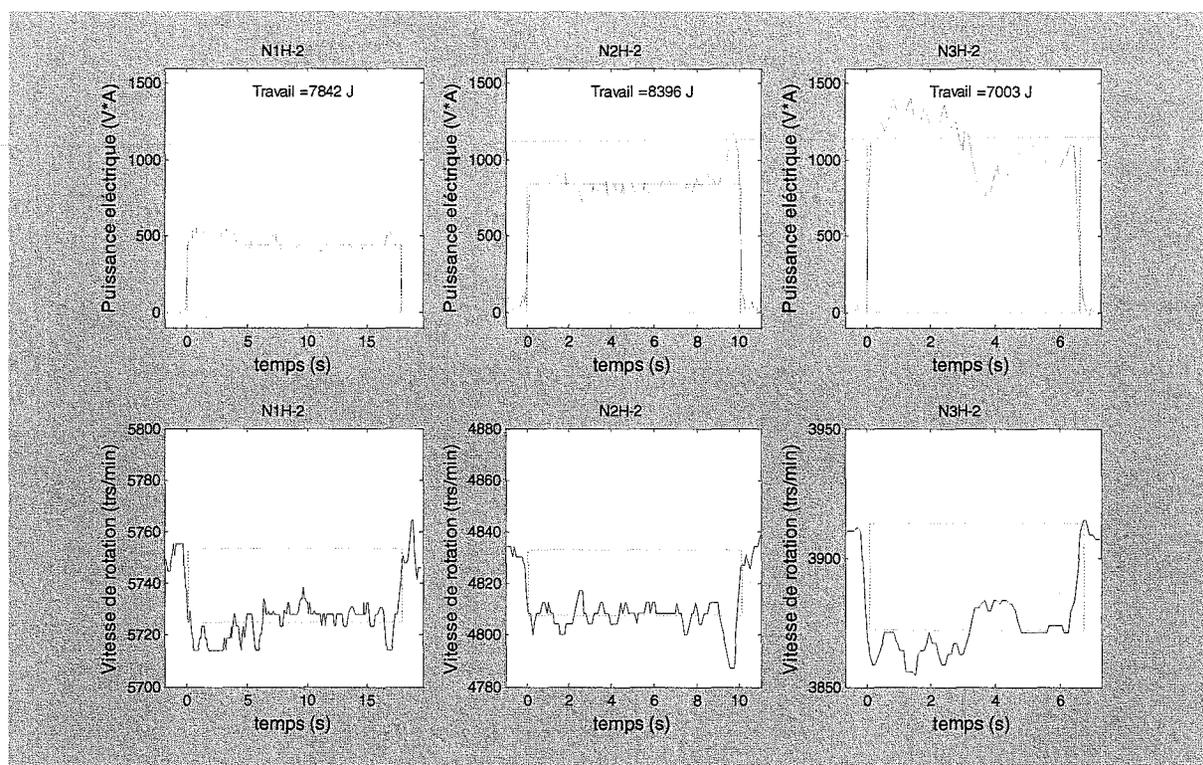


Figure IV.22 - Monitorisation d'usinage – Hêtre

### 2.3.3 Influence de l'essence

À travers l'analyse des figures IV.23, IV.24 et IV.25, nous vérifions que pour le niveau 1 et 2 (niveaux pour lesquels nous considérons que la coupe des fibres est plus importante que l'arrachement), il n'existe pas de différence significative entre les essences, bien que la tendance pour le hêtre conduise à des débits énergétiques légèrement plus élevés. Ce fait peut être justifié par les petites différences de propriétés entre les fibres des deux essences (épaisseur de la paroi cellulaire et indice de cristallinité de la cellulose).

En ce qui concerne le niveau 3, nous vérifions des différences suffisamment élevées entre les deux essences, ce qui peut être justifié par les différences de l'anatomie qui à son tour peuvent expliquer la plus grande difficulté d'arracher des fibres de hêtre (feuillus) comparé au pin (résineux). Ce fait va contribuer aussi à une augmentation de la rugosité de la surface.

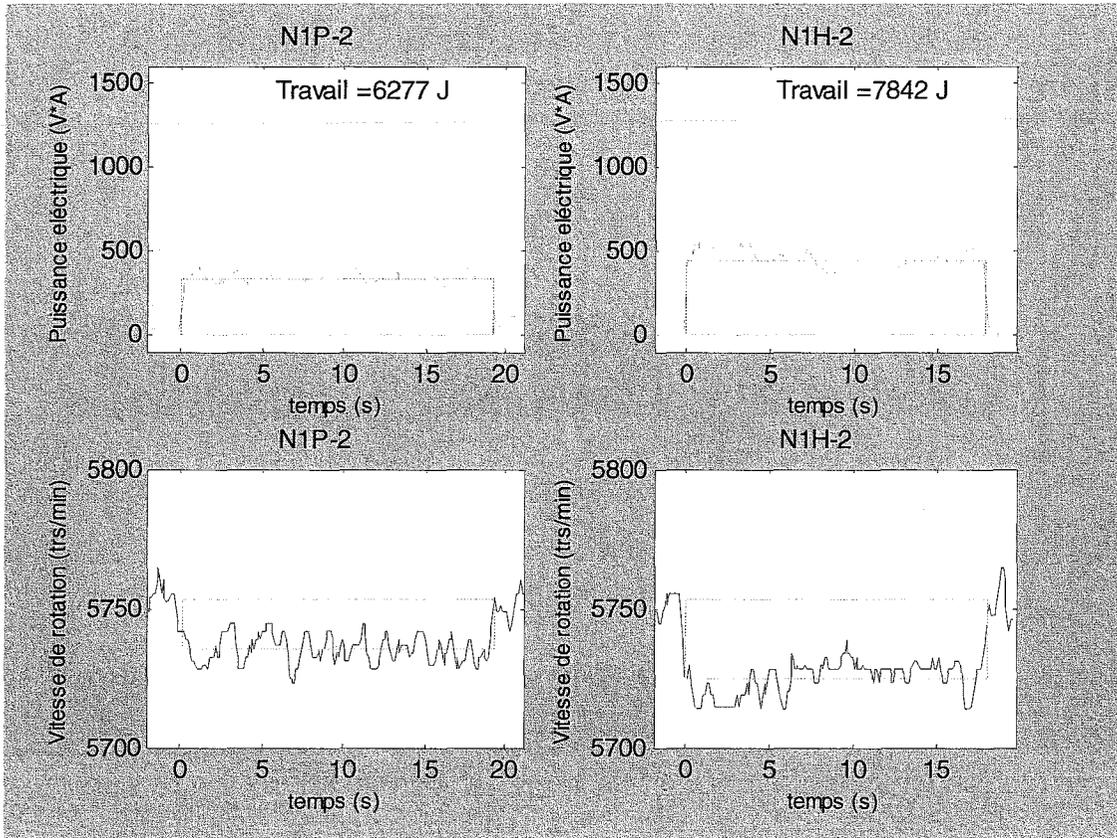


Figure IV.23 - Monitorisation d'usinage du pin et de hêtre pour le niveau 1

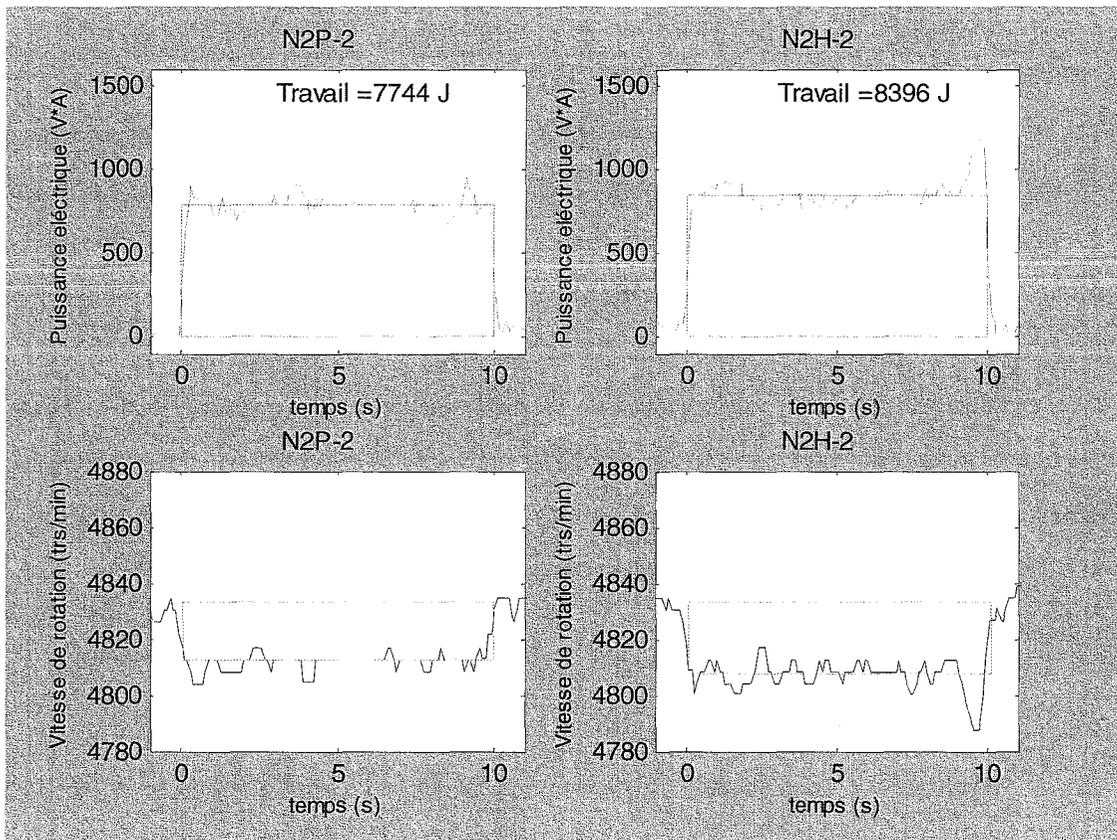


Figure IV.24 - Monitorisation d'usinage du pin et de hêtre pour le niveau 2

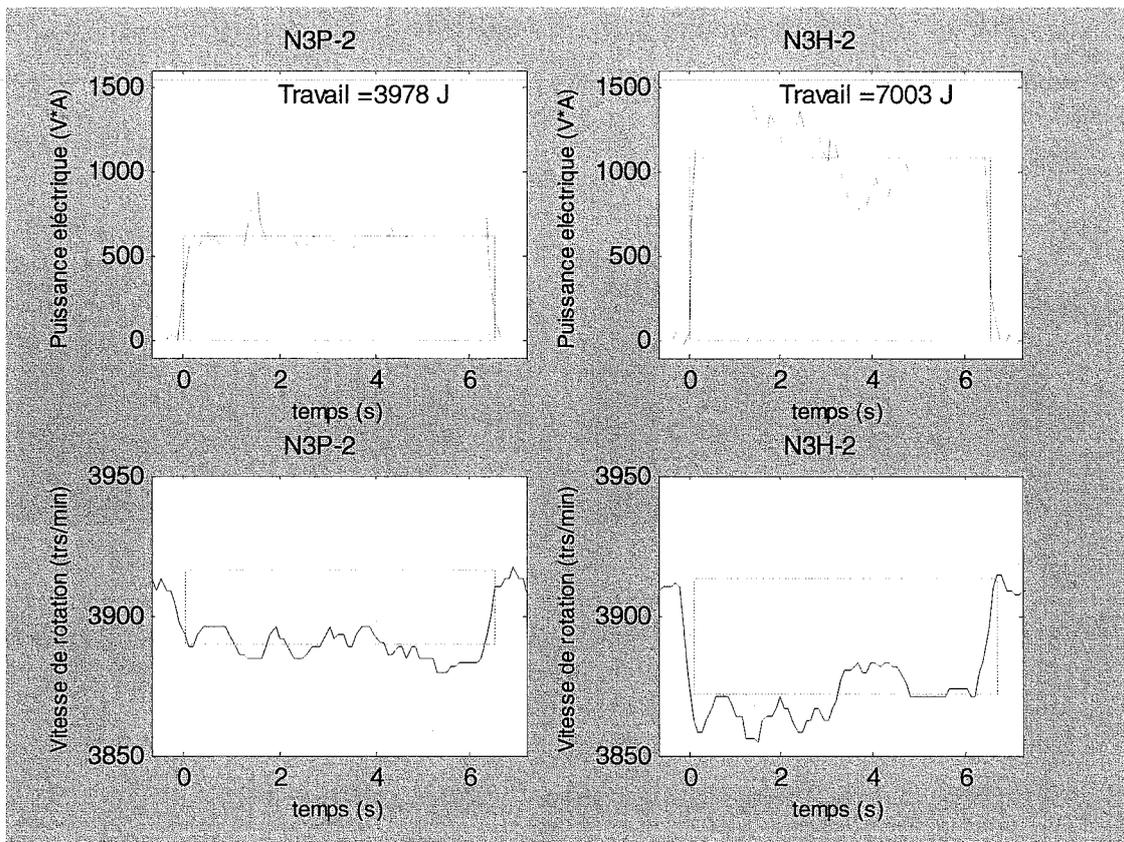


Figure IV.25 - Monitorisation d'usinage du pin et de hêtre pour le niveau 3

## 2.4 Caractérisation objective de la surface

Nous avons réalisé initialement une étude pour voir l'information des paramètres étudiés sur les résultats des analyses du système de vision.

### 2.4.1 Influence des angles d'inclinaison de la caméra et d'incidence du laser

Nous avons tenté de vérifier s'il existait des corrélations entre les critères définis dans les analyses par le système de vision ( $K_{\text{ond}}$ ,  $K_{\text{rug}}$ ,  $K_{\text{sub}}$ ,  $K_4$ ,  $K_5$ ,  $K_6$ ,  $K_7$  et  $K_8$ ) et le niveau d'usinage numéroté - N1, N2 et N3 (16 degrés de liberté), ainsi que le grain du ponçage - G0 et G1 (16 degrés de liberté).

Ainsi, dans la figure IV.26 et IV.27, nous présentons les valeurs des coefficients de corrélation pour l'usinage et le grain du ponçage, respectivement.

Nous pouvons vérifier que l'angle de 8,5° est celui qui présente les valeurs les plus élevées pour les coefficients de corrélation, surtout pour les critères  $K_{ond}$ ,  $K_{rug}$  et  $K_{sub}$ . Nous avons donc décidé de fixer cette valeur pour l'angle d'incidence dans les analyses futures.

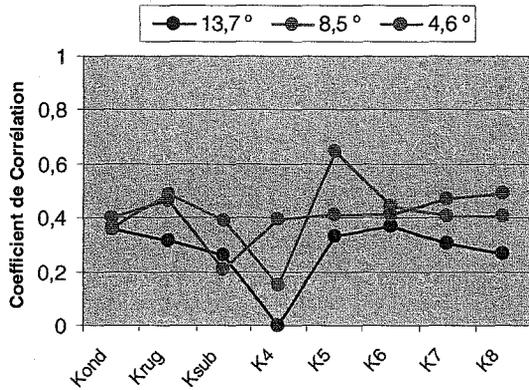


Figure IV.26 - Corrélation avec le niveau d'usinage

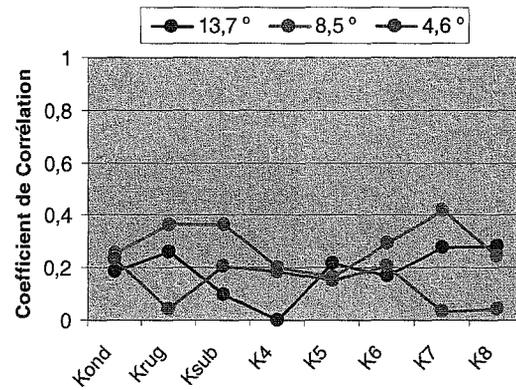


Figure IV.27 - Corrélation avec le grain de ponçage

### 2.4.2 Influence des facteurs étudiés dans l'analyse objective

Nous présentons les résultats obtenus dans ce travail, qui a eu pour objectif de différencier l'influence des facteurs étudiés dans la caractérisation objective de l'aspect d'une finition, mais aussi de déterminer les limites et les potentialités de la méthodologie utilisée pour caractériser la *pseudo-rugosité* du bois.

Sur les figures IV.28, IV.29 et IV.30, nous pouvons voir l'influence de l'épaisseur du copeau dans les critères  $K_{ond}$ ,  $K_{rug}$  et dans l'énergie consommée par unité de masse anhydre, ainsi que la représentation de l'épaisseur du copeau attendu pour chacun des trois niveaux sélectionnés et les lignes de tendance, avec les coefficients respectifs de détermination.

Les figures IV.31 et IV.32, présentent l'influence de l'énergie consommée et du niveau d'usinage (épaisseur du copeau) dans le critère d'ondulation ( $K_{ond}$ ) et dans le critère de rugosité ( $K_{rug}$ ), respectivement.

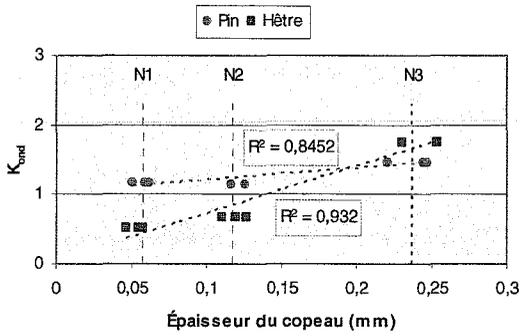


Figure IV.28 - Influence du niveau d'usinage sur le  $K_{ond}$  (critère d'ondulation)

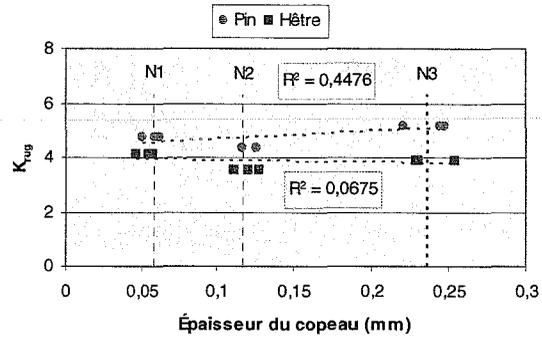


Figure IV.29 - Influence du niveau d'usinage sur le  $K_{rug}$  (critère de rugosité)

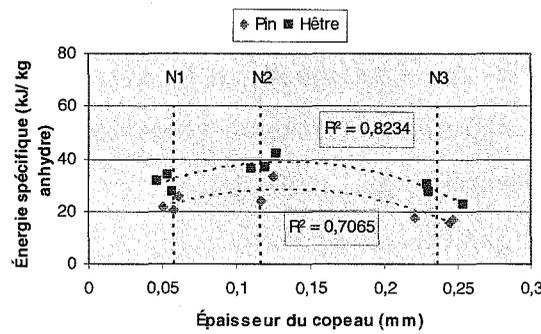


Figure IV.30 - Influence du niveau d'usinage sur l'énergie spécifique

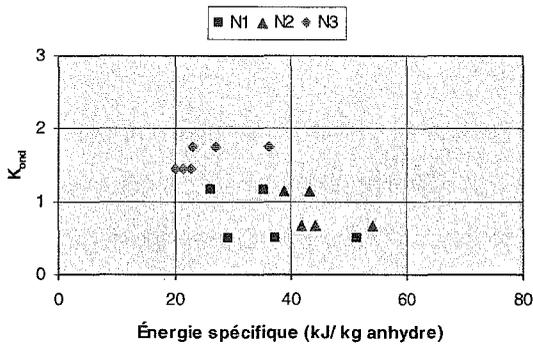


Figure IV.31 - Influence du niveau d'usinage sur le  $K_{ond}$  (critère d'ondulation)

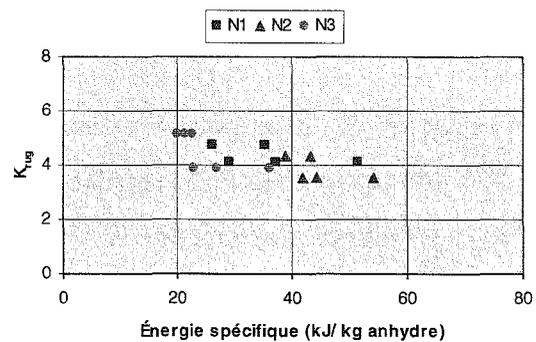


Figure IV.32 - Influence du niveau d'usinage sur le  $K_{rug}$  (critère de rugosité)

De l'analyse de la figure IV.28, il en ressort qu'il existe une forte influence du niveau d'usinage dans le critère d'ondulation, ce qui est parfaitement cohérent avec la définition du critère d'ondulation. Ce critère a été calculé en prenant la valeur du pic le plus élevé de la courbe de puissance FFT, valeur étant d'autant plus élevée que l'ondulation de base de la

surface est plus importante. Nous avons vérifié aussi que le critère d'ondulation est affecté par le facteur essence, essentiellement pour le niveau 1, suivi du niveau 2, mais pas pour le niveau 3.

En ce qui concerne la rugosité, et par l'observation de la figure IV.29, nous pouvons constater que la rugosité est dépendante de l'essence, mais qu'elle n'est pas affectée par le niveau d'usinage.

Dans la figure IV.30, nous pouvons vérifier que l'énergie consommée par unité de masse de bois usinée augmente du niveau 1 par rapport au niveau 2, mais diminue pour le niveau 3. Cela peut être associé à une augmentation du pourcentage de fibres arrachées entre le niveau 2 et le niveau 3, ce qui fait baisser la consommation d'énergie. Cette analyse est renforcée par l'analyse des figures IV.31 et IV.32, dans lesquelles nous pouvons voir qu'entre les niveaux 1 et 2, il existe une augmentation significative d'énergie consommée qui ne correspond à aucune modification significative de la surface ( $K_{\text{rug}}$  et  $K_{\text{ond}}$ ).

De cette analyse, nous pouvons conclure que ces évidences indiquent, pour des modifications dans la nature, des phénomènes considérés dans cette opération.

Il existe également une forte dépendance de l'énergie spécifique avec le facteur essence, ce qui paraît normal en tenant compte des différences existantes entre le hêtre et le pin concernant l'anatomie et les propriétés physico mécaniques.

Sur la figure IV.33, nous pouvons observer les images, les profils de *pseudo-rugosité* et la courbe de puissance de la FFT pour les échantillons de hêtre obtenus avec les deux niveaux d'usinage considérés (éprouvettes N° 2 et 16 du tableau IV.15). En termes globaux, nous observons qu'il existe une quantité élevée de bruits liés à cette méthode, correspondant aux plus hautes fréquences (longueur d'onde plus basse).

En comparant les deux images, nous observons des différences significatives pour la longueur d'onde plus haute, normalement associée à l'ondulation. Ces constatations peuvent signifier que cette méthode permet d'évaluer correctement l'état de la surface, une fois qu'on obtient comme espéré, pour le niveau d'usinage N1 (vitesse de rotation élevée et faible vitesse d'avance) les valeurs en moyenne plus basses de la puissance de la FFT.

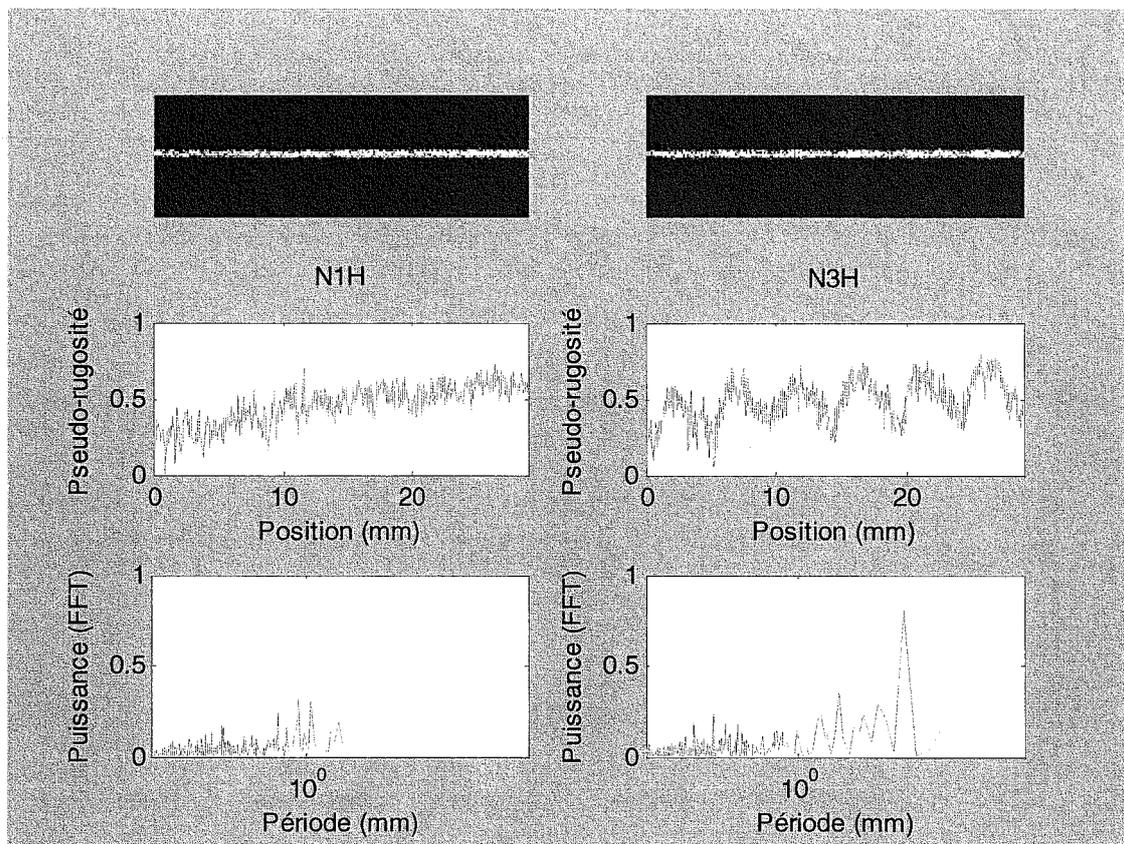


Figure IV.33 - Image de la surface, profil de *pseudo-rugosité* et courbe de puissance (FFT) pour deux éprouvettes de hêtre, obtenue avec les niveaux d'usinage N1 et N3

Dans les figures IV.34, IV.35, IV.36 et IV.37, les influences des différents niveaux des facteurs sont présentés dans les critères d'évaluation objective de la rugosité ( $K_{rug}$  et  $K_{ond}$ ). Cet influence est évalué au travers du calcul de la moyenne (figures IV.34 et IV.36) et de l'indice signal-bruit (figures IV.35 et IV.37), en considérant que pour le calcul de ce dernier nous avons pris en compte la minimisation de l'objectif (la valeur la plus petite est meilleure, voir annexe 3)  $K_{rug}$  et  $K_{ond}$ .

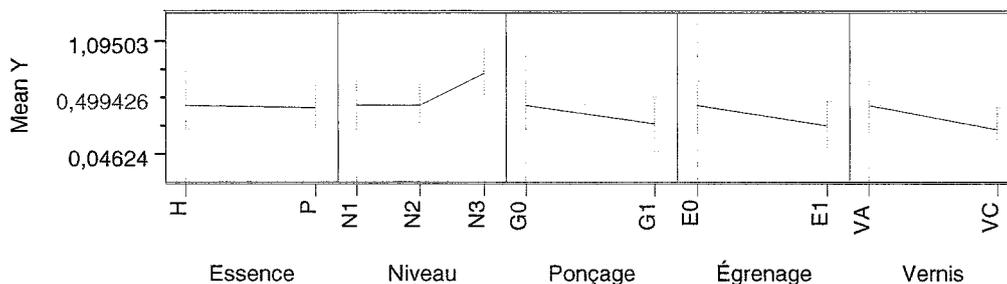


Figure IV.34 - Influence des différents niveaux des facteurs sur le critère  $K_{ond}$  (moyenne)

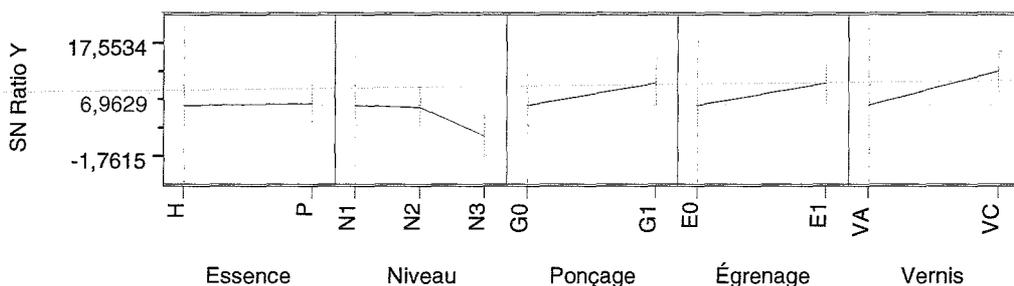


Figure IV.35 - Influence des différents niveaux des facteurs sur le critère  $K_{ond}$  (indice signal-bruit)

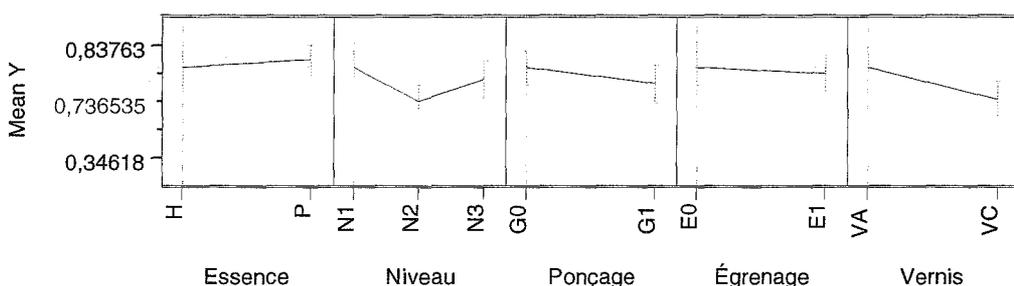


Figure IV.36 - Influence des différents niveaux des facteurs sur le critère  $K_{rug}$  (moyenne)

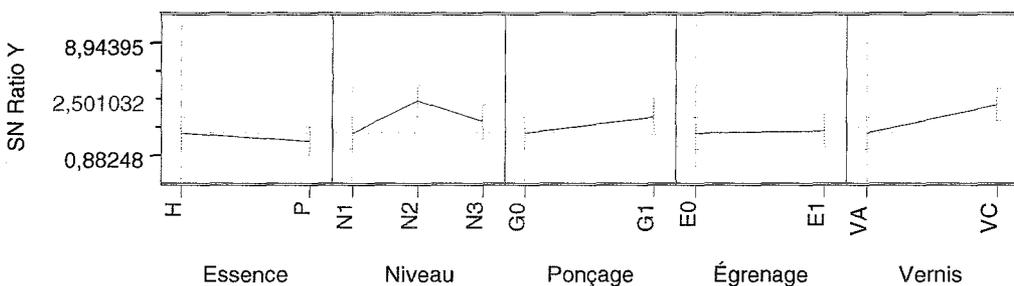


Figure IV.37 - Influence des différents niveaux des facteurs sur le critère  $K_{rug}$  (indice signal-bruit)

Dans les tableaux IV.16 et IV.17, les conclusions de l'étude ont été résumées (seuil de signification statistique) en tenant compte de l'influence de chacun des facteurs étudiés pour les deux critères considérés pour l'évaluation de la qualité objective de la surface. Nous pouvons en conclure que, pour obtenir une surface peu ondulée, le plus important est la sélection du type de vernis (vernis cellulosique - VC). En plus, Il faut poncer et égrener la surface et également éviter le niveau d'usage 3. L'essence du bois n'a pas une portée significative.

Pour obtenir une surface avec une faible rugosité, il faut choisir le vernis cellulosique, un niveau d'usinage 2 (éviter les niveaux d'usinage correspondants aux épaisseurs de copeaux très petites ou grandes) poncer la surface, et il ne sera pas nécessaire d'égrener. Dans ce cas, l'effet de l'essence n'est pas significatif.

Tableau IV.16 - Signification statistique de l'influence des facteurs pour les critères d'évaluation de la surface - moyenne (+5%, ++1%, +++0,1%)

Paramètre moyenne	Essence	Niveau	Ponçage	Égrenage	Vernis
$K_{ond}$	-	+	+	+	+
$K_{rug}$	-	++	+	-	+++

Tableau IV.17 - Signification statistique de l'influence des facteurs pour les critères d'évaluation de la surface - signal-bruit (+5%, ++1%, +++0,1%)

Paramètre signal-bruit	Essence	Niveau	Ponçage	Égrenage	Vernis
$K_{ond}$	-	++	+	+	+++
$K_{rug}$	-	++	+	-	+++

Nous pouvons conclure alors que cette méthode permet de visualiser les différences dans la qualité de la surface pour les niveaux et les facteurs analysés.

### 2.4.3 Mouillabilité de la surface

Les tableaux IV.18 et IV.19 présentent les valeurs d'angle de contact pour chaque essence et chaque niveau d'usinage (3 éprouvettes x 3 mesures). Par les raisons déjà citées au chapitre précédent, ces essais ont été effectués 3 mois (88 jours) après usinage. L'acquisition était faite avec une fréquence de demi seconde. Nous avons vérifié que, dans quelques essais, le système n'était pas capable de stabiliser à cause des variations brusques de l'angle de contact (qui se produisaient par exemple dans les échantillons très poreux tel que le pin). La détermination de l'angle de contact par la méthode décrite dans le paragraphe 5 du chapitre III, n'était pas possible.

Tableau IV.18 - Moyenne des valeurs des angles de contact pour le hêtre

Niveau d'usinage	Angles de contact (°)									Moyenne
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
N1	52,6	52,7	52,0	81,6	82,2	82,9	61,4	60,5	49,5	<b>63,9</b>
N2	26,4	39,9	40,3	53,4	67,0	48,4	48,0	49,5	26,5	<b>44,4</b>
N3	*	49,8	54,4	43,9	67,9	62,6	*	47,9	*	<b>54,4</b>

\* non mesurable

Tableau IV.19 - Moyenne des valeurs des angles de contact pour le pin

Niveau d'usinage	Angles de contact (°)									Moyenne
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
N1	76,7	109,1	102,1	58,0	48,1	70,2	*	*	*	<b>77,4</b>
N2	*	58,0	*	*	60,0	60,0	78,1	80,3	*	<b>67,3</b>
N3	*	68,1	*	*	83,9	81,0	69,3	100,3	—	<b>80,5</b>

— erreur du système; \* non mesurable

De l'analyse des valeurs moyennes de l'angle de contact obtenu (tableau IV.18 et IV.19), nous pouvons conclure, tel qu'ainsi montré dans la figure IV.38, que, pour le pin, la mouillabilité est plus basse. Cela ne serait pas d'attendre dû à la structure anatomique, avec notamment sa porosité supérieure à celle du hêtre. Ainsi, nous pouvons en conclure que le vieillissement (88 jours) de la surface usinée du pin se traduit par une forte diminution de la mouillabilité, le rendu étant pratiquement égal à celui du hêtre.

Sur la figure IV.38, nous pouvons aussi vérifier que les valeurs plus basses de l'angle de contact correspondent pour chaque essence, aux pièces usinées avec le niveau 2, traduisant une mouillabilité plus haute.

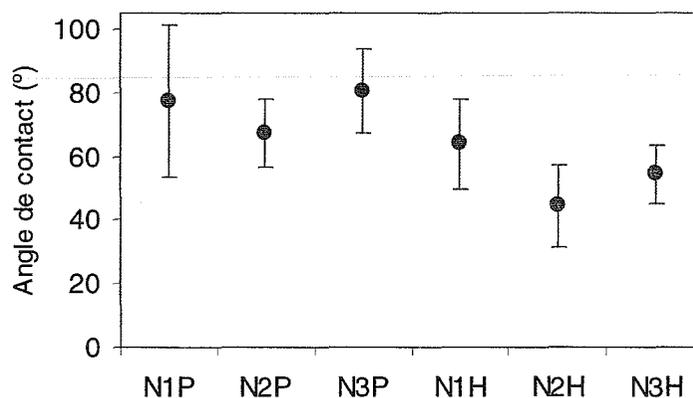


Figure IV.38 - Moyenne et écart-type de l'angle de contact pour le pin (P) et le hêtre (H) usinée avec le niveau N1, N2 et N3 (après 88 jours)

#### 2.4.4 Brillance spéculaire de la surface

Les essais ont été effectués avec un angle d'incidence de 60°. Pour obtenir une valeur de la brillance représentative de toute l'éprouvette, nous avons réalisé six mesures en des points différents et nous avons calculé la moyenne pour un total de 108 mesures.

Dans le tableau IV.20, nous pouvons vérifier qu'il existe une différence significative entre les pièces soumises à l'égrenage (E1) et ceux qui n'ont pas été soumises à cette opération (E0), confirmée à travers un test t-Student à 5% ( $t_{obs}=7,039$ ;  $t_{0,025, 5}=2,571$ ) réalisé pour les échantillons obtenus avec le vernis aqueux (VA). A contrario le vernis cellulosique (VC), ne donne pas différence significative, confirmée également, grâce à un test t-Student à 5% ( $t_{obs}=0,194$ ;  $t_{0,025, 7}=2,365$ ).

Tableau IV.20 - Moyenne des valeurs de la brillance spéculaire avec et sans égrenage

Moyenne de la brillance (60°)			
Éprouvettes	Égrenage (E0)	Éprouvettes	Égrenage (E1)
PN1G1VA	25,1	PN1G1VA	34,1
PN3G0VA	19,8	PN2G0VA	32,6
PN3G0VA	20,0	HN1G1VA	31,3
HN2G1VA	15,2	HN2G0VA	32,7
HN3G0VA	15,1	PN2G0VC	9,6
PN1G0VC	10,1	PN3G1VC	9,6
PN2G1VC	9,5	HN1G0VC	9,2
HN1G0VC	7,8	HN3G1VC	7,4
HN2G1VC	7,3	HN3G1VC	6,7

Cette différence significative pour le vernis aqueux (VA), entre les pièces égrenées (E1) et les non égrenées (E0), est due au fait que ce produit provoque le peluchage, pendant la phase de séchage, produisant une surface âpre au toucher. Cela oblige d'effectuer un égrenage, avec ce type de vernis et non avec le vernis cellulosique.

Avec l'analyse des résultats regroupés par produit (figure IV.39), nous vérifions qu'il existe des différences significatives, le vernis aqueux (VA) produisant une finition plus brillante. Donc, il serait à peine raisonnable de comparer les niveaux d'usinage ou le type d'essence pour échantillons avec le même produit.

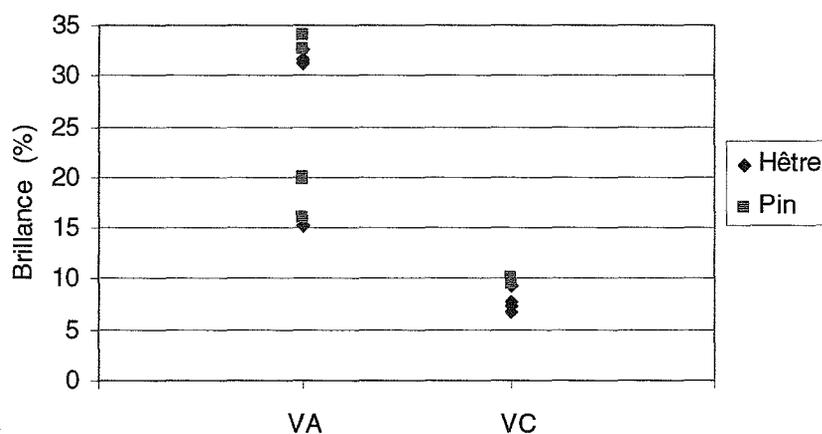


Figure IV.39 - Influence du type de vernis dans la brillance de la surface du bois du pin et de hêtre

## 2.5 Caractérisation subjective de la surface

Nous avons utilisé la première fiche d'enquête (tableau III.7 du chapitre III), pour l'évaluation subjective de l'ondulation visuelle (OV) et tactile (OT) et aussi de la rugosité visuelle (RV) et tactile (RT), sur 18 éprouvettes, avec une population de 20 observateurs, dont 5 experts et les autres avec quelque expérience dans la filière du bois (élèves finalistes du Cours Génie du Bois).

La figure IV.40 présente les évaluations effectuées par les experts et par les élèves.

Ces résultats permettent de conclure qu'il existe une parfaite distinction entre l'évaluation faite par les experts et par les non experts.

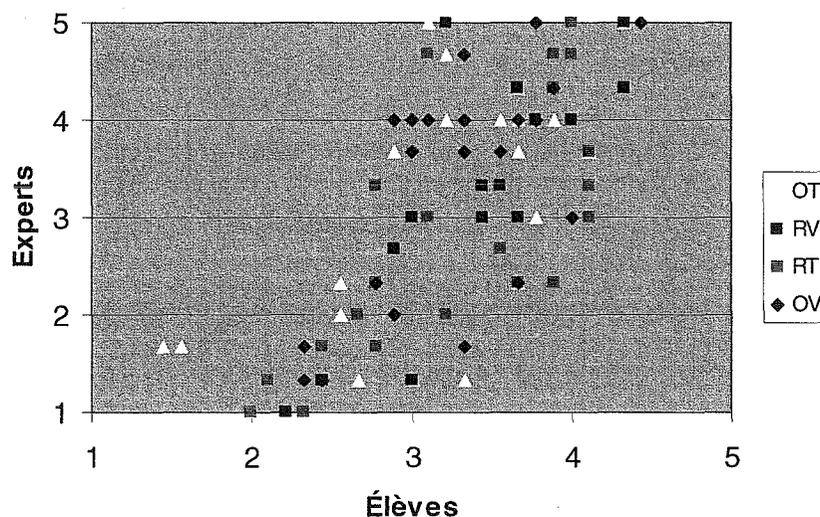


Figure IV.40 - Évaluation subjective de la surface par les experts et les élèves (ondulation visuelle-OV et tactile-OT, rugosité visuelle-RV et tactile-RT)

La figure IV.41 présente des résultats de l'évaluation classée par niveau d'usinage. Selon cette figure, nous pouvons vérifier que les experts et les élèves n'ont pas été capables de détecter l'ondulation. Les résultats de l'évaluation de l'ondulation devront être différents pour les niveaux d'usinage différent.

De plus, dans l'évaluation demandée, aucune séparation entre l'ondulation et la rugosité n'est visible. Nous concluons alors, que la division de l'analyse en ondulation et en rugosité n'était pas la plus appropriée, lorsque ni même les experts n'ont réussi à distinguer l'ondulation de la rugosité au niveau de l'analyse visuelle et tactile. En effet, par exemple, sur les éprouvettes sur

lesquelles était visible l'ondulation, elle n'était pas perceptible dans l'analyse tactile, dû au pouvoir de couverture du vernis. Cependant, pour les observateurs elle reste là, lorsque eux ne réussissaient pas à la dissocier de l'analyse, malgré on demandait que pendant l'analyse tactile ils n'utilisaient pas la analyse visuelle, ils finissaient pour le faire d'une manière intuitive.

Ce fait était au début prévisible, puisque lorsque quelqu'un fait une évaluation subjective à une surface finie, par exemple une pièce d'ameublement, il y a toujours la tendance généralisée pour effectuer l'analyse visuelle et tactile simultanément.

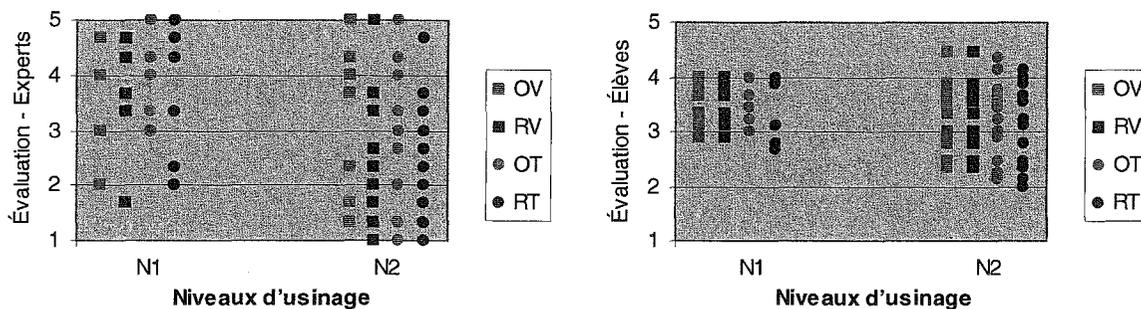


Figure IV.41 - Influence du niveau d'usinage dans l'évaluation subjective de la surface par les experts et élèves (ondulation visuelle-OV et tactile-OT, rugosité visuelle-RV et tactile-RT)

Devant ces difficultés, il faudrait modifier la fiche d'enquête - 1 (tableau III.7 du chapitre III), en faisant arriver l'évaluation subjective de la surface seulement sur la qualité visuelle et la tactile, sans distinction entre l'ondulation et la rugosité. Nous avons donc réalisé l'introduction d'une nouvelle colonne pour l'évaluation totale de la surface, c'est à dire l'analyse visuelle en simultanée avec l'analyse tactile (tableau III.8 du chapitre III), laquelle est instinctivement faite par un potentiel utilisateur final d'une surface finie en bois.

Aux résultats de cette enquête, nous avons effectué un traitement numérique suffisamment simple. À chaque classement, nous avons attribué une valeur numérique: 1-Bonne; 2-Acceptable; 3-Mauvaise. Les valeurs numériques ont été converties en résultats de l'enquête à travers le calcul de la moyenne.

Dans une phase postérieure, soit les valeurs numériques à attribuer à chaque classement, soit la détermination du résultat final, seront réévaluées en tenant compte des caractéristiques de l'échantillon et des caractéristiques du panel d'observateurs, notamment la variance des résultats et l'écart « de l'échelle absolue ».

Tel qu'il a été déjà rapporté, un des objectifs de ce travail était de vérifier non seulement si les différences trouvées dans l'analyse objective correspondaient aux différences de qualité visuelle et tactile des surfaces, mais également s'il existait une corrélation entre les critères considérés dans l'évaluation objective de la surface et les critères considérés dans l'évaluation subjective.

La confrontation entre les résultats de l'analyse subjective avec ceux de l'analyse objective, définis et utilisés dans l'analyse objective ( $K_{\text{ond}}$  et  $K_{\text{rug}}$ ), a permis de conclure qu'il n'existe pas de corrélation entre eux. Il a été nécessaire d'introduire un autre critère objectif – le  $K_{\text{sub}}$ , calculé à partir du rapport entre les intégrales de la courbe de puissance FFT (voir paragraphe 4 du chapitre III), pour les gammes de fréquences correspondants à l'ondulation ( $\lambda > 1$  mm) et à la rugosité ( $\lambda < 1$  mm).

À travers cette étude, nous avons conclu que le critère  $K_{\text{sub}}$  est meilleur que les critères considérés précédemment dans l'évaluation objective de la surface ( $K_{\text{ond}}$  et  $K_{\text{rug}}$ ) selon le seuil de signification de sa corrélation avec les critères considérés dans l'évaluation subjective.

Nous pouvons vérifier dans les graphiques de la figure IV.42, qu'il n'existe pas de distinction entre l'évaluation faite par les experts et celle réalisée par les personnes avec une certaine expérience dans le domaine du bois - élèves finaliste. Cela n'a pas été vérifié avec la première enquête, avec l'évaluation subjective (visuel et tactile), de deux propriétés, de l'ondulation et de la rugosité séparément.

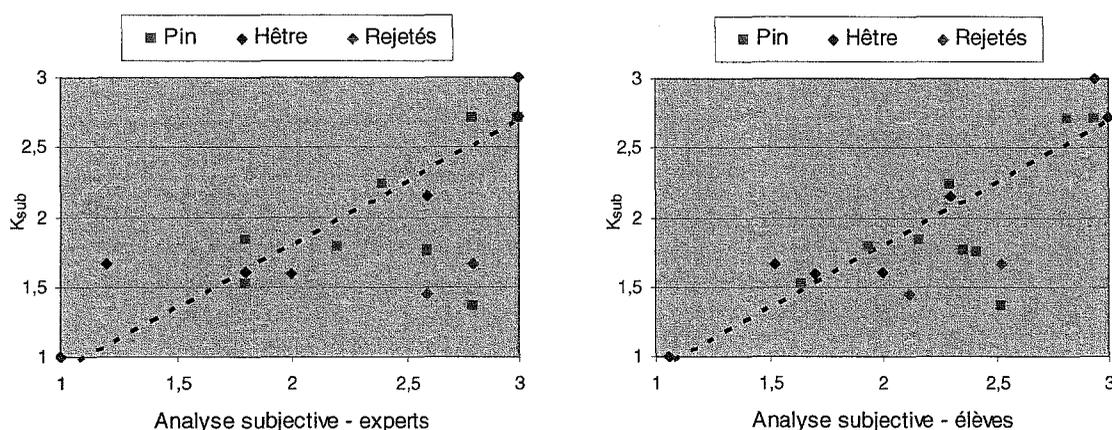


Figure IV.42 - Évaluation subjective de la surface par les experts et les élèves

Sur le tableau IV.21 et IV.22, nous pouvons observer les résultats des essais des éprouvettes de hêtre et de pin respectivement. Nous pouvons vérifier qu'il n'existe pas de différence significative entre les pièces soumises à la caractérisation objective ( $K_{sub}$ ) en utilisant le système de vision et la caractérisation subjective visuelle et tactile, effectuée par le panel d'observateurs (V+T), confirmée au travers un test t-Student à 5% réalisé pour les échantillons de hêtre ( $t_{obs}=0,0003$ ;  $t_{0,025, 5}=74,8057$ ) et pour les échantillons de pin ( $t_{obs}=0,0005$ ;  $t_{0,025, 4}=102,9183$ ).

Tableau IV.21 - Caractérisation objective ( $K_{sub}$ ) et subjective (V+T) pour le hêtre

Moyenne de l'analyse			
N°	Éprouvettes	Objective ( $K_{sub}$ )	Subjective (V+T)
1	HN1G0E1VC	1,60	1,71
2	HN1G0E0VC*	1,45	2,12
3	HN1G1E1VA	1,00	1,06
4	HN2G1E0VC	1,61	2,00
5	HN2G0E1VA	2,15	2,29
6	HN2G1E0VA	2,73	3,00
7	HN3G1E1VC*	1,66	2,53
8	HN3G0E0VA	3,00	2,94
9	HN3G1E1VC	1,66	1,53

\* Éprouvettes non considérées

Tableau IV.22 - Caractérisation objective ( $K_{sub}$ ) et subjective (V+T) pour le pin

Moyenne de l'analyse			
N°	Éprouvettes	Objective ( $K_{sub}$ )	Subjective (V+T)
1	PN1G1E1VA	1,52	1,65
2	PN1G0E0VC*	1,76	2,35
3	PN1G1E0VA*	1,36	2,53
4	PN2G0E1VC*	1,75	2,41
5	PN2G0E1VA	1,84	2,17
6	PN2G1E0VC	1,78	1,94
7	PN3G0E0VA	2,71	2,82
8	PN3G1E1VC	2,24	2,29
9	PN3G0E0VA	2,71	2,94

\* Éprouvettes non considérées

La figure IV.43, présente la corrélation entre le critère objectif ( $K_{sub}$ ) et subjectif (V+T) d'évaluation de la surface.

Dans cette même figure, nous pouvons vérifier qu'il y a quelques points en dehors de la ligne de tendance (avec la couleur verte), soit pour le pin soit pour le hêtre. Après l'analyse en détail de chacun d'entre eux, nous avons constaté qu'il s'agit d'éprouvettes avec quelques défauts macroscopiques dans la surface (éprouvettes N° 2 et 7 du tableau IV.21 et éprouvette N° 2, 3 et 4 du tableau IV.22).

Ces défauts étaient essentiellement de deux types : singularités du bois (présence de fibre torse, de bois de réaction, des nœuds inclus et des poches de résine) et défauts graves d'usinage (marques profondes des éléments de coupe - usure localisée d'une lame), surface irrégulière (arrachement de matière non rectifié par ponçage) et défauts de finition (peluchage, dans le cas du vernis aqueux, parce qu'ils n'étaient pas soumis à l'égrenage).

Une fois que ces défauts sont localisés, ils ne sont pas passibles d'être détectés par le système d'analyse objective exploité dans ce travail. Cependant, ils influencent la forme comme les observateurs évaluent la surface et donc ils ne devront pas être considérés lors de la comparaison des deux méthodes.

Si on enlève ces points, nous pouvons conclure qu'il y a une bonne corrélation entre le critère  $K_{sub}$  utilisé pour la caractérisation objective et la caractérisation subjective, pour les deux essences.

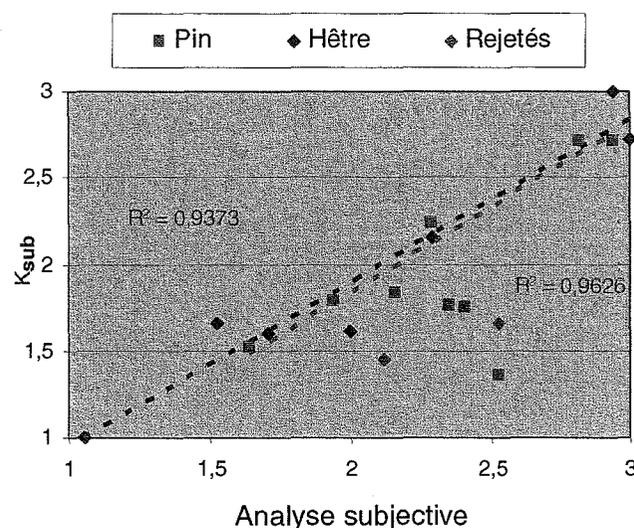


Figure IV.43 - Corrélation entre le critère objectif ( $K_{sub}$ ) et subjectif (V+T) d'évaluation de la surface

À travers cette étude, nous pouvons conclure que le critère  $K_{\text{sub}}$  est meilleur que les critères considérés précédemment dans l'évaluation objective de la surface ( $K_{\text{ond}}$  et  $K_{\text{rug}}$ ).

## 2.6 Conclusions

Pour une meilleure compréhension des effets des paramètres clefs de l'usinage du bois dans la qualité d'une finition, 5 facteurs (essence, niveau d'usinage, grain du ponçage, égrenage et vernis) ont été considérés à deux et à trois niveaux.

L'étude du procédé d'usinage a permis de conclure que la méthode utilisée a une reproductibilité suffisamment acceptable, soit au niveau de la puissance électrique consommée, soit au niveau du travail mécanique développé. Une autre conclusion de cette étude a été que la puissance électrique consommée était une mesure effective de la puissance mécanique consommée.

Nous pouvons aussi conclure parmi les trois niveaux considérés, qu'entre le niveau 1 et le niveau 2 il existe une augmentation significative d'énergie consommée à laquelle il ne correspond aucune modification significative de la qualité de la surface.

La quantification de l'état de surface utilise un système de vision artificielle pour la détermination de la *pseudo-rugosité* des surfaces de bois, et deux critères d'évaluation ont été utilisés: le critère d'ondulation ( $K_{\text{ond}}$ ) et le critère de rugosité ( $K_{\text{rug}}$ ).

Après une analyse des facteurs d'usinage par ANOVA, nous en concluons que pour obtenir une surface peu ondulée, le plus important est la sélection du type de vernis (vernis cellulosique - VC). Le ponçage et l'égrenage de la surface sont indispensables, ainsi qu'éviter le niveau d'usinage 3. L'essence du bois n'est pas un facteur significatif.

Pour obtenir une surface de basse rugosité, nous réalisons le choix suivant: le vernis cellulosique, le niveau d'usinage 2 (éviter les niveaux d'usinage correspondants aux épaisseurs de copeaux trop petites ou trop grandes) et poncer la surface, sans nécessairement égrener. Dans ce cas, également, l'effet de l'essence n'est pas significatif.

Cette méthode permet de visualiser les différences dans la qualité de la surface pour les niveaux et les facteurs analysés.

D'autre part, nous avons vérifié que, entre les différents critères étudiés pour l'évaluation objective de la qualité de la surface, il en existe deux ( $K_{\text{ond}}$  et  $K_{\text{rug}}$ ) pour lesquelles il existe une

bonne corrélation avec les opérations d'usinage. Cependant, le paramètre qui s'approche le plus de l'évaluation subjective est le paramètre  $K_{sub}$ .

Cependant, étant donné que le critère  $K_{sub}$  seulement a été introduit dans la partie finale de cette série d'expériences, il faut vérifier si les relations entre ce critère et les paramètres étudiés dans l'usinage sont cohérentes.

### 3 Deuxième série d'expériences

Les résultats obtenus avec la première série d'expériences étant globalement en conformité avec les valeurs attendues, les paramètres/niveaux considérés ont été maintenus dans la prochaine série d'expériences.

Donc, le but de ce nouveau protocole concerne la validation des résultats, soit de l'analyse objective, soit de l'analyse subjective.

#### 3.1 Plan des expériences

À travers l'équation 3.5, nous avons obtenu les valeurs des paramètres d'usinage (tableau IV.23) pour chacun des niveaux.

Ainsi, nous avons fixé pour le niveau 1, la valeur de la vitesse d'avance à 6,5 m/min et la vitesse de rotation à 6000 trs/min (50 Hz), pour le niveau 2 les valeurs de 11 m/min et 5040 trs/min (42 Hz) et pour le troisième les valeurs de 18 m/min et 4080 trs/min (34 Hz), auxquels correspondent les valeurs moyennes de l'épaisseur de copeau dans chacun des intervalles, soit 0,05 mm, 0,1 mm et 0,2 mm.

Tableau IV.23 - Paramètres et niveaux d'usinage

Longueur du porte-outils (mm)	250		
Diamètre D (mm)	125		
Nombre de dents Z	2		
	<b>Niveau 1</b>	<b>Niveau 2</b>	<b>Niveau 3</b>
Vitesse de rotation N (trs/min)	6000	5040	4080
Vitesse d'avance Vf (m/min)	6,5	11	18
Fréquence du courant électrique (Hz)	50	42	34
Profondeur de coupe H (mm)	1	1	1
Épaisseur moyenne de copeau $e_m$ (mm)	0,05	0,1	0,2

Nous avons obtenu, avec les équations 3.6 et 3.7, les valeurs suivantes pour les marques d'usinage (tableau IV.24), pour chacun des niveaux.

Tableau IV.24 - Marques d'usinage

	<b>Niveau 1</b>	<b>Niveau 2</b>	<b>Niveau 3</b>
Profondeur des marques t (mm)	0,0006	0,0024	0,0097
Avance par dent fz (mm)	0,542	1,091	2,206

Comme dans la première série d'expériences, les valeurs obtenues pour chaque niveau se trouvent aussi dans les limites présentées dans la figure III.8 du chapitre III pour l'avance par dent, ainsi que pour la profondeur des marques (figure III.9 du même chapitre).

Nous avons effectué quelques photographies des pièces (figures IV.44, IV.45 et IV.46), pour chaque niveau, pour une meilleure observation des différents états de la surface obtenus pour chaque niveau d'usinage, où il est possible de visualiser macroscopiquement l'avance par dent ( $f_z$ ), et donc mesurer la fréquence de l'ondulation. Il est attendu que l'avance par dent augmente avec le niveau d'usinage, et nous obtenons la valeur la plus basse pour le niveau 1, qui présente un meilleur état de la surface, pour les deux essences.

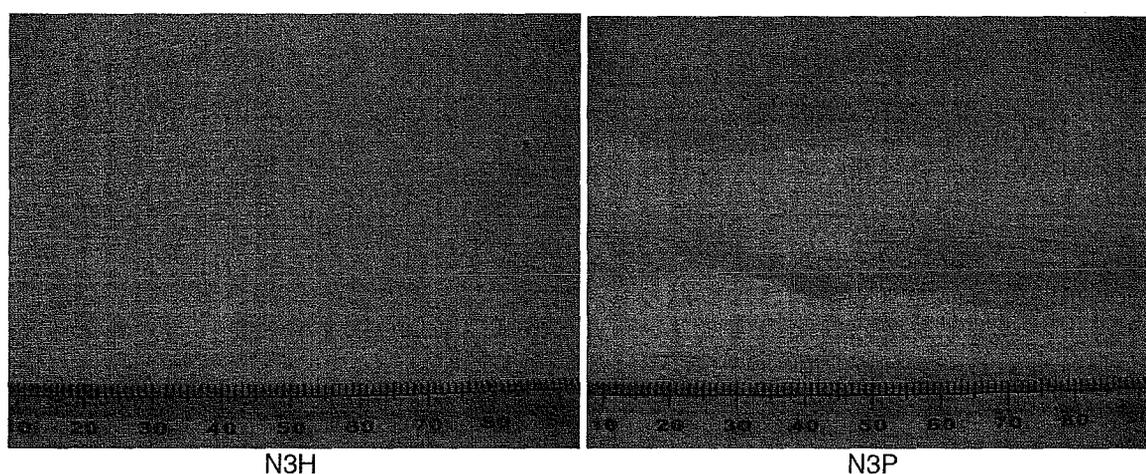


Figure IV.44 - Surface de hêtre (H) et du pin (P), avec l'usinage au niveau 3 (N3)

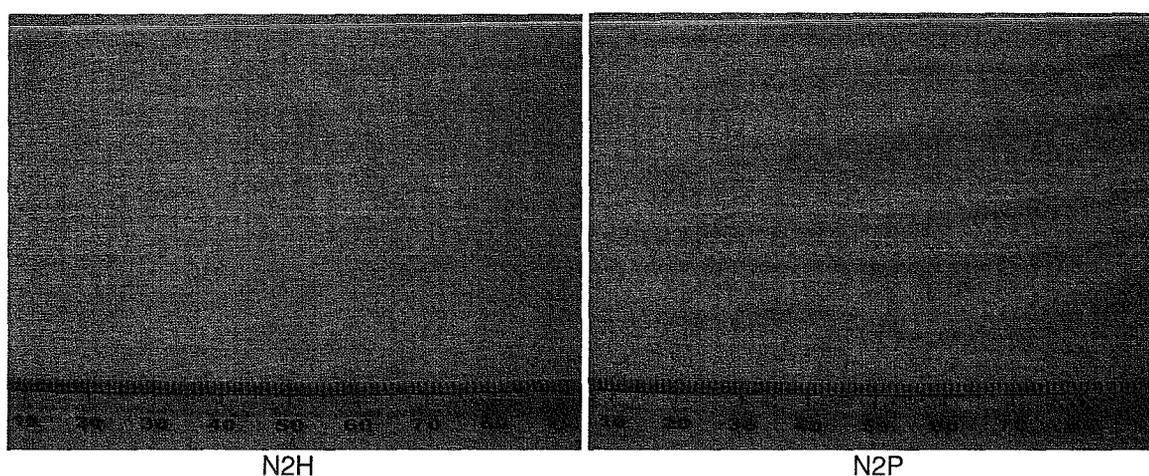


Figure IV.45 - Surface de hêtre (H) et du pin (P), avec l'usinage au niveau 2 (N2)

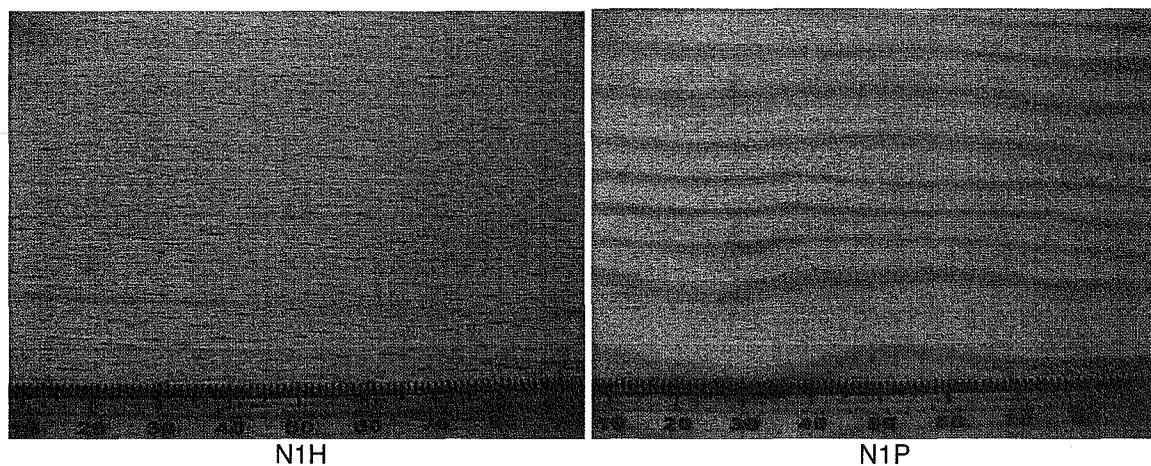


Figure IV.46 - Surface de hêtre (H) et du pin (P), avec l'usinage au niveau 1 (N1)

Dans le tableau IV.25, sont notés les facteurs, les niveaux choisis et leurs valeurs et codes respectifs.

Tableau IV.25 - Facteurs et niveaux

Facteurs		Niveaux/Codes		
		P	H	
Essence		Pin	Hêtre	
		<b>Usinage</b>		
		N1	N2	N3
Vitesse de rotation	N (trs/min)	6000	5040	4080
Vitesse d'avance	Vf (m/min)	6,5	11	18
Profondeur de coupe	H (mm)	1	1	1
		<b>Ponçage</b>		
		G0	G1	
Grain		—	(80, 120)	
Vitesse d'avance	Vf (m/min)	—	10	
Profondeur de passage	H (mm)	—	0,5	
Nombre de passages		—	1	
		<b>Égrenage</b>		
		E0	E1	
Grain		—	400	
		<b>Finition</b>		
		VC	VA	
Vernis		1+1	1+1	
Nombre de couches		1+1	1+1	

Si nous considérons toutes les combinaisons possibles, nous obtenons une table L48 - Plan factoriel complet, égale à celle présentée dans l'étude précédente (voir tableau IV.14).

Ainsi, en raison du grand nombre de paramètres/niveaux concernés, la méthode de Taguchi a été utilisée pour mettre en place un plan d'expériences, selon la table L8 suivante (tableau IV.26) égale à celle utilisée dans l'étude précédente.

Tableau IV.26 - Table Taguchi

N°	Facteurs					Code
1	P	N1	G0	E0	VC	----+
2	H	N1	G1	E1	VA	+--+
3	P	N1	G1	E1	VA	--++
4	H	N1	G0	E0	VC	+---+
5	P	N1	G1	E0	VA	---+-
6	H	N1	G0	E1	VC	+--+
7	P	N2	G0	E1	VC	-0++
8	H	N2	G1	E0	VA	+0--
9	P	N2	G0	E1	VA	-0+-
10	H	N2	G1	E0	VC	+0+-
11	P	N2	G1	E0	VC	-0+-
12	H	N2	G0	E1	VA	+0--
13	P	N3	G1	E1	VC	++++
14	H	N3	G0	E0	VA	++--
15	P	N3	G0	E0	VA	-+--
16	H	N3	G1	E1	VC	++++
17	P	N3	G0	E0	VA	-+--
18	H	N3	G1	E1	VC	++++

De la même façon que dans les autres protocoles, l'analyse des résultats a été effectuée en utilisant une analyse de variance (ANOVA), afin d'évaluer le niveau de signification des effets des différents facteurs.

### 3.2 Essais - Préparation des échantillons

Tout le procédé d'usinage a été réalisé au même endroit que pour l'étude précédente ; c'est à dire, au LTIM (Laboratoire de Technologie des Industries du Bois) de l'École Supérieure de Technologie de Viseu.

Pour la préparation des échantillons, nous avons utilisé des planches de pin et de hêtre débitées tangentiellement de 22 mm d'épaisseur et avec une largeur considérable, afin d'obtenir des planches divisées longitudinalement en deux planches égales, pour minimiser l'effet de l'hétérogénéité du bois. Ainsi, nous avons réussi à réduire le nombre de planches par rapport à l'étude précédente avec le même protocole, soit 6 planches au lieu de 18 (figure

IV.47). D'autre part, toutes les planches ont été usinées dans leur totalité, afin de vérifier, après l'usinage, qu'il n'y avait pas défauts localisés dans la surface (nœuds, poches de résine, etc.). Ce n'était pas le cas dans l'étude précédente, où les défauts présents ont obligé à rejeter une planche et donc à l'utilisation d'une troisième.

Les planches ont été préalablement séchées dans une étuve et maintenues dans un environnement climatisé, de manière à ce que les valeurs d'humidité soient en accord avec ceux utilisés couramment dans l'industrie de l'ameublement. L'humidité déterminée selon la norme NP 614, était de 9% pour les deux essences.

Ensuite, on a effectué un pré-usinage et les planches ont été usinées sur la corroyeuse (2,00 x 0,10 x 0,02 m), pour garantir que les planches possédaient des états de surface initiaux similaires et d'égale géométrie. Alors, les échantillons ont été préparés selon le protocole décrit (tableau IV.25), en ayant obtenu à partir des 6 planches initiales 108 éprouvettes (voir figure IV.47).

Le ponçage a été effectué avec une vitesse d'avance de 10 m/min, avec le premier rouleau, équipé avec une bande de grain 80 et le deuxième rouleau avec une bande de grain 120. Nous avons réalisé seulement un passage de pièces dans la ponceuse.

L'application du produit a été réalisée avec un pistolet airless. L'égrenage du vernis a été réalisé avec une ponceuse mécanique portable, avec un abrasif de grain 400.

Dans la dernière phase, l'application de la seconde couche de vernis a été réalisée sur toutes les éprouvettes, dans les conditions semblables à celle de la première couche.

À partir des 6 planches initiales, dans chaque phase du procédé, nous avons prélevé de chaque planche préparée selon le protocole décrit (tableau IV.26), des petites éprouvettes de 20 cm de longueur. Nous en avons conservé 18 pour la caractérisation physico mécanique et les autres 90 (y compris trois répliques) pour la caractérisation objective et subjective de la surface, donnant à la fin 108 éprouvettes (18 + 30 x 3), (voir figure IV.47).

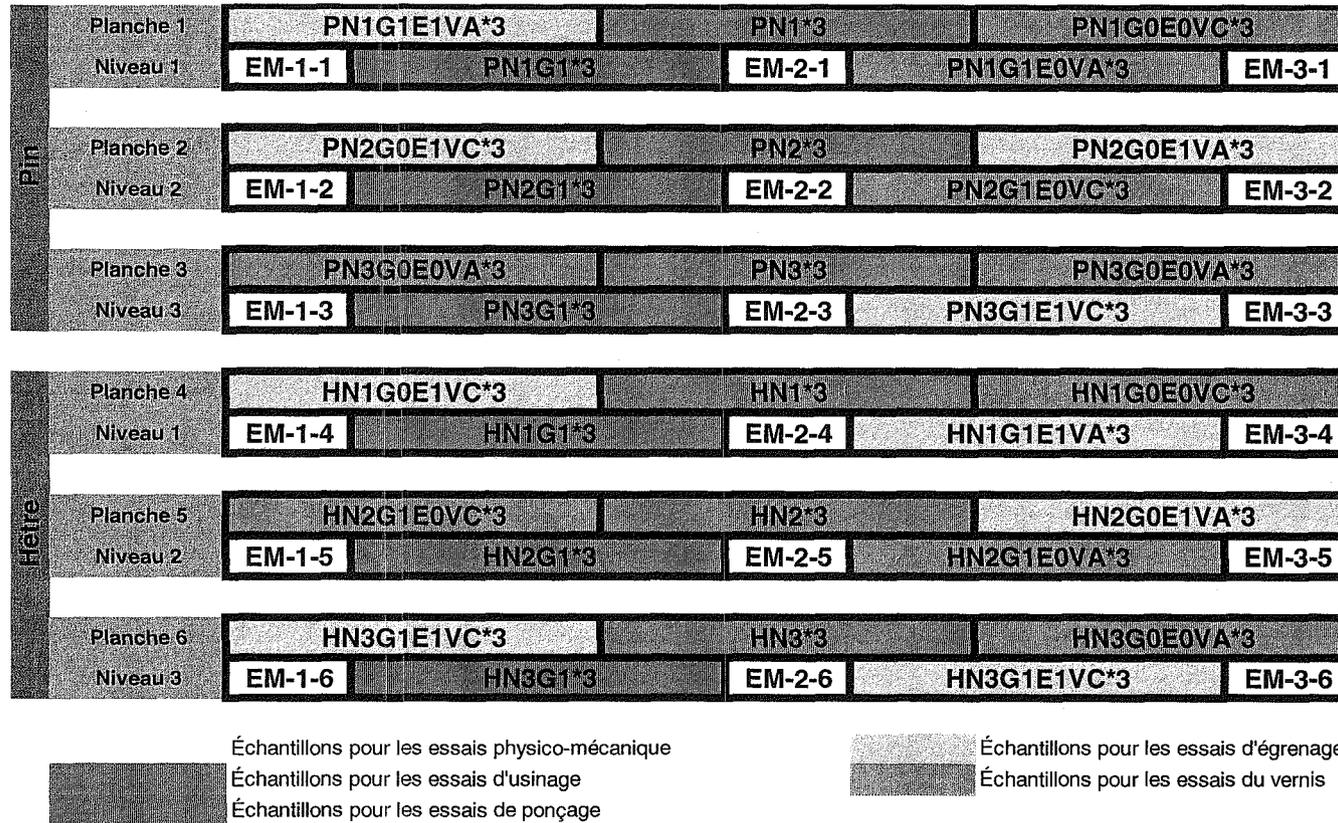


Figure IV.47 - Plan pour la coupe des éprouvettes du pin et de hêtre (108 éprouvettes)

### 3.3 Procédés d'usinage

Les deux séries d'essais (première et deuxième), ont été réalisées en deux phases différentes, avec un intervalle de trois mois. Bien que nous souhaitions maintenir toutes les conditions constantes, il n'a été pas possible de le réaliser. En effet, la difficulté a résidé essentiellement au niveau des outils de coupe (lames différentes et un degré d'usure différent) et également au niveau des conditions de l'ambiance (température et humidité de l'air), et par conséquent, au niveau du bois. En ce qui concerne ce dernier, pour diminuer la variabilité, les planches utilisées appartenaient au même lot, sélectionnées soigneusement, afin d'éviter la présence de défauts (nœuds, poches de résine, etc.).

Dans le cadre de cette étude sur le procédé d'usinage, nous avons considéré les mêmes paramètres d'opération que pour la série d'expériences précédente.

Ainsi, nous avons mis en œuvre l'usinage des planches, conformément au protocole établi précédemment (tableau IV.25). Pendant cette opération, un même ensemble de données ont été obtenues par le système d'acquisition.

Ensuite, nous avons effectué plusieurs analyses complémentaires en ayant pour objectif la validation des données (étude de la reproductibilité) et l'évaluation de la relation entre l'énergie consommée et le type de surface obtenue (analyse de l'effet des niveaux d'usinage et analyse de l'influence de l'essence).

#### 3.3.1 Reproductibilité du système d'acquisition

Dans les figures IV.48, IV.49, IV.50, IV.51, IV.52 et IV.53, nous présentons les valeurs de la puissance électrique consommée, le travail électrique développé et la perte de rotation de l'équipement industriel pour chacune des deux répliques des six essais réalisés (2 essences x 3 niveaux).

Nous avons vérifié que les valeurs de toutes les propriétés déterminées sont très semblables dans chaque essai. Globalement et malgré le nombre réduit de répliques, nous pouvons conclure que cette méthode a une reproductibilité suffisamment acceptable, soit au niveau de la puissance électrique consommée, soit au niveau du travail mécanique développé.

Comme dans la première série d'expériences, nous avons vérifié une évolution pratiquement symétrique de la puissance électrique consommée et de la perte de vitesse de rotation. Cela nous a permis de conclure que la puissance électrique consommée était une mesure effective de la puissance mécanique consommée (variation de la quantité de mouvement).

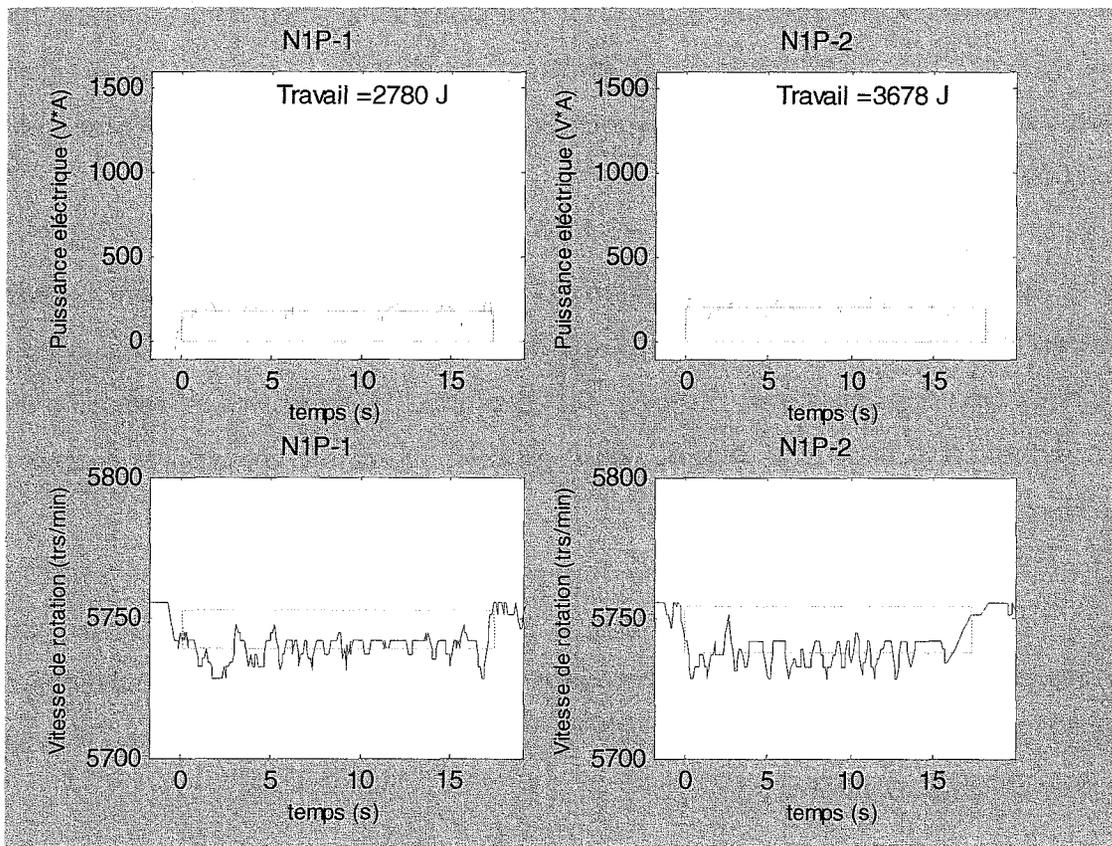


Figure IV.48 - Reproductibilité du système pour le niveau d'usinage 1, pour les deux planches de pin

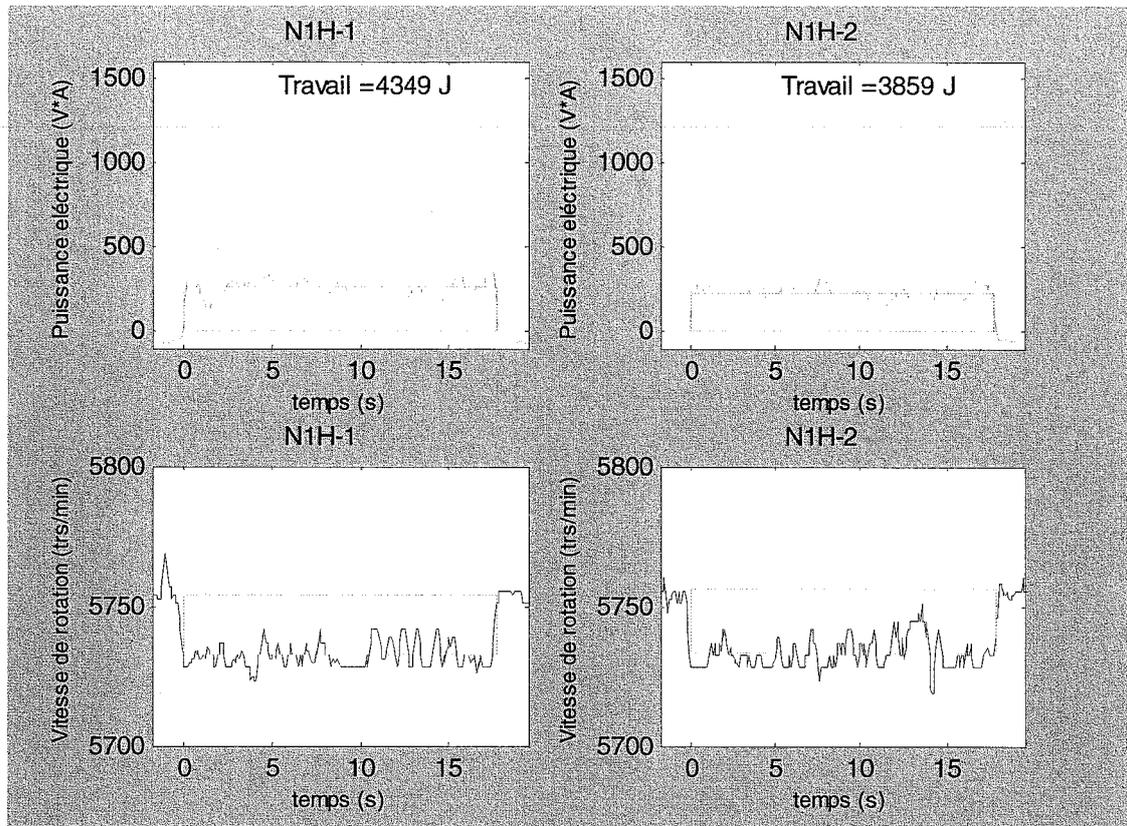


Figure IV.49 - Reproductibilité du système pour le niveau d'usinage 1, pour les deux planches de hêtre

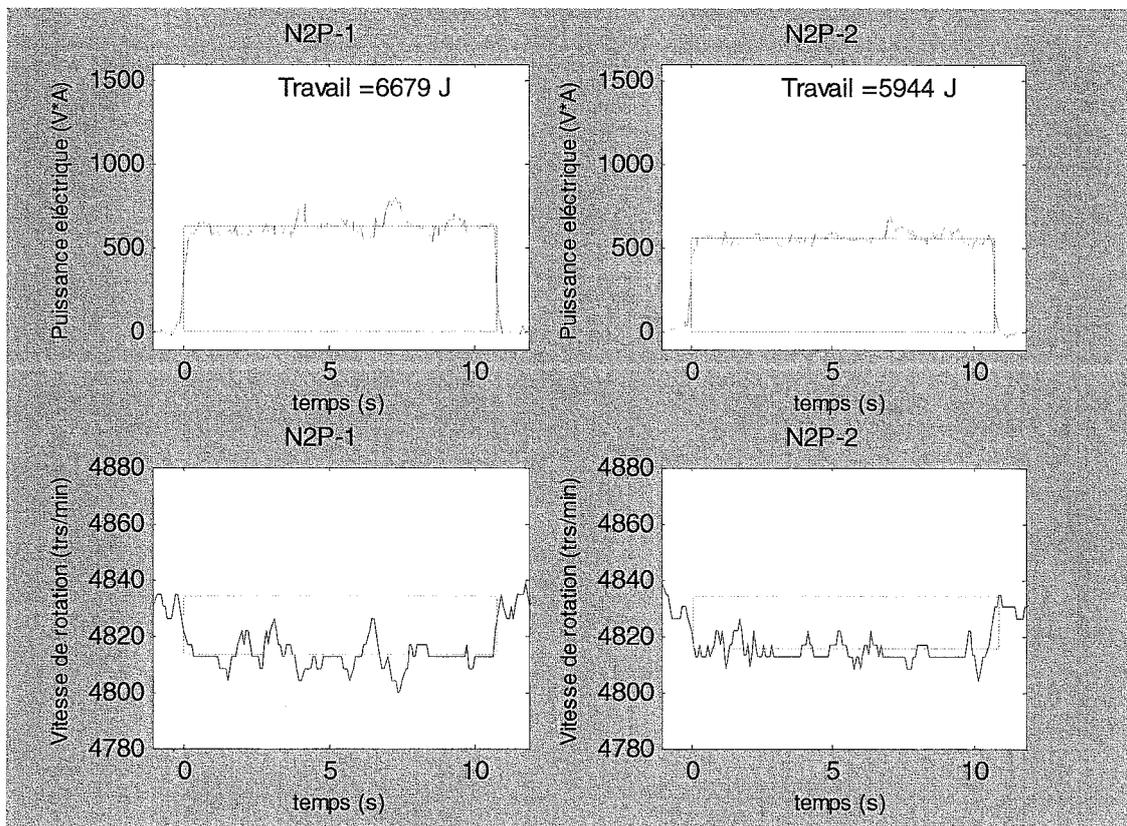


Figure IV.50 - Reproductibilité du système pour le niveau d'usinage 2, pour les deux planches de pin

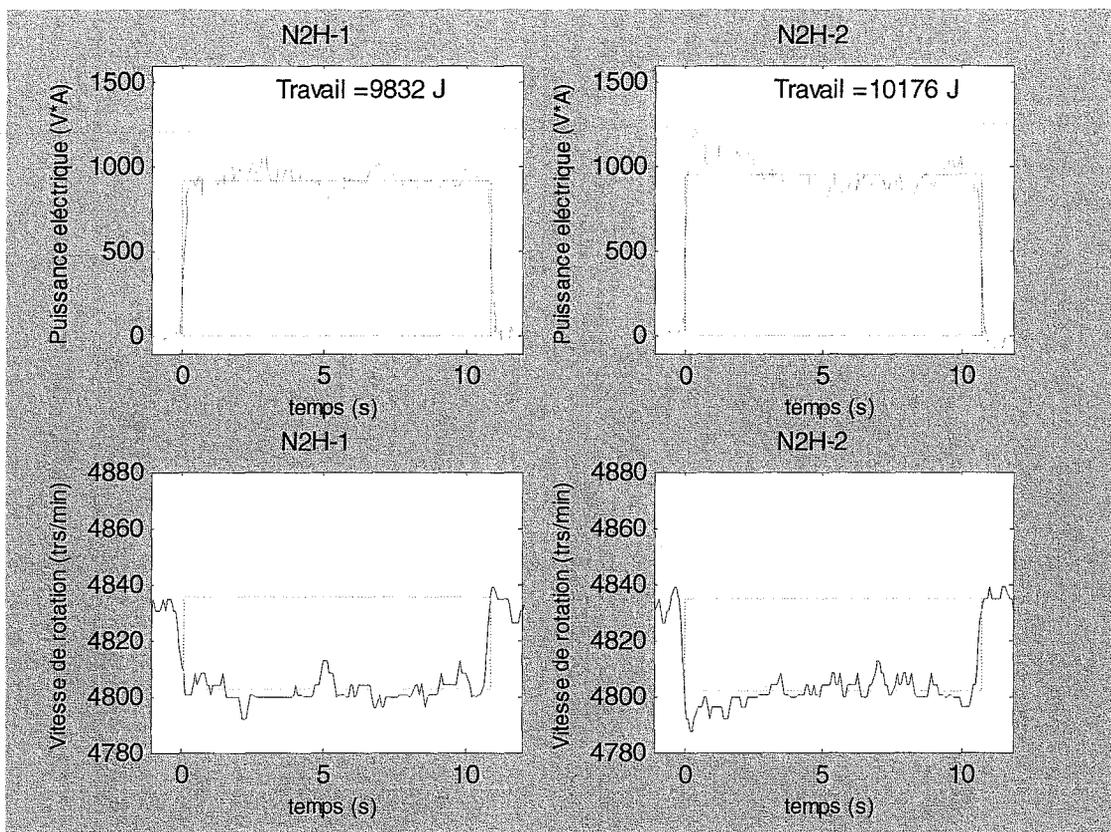


Figure IV.51 - Reproductibilité du système pour le niveau d'usinage 2, pour les deux planches de hêtre

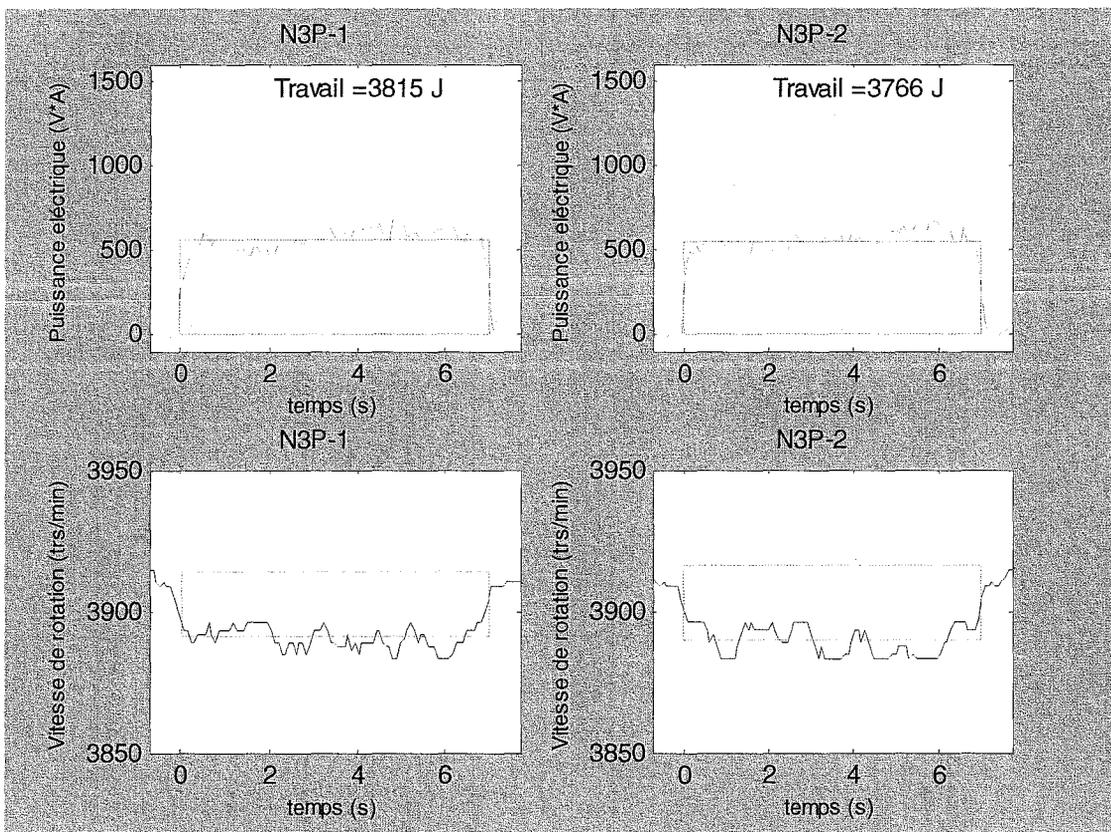


Figure IV.52 - Reproductibilité du système pour le niveau d'usinage 3, pour les deux planches de pin

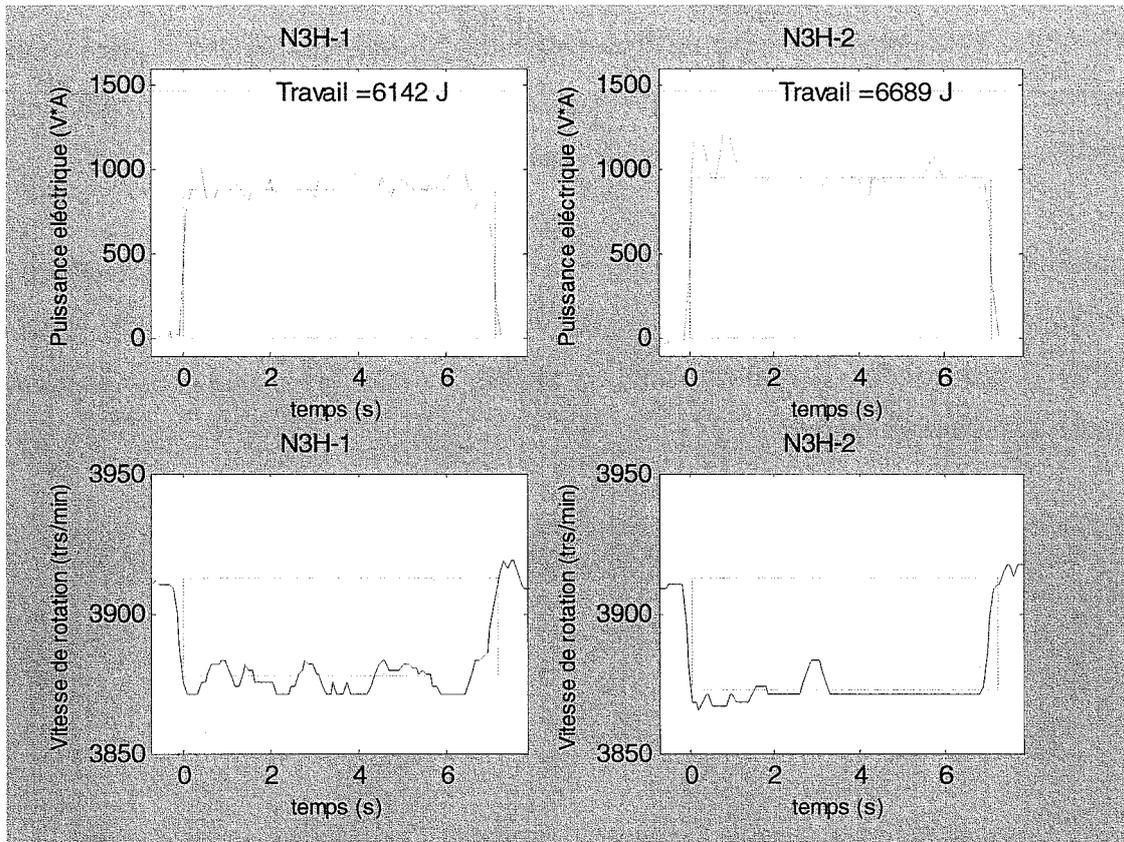


Figure IV.53 - Reproductibilité du système pour le niveau d'usinage 3, pour les deux planches de hêtre

### 3.3.2 Effet des niveaux d'usinage

Dans les figures IV.54 et IV.55, nous présentons les influences du niveau d'usinage sur la puissance électrique consommée, sur le travail électrique développé et sur la variation de la rotation nominale de l'équipement industriel utilisé pour les deux essences (pin et hêtre).

En ce qui concerne la puissance électrique, nous obtenons le même comportement que pour la série d'expériences précédente, c'est à dire, une augmentation significative du niveau 2 par rapport au niveau 1, alors que le niveau 2 et le niveau 3 sont proches si nous prenons en compte l'erreur associée à cette méthode (voir paragraphe 2.3.1).

En ce qui concerne le travail électrique développé, nous vérifions aussi les mêmes comportements que la première série d'expériences, une forte augmentation du niveau 2 par rapport au niveau 1 ; mais, du niveau 2 au niveau 3, il existe une diminution importante. Cette situation peut être justifiée à travers les phénomènes déjà présentés dans la série d'expériences précédente.

La variation de la perte de vitesse de rotation pendant l'usinage suit les mêmes variations précédemment mentionnées (comparaison avec la puissance électrique consommée) lesquels sont en accord avec la série d'expériences précédente.

Malgré le comportement très similaire entre les deux séries d'essais (première et deuxième), il existe un écart entre les valeurs obtenues dans les deux séries d'expériences, dû à l'état des outils de coupe (usure des lames), aux conditions environnementales et à la sélection soigneuse des planches du bois.

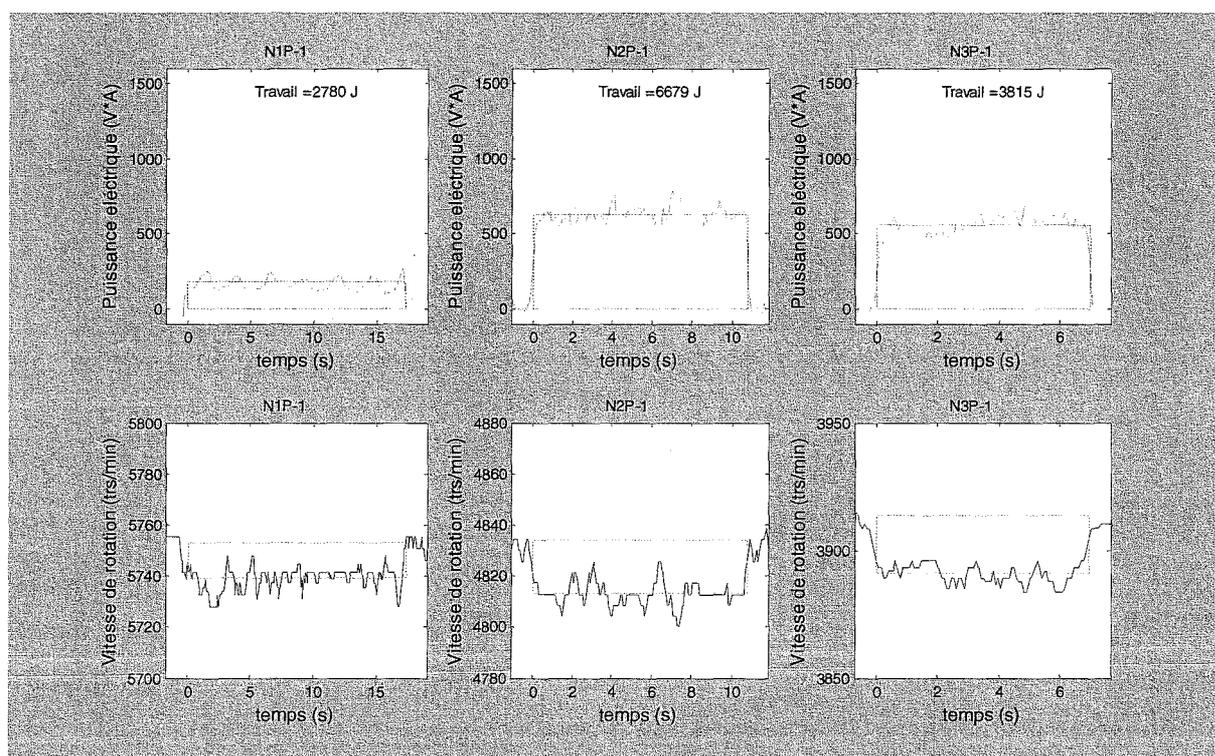


Figure IV.54 - Monitorisation d'usinage – Pin

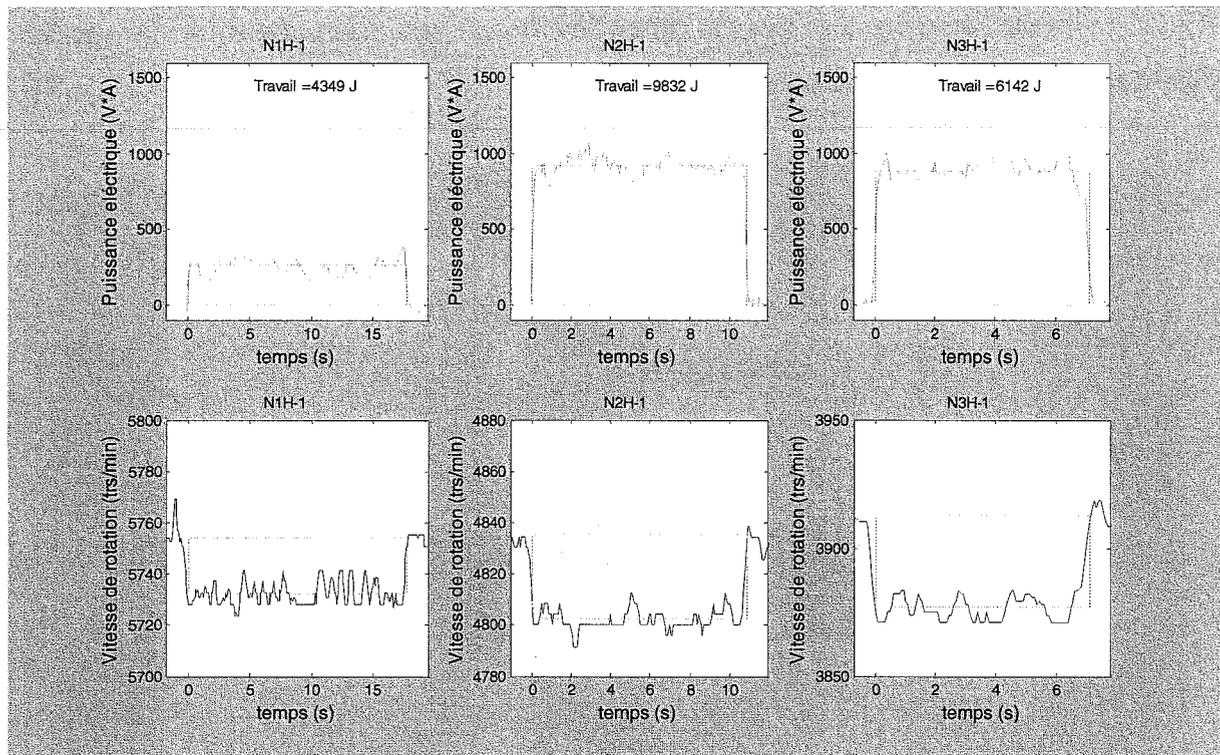


Figure IV.55 - Monitorisation d'usinage – Hêtre

### 3.3.3 Influence de l'essence

À travers l'analyse des figures IV.56, IV.57 et IV.58, nous vérifions que pour le niveau 1 (niveau pour lequel nous considérons que la coupe des fibres est plus importante que l'arrachement), il n'existe pas de différence significative entre les essences.

En ce qui concerne les niveaux 2 et 3, nous vérifions une différence suffisamment élevée entre les deux essences, en prenant en compte les différences de l'anatomie justifiant la plus grande difficulté d'arracher les fibres de hêtre (feuillus) comparée à l'arrachement du pin (résineux), contribuant ainsi à une augmentation de la rugosité de la surface.

Ce comportement est semblable à la série d'expériences précédente pour le niveau 1 et 3. Mais pour le niveau 2, il existe une différence, équivalent ici au niveau 3, et dans la série d'expériences précédente semblable au niveau 1. Les raisons de ce changement, sont les mêmes que dans le paragraphe 3.3.2. En effet, le phénomène du niveau 2 est un niveau de transition entre un niveau, où il y a surtout la coupe des fibres (niveau 1) et un autre niveau où

il y a surtout de l'arrachement (niveau 3), en accord avec les phénomènes vérifiés pendant l'usinage (coupe ou arrachement de fibres).

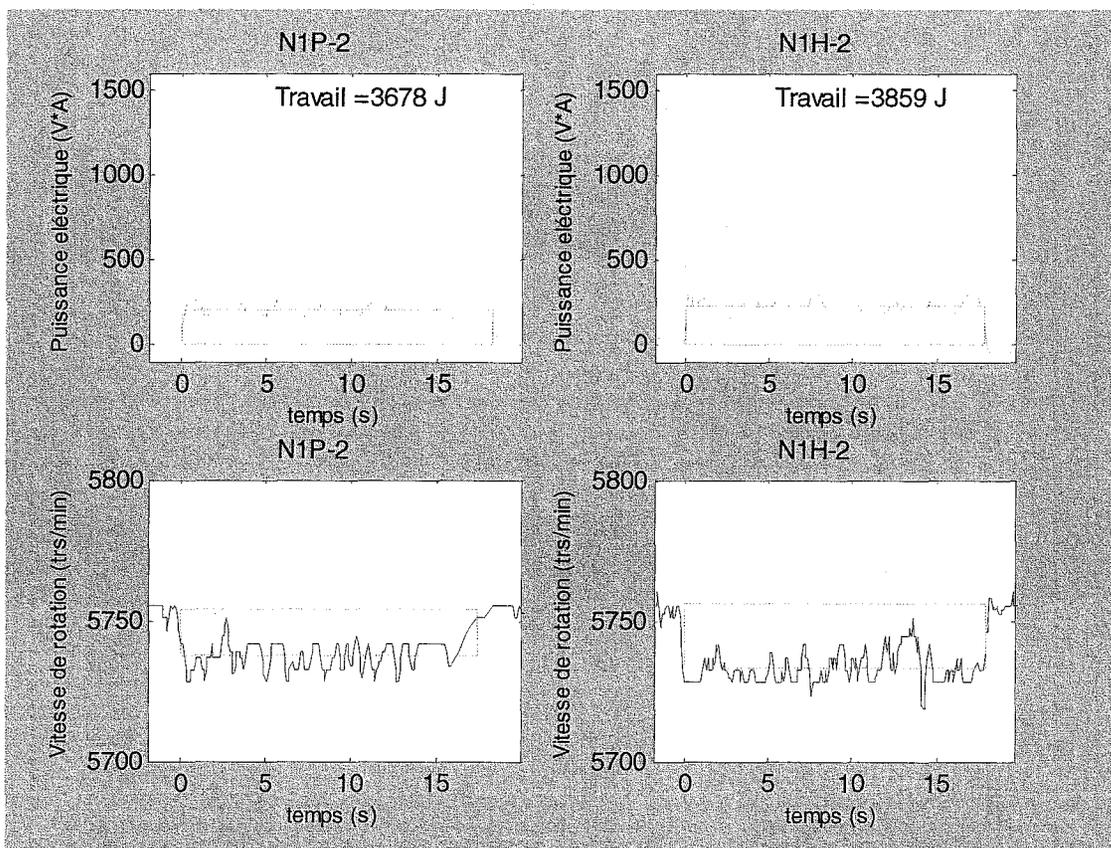


Figure IV.56 - Monitorisation d'usinage du pin et de hêtre pour le niveau 1

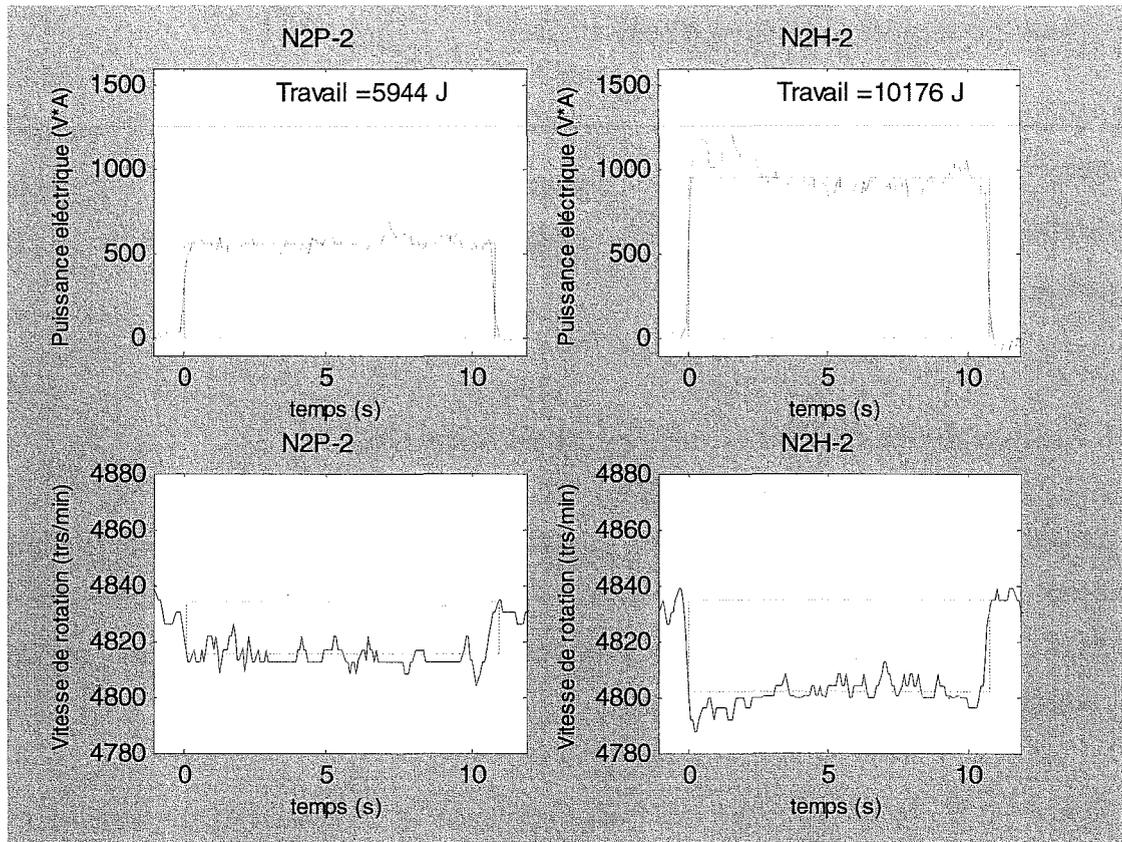


Figure IV.57 - Monitorisation d'usinage du pin et de hêtre pour le niveau 2

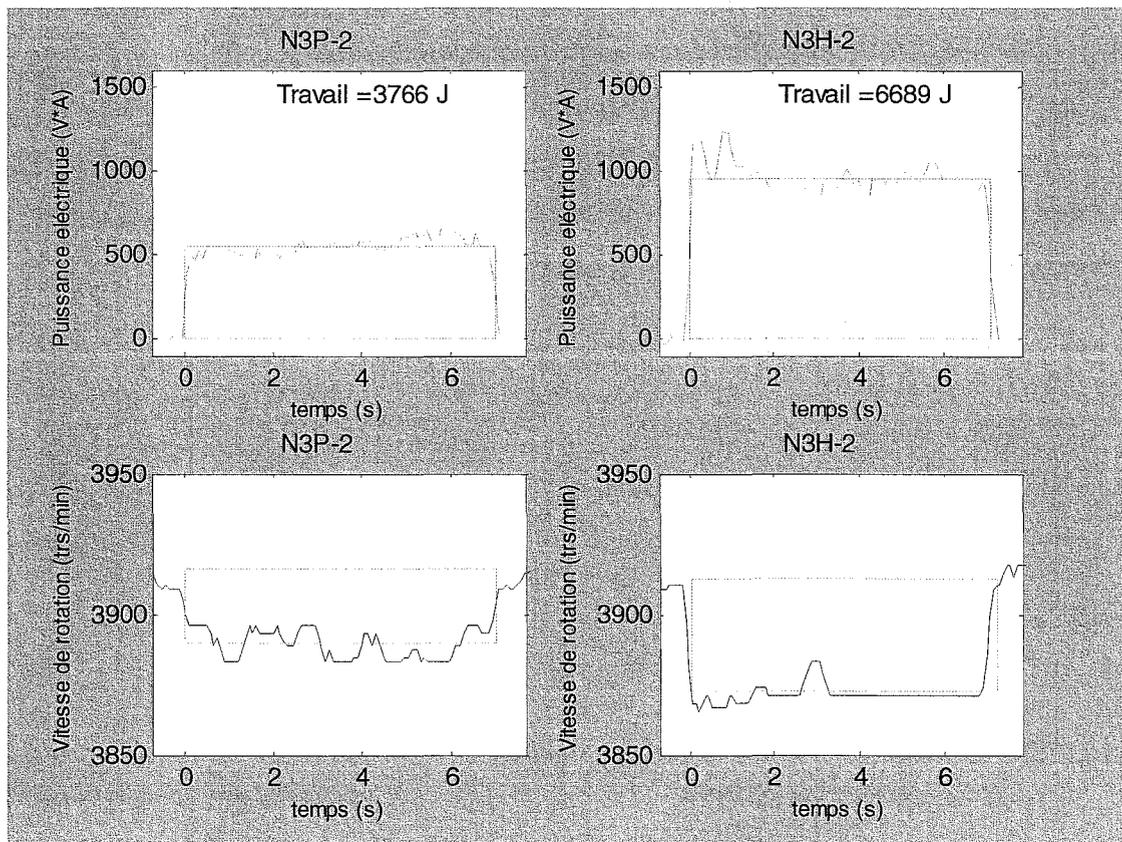


Figure IV.58 - Monitorisation d'usinage du pin et de hêtre pour le niveau 3

### 3.4 Caractérisation objective de la surface

Pour la caractérisation objective de la surface du bois, nous avons fait l'évaluation des propriétés objectives, telles que l'ondulation et la rugosité avant et après la finition, la mouillabilité avant la finition et la brillance de la surface finie, de façon équivalente à la série d'expériences précédente.

#### 3.4.1 Influence des facteurs dans l'analyse objective

Les résultats obtenus dans ce travail sont présentés avec pour objectif la différenciation de l'influence des facteurs étudiés dans la caractérisation objective de l'aspect d'une finition et également la validation de la méthodologie utilisée dans la série d'expériences précédente pour caractériser la *pseudo-rugosité* du bois.

Les figures IV.59, IV.60 et IV.61 montrent l'influence de l'épaisseur du copeau dans les critères  $K_{\text{ond}}$  et  $K_{\text{rug}}$  et dans l'énergie consommée par unité de masse anhydre, ainsi que la représentation de l'épaisseur du copeau attendu pour chacun des trois niveaux sélectionnés et lignes de tendance, avec les coefficients respectifs de détermination.

Les figures IV.62 et IV.63 présentent l'influence de l'énergie consommée par niveau d'usinage (épaisseur du copeau) dans le critère d'ondulation ( $K_{\text{ond}}$ ) et dans le critère de rugosité ( $K_{\text{rug}}$ ). L'influence du ponçage dans le critère d'ondulation ( $K_{\text{ond}}$ ) et dans le critère de rugosité ( $K_{\text{rug}}$ ), est présentée sur les figures IV.64 e IV.65, respectivement.

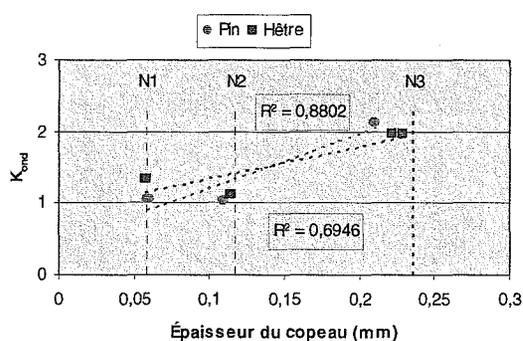


Figure IV.59 - Influence du niveau d'usinage sur le  $K_{\text{ond}}$  (critère d'ondulation)

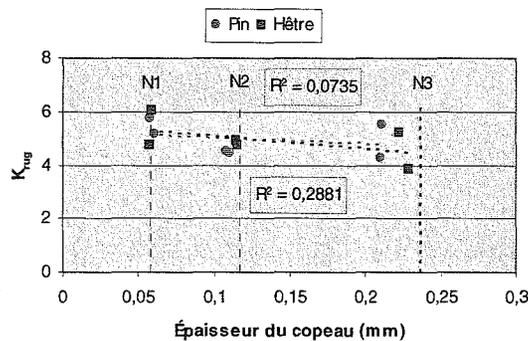


Figure IV.60 - Influence du niveau d'usinage sur le  $K_{\text{rug}}$  (critère de rugosité)

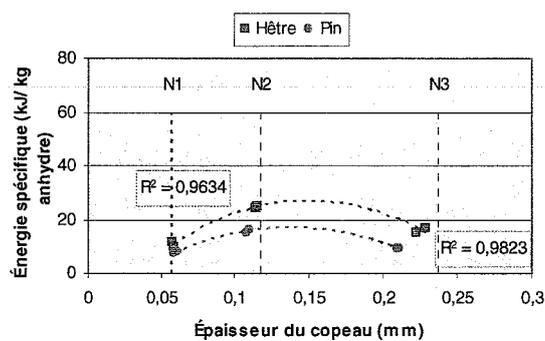


Figure IV.61 - Influence du niveau d'usinage sur l'énergie spécifique

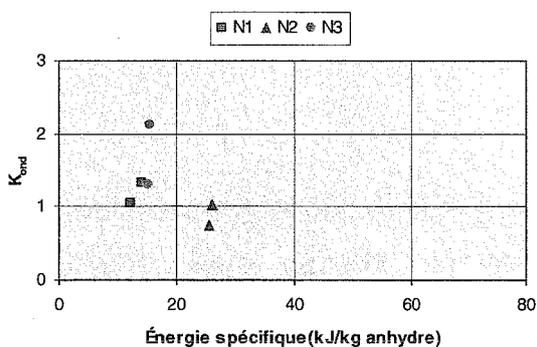


Figure IV.62 - Influence du niveau d'usinage sur le  $K_{ond}$  (critère d'ondulation)

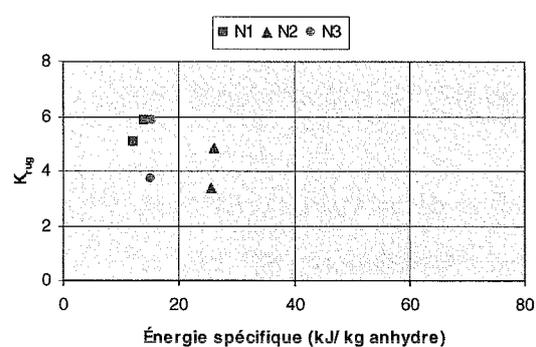


Figure IV.63 - Influence du niveau d'usinage sur le  $K_{rug}$  (critère de rugosité)

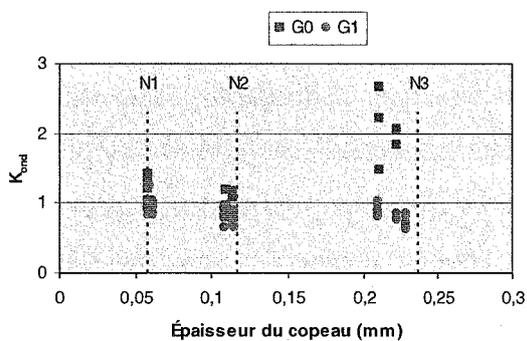


Figure IV.64 - Influence du ponçage sur le  $K_{ond}$  (critère d'ondulation)

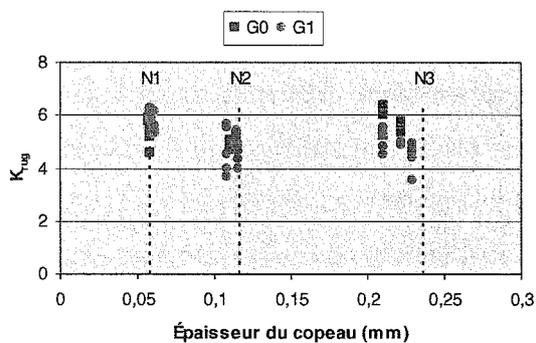


Figure IV.65 - Influence du ponçage sur le  $K_{rug}$  (critère de rugosité)

Comme dans la première série d'expériences, nous constatons sur la figure IV.59, qu'il y a une forte influence du niveau d'usinage dans le critère d'ondulation.

De la même façon, il se vérifie que la relation entre les niveaux d'usinage et le critère d'ondulation n'est pas affectée par le facteur essence.

En ce qui concerne la rugosité, par l'observation de la figure IV.60, nous pouvons constater, que celle-ci est indépendante de l'essence et du niveau d'usinage. Dans la série d'expériences précédente, la rugosité était affectée par le niveau d'usinage.

Le comportement de l'énergie consommée par unité de masse de bois usinée (figure IV.61), a eu le même comportement que dans la première série d'expériences, dans laquelle il a été présenté la justification pour ce comportement. Les figures IV.62 et IV.63 renforcent aussi cette analyse, dans lesquelles nous pouvons vérifier qu'entre le niveau 1 et le niveau 2 il existe une augmentation significative d'énergie consommée qui ne correspond à aucune modification significative de la qualité de la surface.

L'analyse de la figure IV.64 permet de vérifier que la relation entre le niveau d'usinage et le critère d'ondulation est très affectée par le facteur ponçage. Cette influence est particulièrement évidente pour le niveau 3 ce qui renforce le comportement dans la figure IV.59. Nous pouvons aussi vérifier que, après ponçage, il n'y a pas de variation du critère  $K_{\text{ond}}$  avec l'épaisseur du copeau. En effet, les marques d'ondulation sont enlevées par le ponçage.

En ce qui concerne la rugosité, et par observation de la figure IV.65, nous pouvons constater un comportement différent, c'est à dire la rugosité n'est pas dépendante du ponçage, ni affectée par le niveau d'usinage. Néanmoins, nous pouvons vérifier une légère diminution de la qualité de surface pour le niveau 1, avec la réalisation du ponçage; ce qui peut être expliqué par le bon état de la surface obtenue avant le ponçage pour ce niveau. On peut dire que pour ce niveau poncer endommage la surface. Par contre, nous vérifions l'inverse pour le niveau 3, dû au fait de l'arrachement des fibres dans ce niveau et donc la surface usinée possède une surface de moindre qualité.

Ainsi, nous en concluons que ces constats indiquent des modifications dans la nature des phénomènes considérés dans cette opération, et qu'il existe une forte dépendance de l'énergie spécifique avec le facteur essence, de façon équivalente à la série d'expériences précédente.

Sur la figure IV.66, nous pouvons observer les images, les profils de *pseudo-rugosité* et la courbe de puissance de la FFT pour les échantillons de hêtre obtenus avec les deux niveaux d'usinage considérés (éprouvettes N° 1 et 15 du tableau IV.26).

En comparant les deux images, nous observons des différences significatives pour la longueur d'onde la plus haute, normalement associée à l'ondulation. Ces constatations sont les mêmes qui ont été déjà vérifiées dans la première série d'expériences. Cette méthode permet donc d'évaluer correctement l'état de la surface. Nous obtenons, pour le niveau d'usinage N1 (vitesse de rotation élevée et faible vitesse d'avance) des valeurs en moyenne plus basses de la puissance de la FFT.

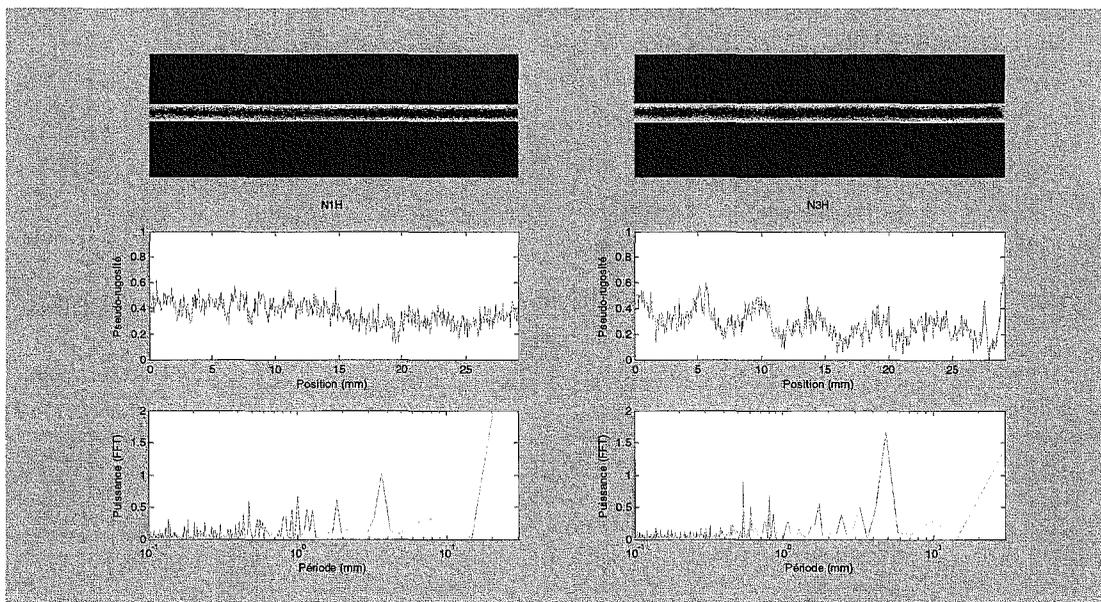


Figure IV.66 - Image de la surface, profil de *pseudo-rugosité* et courbe de puissance (FFT) pour deux éprouvettes de hêtre, obtenue avec les niveaux d'usinage N1 et N3

Sur les figures IV.67, IV.68, IV.69, IV.70, IV.71, IV.72, IV.73 et IV.74, nous pouvons observer les influences des différents niveaux des facteurs dans les critères d'évaluation objective de la rugosité ( $K_{rug}$ ,  $K_{ond}$ ,  $K_{sub}$  et la consommation d'énergie spécifique).

Cette influence a été étudiée au travers du calcul de la moyenne (figures IV.67, IV.69, IV.71, et IV.73) et de l'indice signal-bruit (figures IV.68, IV.70, IV.72 et IV.74), en considérant que pour le calcul de ce dernier il a été pris en compte la maximisation de l'objectif (le plus grand est le meilleur, voir annexe 3) pour  $K_{rug}$ ,  $K_{ond}$ ,  $K_{sub}$  et la consommation d'énergie spécifique.

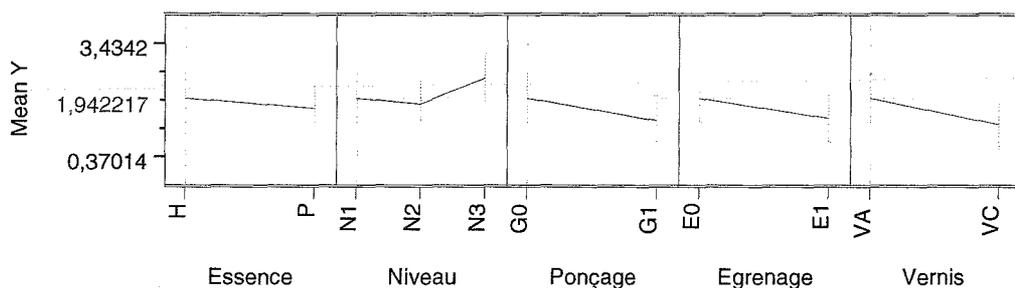


Figure IV.67 - Influence des différents niveaux des facteurs sur le critère  $K_{ond}$  (moyenne)

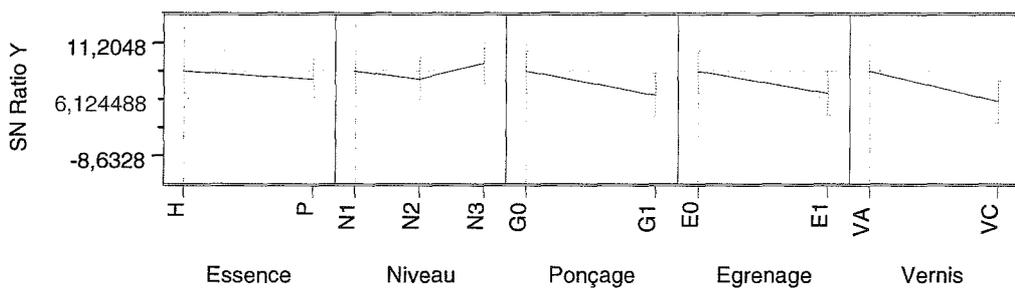


Figure IV.68 - Influence des différents niveaux des facteurs sur le critère  $K_{ond}$  (indice signal-bruit)

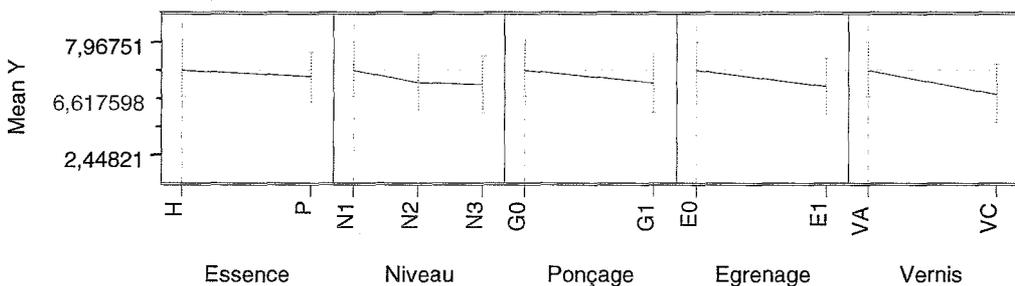


Figure IV.69 - Influence des différents niveaux des facteurs sur le critère  $K_{rug}$  (moyenne)

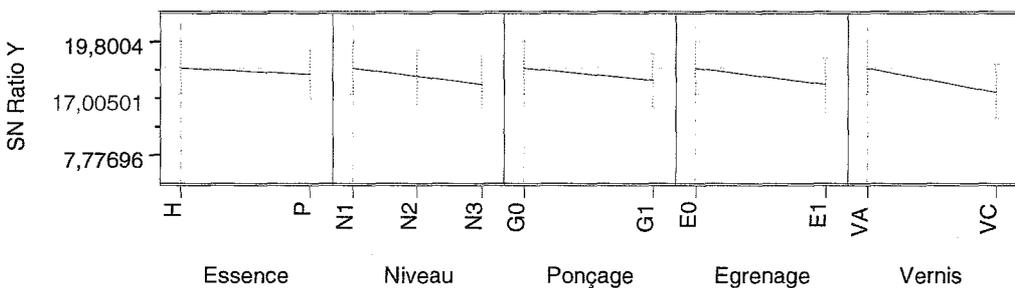


Figure IV.70 - Influence des différents niveaux des facteurs sur le critère  $K_{rug}$  (indice signal-bruit)

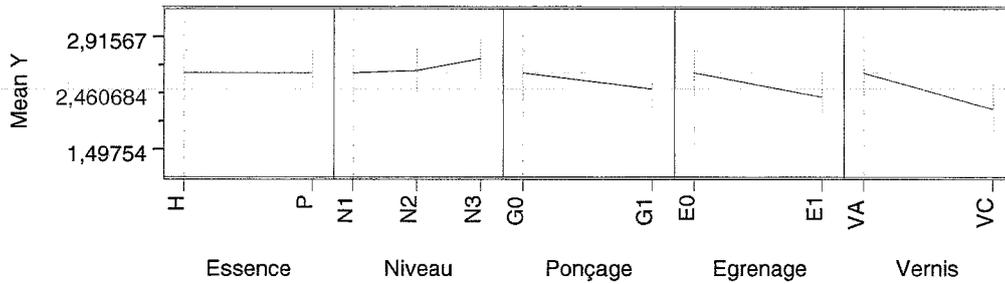


Figure IV.71 - Influence des différents niveaux des facteurs sur le critère  $K_{sub}$  (moyenne)

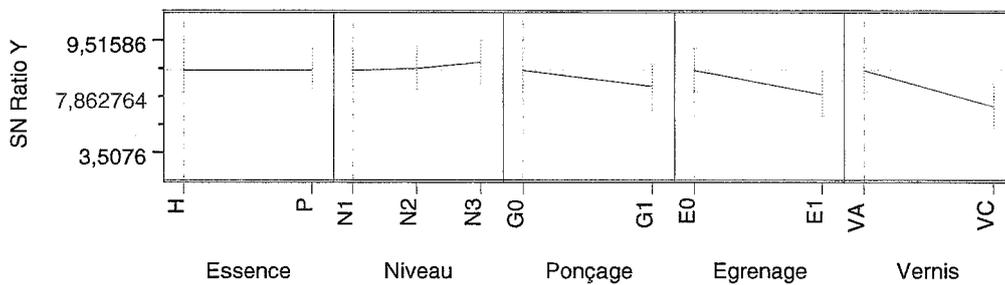


Figure IV.72 - Influence des différents niveaux des facteurs sur le critère  $K_{sub}$  (indice signal-bruit)

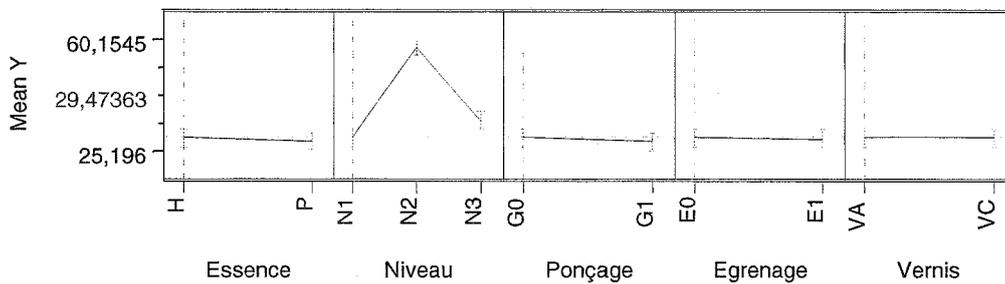


Figure IV.73 - Influence des différents niveaux des facteurs sur l'énergie spécifique consommée (moyenne)

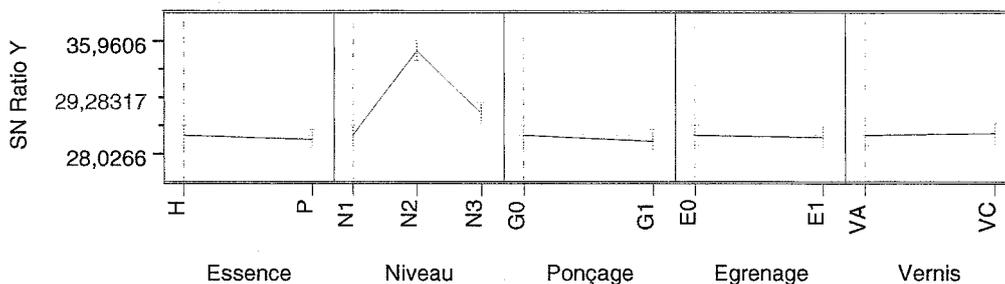


Figure IV.74 - Influence des différents niveaux des facteurs sur l'énergie spécifique consommée (indice signal-bruit)

Les tableaux IV.27 et IV.28 résument les conclusions de l'étude (seuil de signification statistique) en ce qui concerne l'influence de chacun des facteurs étudiés pour les trois critères considérés pour l'évaluation de la qualité objective de la surface et pour la consommation d'énergie spécifique.

Nous pouvons conclure en premier lieu que le choix de la moyenne du rapport signal-bruit comme variable d'étude est indifférent, car les deux tableaux sont semblables.

Nous en concluons également que pour obtenir une surface peu ondulée le plus important est la sélection du type de vernis (vernis cellulosique - VC). Nous devons également effectuer le ponçage (G1) et égrener la surface (E1). L'influence du niveau d'usinage et de l'essence du bois n'est pas significative.

Pour obtenir une surface de basse rugosité, il faut tenir en compte du choix du type de vernis (vernis cellulosique - VC). Dans ce cas, l'effet de tous les autres facteurs n'est pas significatif.

L'étude de l'influence de plusieurs facteurs sur le critère -  $K_{sub}$ , a permis de conclure que pour obtenir une surface de bonne qualité, le plus important est la sélection du type de vernis (vernis cellulosique - VC). Mais, le facteur égrenage ne doit pas être négligée (égrenage - E1). L'influence des autres facteurs n'est pas significative.

En ce qui concerne l'énergie spécifique, nous concluons que le seul facteur significatif est le niveau d'usinage. Aucun autre facteur n'est significatif.

Nous pouvons vérifier, sur la figure IV.61, que pour le niveau d'usinage 2 la consommation d'énergie spécifique est beaucoup plus élevée que pour les autres deux niveaux. Ceci se doit au fait que ce niveau d'usinage est un niveau de transition entre un niveau, où il y a surtout la coupe de fibres (niveau 1) et un autre où il y a surtout l'arrachement (niveau 3). Par contre, nous vérifions que pour ce niveau, la consommation d'énergie spécifique ne correspond à aucune modification significative de la qualité de surface.

Tableau IV.27 - Signification statistique de l'influence des facteurs pour les critères d'évaluation de la surface - moyenne (+5%, ++1%, +++0,1%)

Paramètre moyenne	Essence	Niveau	Ponçage	Égrenage	Vernis
$K_{ond}$	-	-	+	+	++
$K_{rug}$	-	-	-	-	+
$K_{sub}$	-	-	-	++	+++
Énergie spécifique	-	+++	-	-	-

Tableau IV.28 - Signification statistique de l'influence des facteurs pour les critères d'évaluation de la surface - signal-bruit (+5%, ++1%, +++0,1%)

Paramètre signal-bruit	Essence	Niveau	Ponçage	Égrenage	Vernis
$K_{ond}$	-	-	++	++	+++
$K_{rug}$	-	-	-	-	+
$K_{sub}$	-	-	-	++	+++
Énergie spécifique	-	+++	-	-	-

Nous en concluons que cette méthode permet de visualiser les différences dans la qualité de la surface pour les niveaux et les facteurs analysés.

### 3.4.2 Validation de la méthode

Comme signalée précédemment, les conditions des deux protocoles n'ont pas été exactement les mêmes (conditions des lames, conditions d'ambiance et sélection du bois).

Si nous comparons les figures IV.75 jusqu'à IV.79, résultantes de la première série d'essais (effectuée à 3 mois), avec ceux IV.59 jusqu'à IV.63 de la série actuelle et aussi par les figures IV.80, IV.81, IV.82, IV.83 et IV.84, qui représentent l'ensemble ces deux séries d'essais, nous vérifions que globalement le comportement qualitatif s'est maintenu entre les deux études. Néanmoins, il y a une évidente réduction de l'énergie spécifique pour tous les niveaux, accompagnée par une légère croissance de l'ondulation et de la rugosité. Ces constatations peuvent être justifiées par une homogénéité plus grande des planches utilisée par rapport à ceux de l'étude précédente (présence de nœuds, poches de résine, etc.), ainsi que par la différence de l'état des outils de coupe.

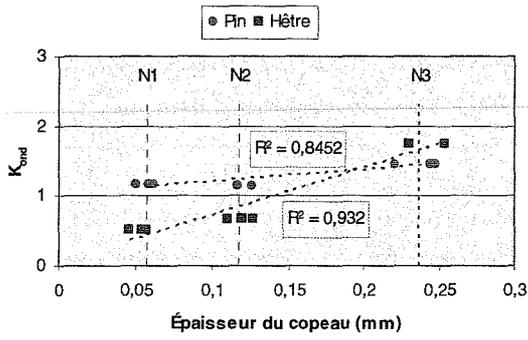


Figure IV.75 - Influence du niveau d'usinage sur le  $K_{ond}$  (critère d'ondulation)

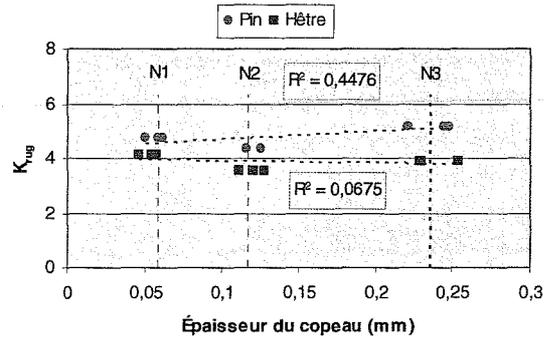


Figure IV.76 - Influence du niveau d'usinage sur le  $K_{rug}$  (critère de rugosité)

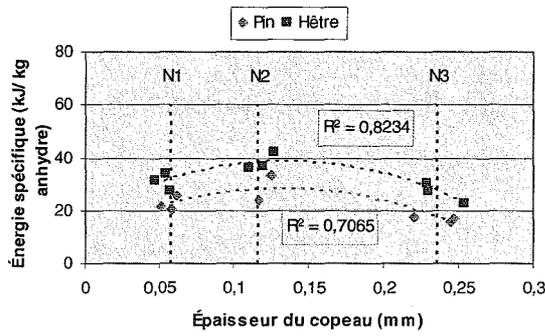


Figure IV.77 - Influence du niveau d'usinage sur l'énergie spécifique

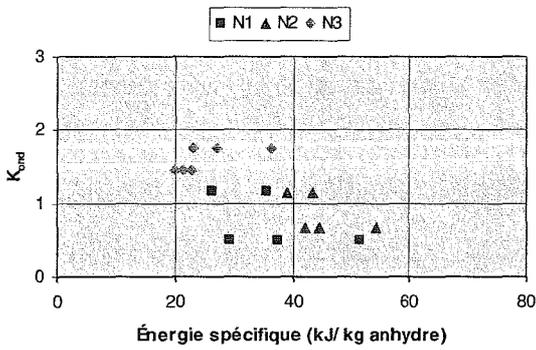


Figure IV.78 - Influence du niveau d'usinage sur le  $K_{ond}$  (critère d'ondulation)

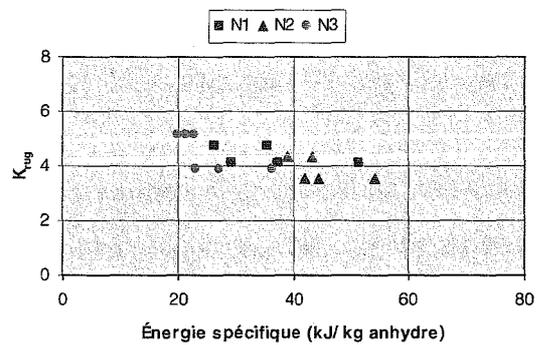


Figure IV.79 - Influence du niveau d'usinage sur le  $K_{rug}$  (critère de rugosité)

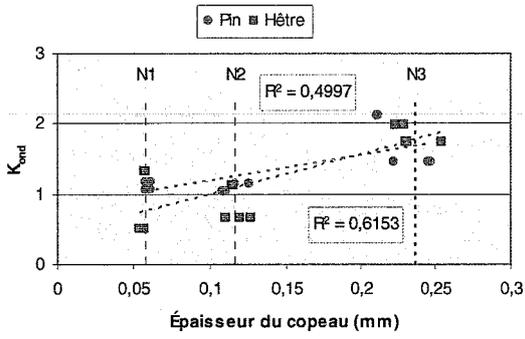


Figure IV.80 - Influence du niveau d'usure sur le  $K_{ond}$  (critère d'ondulation)

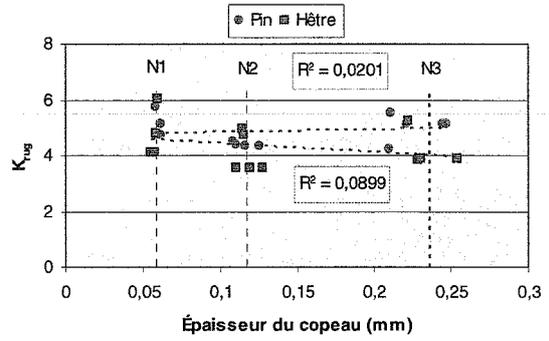


Figure IV.81 - Influence du niveau d'usure sur le  $K_{rug}$  (critère de rugosité)

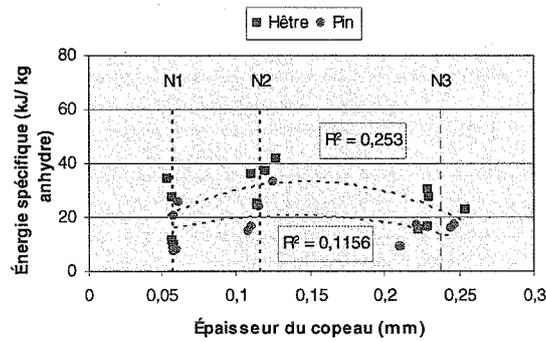


Figure IV.82 - Influence du niveau d'usure sur l'énergie spécifique

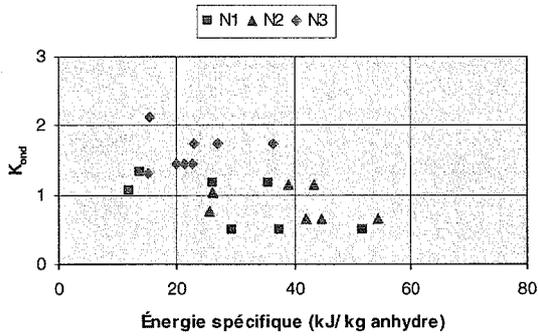


Figure IV.83 - Influence du niveau d'usure sur le  $K_{ond}$  (critère d'ondulation)

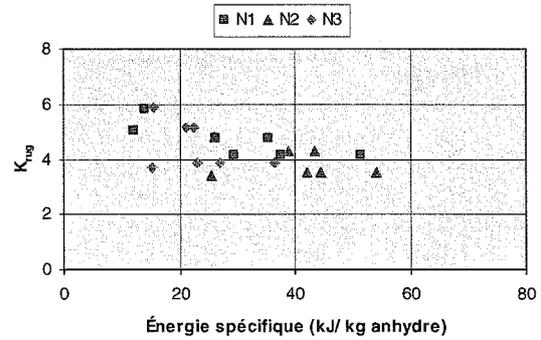


Figure IV.84 - Influence du niveau d'usure sur le  $K_{rug}$  (critère de rugosité)

### 3.4.3 Mouillabilité de la surface

Pour la mesure des angles de contact de l'eau sur le bois, nous avons utilisé le même protocole expérimental (3 éprouvettes x 3 mesures). Sur les tableaux IV.29 et IV.30, nous pouvons voir les valeurs des angles de contact réalisées un jour après l'usinage. L'acquisition des données a été faite avec une fréquence d'une demi seconde. Nous avons vérifié à nouveau sur quelques essais, que le système n'était pas capable de se stabiliser dû à des variations brusques de l'angle de contact; se produisant par exemple dans les échantillons très poreux - pin et rendant impraticable ainsi tout l'essai.

Tableau IV.29 - Moyenne des valeurs des angles de contact pour le hêtre après 1 jour

Niveau d'usinage	Angles de contact (°)									Moyenne
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
N1	68,2	69,9	58,1	67,7	55,1	69,4	59,0	46,0	46,9	<b>60,0</b>
N2	36,1	31,8	38,8	94,7	90,8	61,2	42,8	55,8	59,2	<b>56,8</b>
N3	42,4	*	31,8	83,6	89,2	89,4	61,6	60,3	57,5	<b>64,5</b>

\* non mesurable

Tableau IV.30 - Moyenne des valeurs des angles de contact pour le pin après 1 jour

Niveau d'usinage	Angles de contact (°)									Moyenne
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
N1	*	23,7	*	*	*	*	*	*	*	<b>23,7</b>
N2	*	*	*	*	*	*	33,5	*	39,1	<b>36,3</b>
N3	*	*	*	*	*	*	34,5	35,4	37,3	<b>35,7</b>

\* non mesurable

De l'analyse des valeurs moyennes de l'angle de contact (tableau IV.29 et IV.30), nous pouvons conclure que le pin a une mouillabilité plus grande que le hêtre. Nous pouvons nous en douter, probablement à cause de sa structure anatomique, sa porosité étant supérieure à celle du hêtre.

Sur la figure IV.85, nous pouvons vérifier que les plus basses valeurs de l'angle de contact correspondent, pour le pin, aux pièces usinées avec le niveau 1. Ce résultat peut être attribué

au fait que les surfaces usinées correspondantes à ce niveau ont une surface plus uniforme, avec une rugosité (coupe de fibres) sans ondulation (arrachement de fibres). Ces résultats sont en accord avec d'autres études, qui déterminent une plus grande mouillabilité avec une surface plus rugueuse (Martin *et al.*, 1998).

Pour les niveaux suivants, il se passe exactement l'inverse. Nous pouvons vérifier une diminution de la rugosité et une augmentation de l'ondulation car, pendant l'usinage, la coupe du bois est moins importante et donne lieu à de l'arrachement. Cette situation se traduit par une augmentation significative des valeurs d'angle de contact en passant du niveau 2 au niveau 3 (le pourcentage de fibres coupées transversalement diminue avec l'arrachement de fibre), et donc une diminution de la mouillabilité.

Pour le hêtre nous pouvons vérifier qu'il n'y a pas de grande variation entre les différents niveaux d'usinage. Cela semble normal étant donné la structure anatomique, notamment le fait d'être une essence plus dense et aussi plus homogène que le pin.

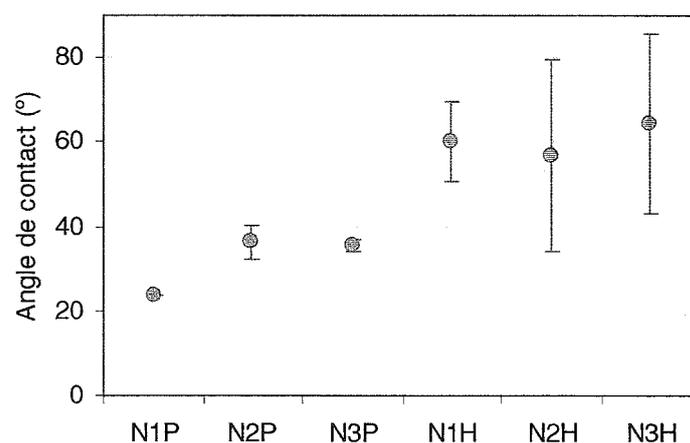


Figure IV.85 - Moyenne et écart-type de l'angle de contact pour le pin (P) et le hêtre (H) usinée avec le niveau N1, N2 et N3 (après 1 jour)

### 3.4.4 Influence du vieillissement de la surface

Pour analyser l'influence du vieillissement, des mesures d'angles de contact ont été réalisées sur des éprouvettes issues de la même planche du bois et pendant 12 jours stockées dans un environnement semblable à celui du secteur industriel (tableaux IV. 31 et IV.32).

Tableau IV.31 - Moyenne des valeurs des angles de contact pour le hêtre après 12 jours

Niveau d'usinage	Angles de contact (°)									Moyenne
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
N1	55,9	57,7	42,4	44,2	47,3	42,9	59,1	59,9	—	<b>51,2</b>
N2	37,8	42,9	39,3	41,4	34,6	29,9	45,8	70,3	48,5	<b>43,4</b>
N3	40,7	50,5	51,1	39,6	31,7	46,8	52,8	54,4	41,7	<b>45,5</b>

— erreur du système

Tableau IV.32 - Moyenne des valeurs des angles de contact pour le pin après 12 jours

Niveau d'usinage	Angles de contact (°)									Moyenne
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
N1	*	*	*	51,1	38,4	34,2	*	*	*	<b>41,3</b>
N2	*	*	*	*	17,9	*	*	*	*	<b>17,9</b>
N3	*	*	*	*	15,0	15,6	41,9	18,0	*	<b>22,6</b>

\* non mesurable

De l'analyse des valeurs moyennes de l'angle de contact (tableaux IV.31 et IV.32), nous pouvons conclure, comme dans la figure IV.86, que pour le pin, la mouillabilité est plus grande par rapport au hêtre. Cependant, nous observons aussi que les différences sont moins marquées, comparé aux mesures faites après 1 jour.

Avec la figure IV.86, où il est représenté la moyenne des angles de contact et le respectif intervalle de confiance ( $\pm$  un écart type), nous pouvons constater qu'il y a eu pour tous les niveaux d'usinage et pour toutes les essences, une diminution de l'angle de contact et du respectif intervalle de confiance, à l'exception du pin usiné avec le niveau 1. Cette diminution, peut être justifiée par les conditions d'ambiance, avec des températures élevées (été très chaud), faisant diminuer le taux d'humidité dans les éprouvettes (0,200 m x 0,08 m x 0,015 m) dont les échantillons (0,06 m x 0,02 m x 0,015 m) ont été réalisés pour faire l'analyse. Au moment de l'essai nous avons vérifié un mouillage supérieur, à cause d'une surface plus sèche. Le facteur humidité affecte beaucoup la mouillabilité, mais la modification de la surface provoquée par le vieillissement (oxydation, migration d'extractives) est aussi importante.

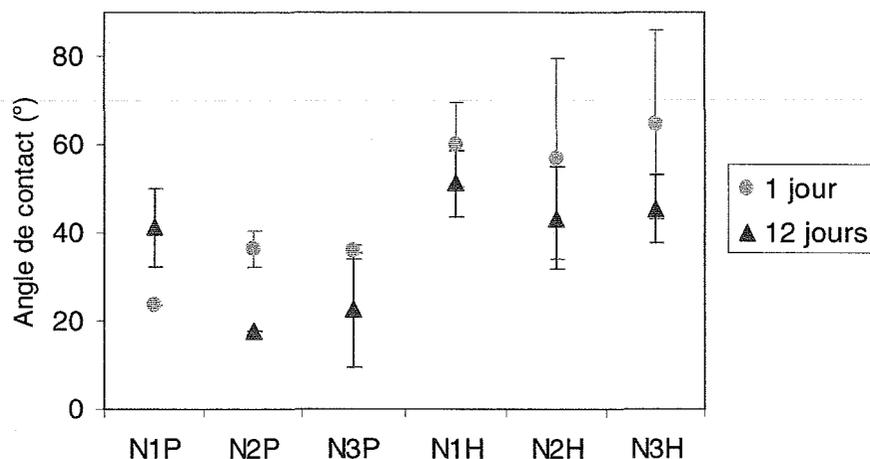


Figure IV.86 - Moyenne et écart-type de l'angle de contact pour le pin (P) et le hêtre (H) usinée avec le niveau N1, N2 et N3 (après 1 et 12 jours)

Pour compléter cette étude sur le vieillissement de la surface, nous avons utilisé aussi les valeurs moyennes de l'angle de contact obtenues dans la série d'expériences précédente (tableaux IV.18 et IV.19), après 88 jours, dans les mêmes conditions de détermination. De l'analyse de ces valeurs moyennes de l'angle de contact, nous pouvons conclure, comme dans la figure IV.87, que pour le hêtre, la variation à 88 jours est semblable à celle après 12 jours, à l'exception du niveau 1, qui augmentée, prend la valeur pour la mesure après 1 jour.

Pour le pin, il y a une importante augmentation des angles de contact, par rapport aux deux autres essais (1 et 12 jours), et on peut dire qu'il prend des valeurs proches des valeurs obtenues pour le hêtre après 1 jour. Nous pouvons le justifier selon Marian et Stumbo (1962b), Gray (1962) et Herczeg (1965), qui ont montré que la mouillabilité diminue avec l'âge de la surface. Le vieillissement est la source d'une diminution de la tension superficielle de la surface. Ceci est dû à la perte de résistance des fibres à la surface, engendrée par la relaxation des chaînes macromoléculaires (cellulose), (dont l'arrangement serait perturbé à l'issue de l'usinage) et à la migration d'extractibles apolaires vers la surface, comme d'autres modifications chimiques de la surface (Stumbo, 1964).

Ainsi, nous pouvons conclure que le vieillissement de la surface usinée du pin se traduit par une forte diminution de la mouillabilité.

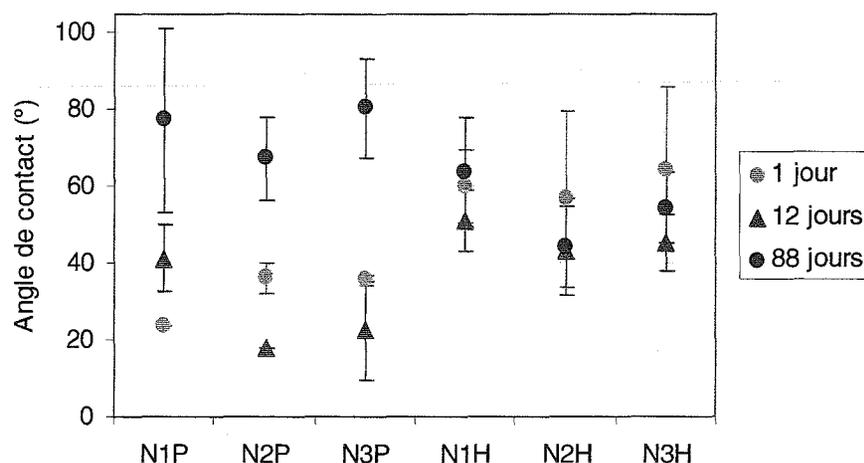


Figure IV.87 - Moyenne et écart-type de l'angle de contact pour le pin (P) et le hêtre (H) usinée avec le niveau N1, N2 et N3 (après 1, 12 et 88 jours)

### 3.4.5 Brillance spéculaire de la surface

Les essais ont été effectués avec un angle d'incidence de  $60^\circ$ . Pour obtenir une valeur de la brillance représentative de toute l'éprouvette, nous avons réalisé six mesures dans des endroits différentes et nous avons calculé la moyenne sur un total de 108 mesures.

Dans le tableau IV.33, en observant les résultats des essais de chaque éprouvette, nous pouvons vérifier qu'il existe une différence significative entre les pièces soumises à l'égrenage (E1) et ceux qui n'ont pas été soumises à cette opération (E0), confirmée à travers un test *t*-Student à 5% ( $t_{obs} = -5,664$ ;  $t_{0,025, 3} = 3,182$ ) réalisé pour les échantillons obtenus avec le vernis aqueux (VA). Le contraire se réalise avec le vernis cellulosique (VC), avec lequel il n'existe pas de différence significative, confirmée également, à travers un test *t*-Student à 5% ( $t_{obs} = 0,084$ ;  $t_{0,025, 4} = 2,776$ ).

Tableau IV.33 - Moyenne des valeurs de la brillance spéculaire avec et sans égrenage

Moyenne de la brillance (60°)			
Éprouvettes	Égrenage (E0)	Éprouvettes	Égrenage (E1)
PN1G1VA	15,5	PN1G1VA	31,7
PN3G0VA	14,3	PN2G0VA	24,3
PN3G0VA	15,8	HN1G1VA	31,3
HN2G1VA	15,8	HN2G0VA	23,7
HN3G0VA	15,4	PN2G0VC	9,7
PN1G0VC	9,5	PN3G1VC	9,6
PN2G1VC	9	HN1G0VC	9,4
HN1G0VC	8,9	HN3G1VC	9,2
HN2G1VC	10,1	HN3G1VC	9,1

Cette différence significative pour le vernis aqueux, entre les pièces égrenées (E1) et les non égrenées (E0), se doit au fait que ce produit, pendant son séchage, provoque le peluchage, produisant une surface rugueuse au toucher. De ce fait, cela rend obligatoire l'égrenage pour ce type de vernis, cela n'arrivant pas avec le vernis cellulosique (résines de nitrocellulose).

Dans ce cas, les conclusions sont les mêmes que pour la série d'expériences précédente. Nous pouvons vérifier à travers l'analyse des résultats regroupés par produit (figure IV.88), qu'il existe des différences significatives, et que le vernis aqueux (VA) produit une finition plus brillante.

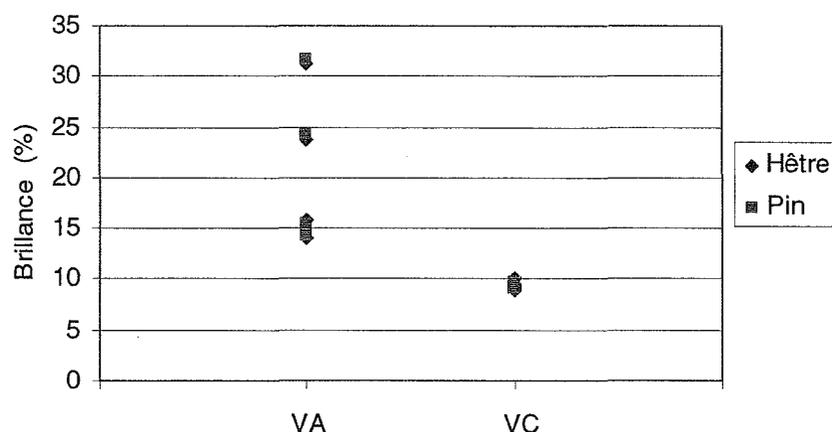


Figure IV.88 - Influence du type de vernis dans la brillance de la surface du bois du pin et de hêtre

### 3.5 Caractérisation subjective de la surface

La fiche d'enquête utilisée pour l'évaluation subjective de la surface a été la même que celle de la série d'expériences précédente (tableau III.8 du chapitre III).

Cette évaluation subjective a été réalisée sur 18 éprouvettes, avec une population de 25 observateurs, réparti en 6 experts et des personnes ayant un peu d'expérience dans le domaine du bois (élèves du Cours Génie du Bois).

Les résultats de cette enquête ont été traités numériquement en appliquant la même méthodologie utilisé dans la série d'expériences précédente. À chaque classement il a été attribuée une valeur numérique : 1-Bonne; 2-Acceptable; 3-Mauvaise. Les valeurs numériques ont été converties pour les résultats de l'enquête en calculant la moyenne.

Nous avons conclu à travers l'étude précédente, que, parmi les plusieurs critères étudiés pour l'évaluation objective de la qualité de la surface, il en existe deux ( $K_{ond}$  et  $K_{rug}$ ) pour lesquelles il se trouve une bonne corrélation avec les opérations d'usinage. Le paramètre s'approchant le plus de l'évaluation subjective est le paramètre  $K_{sub}$ .

Dans ce cas, les conclusions sont les mêmes que pour la série d'expériences précédente. Dans la figure IV.89, nous pouvons vérifier qu'il n'existe pas de distinction entre l'évaluation faite par les experts et celui réalisé par les personnes avec une certaine expérience dans le domaine du bois (élèves). La même constatation a été observée dans l'étude précédente.

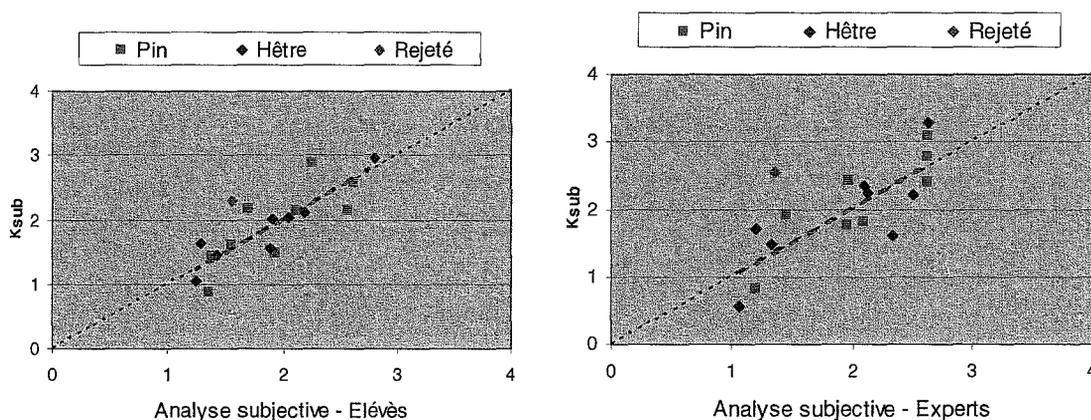


Figure IV.89 - Évaluation subjective de la surface par les experts et les élèves

Sur les tableaux IV.34 et IV.35, nous pouvons observer les résultats des essais des éprouvettes de hêtre et de pin respectivement. Nous pouvons vérifier qu'il n'existe pas de différence significative entre les pièces soumises à la caractérisation objective ( $K_{sub}$ ) en utilisant le système de vision et la caractérisation subjective visuelle et tactile, effectuée par le panel d'observateurs (V+T), confirmée à travers un test  $t$ -Student à 5% réalisé pour les échantillons de hêtre ( $t_{obs}=0,0008$ ;  $t_{0,025, 6}=39,0108$ ) et par les échantillons de pin ( $t_{obs}=0,0123$ ;  $t_{0,025, 7}=11,0109$ ).

Tableau IV.34 - Caractérisation objective ( $K_{sub}$ ) et subjective (V+T) pour le hêtre

Moyenne de l'analyse			
N°	Éprouvettes	Objective ( $K_{sub}$ )	Subjective (V+T)
1	HN1G0E1VC	1,42	1,24
2	HN1G1E1VA*	2,29	1,56
3	HN1G0E0VC	2,32	2,21
4	HN2G1E0VC	1,57	2,15
5	HN2G0E1VA	2,42	2,41
6	HN2G1E0VA	2,28	2,26
7	HN3G1E1VC	1,69	1,02
8	HN3G0E0VA	3,52	3,42
9	HN3G1E1VC	0,13	0,90

\* Éprouvette non considéré

Tableau IV.35 - Caractérisation objective ( $K_{sub}$ ) et subjective (V+T) pour le pin

Moyenne de l'analyse			
N°	Éprouvettes	Objective ( $K_{sub}$ )	Subjective (V+T)
1	PN1G1E1VA	1,68	1,38
2	PN1G0E0VC	1,54	2,08
3	PN1G1E0VA	2,36	3,06
4	PN2G0E1VC	1,48	1,37
5	PN2G0E1VA	2,37	1,73
6	PN2G1E0VC	2,34	2,52
7	PN3G0E0VA	3,29	2,74
8	PN3G0E0VA	2,88	3,12
9	PN3G1E1VC	0,05	1,08

Sur la figure IV.90, nous présentons la relation entre le critère objectif ( $K_{sub}$ ) et subjectif ( $V+T$ ) d'évaluation de la surface.

Dans cette même figure, nous pouvons vérifier qu'il y a un point en dehors de la ligne de tendance (avec la couleur verte), pour le cas du hêtre. Après une analyse en détail de cette éprouvette, nous avons constaté qu'il s'agit d'une éprouvette finie avec un aspect plastifié (éprouvette N° 2 du tableau IV.34).

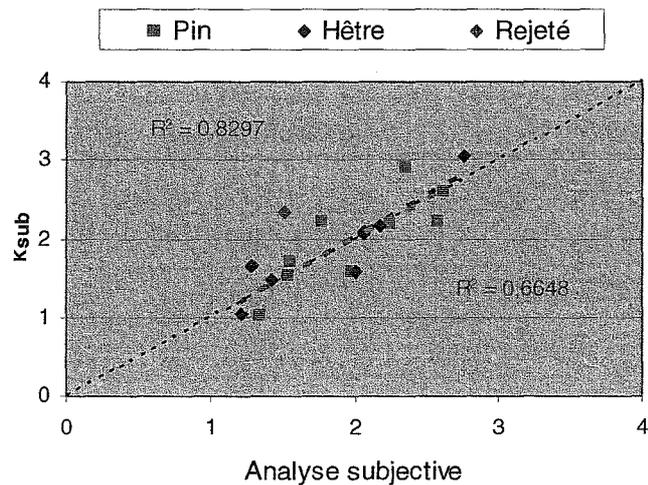


Figure IV.90 - Corrélation entre le critère objectif ( $K_{sub}$ ) et subjectif d'évaluation de la surface

Nous pouvons expliquer cette différence par le fait que cette éprouvette avait un aspect très brillant (spéculaire) comme cela peut être vérifié sur le tableau IV.33. En plus, dans l'analyse objective, le critère d'ondulation ( $k_{ond}$ ) obtenu après usinage, était très élevé (voir tableau A1.1 de l'annexe 1), cela indiquait une éprouvette avec une surface très ondulée par rapport aux autres éprouvettes, ce fait pourrait être à l'origine de la valeur très élevée de la brillance spéculaire.

Dans le cas du pin, l'éprouvette obtenue dans les mêmes conditions d'usinage et de finition a un brillance aussi élevée, mais le critère  $k_{ond}$  n'était pas très différent par rapport aux autres éprouvettes. Cela peut être attribué au fait que le contraste entre le produit de finition et la couleur de la surface de bois de pin est plus petit, en comparaison au hêtre.

Il s'agit peut-être d'une interférence de la couleur dans le résultat du système de vision. Par contre, dans l'analyse subjective, la couleur ne semble pas avoir d'influence dans la forme quand les observateurs évaluent la surface. En conclusion, nous avons décidé de ne pas

considérer cette éprouvette du hêtre pour comparer les deux méthodes (objective et subjective).

Ainsi, nous pouvons conclure qu'il existe une bonne corrélation entre le critère  $K_{sub}$  utilisé pour la caractérisation objective et la caractérisation subjective, pour les deux essences, ce qui est en accord avec les conclusions obtenues dans l'étude précédente.

Nous avons aussi analysé les valeurs des coefficients de corrélation obtenues entre l'évaluation du système de vision ( $K_{sub}$ ) et l'évaluation faite par chacun des observateurs considérés.

La figure IV.91 montre, qu'il y a des bons coefficients de corrélation pour tous les observateurs sauf pour deux (élève 2 et 18, représentés avec la couleur verte).

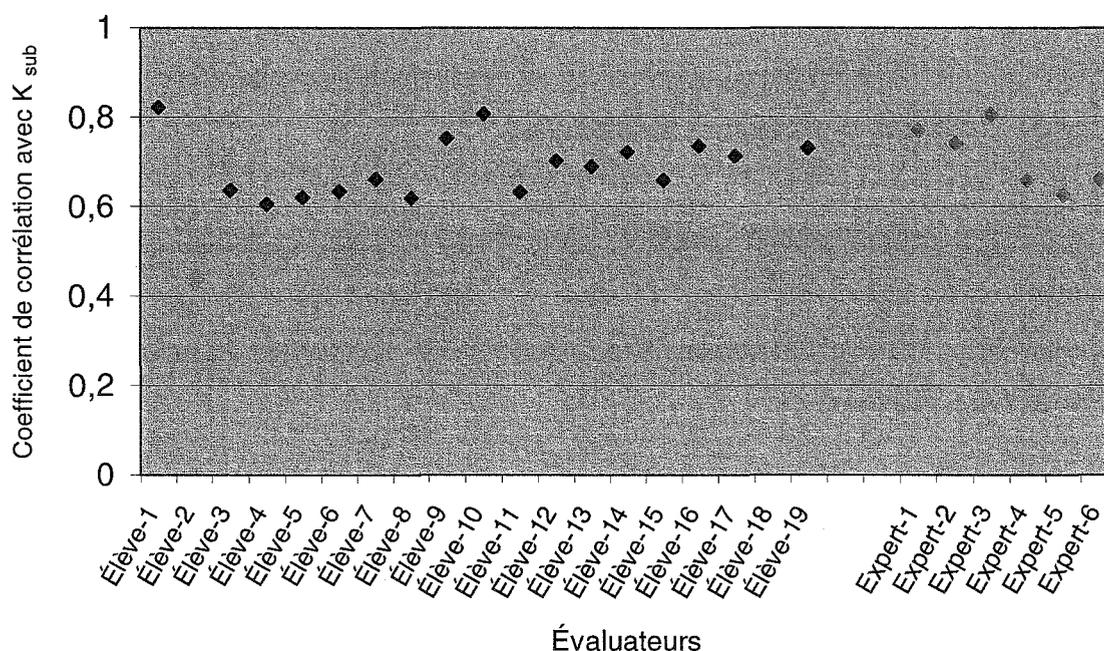


Figure IV.91 - Coefficient de corrélation entre le critère objectif ( $K_{sub}$ ) et l'évaluation subjective de la surface pour chaque observateur

À travers cette étude, comme il est arrivé dans l'étude précédent, nous avons conclu que le critère  $K_{sub}$  est meilleur que les critères considérés précédemment dans l'évaluation objective de la surface ( $K_{ond}$  et  $K_{rug}$ ).

### 3.6 Conclusions

Pour une meilleure compréhension des effets des paramètres clefs d'usinage du bois dans la qualité d'une finition, 5 facteurs (essence, niveau d'usinage, grain du ponçage, égrenage et vernis) ont été considérés à deux et à trois niveaux.

L'étude du procédé d'usinage a permis de conclure que la méthode utilisée a une reproductibilité suffisamment acceptable, soit au niveau de la puissance électrique consommée, soit au niveau du travail mécanique développé. Une autre conclusion importante de cette étude, est que la puissance électrique consommée peut être considérée comme une mesure effective de la puissance mécanique consommée.

Nous avons conclu également que l'épaisseur de copeau est un bon indicateur de la rugosité superficielle pour différentes conditions/niveaux d'usinage, puisqu'il intègre les principaux paramètres qui interviennent dans le procédé et qui démontrent avoir un effet clair tant sur la puissance de coupe que sur la rugosité superficielle.

Parmi les trois niveaux d'usinage considérés, le niveau 2 est celui qui exige une plus grande consommation d'énergie spécifique, et qui ne correspond pas à aucune modification significative de la qualité de la surface. Donc, pour obtenir une qualité de surface acceptable, nous devons éviter ce choix.

Pour la quantification de l'état de surface nous avons utilisé un système de vision artificielle pour la détermination de la *pseudo-rugosité* des surfaces de bois, et trois critères d'évaluation ont été utilisés: le critère d'ondulation ( $K_{ond}$ ), le critère de rugosité ( $K_{rug}$ ) et un critère d'évaluation subjective ( $K_{sub}$ ).

Nous avons conclu que, pour obtenir une surface peu ondulée, le plus important est la sélection du type de vernis (vernis cellulosique - VC). En plus, nous devons effectuer le ponçage (G1) et également égrener la surface (E1). L'influence du niveau d'usinage et de l'essence du bois n'est pas significative.

Pour l'obtention d'une surface avec basse rugosité, seule le choix du type de vernis (vernis cellulosique - VC) a une influence significative.

L'étude de l'influence de plusieurs facteurs sur le critère -  $K_{sub}$ , a permis de conclure que pour obtenir une surface de bonne qualité, le plus important est la sélection du type de vernis (vernis cellulosique - VC). Le facteur égrenage ne doit pas être négligé (égrenage - E1), mais l'influence des autres facteurs n'est pas significative.

Parmi les critères étudiés pour l'évaluation objective de la qualité de la surface, il existe deux critères ( $K_{ond}$  et  $K_{rug}$ ) pour lesquelles une bonne corrélation est obtenue avec les opérations d'usinage. Le paramètre pour l'évaluation subjective est le critère  $K_{sub}$ .

Pour le critère  $K_{sub}$ , nous avons obtenu une bonne corrélation entre les valeurs pour différents types d'usinage/ finition et la qualité de la surface perceptible par les utilisateurs (panel d'observateurs). Ainsi, les résultats confirment les conclusions de l'étude antérieure: ce critère pourra être utilisé comme le seul critère pour l'évaluation de tout le procédé.

Nous pouvons conclure que cette méthode permet de visualiser les différences dans la qualité de la surface pour les niveaux et les facteurs analysés.

Nous pouvons dire qu'un des objectifs de ce travail, a été atteint: vérifier si aux différences trouvées dans la caractérisation objective correspondaient des différences en ce qui concerne la qualité visuelle et tactile des surfaces.

Un autre objectif était de vérifier si les relations entre ces critères ( $K_{ond}$ ,  $K_{rug}$  et  $K_{sub}$ ) et les paramètres étudiés dans l'usinage étaient cohérents: cela a été réalisé, ce qui, en substance, permettra la construction de modèles de prévision de la qualité de la surface finale, valable pour chacune des étapes de production.



## **Conclusion Générale et Perspectives**



## Conclusion Générale et Perspectives

Pour une meilleure compréhension des effets des paramètres clefs d'usinage du bois dans la qualité d'une finition, 5 facteurs (essence, niveau d'usinage, grain du ponçage, égrenage et vernis) ont été considérés à deux et à trois niveaux.

L'étude du procédé d'usinage a permis de conclure que la méthode utilisée a une reproductibilité suffisamment acceptable, soit au niveau de la puissance électrique absorbée, soit au niveau du travail mécanique développé. Une autre conclusion de cette étude est que la puissance électrique absorbée est une mesure effective de la puissance mécanique absorbée (variation de la quantité de mouvement).

Nous avons considéré trois niveaux d'usinage : niveau 1 (vitesse d'avance de 6,5 m/min et vitesse de rotation de 6000 trs/min (50 Hz)), niveau 2 (vitesse d'avance de 11 m/min et vitesse de rotation de 5040 trs/min (42 Hz)) et le niveau 3 (vitesse d'avance de 18 m/min et vitesse de rotation de 4080 trs/min (34 Hz)). Nous avons vérifié que pour ces niveaux d'usinage l'épaisseur de copeau est un bon indicateur de la rugosité, puisqu'il intègre les principaux paramètres qui interviennent dans le procédé et qui ont un effet important tant sur la puissance de coupe que sur la rugosité. Le niveau 2 est celui qui exige une consommation maximale d'énergie spécifique, à laquelle aucune modification significative de la qualité de la surface ne correspond. Il faut donc éviter son utilisation.

Pour la quantification de l'état de surface, nous avons utilisé un système de vision artificielle pour la détermination de la *pseudo-rugosité* des surfaces de bois. Après le traitement des profils obtenus à partir des images de la surface, par une méthode de filtrage basée sur l'utilisation de la FFT (Transformée Rapide de Fourier), plusieurs critères d'évaluation de la surface ont été déduits. Obtenus après le traitement des profils, trois critères d'évaluation ont été utilisés: le critère d'ondulation ( $K_{\text{ond}}$ ), le critère de rugosité ( $K_{\text{rug}}$ ) et un critère d'évaluation subjective ( $K_{\text{sub}}$ ). Parmi les critères étudiés pour l'évaluation objective de la qualité de la surface, le critère d'ondulation ( $K_{\text{ond}}$ ) et le critère de rugosité ( $K_{\text{rug}}$ ) ont donné de bonnes corrélations avec les opérations d'usinage. Pour l'évaluation subjective, le paramètre  $K_{\text{sub}}$  est le plus adéquat.

Une fois trouvée une forte corrélation entre ce paramètre et la qualité de la surface perceptible par les utilisateurs potentiels, ce critère pourra éventuellement être utilisé comme le seul critère pour l'évaluation de tout le procédé.

Les résultats obtenus indiquent que la méthodologie utilisée permet de distinguer les différences dans la qualité de la surface pour les niveaux et les facteurs analysés.

Nous pouvons dire qu'un des objectifs de ce travail a été atteint en ce qui concerne l'hypothèse que les différences trouvées dans la caractérisation objective correspondent à des différences de qualité visuelle et tactile des surfaces.

Un autre objectif a été de vérifier si les relations entre les critères ( $K_{\text{ond}}$ ,  $K_{\text{rug}}$  et  $K_{\text{sub}}$ ) et les paramètres étudiés dans l'usinage étaient cohérentes. Ce point a été vérifié, ce qui va permettre la construction de modèles de prévision de la qualité de la surface finale valables pour chacune des étapes de la production. Ces modèles de prévision seront employés afin d'élaborer une liste de recommandations qualitatives et quantitatives qui permettent les meilleures pratiques opératoires et une meilleure conception de l'équipement utilisé.

De l'étude de l'influence des paramètres dans la qualité de surface, il ressort que, pour l'obtention d'une bonne finition sur du pin ou du hêtre, nous devons usiner (corroyeuse avec six arbres) avec le niveau 1, c'est à dire, avec une vitesse d'avance de 6,5 m/min, une vitesse de rotation de 6000 trs/min (50 Hz) et une profondeur de coupe de 1 mm, ce qui correspond à une épaisseur moyenne de copeau de 0,05 mm. C'est un niveau où l'énergie absorbée est minimale et qui correspond à un état optimal de la surface : l'ondulation n'est pas visible et pour cette raison il n'est pas nécessaire de poncer la surface. Donc, il est possible d'éliminer cette opération de la séquence opératoire habituelle effectuée par les entreprises, et réalisée fréquemment sans contrôle, c'est à dire quelque soit l'état de la surface usinée.

Finalement l'application d'un vernis cellulosique, permet d'éliminer encore une autre opération - l'égrenage. Dans le cas de l'application d'un vernis aqueux, l'égrenage sera nécessaire à cause du peluchage issu du séchage de la première couche de vernis appliqué.

On peut synthétiser qu'il faut, usiner avec le **niveau 1** et une finition avec un **vernis cellulosique** (deux couches), pour l'obtention d'une bonne surface finie de pin ou de hêtre.

Il est important de faire ressortir que l'élimination des opérations de ponçage et d'égrenage dans les séquences opératoires habituellement pratiquées par les entreprises pourra apporter une bonne contribution pour l'environnement direct de travail des opérateurs. La diminution des déchets (poussières), résultant de ces opérations, peut également avoir un impact environnemental positif.

Les résultats issus de cette étude peuvent finalement être utiles pour l'optimisation des opérations industrielles engagées dès l'usinage jusqu'à la finition d'un produit bois. En outre, ils peuvent avoir un grand impact en termes pratiques par rapport à l'approche empirique des choix types de systèmes produit de finition/usinage utilisables dans l'industrie, du fait de l'absence d'un support scientifique et technologique.



---

## *Bibliographie*



## Bibliographie

- AFNOR, 1991 - Recueil de Normes Françaises : Contrôle de la Qualité des Produits Alimentaires: Analyse Sensorielle, (4<sup>e</sup> ed.). Paris: AFNOR.
- Aguilera, A. et P. Martin, 2001- Machining qualification of solid wood of *Fagus silvática* L. and *Picea excelsa* L.: cutting forces, power requirements and surface roughness, *Holz Roh-Werks.*, 59(6), p. 483.
- Andrade, J. D., D. E. Gregonis et L. M. Smith, 1985 - Polymer surface dynamics. Surface and Interfacial Aspects of Biomedical Polymers, Vol. 1. Surface Chemistry and Physics. Plenum Press, New York, p. 282-283.
- Anonyme, 2002 - Surface profile filtering, (<http://www.predev.com/smg/filtering.htm> accédé en 30 juin de 2005), Precision Devices Inc.
- ASME B46.1, 1995 - Surface Texture (Surface Roughness, Waviness, and Lay)
- ASTM, 1996 - ASTM Manual 26: Sensory Testing Methods (2<sup>e</sup> ed.). Edgar Chambers IV et Mona Baker Wolf (Ed.), Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- ASTM, 1997a - Standard Practice E679-91, Standard Practice for Determination of Odor and Taste Thresholds By a Forced-Choice Ascending Concentration Series Method of Limits, Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- ASTM, 1997b - Standard Practice E1432-91, Standard Practice for Defining and Calculating Individual and Group Sensory Thresholds from Forced-Choice Data Sets of Intermediate Sizes. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- Banks W. B. et J. M. Lawther, 1994 - Chapitre 7, Derivatization of wood in composites. Ed Gilbert R. D Cellulosic polymer, blends and composites, Hanser publishers, New York.
- Berg, J. C. 1993 - Chapitre 2, Role of acid-base interactions in wetting and related phenomena. Wettability. Ed. J. C. Berg. Marcel Dekker, New York, p. 75-148.
- Bi, J. et D. Ennis, 1998a - Sensory Thresholds: Concepts and Methods. *Journal of Sensory Studies*, 13, p. 133-148.
- Bogner, A., 1991 - Improving Adhesive Quality by Modification of Wood Surface, *Holz als Roh-und Werkstoff*, 49, p. 271-275.
- Bourre, Jean-Marie, 1993 - Comida inteligente. A diética do cérebro V, Grávida. Lisboa.

- Brinkmann, S., H. Bodschwinn, et H. W. Lemke, 2000 - Development of a robust Gaussian regression filter for three-dimensional surface analysis. Proceedings of the 10th International Colloquium on surfaces. 31 January-1 February, Chemnitz, Germany.
- Brinkmann, S., H. Bodschwinn, et H. W. Lemke, 2001 - Accessing roughness in three-dimensions using Gaussian regression filtering. *Int. J. Machine Tools Manufacture*, 41(13), p. 2153-61.
- Carrano, A. L., 2000 - Characterisation of Wood Surface Preparation, PhD. Thesis. North Carolina State University.
- Carrano, A. L., J. B. Taylor, R. E. Young, R. L. Lemaster et D. E. Saloni, 2004 - Fuzzy knowledge-based modeling and statistical regression in abrasive wood machining, *Forest Prod. J.*, 54(5), p. 66-72.
- Chardin, A. et J. Froidure, 1968 - Étude de l'usure des dents de scie. Introduction. Centre Techniques Forestier Tropical.
- Chehimi, M. M., 1999 - Harnessing acid-base interactions to improve adhesion. *Adhesion Promotion Techniques: Technological Applications*. Eds. K.L. Mittal and A. Pizzi. Marcel Dekker, New York, p. 27-82.
- Christie, J. S., 1986 - Evaluation of the attribute of appearance called gloss. *CIE Journal* 5, p. 41-56.
- Coelho, C. M., L. Carvalho, J. Martins, C. Costa, D. Masson et P-J. Méausoone, 2004 - Influência da maquinação da madeira sobre as características objectivas e sobre a percepção subjectiva do aspecto de um acabamento, 1º Congresso Ibérico sobre a Madeira na Construção, Universidade do Minho, 25-27 mars, p. 85-94.
- Coelho, C. M., L. Carvalho, J. Martins, C. Costa, D. Masson et P-J. Méausoone, 2005a - Estudo dos Efeitos dos Parâmetros de Maquinação da Madeira nas Características Objectivas e Percepção Subjectiva de um Acabamento, 5º Congresso Florestal Nacional sobre a Floresta e as Gentes, Instituto Superior Politécnico de Viseu, 16-19 mai, CD-Rom.
- Coelho, C. M., L. Carvalho, J. Martins, C. Costa, D. Masson et P-J. Méausoone, 2005b - A novel method for evaluating the influence of wood machining conditions on the quality of a finished surface, Proceedings of the 17th International Wood Machining Seminar, Rosenheim, Alemanha, 26-28 septembre, p. 272-286.

- Costell, E. et L. Duran, 1981 - El análisis sensorial en el control de calidad de los alimentos III. Planificación, selección de jueces y diseño estadístico, *Rev. Agroquímica Tecnología de Alimentos*.
- Costell, E., M. Pastor, L. Izquierdo et L. Durán, 1994 - Comparison of Simplified Methods for Evaluation of Sensory Thresholds of Added Substances. *Journal of Sensory Studies*, 9, p. 365-382.
- Côté, W., 1983 - Wood as a substrate for coatings, *J. of Coating Technology*, Vol. 55, N° 699.
- Coulomb, C. A., 1785 - Mémoires de mathématiques et de Physique de l'Académie Royale des Sciences.
- CTBA, 1999 - Comment Bien Usiner le Bois.
- Czepluch, W., 1976 - Zusammenhänge zwischen binokularer Betrachtungsweise und visuellem Glanzeindruck. *Lichttechnik*, 28, p. 6-18.
- DeVries, W. R. et R. L. Lemaster, 1991 - Processing methods and potential applications of wood surface roughness analysis. Proceedings of the 10th International Wood Machining Seminar, University of California Forest Products Laboratory, Richmond, CA, 21-23 octobre, p. 276-292.
- Ehlers, W., 1958 - Quality determination of wood surfaces, *Holz Roh - Werkstoff*, 16(2), p. 49-60.
- Elias, M. et M. Menu, 2000 - Experimental characterization of a random metallic rough surface by spectrophotometric measurements in the visible range. *Optics communications*, 180, p. 191-198.
- English, B., J. A. Youngquist et A. M. Krzysik, 1994 - Chapitre 6: Lignocellulosic Composites. Ed. Gilbert R. D. cellulose polymer, blends and composites, Hanser publishers, New York, p. 115-130.
- Esteban, L. G., A. Guindeo Casaus, C. Peraza Oramas et P. De Palácios, 2003 - La madera y su anatomía, Al. Mundi-Prensa Libros, S.A.
- Eyma, Florent, 2002 - Caractérisation des efforts de coupe de différentes essences de bois à l'aide de leurs paramètres mécaniques Thèse de Docteur en Sciences du bois à l'Université de Nancy I.
- Faust, T. D. et J. T. Rice, 1986 - Characterizing the Roughness of Southern Pine Veneer Surfaces, *Forest Prod. J.*, 37(11/12), p. 75-81.
- Figueiredo, M. A. V. et A. A. Fernandes, 1996 - O Método de Taguchi no Planeamento e Análise de Operações de Soldadura. *INGENIUM*, 11, p. 79-85.

- Filosa, B., 1995 - Brillant-Mat-Voile. Double liaison 478 (Physique, chimie et économie des peintures et adhésifs), p. 88-90.
- Fujiwara, Y., A. Ishii, Y. Sawada, 1999 - Novel Filtering Methods of Evaluating Surface Roughness of Wood. Evaluation Based on Tactile Roughness and 3D Measurement of Surface Roughness, Proceedings of the 14th International Wood Machining Seminar, France, 12-19 septembre.
- Fujiwara, Y., Y. Fujii, Y. Sawada et S. Okumura, 2001 - Development of a parameter to reflect the roughness of a wood surface that corresponds to tactile roughness, Holz Roh-Werks, 59(5), p. 351-355.
- Fujiwara, Y., Y. Fujii, Y. Sawada et S. Okumura, 2004 - Assessment of wood surface roughness: comparison of tactile roughness and three-dimensional parameters derived using a robust Gaussian regression filter, J. Wood Sci., 50(1), p. 35-40.
- Funck, J.W., J. B. Forrer, D. A. Butler, C. C. Brunner et A. G. Maristany, 1992 - Measuring Surface Roughness on Wood: A Comparison of Laser Scatter and Stylus Tracing Approaches, SPIE. Vol. 1821, p. 173-184.
- Gonçalves, MTT., R. Rodrigues et JSI. Takahashi, 1997 - An experimental analysis of the influences of machining conditions on the parallel cutting force in orthogonal cutting for ten Brazilian wood species. 13th International Wood Machining Seminar.
- González-Viñas, M. Salvador et P. Martín-Alvarez, 1998 - Comparison of Two Simple Methods for the Measurement of Detection Thresholds for Basic, Umami and Metallic Tastes. Journal of Sensory Studies, 13, p. 299-314.
- Good, R. J., 1993 - Contact angle, wetting, and adhesion: a critical review. Contact Angle, Wettability and Adhesion. Ed. K.L. Mittal. VSP, Utrecht, The Netherlands, p. 3-36.
- Gray, V. R., 1962 - The wettability of wood. Forest Prod. J. 12 (9), p. 452-461.
- Gross, P., G. Duchanois, P. Eisen et P. Triboulot, 1996 - Contrôle qualité et états de surface bois, TOPOSURF® & TOPOVISE®, outils complémentaires de mesure des qualités de surface, 4<sup>ème</sup> Colloque Sciences du Bois et Industries du Bois, Nancy, 11-13 septembre.
- Guimarães, R. C. et J. A. S. Cabral, 1997 - Estatística, Mc Graw-Hill, Lisboa.
- Gurau, L., H. D. Mansfield-Williams et M. A. Irle, 2001 - A comparison of Laser Triangulation and Stylus Scanning for measuring the Roughness of Sanded Wood Surfaces. Proceedings of the 5th International Conference on the Development of Wood Science, Wood Technology and Forestry, Ljubliana, Slovenia, 5-7 septembre.

- Gurau, L., H. D. Mansfield-Williams et M. A. Irle, 2002 - An Analysis of Wood Surface Roughness Data. Proceedings of the 13th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood. University of California, Berkeley Campus, California, USA, 19-21 août.
- Gurau, L., H. D. Mansfield-Williams et M. A. Irle, 2005 - Processing roughness of sanded wood surfaces, *Holz Roh-Werks*, 63(1), p. 43-52.
- Harrington, J. J., 1998 - MicroFibril Angle in Wood. *Ed B.G Butterfield*, IAWA/IUFRO, New Zealand.
- Heisel, U., et H. Krondorfer, 1995a - Surface method for vibration analysis in peripheral milling of solid wood, Proceedings of the 12th International Wood Machining Seminar, Kyoto, Japan.
- Heisel, U., et H. Krondorfer, 1995b - Messtechnik für Massivholzoberflächen - Messen der kinematischen Rauheit von umfangfräsbearbeiteten Oberflächen bei Massivholzern. *HOB Holzbearbeitung*, 5, p. 207-210.
- Herczeg, A., 1965 - Wettability of wood. *Forest Prod. J.* 15(11), p. 499-505.
- Hiziroglu, S., 1996 - Surface Roughness Analysis of Wood Composites: A Stylus Method, *Forest Prod. J.*, 46(7/8), p. 67-72.
- Hora de Carvalho, L., 1990 - Caractérisation Physico-Chimique de la Surface du Chêne Pedonculé, Thèse DEA Sciences du Bois, UHP-Nancy 1.
- Huifen, Li, Xaingqian Jiang et Zhu Li, 2004 - Study on and improvement of the robust performance of Gaussian filtering. *Precision Engineering*, 28, p. 186-193.
- Hunter, A., 1996 - Experimental Design. Naes, T. et E. Risvik (Eds.), *Multivariate Analysis of Data in Sensory Science*, Amsterdam, Elsevier, p. 37-69.
- IFT, 1981 - Institute of Food Technologists, American Society for Testing and Materials.
- ISO 11056, 1999 - Analyse sensorielle - Méthodologie - Méthode d'estimation de la grandeur.
- ISO 11562, 1996 - Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface Texture: Profile Method - Metrological Characteristics of Phase Correct Filters. British Standards Institute, London.
- ISO 13565-1, 1996 - Geometrical product specifications (GPS) - Surface texture. Profile method. Surfaces having stratified functional properties. Part 1: Filtering and general measurement conditions. British Standards Institute, London.

- ISO 13565-2, 1996 - Geometrical product specifications (GPS) - Surface texture. Profile method. Surfaces having stratified functional properties. Part 2: Height characterisation using the linear material ratio curve. British Standards Institute, London.
- ISO 13565-3, 2000 - Geometrical product specification (GPS) - Profile method. Surfaces having stratified functional properties. British Standards Institute, London.
- ISO 4121, 2003 - Analyse sensorielle - Lignes directrices pour l'utilisation d'échelles de réponses quantitatives.
- ISO 4287, 1997 - Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture. Profile method. Terms, definitions and surface texture parameters.
- ISO 4287-1, 1984 - Surface roughness - Terminology - Part 1: Surface and its parameters.
- ISO 5492, 1992 - Analyse sensorielle - Vocabulaire.
- ISO 5495, 1983 - Analyse sensorielle - Méthodologie - Essai de comparaison par paires.
- ISO 6658, 1985 - Analyse sensorielle - Méthodologie - Guide général.
- ISO/NP TS 16610-31- 2004 - Geometrical product specification (GPS) - Filtration Part 31: Robust profile filters. Gaussian regression filters. En préparation. International Standards Organisation.
- Jensen, W. B., 1991 - Overview Lecture. The Lewis acid-base concepts: recent results and prospects for the future. In: Acid-base interactions: Relevance to adhesion science and technology. Eds. K. L. Mittal and H. R. Anderson, Jr. VSP, Utrecht, The Netherlands.
- Jiang, XQ., L. Blunt et K.J. Stout, 2000 - Development of a lifting wavelet representation for characterization of surface topography. Proc. R. Soc. Lond. A., London, 456, p. 2283-313.
- JMP, The Statistical Discovery Software, version 5, SAS Institute Inc.
- Jodin, P., 1994 - Défauts de forme et états de surface. Le bois Matériau d'Ingénierie, A.R.BO.LOR, p. 334.
- Johnson, R. E. et R. Dettre, 1969 - Wettability and contact angles. Surface Colloid Sci. 2, p. 85-153.
- Johnson, R. E. Jr. et R. H. Dettre, 1993 - Wetting of low-energy surfaces. Wettability. Ed. J. C. Berg. Marcel Dekker, New York.
- Jordan, D. L. et J. D. Wellons, 1977 - Wettability of dipterocarp veneers. Wood Sci. 10(1), p. 22-27.

- Kang, J. et M. Hadfield, 2001 - Parameter optimization by Taguchi methods for finishing advanced ceramic balls using a novel eccentric lapping machine. *Proceedings Instn. Mech. Engrs*, 215 Part B, p. 69-78.
- Kivimaa, 1950 - *Cutting in wood working*, Helsinki.
- Koch, P., 1964 - *Wood Machining Process*. Cambridge, Ronald press.
- Kollmann, F. F. P. et W. A. Jr. Côté, 1984 - *Principles of wood science and technology*. Springer Series in Wood Science, I, New York, USA, p. 592.
- Krisch, J. et C. Csiha, 1999 - *Analysing Wood Surface Roughness Using an S3P Perthometer and Computer Based Data Processing*, *Proceedings 13th Sesja Naukowa Badania dla Meblarstwa*, Poznan.
- Kumar, R., P. Kulashekar, B. Dhanasekar et B. Ramamoorthy, 2005 - Application of digital image magnification for surface roughness evaluation using machine vision, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 45(1), p. 228-234.
- Lavery, D. J., D. Mc. Larnon, J. M. Taylor, S. Moloney et A. Atanackovic, 1995 - Parameters Affecting the Surface Finish of Planed Sitka Spruce, *Forest Prod. J.*, 45(4), p. 45-50.
- Lawless, H. et H. Heymann, 1999 - *Sensory Evaluation of Food: Principles and Practices*, Maryland, USA: Aspen Publishers.
- Lee, L.-H., 1991 - Ed. *Fundamentals of Adhesion*. Plenum Press, New York.
- Lemaster, R. L. et J. B. Taylor, 1999 - High Speed Surface Assessment of Wood and Wood-Based Composites, *Proceedings of the 14th Wood Machining Seminar*, France, 12-19 septembre, p. 479-488.
- Lemaster, R. L., 1995 - The use of an optical profilometer to monitor product quality in wood and wood-based products, *Proceedings of the Sanding and Sawing Seminar*, 21-22 septembre, Portland, OR, Charlotte NC, 14-15 novembre, Ed. By John Bradfield, Forest Products Society, Madison, WI, p. 33-42.
- Lemaster, R. L., 1997 - Hardwood Machining R&D: Surface Quality and Process Monitoring Technologies, *Proceedings of the Eastern Hardwood Resource, Technologies and Markets Conference*, 21-23 Avril, Camp Hill, Pennsylvania, Forest Products Society, Madison, WI, p. 109-120.
- Lemaster, R. L., M. K. Jouaneh et S. M. Yoo, 1985 - Determining products quality with optical scanners. *Proceedings of the 8th Wood Machining Seminar*, University of California Forest Products Laboratory, octobre, p. 311-324.

- Léonard de Vinci et M. Amontons - Définition du frottement, définition des surfaces, Encyclopedia Universalis.
- Lepetit, H., P. Triboulot et P. Martin, 1990 - Caractérisation de qualité de surface bois par analyse d'images, 3<sup>ème</sup> Colloque Sciences et Industries du Bois, Bordeaux, mai.
- Li, H., X. Jiang et Z. Li, 2002 - Gaussian-based robust filtering for estimating engineering surfaces. *J. Huazhong Univ. Sci. Technol.*, 30(8), p. 43-5.
- Li, H., X. Jiang et Z. Li, 2004 - Robust estimation in Gaussian filtering for engineering surface characterization. *Precision Engineering*, 28, p. 186-193.
- Liptáková, E. et J. Kúdela, 1994 - Analysis of the Wood-Wetting Process. *Holzforschung* 48(2), p. 139-144.
- Lloyd, D. R., T. C. Ward et H. P. Schreiber, 1989 - Inverse gas chromatography: Characterization of polymers and other materials. ACS Symposium Series 391, American Chemical Society, Washington, DC.
- Lundberg, I. A. S. et B. Porankiewicz, 1995 - Studies of Non Contact Methods for Roughness Measurements on Wood Surfaces, *Holz Roh-Werks*, 53, p. 309-314.
- Magross, E. et G. Sitkei, 1999 - Influence of Wood Structure on the Surface Roughness at Milling Operations, Proceedings of the 4th ICWSF, Missenden Abbey, UK.
- Marian, J. E. et D. A. Stumbo, 1962a - Adhesion in Wood Part I. Physical Factors, *Holzforschung*, 16, p. 134-148.
- Marian, J. E. et D. A. Stumbo, 1962b - Adhesion in Wood. Part II. Physico-chemical surface phenomena and the thermodynamic approach to adhesion. *Holzforschung*, 16(6), p. 168-180.
- Martin, P., 1983 - Mécanique du Bois. Le Matériau Bois: propriétés, technologie, mise en oeuvre, Albe, A.R.BO.LOR, p. B1-11.
- Martin, P., et C. Sales, 1994 - Processus de coupe. Le bois Matériau d'Ingénierie in A.R.BO.LOR, p. 289-309.
- Martin, S. et Manfred, D., 1998 - Measurement of Contact Angles on Wood, *Holzforshung*, 52(1), p. 89-94.
- Masters, I., A. R. Khoei et D. T. Gethin, 1999 - The Application of Taguchi Methods to the Aluminium Recycling Process. 4th ASM International Conference on the Recycling of Metals. Vienna.
- Mat, 2005 - Site officiel de Matlab - [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com).

- Mathia, T., 1983 - Mise en oeuvre du matériau: États de surface. École d'hivers sur le bois, janvier.
- McCamy, C. S., 1996 - Observation and measurement of the appearance of metallic materials. Part I. Macro Appearance. Col. Res. and Appl., 21, p. 292-304.
- McCamy, C. S., 1998 - Observation and measurement of the appearance of metallic materials. Part II. Micro appearance. Col. Res. and Appl., 23, p. 362-373.
- McKenzie W., 1961 - Fundamental Analysis of the Wood Cutting Process. Dept. of Wood Tech., School of Natural Resources, University of Michigan, Ann Arbor.
- McKenzie W., 1993 - Wood is easy to cut - or is it?. 11th International Wood Machining Seminar.
- Meilgaard, M., G. Civille et B. Carr, 1987a - Sensory Evaluation Techniques, Vol. 1, Boca Raton, Florida: CRC Press.
- Meilgaard, M., G. Civillie et B. Carr, 1987b - Sensory Evaluation Techniques, Vol. 2. Boca Raton, Florida: CRC Press.
- Mignot, J., 1983 - Analyse microtopographique des surfaces, Université de Franche Comté. IUT de Belfort.
- Mittal, K. L. et H. R. Jr., Anderson, Eds. 1991 - Acid-base interactions: Relevance to adhesion science and technology. VSP, Utrecht, the Netherlands.
- Mittal, K. L., Ed. 1993 - Contact Angle, Wettability and Adhesion: Festschrift in honor of Professor Robert J. Good. VSP, Utrecht, the Netherlands.
- Moitie, E., 1998 - Détermination des paramètres permettant d'obtenir une finition optimale, Thèse DEA Sciences du Bois, UHP-Nancy 1.
- Mothe, F., 1985 - Essai de comparaison de 3 méthodes de classement de surface bois massif pour leur rugosité; méthodes pneumatique et sensorielle, Annales des Sciences Forestières, 42 (4), p. 435-452.
- Mothe, F., 1988 - Aptitude au déroulage du bois de douglas. Conséquences de l'hétérogénéité du bois sur la qualité des placages. Thèse.
- Movassaghi, E., 1985 - Influence des paramètres microdensitométriques du bois sur les efforts de coupe et la qualité des placages de Douglas et de Châtaignier obtenus par déroulage, Thèse de Docteur - Ingénieur, INPL, p. 181.
- Mukhersee, P. S. et K. G. Satyanarayana, 1986 - An empirical evaluation of structure-property relationships in natural fibres and their fracture behaviour. J. Mater. Sci., 21, p. 4162-4168.

- Negri, M., 1997 - Relationship between power measurement and some properties of different wood species. 13th International Wood Machining Seminar.
- Neilson, A., V. Ferguson et D. Kendall, 1988 - Profile Methods: Flavor Profile and Profile Attribute Analysis. Moskowitz, H. (Ed.), Applied Sensory Analysis of Food, Boca Raton, Florida: CRC Press, Vol. I, p. 21-41.
- Neumann, A. W. et R. J. Good, 1979 - Chapter 2. Techniques of measuring contact angles. Surface and Colloid Science. Vol. II. Eds. R. J. Good and R. R Stromberg. Plenum Press, New York, p. 47-51.
- NF E 05 015, 1982 - États de surface des produits. Prescriptions, généralités, terminologie, définitions, AFNOR, France.
- Nguyen, T. et W. E. Johns, 1979 - The effect of aging and extraction on the surface free energy of Douglas Fir and Redwood. Wood Sci. Technol., 13, p. 29-40.
- NP 614, 1973 - Madeiras. Determinação do teor em água.
- NP 616, 1973 - Madeiras. Determinação da massa volúmica.
- NP EN ISO 2431, 1998 - Tintas e vernizes. Avaliação da viscosidade aparente pela determinação do tempo de escoamento (ISO 2431, 1993, incluindo Corrigenda Técnica 1, 1994).
- NP EN ISO 2813, 2001 - Tintas e vernizes. Determinação do brilho especular de revestimentos por pintura não-metálicos a 20°, 60° e 85°.
- NP ISO 2811-1, 1999 - Tintas e vernizes. Determinação da massa volúmica.
- O'Mahony, M., 1988 - Sensory Difference and Preference Testing: The Use of Signal Detection Measures. Moskowitz, H. (Ed.), Applied Sensory Analysis of Food, Boca Raton, Florida: CRC Press, Vol. I, p. 145-175.
- O'Mahony, M., 1992 - Understanding Discrimination Tests: a User-Friendly Treatment of Response Bias, Rating and Ranking R-Index Tests and Their Relationship to Signal Detection, Journal of Sensory Studies, 7, p. 1-47.
- Oss, C. J. van, 1994 - Interfacial forces in aqueous media. Marcel Dekker, New York.
- Oss, C. J. van, R. F. Giese, Z. Li, K. Murphy, J. Norris, M. K. Chaudhury et R. J. Good, 1992 - Determination of contact angles and pore sizes of porous media by column and thin layer wicking, J. Adhesion Sci. Technol., 6(4), p. 413-428.
- Pavithran, C., P. S. Mukherjee, M. Brahmakumar et A. D. Damodaran, 1987 - Impact properties of natural fiber composites, J. Mater. Sci. Letters, 6, p. 882-884.

- Peters, CC. et A. Mergen, 1971 - Measuring wood surface smoothness: a proposed method. *Forest Prod. J.*, 21(7), p. 28–30.
- Peters, CC. et JD. Cumming, 1970 - Measuring wood surface smoothness, *Forest Prod. J.*, 20(12), p. 40–43.
- Peynaud, E. et J. Blouin, 1997 - *O Gosto do Vinho*. Lisboa: Litexa Editora.
- Pohl, P., 1999 - Pressure of the gauging point of a contact profilographometer exerted on wood surface, *Proceedings of the 2 Medzinárodná Vedecká Konferencia*, Nitra, Slovensko, 8-9 octobre.
- Rabinowicz, E., 1965 - *Friction and wear of materials*, John Wiley and sons, inc, New York.
- Raja, J., B. Muralikrishnan et S. Fu, 2002 - Recent advances in separation of roughness, waviness and form, *Precision Eng.*, 5274, p. 1-14.
- Riegel, A., 1993 - Quality measurement in surface technologies. *Proceedings of the International Conference on Woodworking Technologies*, Ligna, Hannover.
- Riout, J., 1985 - Les états de surface, *CETIM- note technique*, N°18, décembre.
- Ross, P. J., 1991 - *Aplicações das Técnicas de Taguchi na Engenharia da Qualidade*. McGraw-Hill, Inc.
- Rosumek, O., 1983 - Pin maritime pour contreplaqués: étude de mouillabilité, *Diplôme d'Etude Approfondies en Sciences du Bois*, Université de Nancy I.
- Rowell, R. M., R. A. Young et J. K. Rowell, 1997- *Paper and composites from agro-based resources*. Ed Rowell R. M., Lewis publishers, Boca Raton, USA.
- Roy, R. K., 2001 - *Design of Experiments using the Taguchi Approach - 16 Steps to Product and Process Improvement*. John Wiley & Sons, Inc.
- Sadoh, T. - Relationships between sensory and physical evaluations of wood surface roughness, *Bulletin of the Kyoto Univer. forsets*, N° 49.
- Sandak, J. et C. Tanaka, 2003 - Evaluation of surface smoothness by laser displacement sensor 1: effect of wood species, *J. Wood Sci.*, 49(4), p. 305-311.
- Schadoffsky, O., 2000 - *Topographiebewertung zur Proze-beurteilung beim Fräsen und Schleifen von Massivholz*. Doctoral thesis. Technische Universität Braunschweig, IWF. Vulkan-Verlag, Essen, ISBN 3-8027-8652-1.
- Scheffé, H., 1952 - An Analysis of Variance for Paired Comparisons. *Journal of the American Statistical Association*, 47, p. 381.
- Schmaltz, G., 1936 - *Technisme oberflachankn ods. (connaissance technique des surfaces)*, Springer Berlin.

- Sève, R., 1993 - Problems connected with the concept of gloss. *Col. Res. and Appl.* 18, p. 241-252.
- Sève, R., 1996 - *De l'apparence colorée à la technique colorimétrique*. Masson, Paris.
- Sheldon, Q. S. et J. G. Douglas, 2001 - Dynamic Adhesive Wettability of Wood, *Wood and Fiber Science*, 33(1), p. 58-68.
- Stone, H. et L. Sidel, 1999 - *Sensory Evaluation Practices*, San Diego: Academic Press.
- Stumbo, D. A., 1964 - Influence of surface aging prior to gluing on bond strength of Douglas-fir and redwood, *Forest Prod. J.*, 14, p. 582-589.
- Taylor, J. B., A. L. Carrano et R. L. Lemaster, 1999 - Quantification of Process Parameters in a Wood Sanding Operation, *Forest Prod. J.*, 49(5), p. 41-46.
- Thibaut, B., 1988 - *Le processus de coupe du bois par déroulage*, Thèse de Doctoral d'État.
- Thomas C. E., 1984 - *Étude bibliographique des facteurs influençant les efforts de coupe dans l'usinage du matériau bois*. Diplôme d'études approfondies.
- Triboulot, P. et A. Zerizer, 1991 - *Travail préparatoire pour la thèse - Contribution à l'étude d'usinabilité du MDF*, ESSTIB.
- Triboulot, P., 1984 - *Réflexion sur les surfaces et mesures des états de surfaces du bois*, *Annales des Sciences Forestière*, 41 (3), p. 335-354.
- Triboulot, P., P. Kremer, P. Martin et J. M. Leban, 1991 - Planing of Norway Spruce with Very Varied Ring Width, *Holz Roh-Werks*, 49, p. 181-184.
- Usenius, A., 1975 - Surface smoothness measurement of sawn timber. *Paperi ja Puu*, 4, p. 321-326.
- Vavra, T. G., 1997 - *Improving Your Measurement of Customer Satisfaction: A Guide to Creating, Conducting, Analysing and Reporting Customer Satisfaction Measurement Programs*. Milwaukee, Wisconsin: ASQ Quality Press.
- Wenzel, R. N., 1936 - Resistance of solid surfaces to wetting by water, *Ind. And Eng. Chem.*, 28 (8), p. 988.
- Westkämper, E. et A. Riegel, 1993 - Qualitätskriterien für Geschliffene Massivholzoberflächen, *Holz als Roh-und Werkstoff*, 51, p. 121-125.
- Westkämper, E. et O. Schadoffsky, 1995a - *Oberflächentopographie von Massivholz. Einflüsse und Verfahren bei der Me-technischen Erfassung und Bewertung von Holzoberflächen*, Teil 1. *HOB.* 3, p. 74-78.

- Westkämper, E. et O. Schadoffsky, 1995b - Oberflächentopographie von Massivholz. Einflüsse und Verfahren bei der Me-technischen Erfassung und Bewertung von Holzoberflächen, Teil 2. HOB. 4, p. 50-54.
- Wieloch, G. et P. Pohl, 1999 - Computer Programmes Supporting. Surface Roughness Measuring by Profilographometer for Wood and Wood Products. Proceedings of the 50 Rokov Vysokoškolského Drevarskeho Studia Medzinarodna Konferencia.
- Williams, R. S., M. T. Knaebe et W. C. Feist, 1996 - Finishes for exterior wood: selection, application, and maintenance, Forest Products Society, Madison, WI.
- Zerizer, A., 1991 - Contribution à l'étude d'usinabilité du MDF, Thèse en Sciences du bois à l'Université de Nancy I.



## *Annexes*



## Annexe 1 - Procédé d'usinage et acquisition de données

Les essais ayant permis d'aboutir à ce graphique ont été réalisés par Mr Kivimaa (1950).

Le graphique suivant montre le cas du hêtre pour un copeau de 0.2 mm d'épaisseur. Il a pu être établi grâce aux résultats des essais vus dans la figure A1.1.

Ce tableau permet donc de quantifier, par l'intermédiaire du coefficient  $K_h$ , l'influence de l'humidité sur l'effort de coupe.

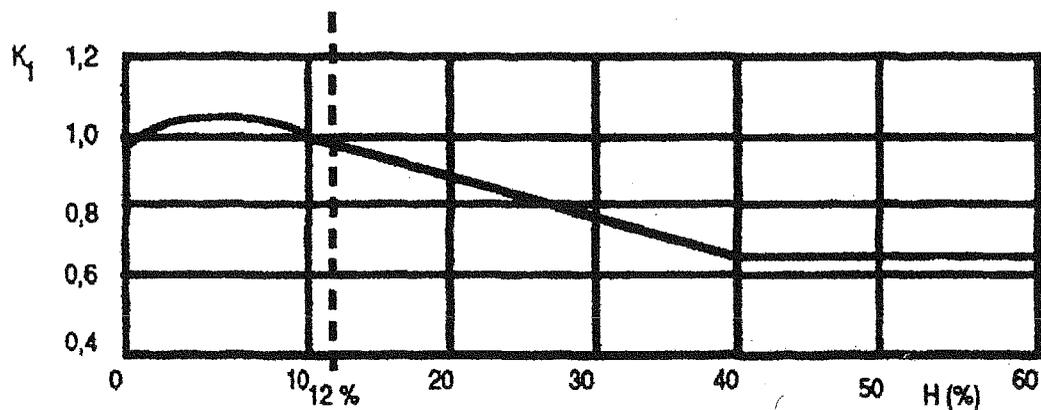


Figure A1.1 - Détermination du coefficient d'humidité  $K_h$

## Effet de l'humidité sur les propriétés mécaniques du bois et donc influence sur l'effort de coupe

Cette figure nous montre les variations des propriétés mécaniques (élastiques) du bois en fonction du pourcentage d'humidité (selon Mr P. Koch, 1964).

Ratio of Strength Properties of Air-Dry Wood at 12 Percent Moisture Content to Green Wood

Strength Property	Hardwood Ratio $S_{12}/S_g$	Softwood Ratio $S_{12}/S_g$	Average Percent Change in Strength with 1 Percent Change in Moisture Content
<b>STATIC BENDING:</b>			
Fiber stress at proportional limit	1.80	1.81	5
Modulus of rupture	1.59	1.61	4
Modulus of elasticity	1.31	1.28	2
Work to proportional limit	2.49	2.56	8
Work to maximum load	1.05	1.13	0.5
<b>IMPACT BENDING:</b>			
Fiber stress at proportional limit	1.44	1.39	3
Work to proportional limit	1.68	1.59	4
Height of hammer drop causing complete failure	0.89	1.03	0.5
<b>COMPRESSION PARALLEL TO GRAIN:</b>			
Fiber stress at proportional limit	1.74	1.86	5
Maximum crushing strength	1.95	1.97	6
<b>COMPRESSION PERPENDICULAR TO GRAIN:</b>			
Fiber stress at proportional limit	1.84	1.96	5.5
<b>TENSION PERPENDICULAR TO GRAIN:</b>			
Maximum tensile strength	1.20	1.23	1.5
<b>SHEAR PARALLEL TO GRAIN:</b>			
Maximum shear strength	1.43	1.37	3
<b>HARDNESS:</b>			
End	1.55	1.67	4
Side	1.33	1.40	2.5

Figure A1.2 - Variations des propriétés mécaniques (élastiques) du bois en fonction du pourcentage d'humidité

$S_{12}$  - infradensité à 12% d'humidité

$S_g$  - infradensité dans les conditions vertes

### Influence de la température sur les efforts de coupe $F_c$

Les essais ayant permis d'aboutir à ce graphique ont été réalisés par Mr Kivimaa (1950). Le graphique suivant montre le cas du bouleau (Bétula) à 80% d'humidité, avec une infradensité à 12% de 0.78.

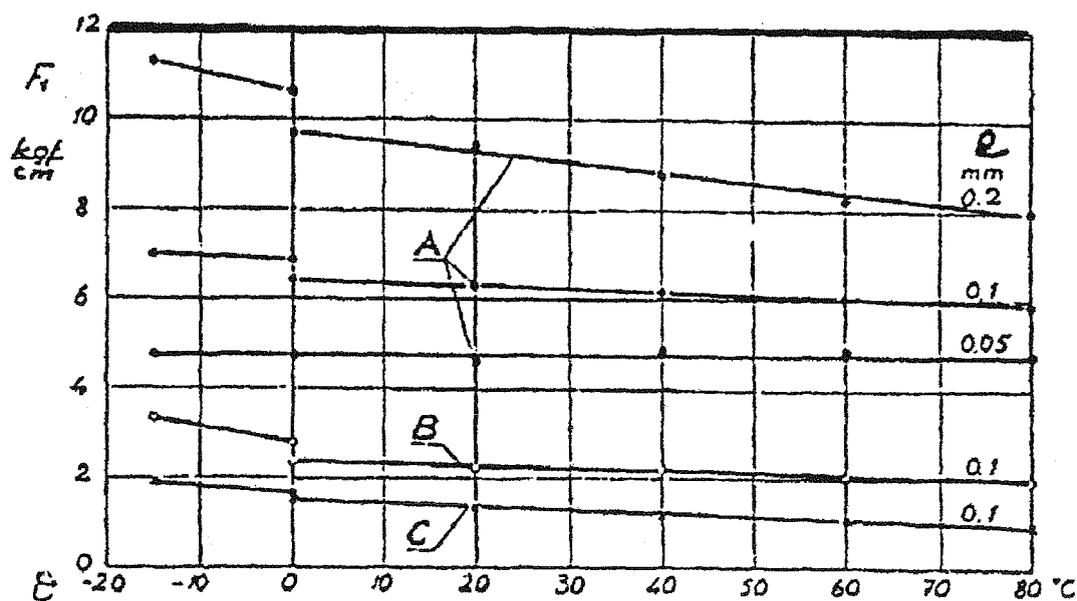


Figure A1.3 - Influence de la température sur les efforts de coupe  $F_c$

Le comportement à  $0^{\circ}\text{C}$  est marqué par une chute brusque de la courbe, qui tient aux conditions expérimentales: la chute tient à la différence d'état de l'eau à l'intérieur du bois. Les valeurs inférieures ont été obtenues par immersion d'éprouvettes à température ambiante dans un bain à  $0^{\circ}\text{C}$ ; les valeurs supérieures, sur des éprouvettes conditionnées à  $-15^{\circ}\text{C}$  puis plongées dans un bac à  $0^{\circ}\text{C}$ .

## Acquisition de données

Acquisition de données à travers d'une plaque d'Advantech PcLabCard – PCL-818L et une extension extérieure PCLD-8115, commandé par une application informatique en Advantech Labtech®.

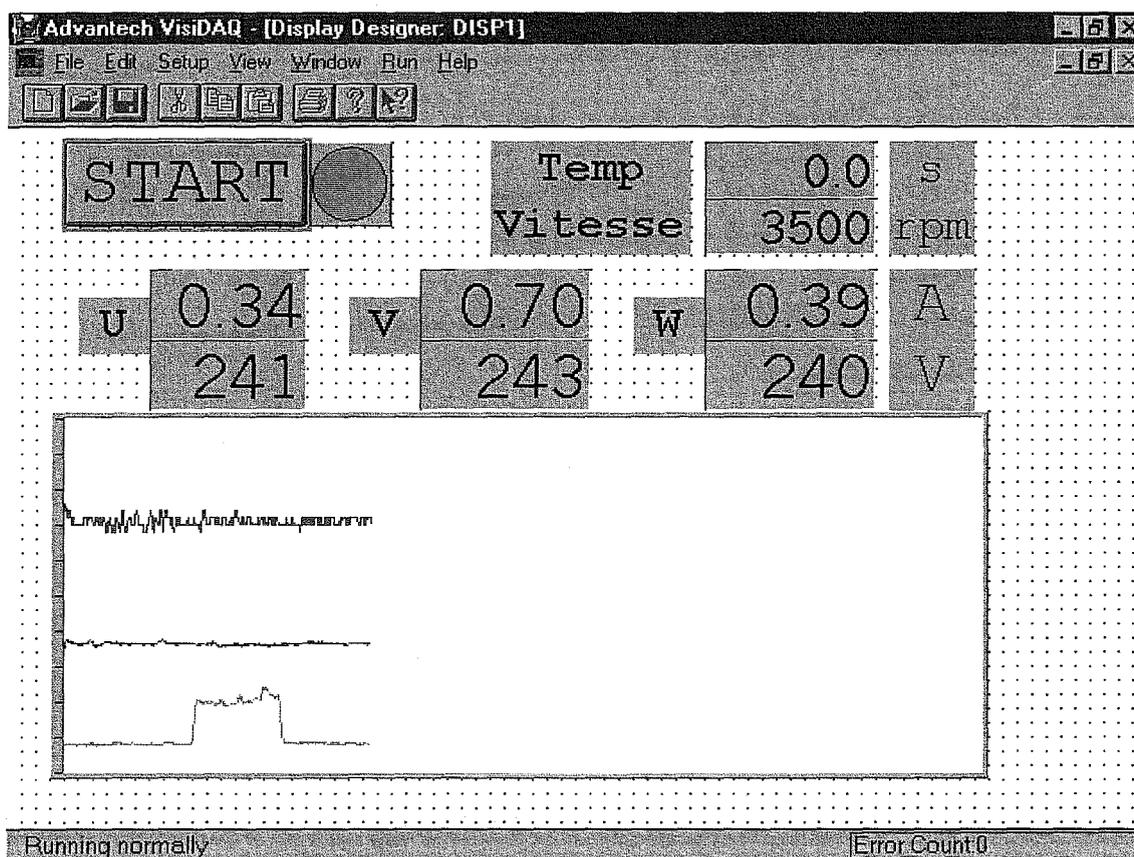


Figure A1.4 - Application en Labtech® - exemple d'exécution

Acquisition des données à travers d'une plaque NI-PCI-MIO-16E4 et avec une extension extérieure NI-SCB-68, commandé par une application informatique en LabView®.

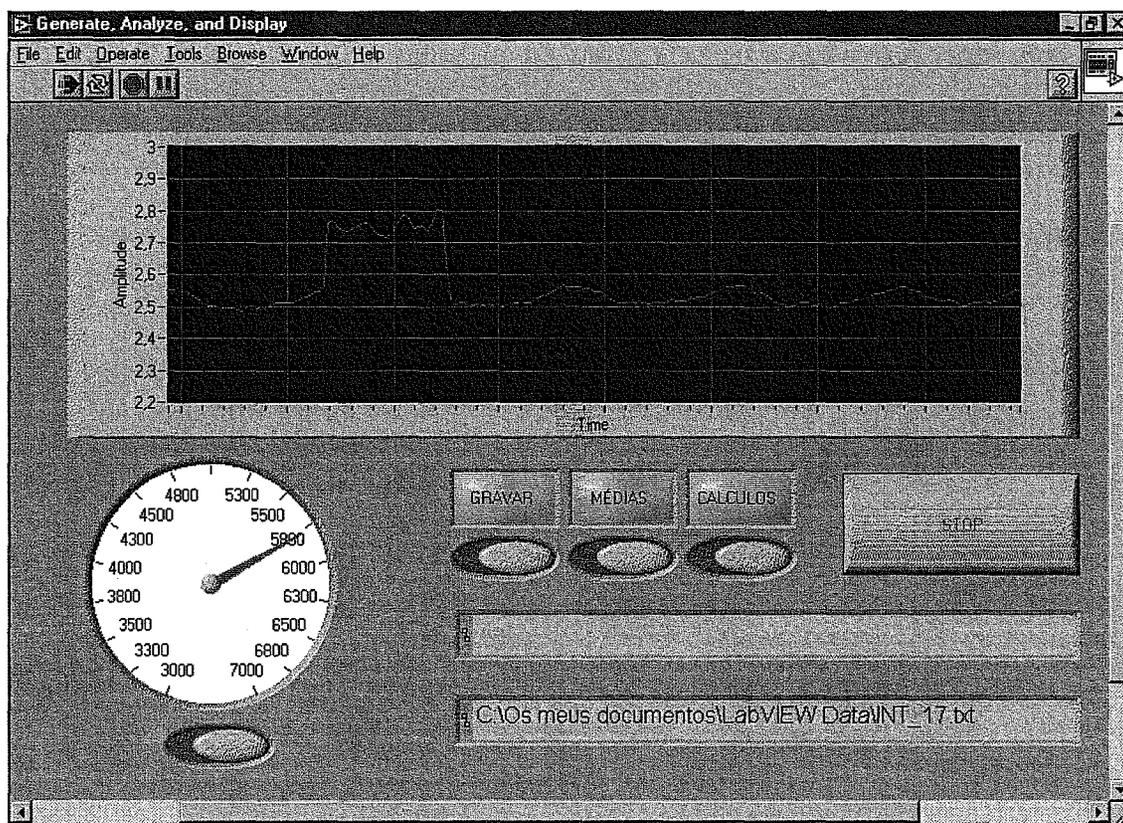


Figure A1.5 - Application en NI LabView® - exemple d'exécution



Tableau A1.1 - Critères d'évaluation objective de la qualité de la surface ( $k_{\text{ond}}$ ,  $k_{\text{rug}}$  et énergie spécifique) obtenus après usinage

Essai	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Humidité [%]	$M_v$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Épaisseur [mm]	$V_f$ [m/min]	$f_z$ [mm]	$a_m$ [mm]	Travail [W]	Énergie [kJ]	Énergie spécifique [kJ/m <sup>2</sup> ]	Essence	Usinage	$k_{\text{ond}}$	$k_{\text{rug}}$	Énergie spécifique [kJ/kg]
PN1-1	2000	200,67	9,11	502,72	1,146	7,001	0,610	0,058	178,8061	3,064736	7,636385	P	PN1	1,056009	5,724624	12,14388
PN1-2	2000	200,67	9,11	502,72	1,074	7,561	0,659	0,061	205,0385	3,25396	8,107875	P	PN1	0	5,144196	13,76122
PN2-1	2000	200,80	9,03	526,83	1,101	11,321	1,176	0,110	625,3733	6,628957	16,50637	P	PN2	1,026816	4,421977	26,10449
PN2-2	2000	200,80	9,03	526,83	1,078	11,257	1,169	0,109	557,3828	5,9417	14,79507	P	PN2	0	4,481641	23,8956
PN3-1	2000	201,33	9,31	516,20	1,064	17,778	2,285	0,211	554,006	3,739568	9,287007	P	PN3	2,119277	5,53161	15,46455
PN3-2	2000	201,33	9,31	516,20	1,075	17,621	2,265	0,210	545,9364	3,717827	9,233013	P	PN3	0	4,244878	15,22252
FN1-1	2000	200,43	9,14	643,63	1,170	6,845	0,597	0,058	263,3879	4,61719	11,51802	H	HN1	1,333353	4,7607	14,01824
FN1-2	2000	200,43	9,14	643,63	1,236	6,787	0,592	0,059	225,5157	3,987105	9,946214	H	HN1	0	6,031175	11,45272
FN2-1	2000	200,60	9,30	729,84	1,192	11,257	1,172	0,114	917,074	9,776009	24,36692	H	HN2	1,116216	4,929603	25,61646
FN2-2	2000	200,60	9,30	729,84	1,188	11,374	1,185	0,115	952,8247	10,0523	25,05558	H	HN2	0	4,759232	26,43624
FN3-1	2000	200,50	8,91	737,95	1,251	17,217	2,221	0,222	878,9685	6,126411	15,27783	H	HN3	1,976516	5,213876	15,19174
FN3-2	2000	200,50	8,91	737,95	1,323	17,217	2,224	0,229	955,9205	6,662766	16,61538	H	HN3	0	3,825423	15,6237



## Annexe 2 - Programmes informatiques (langage Matlab)

Tableau A2.1 - Programme informatique (langage Matlab) - profil de *pseudo-rugosité* et courbe de la puissance (FFT)

```

clear all;
%close all;

L=29.0971; % detectado pela funcao regua.m

directoria='Nivelados\';

x=(L/745)*(1:745);
freq=L./(1:400);

figure(1),title('SPCF');
for i=1:2 % ensaios
    if (i==1)
        ensaio='N-SI.46-2.bmp';
        legenda='N1H';
    else
        ensaio='N-SI.54-2.bmp';
        legenda='N3H';
    end

    foto=imread(['Nivelados\',ensaio], 'bmp');
    nx=size(foto,2);
    ny=size(foto,1);
    foto=(255-double(foto));
    dados=double(foto(fix(ny/2),:));
    pfft=abs(fft(dados)).^2/2e7;
    yfft=pfft(2:301);
    m=parametros(yfft);

    dados=mean(double(foto))./256;

    for k=1:250
        for j=1:745
            foto2(k,j)=64;
        end
    end
    k0=120-fix(ny/2)-1;
    for k=1:ny
        for j=1:745
            foto2(k0+k,j)=foto(k,j);
        end
    end
    subplot(3,2,i),
    imshow(uint8(foto2)),xlabel(legenda),hold on;

```

```

subplot(3,2,2+i);
plot(x,(dados-0.4)/0.5,'r'),axis([0 L 0 1]),
ylabel('Pseudo-rugosité'),
xlabel('Position (mm)'),hold on;
subplot(3,2,4+i);
semilogx(freq(1:300),yfft(1:300),'r'),axis([0.1 30 0 2]),
ylabel('Puissance (FFT)'),
xlabel('Période (mm)'),hold on;

end

```

Tableau A2.2 - Programme informatique (langage Matlab) pour l'étude du procédé d'usinage

```

clear all;
close all;

cor='kbbbb';

grafico=(0==0);

label(08,1:10)='N1P-1';
label(10,1:10)='N1H-1';
label(09,1:10)='N1P-2';
label(11,1:10)='N1H-2';
label(13,1:10)='N2P-1';
label(15,1:10)='N2H-1';
label(14,1:10)='N2P-2';
label(02,1:10)='N2H-2';
label(03,1:10)='N3P-1';
label(05,1:10)='N3H-1';
label(04,1:10)='N3P-2';
label(06,1:10)='N3H-2';

vensaioref(1)=5700;
vensaioref(2)=4780;
vensaioref(3)=3850;

ficheirosInt=dir(['INT_*.txt']);
ficheirosRot=dir(['ROT_*.txt']);

%
close all;

%ensaios=[8,9,10,11,13,14,15,2,3,4,5,6,];
%n01=2;

```

```

%ensaios=[8,13,3,10,15,5];
%n01=3;

ensaios=[9,11,14,2,4,6];
n01=2;

%


---


n00=1;
ncolunas=n01;
nlinhas=2;

for si11=1:fix(length(ensaios)/n01)

figure(si11);

pensaio=0;

for iensaio=n00:n01
    ensaio=ensaios((si11-1)*n01+iensaio)
    vensaio=vensaioref(str2num(label(ensaio,2)))
    lensaio=label(ensaio,:)
    clear dados;
    clear novos;
    nome=ficheirosInt(ensaio).name
    nensaio=str2num(nome(5:length(nome)-4))+1;
    dados=dlmread(nome,'\t');

    n=length(dados);

    for j=2:2:6
        L0=mean(dados(1:20,j));
        dados(:,j)=(dados(:,j)-L0)/220/0.016*10;
    end
    % novos=(dados(:,2)+dados(:,4)+dados(:,6))/3;
    novos=dados(:,2);
    L1=max(novos);

    m=find(novos>L1/2);

    m1=min(m)-1;
    m2=max(m)+1;

    ti(ensaio)=dados(m1,1);
    tf(ensaio)=dados(m2,1);
    L2=mean(novos(m));

    res(nensaio,1)=str2num(nome(5:length(nome)-4));

```

```

res(nensaio,2)=(tf(ensaio)-ti(ensaio));
res(nensaio,3)=mean(novos(m));
res(nensaio,4)=std(novos(m));

```

```

if grafico
    pensaio=pensaio+1;
%   figure(nensaio);
    subplot(nlinhas,ncolunas,pensaio);
    dt=(tf(ensaio)-ti(ensaio));
    area=(mean(novos(m1:m2)))*(tf(ensaio)-ti(ensaio))*(10/0.016*230/220);
    plot(dados(:,1)-ti(ensaio),novos.*(10/0.016*230/220),'r'),
    text(dt*.3,1450,['Travail =',num2str(fix(area)), ' J'])
    axis([-dt*0.1 dt*1.1 -100 1600]), hold on;
    y(1)=0;
    y(2)=L2*(10/0.016*230/220);
    x(1)=0;
    x(2)=0;
    z(1)=tf(ensaio)-ti(ensaio);
    z(2)=z(1);
    plot(z,y,'b'),title(lensaio);hold on;
    plot(x,y,'b');hold on;
    z(2)=x(1);
    x(2)=z(1);
    y(1)=y(2);
    plot(z,y,'b');hold on;
    y(1)=0;
    y(2)=0;
    plot(x,y,'b'),xlabel('temps [s]'),ylabel('Puissance électrique [V*A]'),hold on;
end

```

```

clear dados;
nome=ficheirosRot(ensaio).name
dados=dlmread(nome,'\t');
n=length(dados);

```

```
% retirar o ruído principal
```

```

for i=1:n
    if dados(i,2)>9;
        dados(i,2)=1;
    elseif dados(i,2)<1;
        dados(i,2)=0;
    else
        if(i>1)
            dados(i,2)=dados(i-1,2);
        else
            dados(i,2)=(dados(i,2)>5);
        end
    end
end

```

```

end
end

x(1)=0;
j=2;
k=j-1;

np=500;          % numero de pontos por bloco
nb=fix(n/np);    % numero de blocos

k=1;
clear vt;
clear tt;

for i=1:nb-1
    p1=i*500-499;
    p2=p1+498;
    clear n0;
    clear n1;
    n0=find(dados(p1:p2,2)<dados(p1+1:p2+1,2))+p1-1; % picos positivos
    n1=find(dados(p1:p2,2)>dados(p1+1:p2+1,2))+p1-1; % picos negativos

    % retirar falsas pulsos

    if( n0(1)>n1(1))
        n1(1)=[];
    end

    ln1=length(n1);

    fp=find(abs(n0(1:ln1)-n1(1:ln1))<70);
    for j=length(fp):-1:1
        n0(fp(j))=[];
    end

    Ln0=length(n0);
    r1=dados(n0(1),1);
    r2=dados(n0(Ln0),1);
    vt(k)=(30/(r2-r1))*(Ln0-1);
    tt(k)=(r1+r2)/2;
    k=k+1;
end

n=length(tt);

b=0;
nx=5;

clear tt2;

```

---

```

clear vt2;

for j=1:n-nx
    a=j;
    b=a+nx-1;
    tt2(j)=mean(tt(a:b));
    vt2(j)=(sum(vt(a:b))-max(vt(a:b))-min(vt(a:b)))/(nx-2);
%   vt2(j)=mean(vt(a:b));
end

% maquinação

maq1=find(tt2<tf(ensaio));
maq=find(tt2>ti(ensaio));

vtn1=min(maq);
vtn2=vtn1+m2-m1;
% linha de base

tt3(1)=tt2(vtn1);
tt3(2)=tt2(vtn2);

vt3(1)=mean(vt(1:vtn1-1));
vt3(2)=vt3(1);

vt4(1)=mean(vt2(vtn1:vtn2));
vt4(2)=vt4(1);

vt5(1)=vt4(1);
vt5(2)=vt3(1);
tt5(1)=tt2(vtn1);
tt5(2)=tt5(1);
tt6(1)=tt2(vtn2);
tt6(2)=tt6(1);

nome=ficheirosRot(ensaio).name;
nensaio=str2num(nome(5:length(nome)-4))+1;
res(nensaio,5)=mean(vt2(vtn1:vtn2));
res(nensaio,6)=std(vt2(vtn1:vtn2));
res(nensaio,7)=vt4(1)-vt3(1);

if grafico
%   figure(nensaio)
    N00=10^(fix(log10(min(vt2(vtn1:vtn2))))*100)/100;
    dt=tf(ensaio)-ti(ensaio);
    subplot(nlinhas,ncolunas,ncolunas+pensaio);
    area=(mean(vt2(vtn1:vtn2))-mean(vt2(1:vtn1)))*(tf(ensaio)-ti(ensaio));
    plot(tt2-ti(ensaio),vt2,cor(1)),
%   text(dt*.25,vensaio+75,['Perda = ',num2str(fix(-area/60*10)/10),' voltas']),

```

---

```
title(lensaio),axis([-dt*0.1 dt*1.1 vensaio vensaio+100]),hold on;  
plot(tt3-ti(ensaio),vt3,cor(2)),hold on;  
plot(tt3-ti(ensaio),vt4,cor(3)),hold on;  
plot(tt5-ti(ensaio),vt5,cor(4)),hold on;  
plot(tt6-ti(ensaio),vt5,cor(4)),xlabel('temps [s]'),ylabel('Vitesse rotation [trs/min]'),hold  
on;  
end  
  
end  
  
end
```

---



---

## Annexe 3 - Méthodes statistiques utilisées

### La méthode de Taguchi - fondements théoriques

Face au élevé numéro de paramètres/niveaux considérés dans cette étude, on a été utilisée la planification d'expériences selon les matrices orthogonales de Taguchi. La méthode Taguchi dépend fortement de techniques statistiques, surtout d'expériences planées statistiquement (Figueiredo et *al.*, 1996). Une matrice ou un arrange orthogonal, est une matrice factorielle fractionnaire qui assure la comparaison équivalente et régulière des niveaux d'un quelconque facteur. Dans ce type de planification expérimentale, de tous les facteurs, peuvent être évaluées de forme indépendante (Ross, 1991). Un des objectifs de le plan expérimentale est déterminer, les effets de chaque facteur dans la gamme des valeurs analysées (Masters et *al.*, 1999). Il est d'extrême importance prend la décision pendant les expériences de combien et quels sont les facteurs les plus significatifs et si le modèle choisi est approprié, ou si par contre, il est nécessaire de considérer un modèle plus complexe. Si le nombre de facteurs et de niveaux à considérer est élevé le plan factoriel complet ira se traduire dans un nombre élevé d'expériences, comme il est arrivé dans notre étude, au début de chaque plan d'expériences (L32 et L48).

Taguchi a développé un type de matrice spéciale qui constitue une fraction du plan factoriel complet (dans lequel seulement une partie des conditions est analysée afin d'identifier de manière efficace les facteurs importants). Des arrangements développées par Taguchi on peut rapporter quelques-uns comme les plus typiques, notamment, l'arrangement avec deux niveaux : L4, L8, L12 et L16 et l'arrangement avec trois niveaux : L9, L18 et L27.

Le nombre dans la désignation de la arrangement correspond au nombre d'essais contenu dans le même (par exemple, une arrangement L8 contient 8 essais). Une autre notation peut encore être utilisée pour désigner ces matrices. D'une forme générique on peut représenter par **La** (**b<sup>c</sup>**), dans lequel, **a** représente le nombre d'essais, **b** le nombre de niveaux pour chaque facteur et **c** le nombre de colonnes. La sélection de la arrangement orthogonal dépend du nombre de facteurs et/ou d'interactions et aussi du nombre de niveaux pour chaque facteur les quels vont déterminer le nombre de degrés de liberté totaux (nombre de mesures indépendantes disponibles pour estimer des parties d'informations), (Ross, 1991). Dans la méthode de

Taguchi, il est aussi possible de rendre le procédé insensible aux effets des facteurs de bruit (normalement facteurs ambiantes non contrôlables).

Dans l'analyse des résultats selon la méthode de Taguchi, on cherche à identifier les facteurs qui contribuent à la réduction de la variation dans la réponse. La variation peut être analysée en observant les effets dans la réponse moyenne ou dans la dispersion. Pour mesurer les effets dans la variation, Taguchi a développé une transformation des données, désignée par relation Signal/Bruit (S/R), qui représente la mesure de la variation existante. Les relations S/R sont fonctions logarithmiques qui combinent de diverses répétitions, étant nécessaire aussi, au minimum, deux valeurs observées (Ross, 1991). D'entre tous les facteurs étudiés on peut vérifier ceux qui présentent influence significative dans la variation des réponses et ainsi, en fonction des résultats obtenus on peut redessiner le plan d'expériences, à travers de la sélection de nouvelles valeurs expérimentaux.

On peut considérer trois types de relations Signal/Bruit dans les méthodologies de Taguchi :

- plus petit c'est meilleur (**meM**) - pour minimiser ;
- nominal c'est meilleur (**NeM**) - pour faire la réponse s'approcher d'une certaine valeur spécifiée ;
- plus grand c'est meilleur (**MeM**) - pour maximiser.

La meilleure sélection de la S/R dépend des propriétés physiques du problème, de l'objectif du travail expérimental, etc. Il se présente à suivre les équations de calcul des divers indices S/R.

$$S/R_{meM} = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (A.1)$$

$$S/R_{NeM} = -10 \log \left( \frac{\bar{y}^2}{s^2} \right) \quad (A.2)$$

$$S/R_{MeM} = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (A.3)$$

où,

$S/R_{meM}$	→	représente la relation Signal/Bruit « plus petit est meilleur »
$S/R_{NeM}$	→	représente la relation Signal/Bruit « nominal est meilleur »
$S/R_{MeM}$	→	représente la relation Signal/Bruit « plus grand est meilleur »
$Y_i$	→	représente les valeurs individuelles de la réponse (résultats expérimentaux)
$N$	→	représente le n° de répétitions dans un essai
$s^2$	→	représente la variance de l'erreur

Une fois que dans notre étude se prétendait minimiser l'ondulation et la rugosité de la surface du bois, il a été choisie la relation signal/plus « petit c'est meilleur ».

L'analyse des moyennes simples des résultats est selon Roy (2001) la méthode traditionnelle de calculer les effets moyens des facteurs et déterminer de cette forme les niveaux souhaitables de ceux-ci. Malgré le calcul des moyennes être plus simple il n'a pas en considération la variabilité autour de la moyenne dans le groupe. Il est donc recommandable l'utilisation de l'indice S/R pour l'analyse des résultats expérimentaux. Les avantages et les désavantages plus important dans l'utilisation de l'indice S/R sont les suivantes :

- l'utilisation d'une seule mesure qui inclut les effets dans la moyenne et dans l'écart-type avec égale priorité ;
- les résultats présentent un comportement plus linéaire, s'ils ont exprimés en termes de S/R. Le calcul de l'estimation de la réponse dans les conditions optimales est effectué à travers de la de comportement linéaire.
- la seul désavantage de cet indice est l'interprétation des résultats dans le cas des résultats n'être si objectives, ce qui peut obliger à transformer les données.

### *Analyse de la variance (ANOVA)*

Dans cette étude, l'analyse des résultats a été effectuée employant la même analyse que Taguchi utilise pour traiter les résultats obtenus après l'exécution du plan d'expériences, c'est à dire, l'analyse de la variance (ANOVA).

L'analyse de variance est une technique qui permet la comparaison entre paramètres de plusieurs populations. À partir de l'analyse de la dispersion totale dans un ensemble de données, l'analyse de variance permet d'identifier les facteurs qui ont donné origine à cette dispersion et d'évaluer la contribution de chacun d'entre eux (Guimarães et Sarsfield Cabral, 1997). Donc, la méthode statistique d'analyse de variance permet de vérifier lesquels paramètres de l'étude qui sont statistiquement significatifs. De suite, on présente les calculs nécessaires pour réaliser l'ANOVA (Figueiredo et al., 1996, Ross, 1991 et Roy, 2001). La moyenne globale à partir de laquelle sont calculées toutes les variations est obtenue par :

$$\bar{T} = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N} \quad (\text{A.4})$$

où :

- $\bar{T}$  → moyenne de toutes les observations ou la moyenne globale
- $y_i$  → observation (résultat)
- $N$  → nombre total d'observations

La somme totale des carrés des écarts à la moyenne ( $SCE_T$ ) est donnée par:

$$SCE_T = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{T})^2 \quad (\text{A.5})$$

La variation due à un certain facteur, par exemple le facteur A, est obtenue à travers de la somme des carrés des écarts en relation à la moyenne pour les observations correspondantes aux niveaux de ce facteur, donné par :

$$SCE_A = \sum_{i=1}^{K_A} n_{A_i} (\bar{A}_i - \bar{T})^2 \quad (\text{A.6})$$

$$\bar{A}_i = \frac{\sum_{i=1}^{n_{A_i}} A_i}{n_{A_i}} \quad (\text{A.7})$$

où :

- $\bar{A}_i$  → la moyenne des observations à le niveau  $A_i$
- $A_i$  → somme des observations à le niveau  $A_i$
- $n_{A_i}$  → nombre d'observations à le niveau  $A_i$

$k_A$  → nombre de niveaux du facteur A

$SCE_A$  → somme des carrés du facteur A

Cette somme des carrés correspond à la somme carrés pour chaque colonne de la matrice orthogonal et correspond à la variation dû au facteur et/ou à l'interaction (effet synergétique de deux ou plusieurs facteurs dans un plan expérimental factoriel (Ross, 1991)) représentée par la colonne.

Après le calcul de la somme des carrés de tous les facteurs et/ou les interactions de l'étude il est possible de calculer la variation liée à l'erreur. En sachant que la variation totale est égale à l'addition des variations partielles, l'addition des carrés de l'erreur est :

$$SCE_e = SCE_T - SCE_A - SCE_B - \dots - SCE_{AB} - \dots \quad (A.8)$$

où,

$SCE_e$  → somme des carrés de l'erreur

$SCE_{AB}$  → somme des carrés de l'interaction entre les facteurs A et B, s'il exister

Pour construire la table ANOVA typique, il est encore nécessaire le calcul des écarts quadratiques moyens, ou des estimateurs de variances, de la forme suivante:

$$CM_A = \frac{SCE_A}{v_A} \quad (A.9)$$

$$v_a = K_A - 1 \quad (A.10)$$

$$CM_e = \frac{SCE_e}{v_e} \quad (A.11)$$

$$v_e = v_{total} - \sum v_{facteurs} \quad (A.12)$$

où,

$CM_A$  → carré moyen des écarts du facteur A

$v_A$  → nombre de degrés de liberté du facteur A

$CM_e$  → carré moyen des écarts de l'erreur

$v_e$  → nombre de degrés de liberté de l'erreur

Le nombre total de degrés de liberté, le total  $v_{\text{total}}$ , d'un plan expérimental (dans ce cas, matrice orthogonal) est égal à la somme des degrés de liberté de chaque colonne ou égale au nombre de observations moins 1.

Les raisons F sont obtenues par le calcul suivant (exemplifiée pour le facteur A) :

$$F_A = \frac{CM_A}{CM_e} \quad (\text{A.13})$$

et, le pourcentage de la contribution de chacun des facteurs, est calculé comme (par exemple pour le facteur A générique) :

$$P_A = \frac{SCE_A - CM_e * v_A}{SCE_T} * 100 \quad (\text{A.14})$$

Le pourcentage de la contribution indique le pouvoir relatif d'un facteur pour réduire la variation. Si le facteur soit contrôlé de forme précise, alors la variation totale peut être réduite dans la valeur indiquée par le pourcentage de contribution (Ross, 1991).

Quand, il n'est pas possible de calculer  $CM_e$  parce qu'il n'y a pas de degrés de liberté pour le terme de l'erreur, le pourcentage de la contribution de chaque facteur sera donné pour le facteur A, par :

$$P_A = \frac{SCE_A}{SCE_T} * 100 \quad (\text{A.15})$$

L'essai F permet d'expérimenter si les effets des facteurs et/ou les interactions sont statistiquement significatifs au seuil de signification choisi.

Le modèle de base pour un essai de ce type est :

$$Y = \beta_0 + \beta_1 A + \beta_2 B + \dots + \beta_1 AB + \dots + \varepsilon \quad (\text{A.16})$$

où, l'Y est l'estimateur de la réponse, A, B, AB, sont les facteurs, les  $\beta$  sont les paramètres du modèle et  $\varepsilon$  le terme de l'erreur.

On a expérimente les suivantes hypothèses :

Hypothèse nulle  $\rightarrow H_0$  : tous les  $\beta$  sont nuls

Hypothèse alternative  $\rightarrow H_1$  : au moins un de  $\beta$  c'est différent de zéro

On déclare F significatif, si la valeur de F observée est supérieure au F tabulée de la table de valeurs de F, au seuil de signification choisi et pour les degrés de liberté de chaque facteur et de l'erreur. On peut alors dire que les facteurs diffèrent statistiquement à ce seuil de signification.

Pour l'essai d'hypothèses, d'accord le précédemment décrite, après on prend la décision de rejeter ou non rejeter de l'hypothèse nulle. La décision pourra être parfois peu réaliste une fois que la fixation d'un seuil de signification est arbitraire et les données d'échantillonnage peuvent contredire l'hypothèse nulle en majeur ou mineur degré. Une forme alternative de prendre la décision est l'utilisation de la *valeur p*, qui constitue une mesure du degré avec lequel les données d'échantillonnage contredisent l'hypothèse nulle. La *valeur p* correspond à la probabilité de la statistique de l'essai (raison F), prendre une valeur égale ou plus extrême que celui qui est observé, en ayant considéré que  $H_0$  est vrai. Combien moindre soit la *valeur p*, plus grand sera le degré avec lequel l'hypothèse nulle est contrariée. Plus important qu'affirmer que  $H_0$  a été rejeté au niveau de signification de 5%, il sera dire que tel a réussi et que la *valeur p* a été, par exemple, de 0.3% (Guimarães et Cabral, 1997).

### *Analyse des effets moyens des niveaux des facteurs*

Cette analyse est basée sur le calcul de la moyenne des résultats expérimentaux obtenus pour chaque niveau de chaque facteur. Si on considère comme exemple le cas particulier d'une matrice de Taguchi L4 ( $2^3$ ), chaque niveau de chaque facteur est contenu en deux essais. On peut voir dans la figure A3.1, que le niveau 1 du facteur se produit dans les essais 1 et 2 et le niveau 2 dans les autres, ainsi comme le niveau 1 du facteur B arrive dans les essais 1 et 3. Ainsi, l'effet moyen du facteur au niveau 1 est la moyenne des observations qui arrivent quand le facteur se trouve à ce niveau calculé selon l'équation A.7.

Taguchi Array L4							
Taguchi	A	B	Pattern	Y run 1	Mean Y	SN Ratio Y	
Column	1	1	--	•	•	•	
	2	1	-+	•	•	•	
	3	2	+.	•	•	•	
Rows	4	2	++	•	•	•	

Figure A3.1 Matrice de Taguchi L4 ( $2^3$ )

Quand on calcule la réponse moyenne pour un niveau d'un facteur toutes les influences des différents niveaux d'autres facteurs sont contrebalancées, parce qu'ils tous iront apparaître à chaque niveau différent une fois. Ainsi, l'effet d'un niveau d'un facteur dans les résultats expérimentaux peut être séparé des effets des autres facteurs. De cette forme, l'effet de chaque facteur peut être analysé indépendamment (Kang *et al.*, 2001). Ces présuppositions sont valables en l'absence d'interactions entre les facteurs. Si tous les facteurs se comportent de forme indépendante, la courbe des effets principaux par facteur (que montre la tendance de l'influence des facteurs) n'ira pas changer quel que soit le niveau dans lequel apparaît autre facteur. L'effet principal d'un facteur est l'effet de celui-ci en agissant, de lui-même, d'un niveau pour l'autre et qui modifie les résultats de plans expérimentaux factoriels (Ross, 1991). Ainsi, à travers de l'analyse des effets moyens par facteur il est possible identifier quelles sont les conditions qui détermineront la réponse optimale (niveaux optimaux pour les facteurs).

Étant déterminés les niveaux optimaux pour les facteurs, selon Roy (2001), il est possible d'estimer la valeur optimale de la réponse. La méthode la plus simple et plus commune consiste en ajouter à toutes les contributions de tous les facteurs pour l'amélioration de performance, à la moyenne globale. Les contributions mentionnées seulement sont additives si les influences de tous les facteurs sont linéaires. Si ce n'est pas le cas, on peut seulement attendre que le résultat soit proche de la valeur réelle. La valeur optimale de la réponse peut alors se calculer comme a suivie, par exemple pour un problème avec trois facteurs :

$$Y_{\text{opt}} = \bar{T} + (\bar{A}_m - \bar{T}) + (\bar{B}_j - \bar{T}) + (\bar{C}_k - \bar{T}) \quad (\text{A.17})$$

où :

$Y_{\text{opt}}$  → valeur attendue de la réponse dans les conditions optimales

$m, j, k$  → niveaux optimaux des facteurs A, B et C, respectivement

$\bar{A}_m, \bar{B}_j, \bar{C}_k \rightarrow$  moyennes des observations quand les facteurs A, B, C se trouvent à les niveaux optimaux respectifs

On peut encore calculer un intervalle de confiance pour la valeur attendue :

$$\left[ Y_{\text{opt}} \pm \left[ \frac{F(1, v_e) * CM_e}{N_e} \right]^{0,5} \right] \quad (\text{A.18})$$

ou, si on parle d'essai de confirmation (essai réalisé pour vérifier si l'optimisation désirée est en train d'être atteint), l'intervalle de confiance sera calculé comme à suivre :

$$\left[ Y_{\text{opt}} \pm \left[ F(1, v_e) * CM_e * \left( \frac{1}{N_e} + \frac{1}{r} \right) \right]^{0,5} \right] \quad (\text{A.19})$$

où,

$$N_e = \frac{N}{v_{\text{moyenne}} + v_{\text{total}_{\text{opt}}}} \quad (\text{A.20})$$

en étant,

$F(1, v_e) \rightarrow$  valeur de F tabulé pour le niveau de confiance désiré

$v_{\text{moyenne}} \rightarrow$  nombre de degrés de liberté de la moyenne (toujours égale à 1)

$v_{\text{total}_{\text{opt}}} \rightarrow$  addition des degrés de liberté des facteurs utilisés pour estimer  $Y_{\text{opt}}$

$N_e \rightarrow$  nombre effectif de répliques

$r \rightarrow$  nombre de répliques de l'essai de confirmation

La réalisation de l'expérience de confirmation a aussi pour but la vérification de la précision des prévisions trouvées, étant une mesure de l'optimisation réussie. Pour l'essai de confirmation la valeur de la réponse doit être obtenue avec le même nombre de répétitions utilisé initialement, pour que cet intervalle de confiance soit applicable (Ross, 1991).

## Presentation succincte de l'application JMP

Dans le traitement statistique, l'option *Taguchi Arrays* a été celle qu'on a utilisé de l'application informatique JMP, *The Statistical Discovery Software*, version 5, qui est basées dans la méthode statistique présentée (voir section précédent).

Si on utilise l'option de *JMP Taguchi Arrays* du bloc de planification d'expériences, le menu d'entrée de données est du type présenté à la figure A3.2, où est montrée une matrice L18, qui est l'exemple de notre cas d'étude, avec cinq facteurs, un à trois niveaux et les autres à deux dans lesquels chaque essai a été répété une fois.

	Essence	Niveau	Ponçage	Egrenage	Vernis	Pattern	Y run 1	Mean Y	SN Ratio Y
1	P	N1	G0	E0	VC	----+	•	•	•
2	H	N1	G1	E1	VA	+---	•	•	•
3	P	N1	G1	E1	VA	--++	•	•	•
4	H	N1	G0	E0	VC	+---	•	•	•
5	P	N1	G1	E0	VA	--+-	•	•	•
6	H	N1	G0	E1	VC	+---	•	•	•
7	P	N2	G0	E1	VC	-0++	•	•	•
8	H	N2	G1	E0	VA	+0--	•	•	•
9	P	N2	G0	E1	VA	-0+-	•	•	•
10	H	N2	G1	E0	VC	+0+-	•	•	•
11	P	N2	G1	E0	VC	-0+-	•	•	•
12	H	N2	G0	E1	VA	+0+-	•	•	•
13	P	N3	G1	E1	VC	----+	•	•	•
14	H	N3	G0	E0	VA	++--	•	•	•
15	P	N3	G0	E0	VA	-+--	•	•	•
16	H	N3	G1	E1	VC	++++	•	•	•
17	P	N3	G0	E0	VA	-+--	•	•	•
18	H	N3	G1	E1	VC	++++	•	•	•

Figure A3.2 Menu d'entrée de données pour une matrice L18 à l'option *Taguchi Arrays*, de l'application JMP

Après l'introduction des valeurs des observations pour chaque essai, l'application calcule la moyenne (Mean Y) et l'indice signal/bruit (SN Ratio Y).

Quand on fait exécuter l'application, elle calcule les contributions de chaque facteur pour la variation de la variable que nous sommes en train d'optimiser. Les tableaux importants pour l'analyse présentée au chapitre de résultats et discussions sont montrés dans les figures A3.3 à A3.5.

Response Mean Y	
Actual by Predicted Plot	
Summary of Fit	
RSquare	0,752602
RSquare Adj	0,617658
Root Mean Square Error	0,470577
Mean of Response	1,057756
Observations (or Sum Wgts)	18

Figure A3.3 Exemple de tableau de synthèse de l'ajustement effectué

De la figure A3.3 peuvent être relevées les informations suivantes:

Tableau A3.1 - Correspondance entre la terminologie de l'application JMP et de celle utilisée dans l'approche expérimentale

Notation JMP	Notation utilisée dans l'approche expérimentale
<i>Observations</i>	T
<i>Mean of response</i>	$\bar{T}$

Response Mean Y					
Actual by Predicted Plot					
Summary of Fit					
Analysis of Variance					
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	
Model	6	7,4100953	1,23502	5,5771	
Error	11	2,4358703	0,22144	Prob > F	
C. Total	17	9,8459656		0,0070	

Figure A3.4 Exemple de tableau ANOVA pour le modèle global utilisé

Response Mean Y						
Actual by Predicted Plot						
Summary of Fit						
Analysis of Variance						
Lack Of Fit						
Parameter Estimates						
Effect Tests						
Source	Nparm	DF	Sum of Squares	F Ratio	Prob > F	
Essence	1	1	0,2806018	1,2672	0,2843	
Niveau	2	2	1,5620042	3,5269	0,0655	
Ponçage	1	1	1,5256548	6,8896	0,0236	
Egrenage	1	1	1,2384918	5,5928	0,0375	
Vernis	1	1	2,0224229	9,1329	0,0116	

Figure A3.5 Exemple de tableau ANOVA par facteur

Relativement aux figures A3.4 et A3.5 la correspondance entre les différentes terminologies utilisées est présentée dans le tableau A3.2.

Tableau A3.2 - Correspondance entre la terminologie de l'application JMP et celle utilisée dans l'approche expérimentale

<b>Notation JMP</b>	<b>Notation utilisée dans l'approche expérimentale</b>
<i>Source</i>	Source de variation
<i>DF</i>	v
<i>Sum of squares</i>	SS (somme des carrés des écarts)
<i>Mean Squares</i>	DQM (somme des carrés moyens)
<i>F Ratio</i>	Raison F
<i>Prob&gt;F</i>	Valeur p

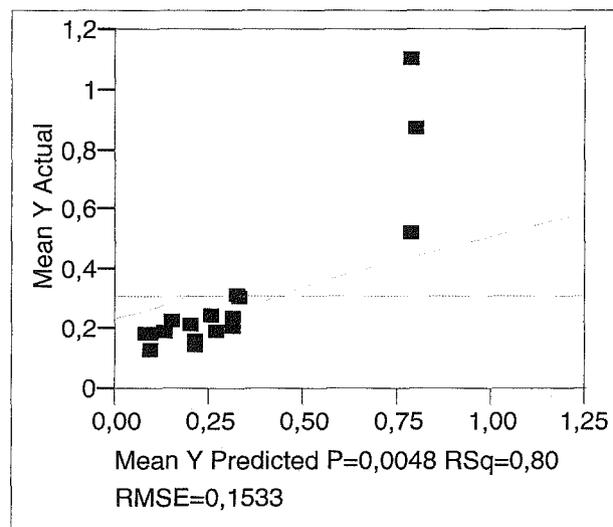
## Rapports extraits de l'application JMP

On présente à suivre les rapports extraits de l'application JMP, pour tous les protocoles expérimentaux réalisés.

### Première série d'expériences

#### L18 - K<sub>ond</sub>

Least Squares Fit  
Response Mean Y  
Actual by Predicted Plot



**Summary of Fit**

RSquare	0,79875
RSquare Adj	0,677999
Root Mean Square Error	0,153314
Mean of Response	0,311148
Observations (or Sum Wgts)	17

**Analysis of Variance**

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Model	6	0,9328998	0,155483	6,6149
Error	10	0,2350505	0,023505	Prob > F
C. Total	16	1,1679503		0,0048

**Lack Of Fit**

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Lack Of Fit	8	0,06759231	0,008449	0,1009
Pure Error	2	0,16745819	0,083729	Prob > F
Total Error	10	0,23505050		0,9932
				Max RSq
				0,8566

**Parameter Estimates**

Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob> t
Intercept	0,2980709	0,037818	7,88	<.0001
Essence[H]	0,0071977	0,038782	0,19	0,8565
Niveau[N1]	-0,09995	0,052307	-1,91	0,0851
Niveau[N2]	-0,097353	0,05576	-1,75	0,1114
Ponçage[G0]	0,0881772	0,038782	2,27	0,0463
Égrenage[E0]	0,0895887	0,038782	2,31	0,0435
Vernis[VA]	0,1163415	0,038782	3,00	0,0133

**Effect Tests**

Source	Nparm	DF	Sum of Squares	F Ratio	Prob > F
Essence	1	1	0,00080963	0,0344	0,8565
Niveau	2	2	0,33672746	7,1629	0,0117
Ponçage	1	1	0,12151039	5,1695	0,0463
Égrenage	1	1	0,12543177	5,3364	0,0435
Vernis	1	1	0,21152909	8,9993	0,0133

**Effect Details****Essence****Least Squares Means Table**

Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
H	0,30526855	0,05152109	0,272590

Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
P	0,29087319	0,05669274	0,354525

**Niveau**

**Least Squares Means Table**

Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
N1	0,19812117	0,06259000	0,198121
N2	0,20071794	0,07097039	0,225708
N3	0,49537350	0,06259000	0,495374

**Ponçage**

**Least Squares Means Table**

Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
G0	0,38624807	0,05669274	0,449900
G1	0,20989367	0,05152109	0,187812

**Égrenage**

**Least Squares Means Table**

Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
E0	0,38765960	0,05152109	0,409584
E1	0,20848214	0,05669274	0,200406

**Vernis**

**Least Squares Means Table**

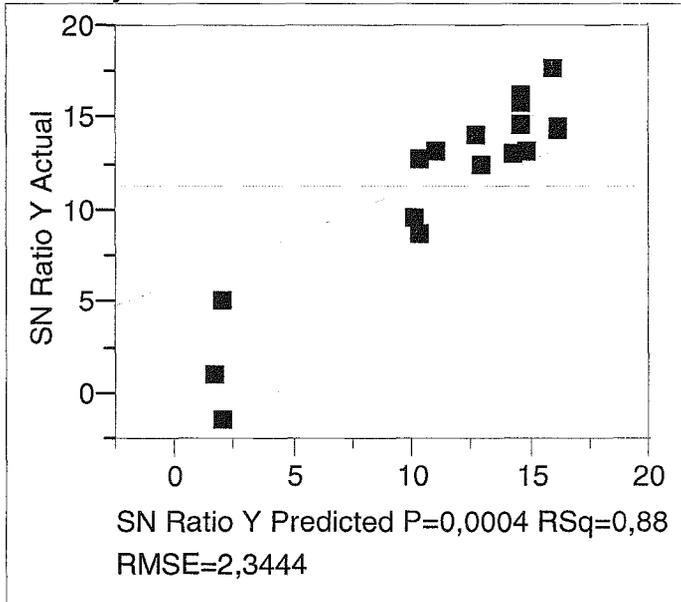
Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
VA	0,41441236	0,05152109	0,433364
VC	0,18172938	0,05669274	0,173654

**Scaled Estimates**

Nominal factors expanded to all levels

Term	Scaled Estimate	Plot Estimate	Std Error	t Ratio	Prob> t
Intercept	0,2980709		0,037818	7,88	<.0001
Essence[H]	0,0071977		0,038782	0,19	0,8565
Essence[P]	-0,007198		0,038782	-0,19	0,8565
Niveau[N1]	-0,09995		0,052307	-1,91	0,0851
Niveau[N2]	-0,097353		0,05576	-1,75	0,1114
Niveau[N3]	0,1973026		0,052307	3,77	0,0036
Ponçage[G0]	0,0881772		0,038782	2,27	0,0463
Ponçage[G1]	-0,088177		0,038782	-2,27	0,0463
Égrenage[E0]	0,0895887		0,038782	2,31	0,0435
Égrenage[E1]	-0,089589		0,038782	-2,31	0,0435
Vernis[VA]	0,1163415		0,038782	3,00	0,0133
Vernis[VC]	-0,116341		0,038782	-3,00	0,0133

**Response SN Ratio Y  
Actual by Predicted Plot**



**Summary of Fit**

RSquare	0,878577
RSquare Adj	0,805723
Root Mean Square Error	2,344385
Mean of Response	11,36987
Observations (or Sum Wgts)	17

**Analysis of Variance**

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Model	6	397,68153	66,2803	12,0594
Error	10	54,96142	5,4961	Prob > F
C. Total	16	452,64295		0,0004

**Lack Of Fit**

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Lack Of Fit	8	33,311620	4,1640	0,3847

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Pure Error	2	21,649796	10,8249	Prob > F
Total Error	10	54,961416		0,8651
				Max RSq
				0,9522

**Parameter Estimates**

Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob> t
Intercept	11,623128	0,578292	20,10	<.0001
Essence[H]	-0,142299	0,593033	-0,24	0,8152
Niveau[N1]	1,9345944	0,799852	2,42	0,0361
Niveau[N2]	1,4594243	0,852645	1,71	0,1177
Ponçage[G0]	-1,874399	0,593033	-3,16	0,0101
Égrenage[E0]	-1,755572	0,593033	-2,96	0,0143
Vernis[VA]	-2,822552	0,593033	-4,76	0,0008

**Effect Tests**

Source	Nparm	DF	Sum of Squares	F Ratio	Prob > F
Essence	1	1	0,31645	0,0576	0,8152
Niveau	2	2	101,28454	9,2141	0,0054
Ponçage	1	1	54,90665	9,9900	0,0101
Égrenage	1	1	48,16575	8,7636	0,0143
Vernis	1	1	124,50443	22,6531	0,0008

**Effect Details****Essence****Least Squares Means Table**

Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
H	11,480829	0,78783164	12,1978
P	11,765427	0,86691361	10,4385

**Niveau****Least Squares Means Table**

Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
N1	13,557722	0,9570912	13,5577
N2	13,082552	1,0852394	12,5133
N3	8,229109	0,9570912	8,2291

**Ponçage****Least Squares Means Table**

Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
G0	9,748729	0,86691361	8,4218
G1	13,497527	0,78783164	13,9904

**Égrenage****Least Squares Means Table**

Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
-------	---------------	-----------	------

Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
E0	9,867556	0,78783164	9,3615
E1	13,378700	0,86691361	13,6293

**Vernis****Least Squares Means Table**

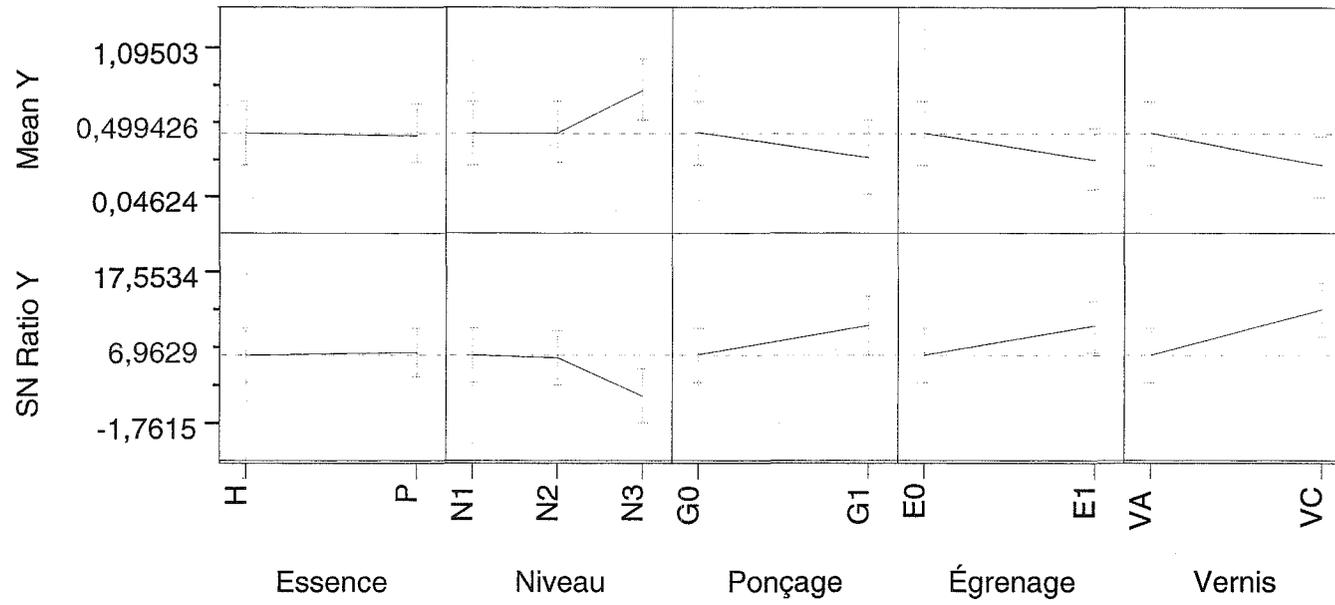
Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
VA	8,800576	0,78783164	8,4131
VC	14,445680	0,86691361	14,6963

**Scaled Estimates**

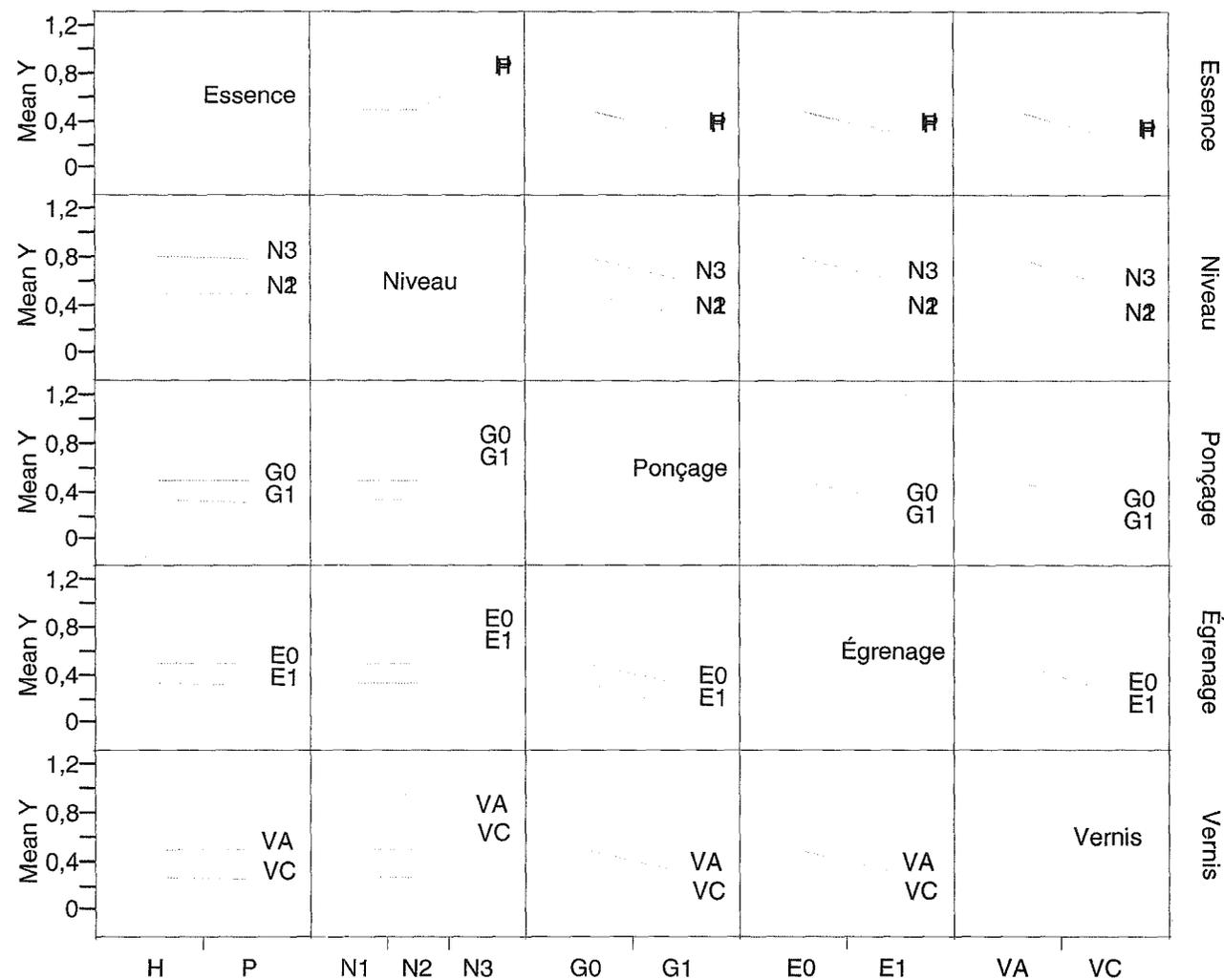
Nominal factors expanded to all levels

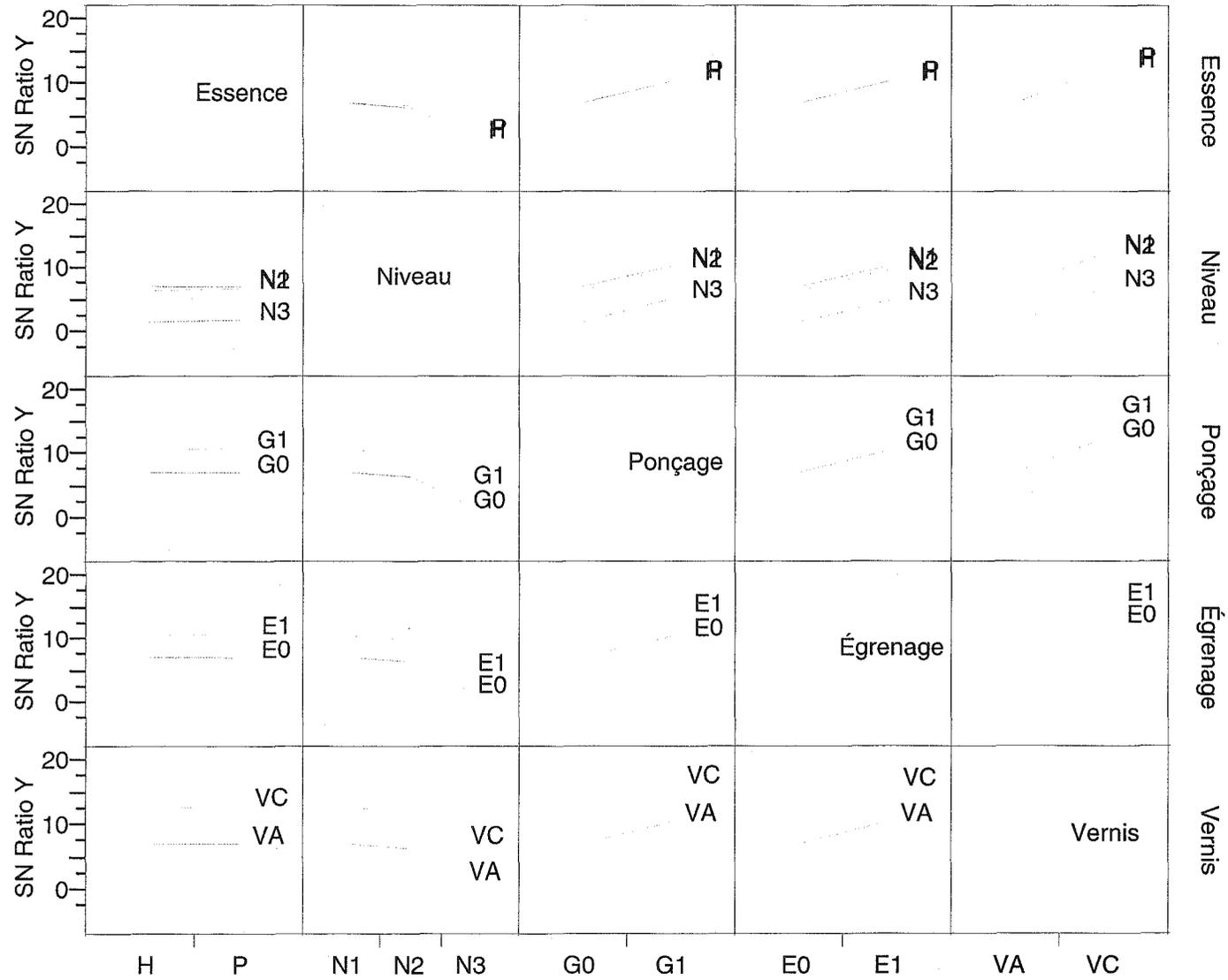
Term	Scaled Estimate	Plot Estimate	Std Error	t Ratio	Prob> t
Intercept	11,623128		0,578292	20,10	<.0001
Essence[H]	-0,142299		0,593033	-0,24	0,8152
Essence[P]	0,1422986		0,593033	0,24	0,8152
Niveau[N1]	1,9345944		0,799852	2,42	0,0361
Niveau[N2]	1,4594243		0,852645	1,71	0,1177
Niveau[N3]	-3,394019		0,799852	-4,24	0,0017
Ponçage[G0]	-1,874399		0,593033	-3,16	0,0101
Ponçage[G1]	1,8743991		0,593033	3,16	0,0101
Égrenage[E0]	-1,755572		0,593033	-2,96	0,0143
Égrenage[E1]	1,7555724		0,593033	2,96	0,0143
Vernis[VA]	-2,822552		0,593033	-4,76	0,0008
Vernis[VC]	2,8225522		0,593033	4,76	0,0008

Prediction Profiler



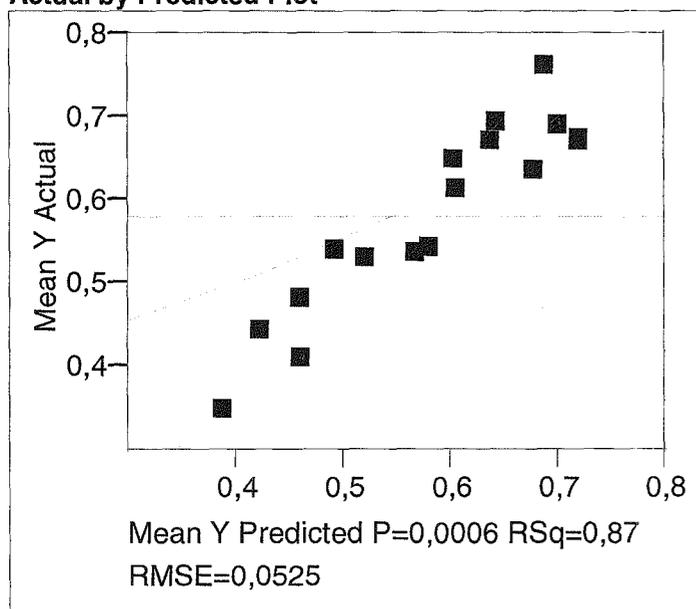
Interaction Profiles





L18 - K<sub>rug</sub>

Least Squares Fit  
Response Mean Y  
Actual by Predicted Plot



## Summary of Fit

RSquare	0,870904
RSquare Adj	0,793446
Root Mean Square Error	0,052478
Mean of Response	0,580129
Observations (or Sum Wgts)	17

## Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Model	6	0,18578852	0,030965	11,2436

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Error	10	0,02753993	0,002754	Prob > F
C. Total	16	0,21332845		0,0006

**Lack Of Fit**

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Lack Of Fit	8	0,02500354	0,003125	2,4645
Pure Error	2	0,00253639	0,001268	Prob > F
Total Error	10	0,02753993		0,3206
				Max RSq
				0,9881

**Parameter Estimates**

Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob> t
Intercept	0,5738455	0,012945	44,33	<.0001
Essence[H]	-0,016791	0,013275	-1,26	0,2346
Niveau[N1]	0,065767	0,017904	3,67	0,0043
Niveau[N2]	-0,080475	0,019086	-4,22	0,0018
Ponçage[G0]	0,0352875	0,013275	2,66	0,0240
Égrenage[E0]	0,0117918	0,013275	0,89	0,3953
Vernis[VA]	0,0666341	0,013275	5,02	0,0005

**Effect Tests**

Source	Nparm	DF	Sum of Squares	F Ratio	Prob > F
Essence	1	1	0,00440596	1,5998	0,2346
Niveau	2	2	0,05678174	10,3090	0,0037
Ponçage	1	1	0,01946004	7,0661	0,0240
Égrenage	1	1	0,00217302	0,7890	0,3953
Vernis	1	1	0,06938952	25,1960	0,0005

**Effect Details**

**Essence**

**Least Squares Means Table**

Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
H	0,55705472	0,01763542	0,544420
P	0,59063618	0,01940565	0,620302

**Niveau**

**Least Squares Means Table**

Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
N1	0,63961249	0,02142426	0,639612
N2	0,49337003	0,02429282	0,498640
N3	0,58855383	0,02142426	0,588554

**Ponçage****Least Squares Means Table**

Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
G0	0,60913300	0,01940565	0,638799
G1	0,53855791	0,01763542	0,527978

**Égrenage****Least Squares Means Table**

Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
E0	0,58563728	0,01763542	0,598828
E1	0,56205363	0,01940565	0,559093

**Vernis****Least Squares Means Table**

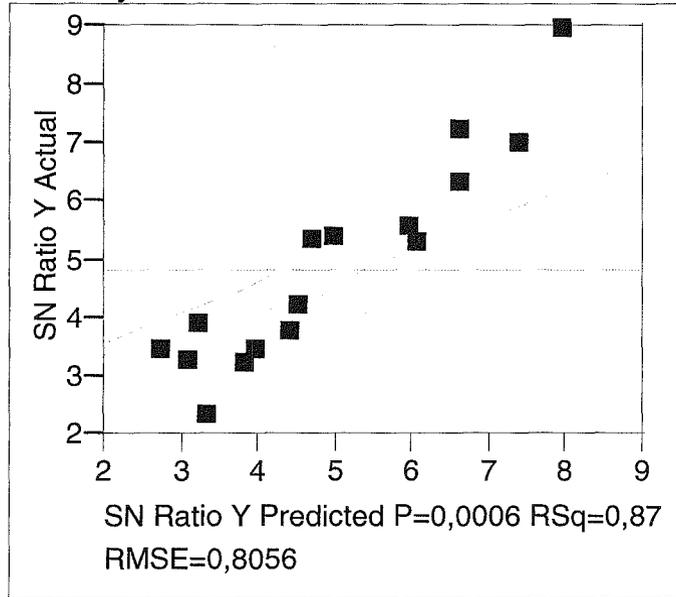
Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
VA	0,64047955	0,01763542	0,647576
VC	0,50721135	0,01940565	0,504251

**Scaled Estimates**

Nominal factors expanded to all levels

Term	Scaled Estimate	Plot Estimate	Std Error	t Ratio	Prob> t
Intercept	0,5738455		0,012945	44,33	<.0001
Essence[H]	-0,016791		0,013275	-1,26	0,2346
Essence[P]	0,0167907		0,013275	1,26	0,2346
Niveau[N1]	0,065767		0,017904	3,67	0,0043
Niveau[N2]	-0,080475		0,019086	-4,22	0,0018
Niveau[N3]	0,0147084		0,017904	0,82	0,4305
Ponçage[G0]	0,0352875		0,013275	2,66	0,0240
Ponçage[G1]	-0,035288		0,013275	-2,66	0,0240
Égrenage[E0]	0,0117918		0,013275	0,89	0,3953
Égrenage[E1]	-0,011792		0,013275	-0,89	0,3953
Vernis[VA]	0,0666341		0,013275	5,02	0,0005
Vernis[VC]	-0,066634		0,013275	-5,02	0,0005

**Response SN Ratio Y  
Actual by Predicted Plot**



**Summary of Fit**

RSquare	0,872454
RSquare Adj	0,795927
Root Mean Square Error	0,805581
Mean of Response	4,810521
Observations (or Sum Wgts)	17

**Analysis of Variance**

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Model	6	44,390983	7,39850	11,4005
Error	10	6,489607	0,64896	Prob > F
C. Total	16	50,880590		0,0006

**Lack Of Fit**

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Lack Of Fit	8	6,0763813	0,759548	3,6762

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Pure Error	2	0,4132258	0,206613	Prob > F
Total Error	10	6,4896071		0,2314
				Max RSq
				0,9919

**Parameter Estimates**

Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob> t
Intercept	4,898705	0,198713	24,65	<.0001
Essence[H]	0,2911216	0,203779	1,43	0,1836
Niveau[N1]	-1,031396	0,274846	-3,75	0,0038
Niveau[N2]	1,2678052	0,292987	4,33	0,0015
Ponçage[G0]	-0,567475	0,203779	-2,78	0,0193
Égrenage[E0]	-0,083876	0,203779	-0,41	0,6893
Vernis[VA]	-1,006047	0,203779	-4,94	0,0006

**Effect Tests**

Source	Nparm	DF	Sum of Squares	F Ratio	Prob > F
Essence	1	1	1,324493	2,0409	0,1836
Niveau	2	2	14,047431	10,8230	0,0032
Ponçage	1	1	5,032626	7,7549	0,0193
Égrenage	1	1	0,109946	0,1694	0,6893
Vernis	1	1	15,817483	24,3736	0,0006

**Effect Details****Essence****Least Squares Means Table**

Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
H	5,1898266	0,27071584	5,37398
P	4,6075834	0,29789010	4,17663

**Niveau****Least Squares Means Table**

Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
N1	3,8673086	0,32887706	3,86731
N2	6,1665102	0,37291153	6,12024
N3	4,6622961	0,32887706	4,66230

**Ponçage****Least Squares Means Table**

Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
G0	4,3312298	0,29789010	3,90027
G1	5,4661802	0,27071584	5,61963

**Égrenage****Least Squares Means Table**

Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
-------	---------------	-----------	------

Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
E0	4,8148288	0,27071584	4,60765
E1	4,9825812	0,29789010	5,03875

**Vernis**

**Least Squares Means Table**

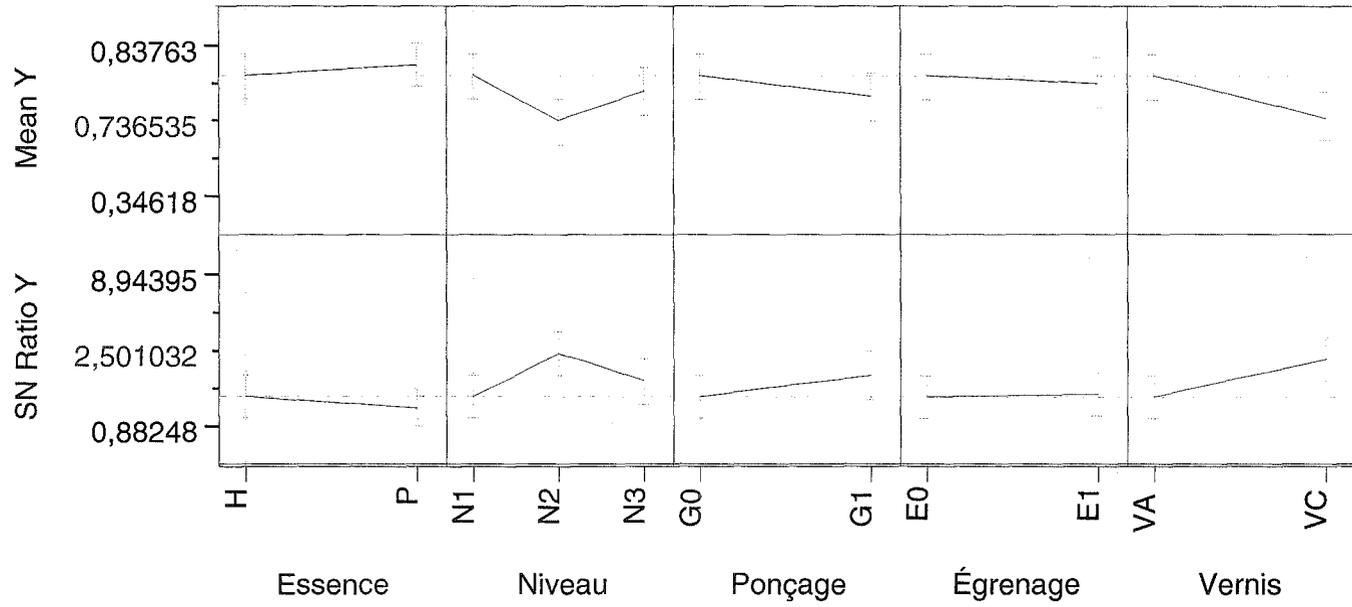
Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
VA	3,8926580	0,27071584	3,78794
VC	5,9047520	0,29789010	5,96093

**Scaled Estimates**

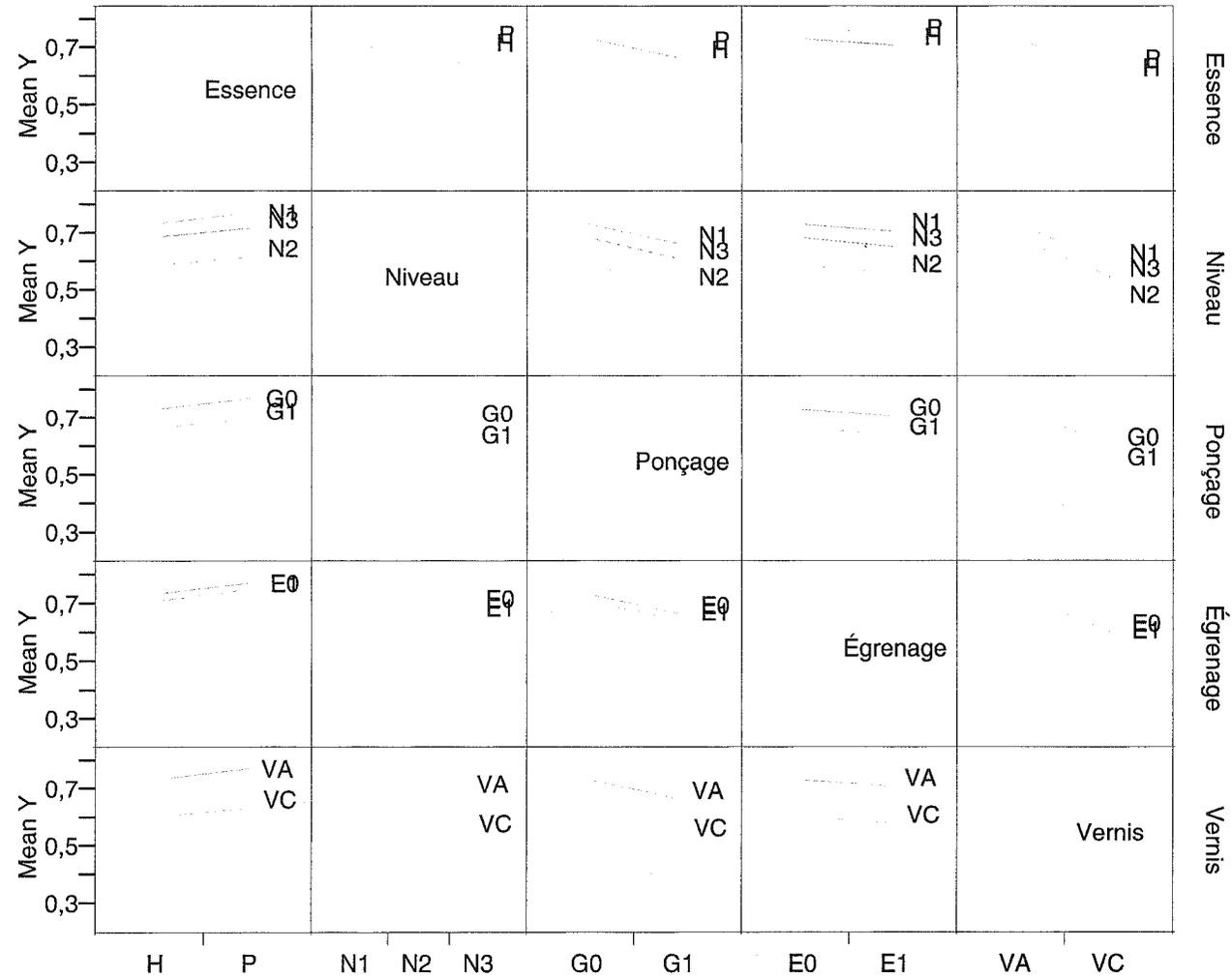
Nominal factors expanded to all levels

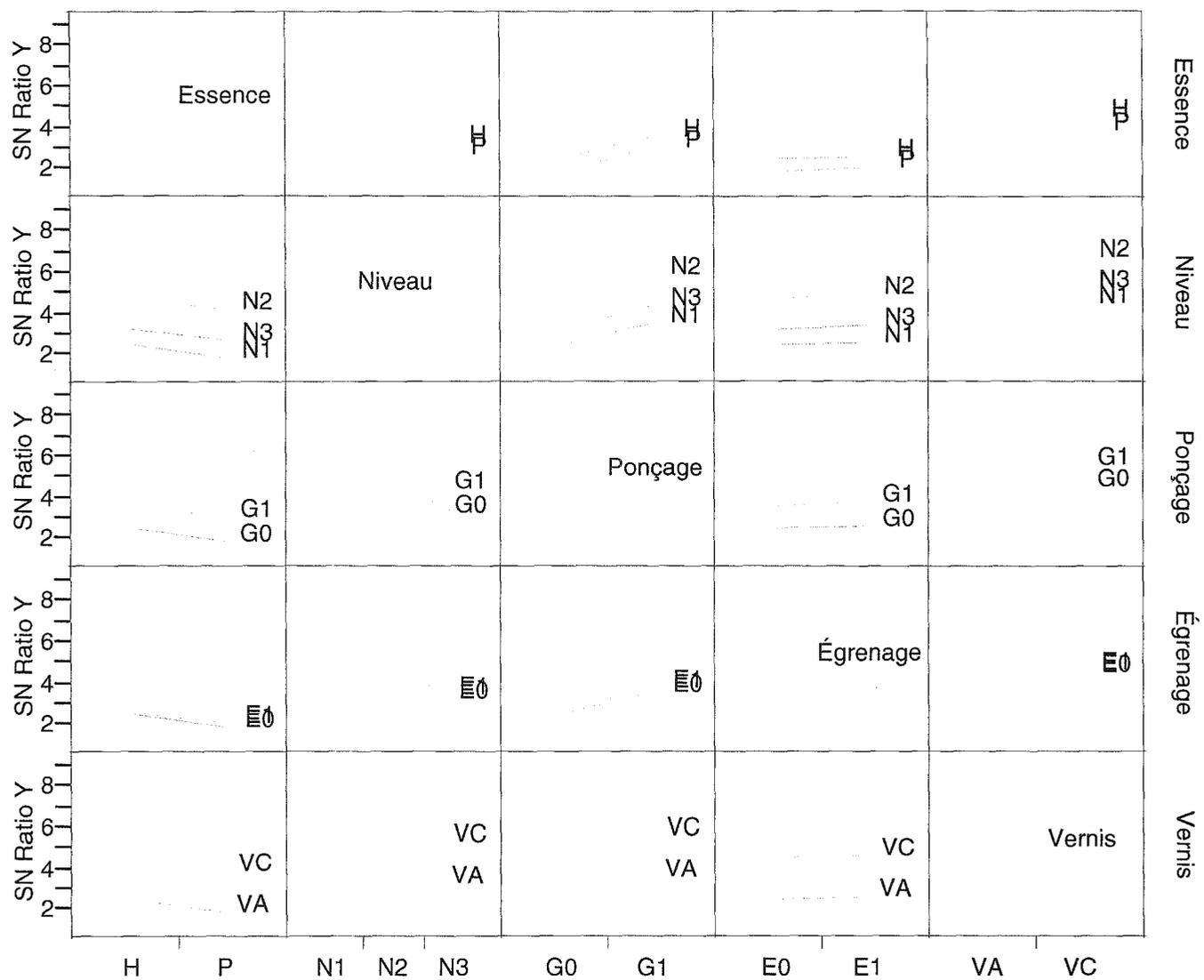
Term	Scaled Estimate	Plot Estimate	Std Error	t Ratio	Prob> t
Intercept	4,898705		0,198713	24,65	<.0001
Essence[H]	0,2911216		0,203779	1,43	0,1836
Essence[P]	-0,291122		0,203779	-1,43	0,1836
Niveau[N1]	-1,031396		0,274846	-3,75	0,0038
Niveau[N2]	1,2678052		0,292987	4,33	0,0015
Niveau[N3]	-0,236409		0,274846	-0,86	0,4099
Ponçage[G0]	-0,567475		0,203779	-2,78	0,0193
Ponçage[G1]	0,5674752		0,203779	2,78	0,0193
Égrenage[E0]	-0,083876		0,203779	-0,41	0,6893
Égrenage[E1]	0,0838762		0,203779	0,41	0,6893
Vernis[VA]	-1,006047		0,203779	-4,94	0,0006
Vernis[VC]	1,006047		0,203779	4,94	0,0006

Prediction Profiler



Interaction Profiles

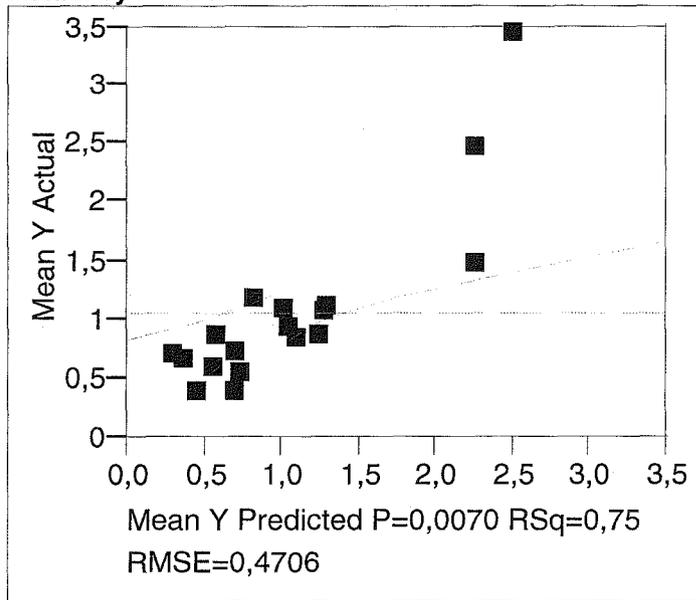




Deuxième série d'expériences

L18 -  $K_{ond}$

Least Squares Fit  
Response Mean Y  
Actual by Predicted Plot



**Summary of Fit**

RSquare	0,752602
RSquare Adj	0,617658
Root Mean Square Error	0,470577
Mean of Response	1,057756
Observations (or Sum Wgts)	18

**Analysis of Variance**

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Model	6	7,4100953	1,23502	5,5771
Error	11	2,4358703	0,22144	Prob > F
C. Total	17	9,8459656		0,0070

**Lack Of Fit**

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Lack Of Fit	9	1,8826078	0,209179	0,7562
Pure Error	2	0,5532625	0,276631	Prob > F
Total Error	11	2,4358703		0,6863
				Max RSq
				0,9438

**Parameter Estimates**

Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob> t
Intercept	1,0577561	0,110916	9,54	<.0001
Essence[H]	0,1267917	0,112636	1,13	0,2843
Niveau[N1]	-0,144746	0,156859	-0,92	0,3759
Niveau[N2]	-0,265937	0,156859	-1,70	0,1181
Ponçage[G0]	0,2956473	0,112636	2,62	0,0236
Egrenage[E0]	0,2663743	0,112636	2,36	0,0375
Vernis[VA]	0,3403939	0,112636	3,02	0,0116

**Effect Tests**

Source	Nparm	DF	Sum of Squares	F Ratio	Prob > F
Essence	1	1	0,2806018	1,2672	0,2843
Niveau	2	2	1,5620042	3,5269	0,0655
Ponçage	1	1	1,5256548	6,8896	0,0236
Egrenage	1	1	1,2384918	5,5928	0,0375
Vernis	1	1	2,0224229	9,1329	0,0116

**Effect Details****Essence****Least Squares Means Table**

Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
-------	---------------	-----------	------

Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
H	1,1845479	0,15807973	1,08428
P	0,9309644	0,15807973	1,03123

**Niveau****Least Squares Means Table**

Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
N1	0,9130102	0,19211227	0,91301
N2	0,7918194	0,19211227	0,79182
N3	1,4684388	0,19211227	1,46844

**Ponçage****Least Squares Means Table**

Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
G0	1,3534034	0,15807973	1,40673
G1	0,7621089	0,15807973	0,70878

**Egrenage****Least Squares Means Table**

Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
E0	1,3241304	0,15807973	1,38071
E1	0,7913818	0,15807973	0,73480

**Vernis****Least Squares Means Table**

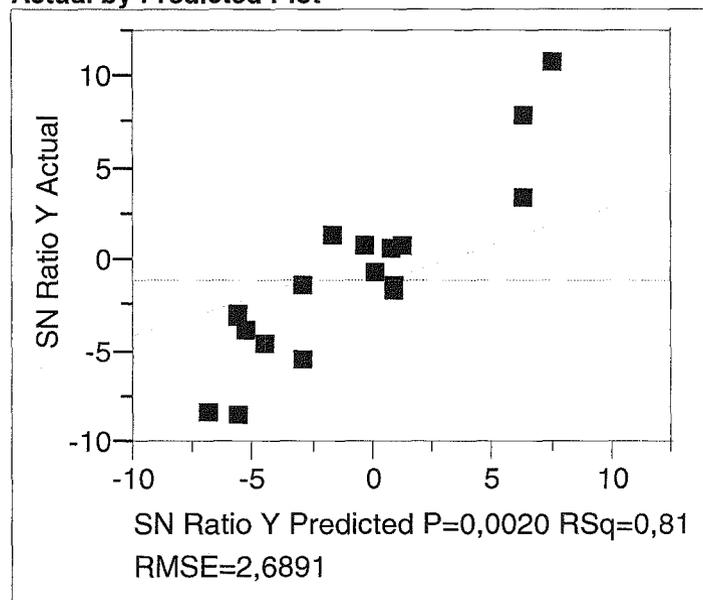
Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
VA	1,3981500	0,15807973	1,44651
VC	0,7173623	0,15807973	0,66900

**Scaled Estimates**

Nominal factors expanded to all levels

Term	Scaled Estimate	Plot Estimate	Std Error	t Ratio	Prob> t
Intercept	1,0577561		0,110916	9,54	<.0001
Essence[H]	0,1267917		0,112636	1,13	0,2843
Essence[P]	-0,126792		0,112636	-1,13	0,2843
Niveau[N1]	-0,144746		0,156859	-0,92	0,3759
Niveau[N2]	-0,265937		0,156859	-1,70	0,1181
Niveau[N3]	0,4106827		0,156859	2,62	0,0239
Ponçage[G0]	0,2956473		0,112636	2,62	0,0236
Ponçage[G1]	-0,295647		0,112636	-2,62	0,0236
Egrenage[E0]	0,2663743		0,112636	2,36	0,0375
Egrenage[E1]	-0,266374		0,112636	-2,36	0,0375
Vernis[VA]	0,3403939		0,112636	3,02	0,0116
Vernis[VC]	-0,340394		0,112636	-3,02	0,0116

**Response SN Ratio Y  
Actual by Predicted Plot**



**Summary of Fit**

RSquare	0,807957
RSquare Adj	0,703207
Root Mean Square Error	2,68913
Mean of Response	-1,00674
Observations (or Sum Wgts)	18

**Analysis of Variance**

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Model	6	334,66261	55,7771	7,7132
Error	11	79,54561	7,2314	Prob > F
C. Total	17	414,20822		0,0020

**Lack Of Fit**

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Lack Of Fit	9	53,742020	5,9713	0,4628

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Pure Error	2	25,803592	12,9018	Prob > F
Total Error	11	79,545613		0,8287
				Max RSq
				0,9377

**Parameter Estimates**

Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob> t
Intercept	-1,006739	0,633834	-1,59	0,1405
Essence[H]	0,5979701	0,643661	0,93	0,3728
Niveau[N1]	-0,063116	0,896377	-0,07	0,9451
Niveau[N2]	-1,230323	0,896377	-1,37	0,1972
Ponçage[G0]	2,0630941	0,643661	3,21	0,0084
Egrenage[E0]	1,8585469	0,643661	2,89	0,0148
Vernis[VA]	2,6747315	0,643661	4,16	0,0016

**Effect Tests**

Source	Nparm	DF	Sum of Squares	F Ratio	Prob > F
Essence	1	1	6,24119	0,8631	0,3728
Niveau	2	2	19,14398	1,3237	0,3054
Ponçage	1	1	74,29278	10,2736	0,0084
Egrenage	1	1	60,29143	8,3374	0,0148
Vernis	1	1	124,87311	17,2681	0,0016

**Effect Details****Essence****Least Squares Means Table**

Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
H	-0,408769	0,90335241	-1,1417
P	-1,604709	0,90335241	-0,8718

**Niveau****Least Squares Means Table**

Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
N1	-1,069855	1,0978327	-1,0699
N2	-2,237062	1,0978327	-2,2371
N3	0,286700	1,0978327	0,2867

**Ponçage****Least Squares Means Table**

Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
G0	1,056355	0,90335241	1,4936
G1	-3,069833	0,90335241	-3,5071

**Egrenage****Least Squares Means Table**

Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
-------	---------------	-----------	------

Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
E0	0,851808	0,90335241	1,3118
E1	-2,865286	0,90335241	-3,3253

**Vernis**

**Least Squares Means Table**

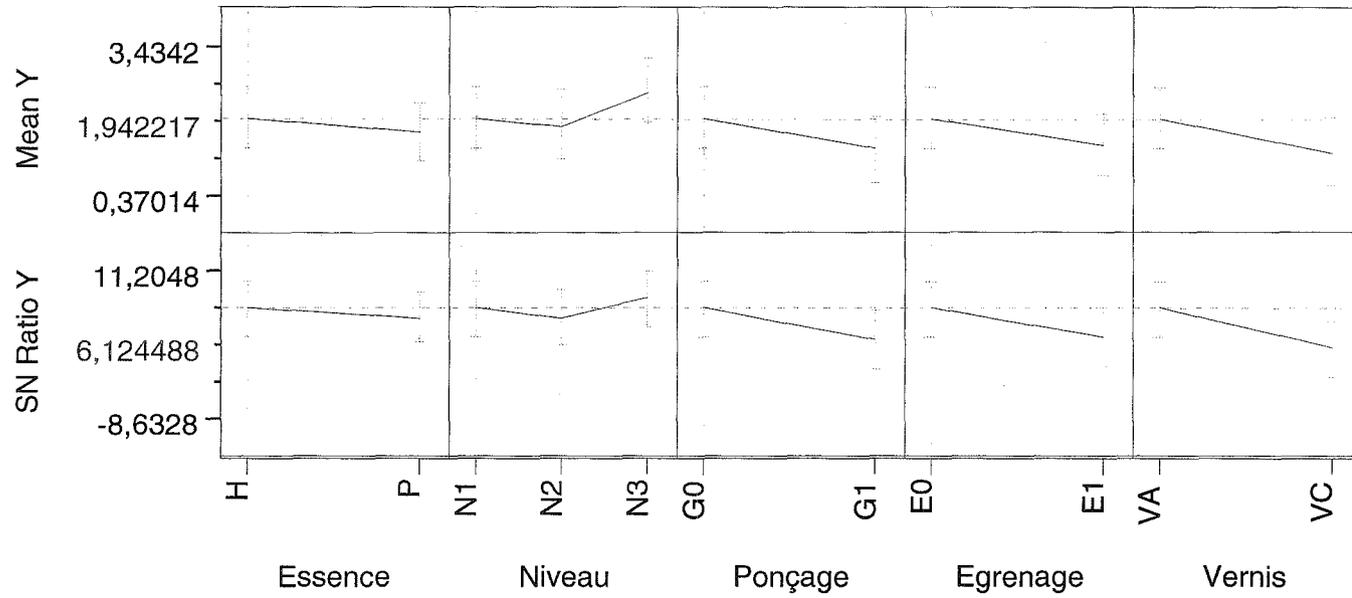
Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
VA	1,667992	0,90335241	2,0373
VC	-3,681471	0,90335241	-4,0508

**Scaled Estimates**

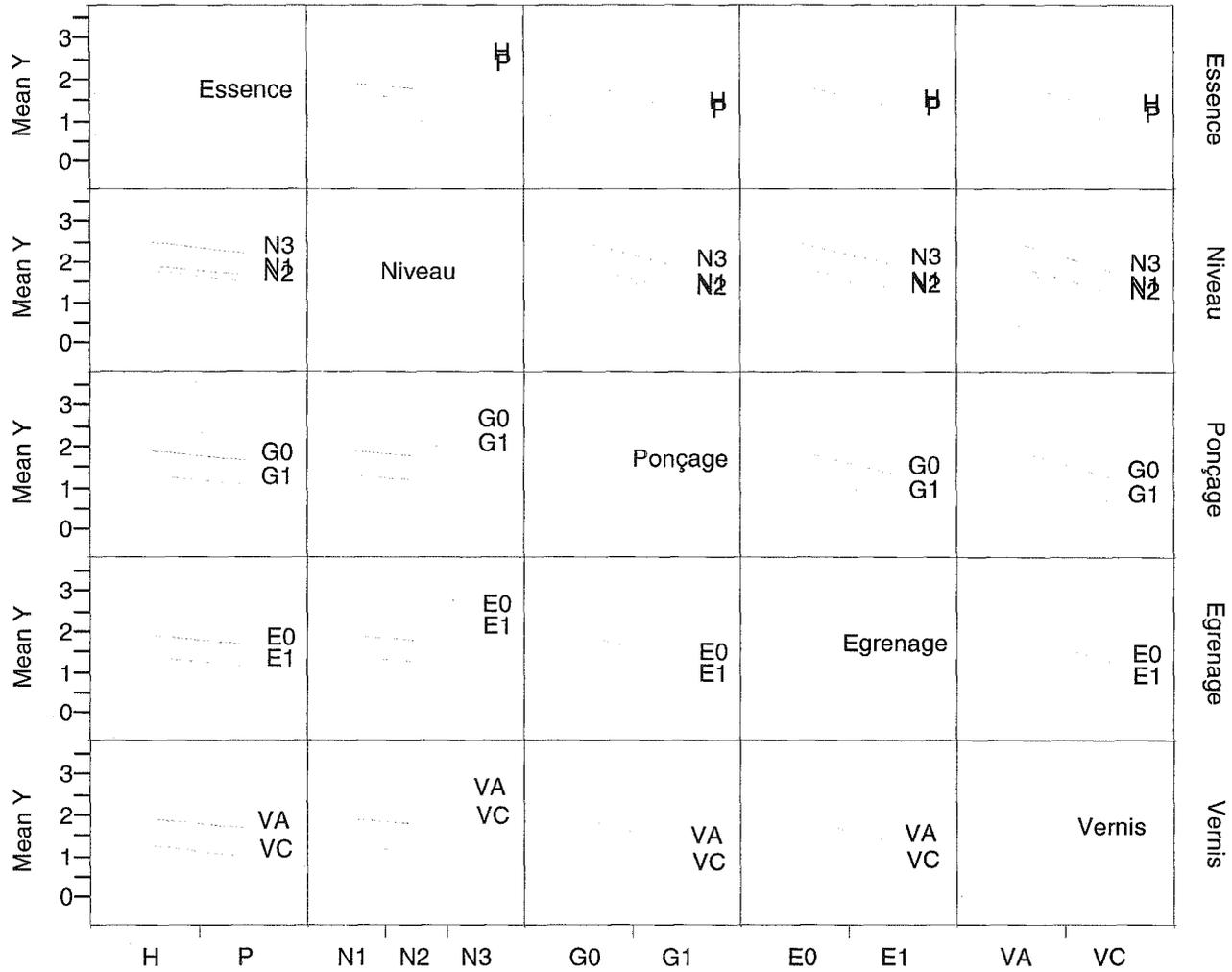
Nominal factors expanded to all levels

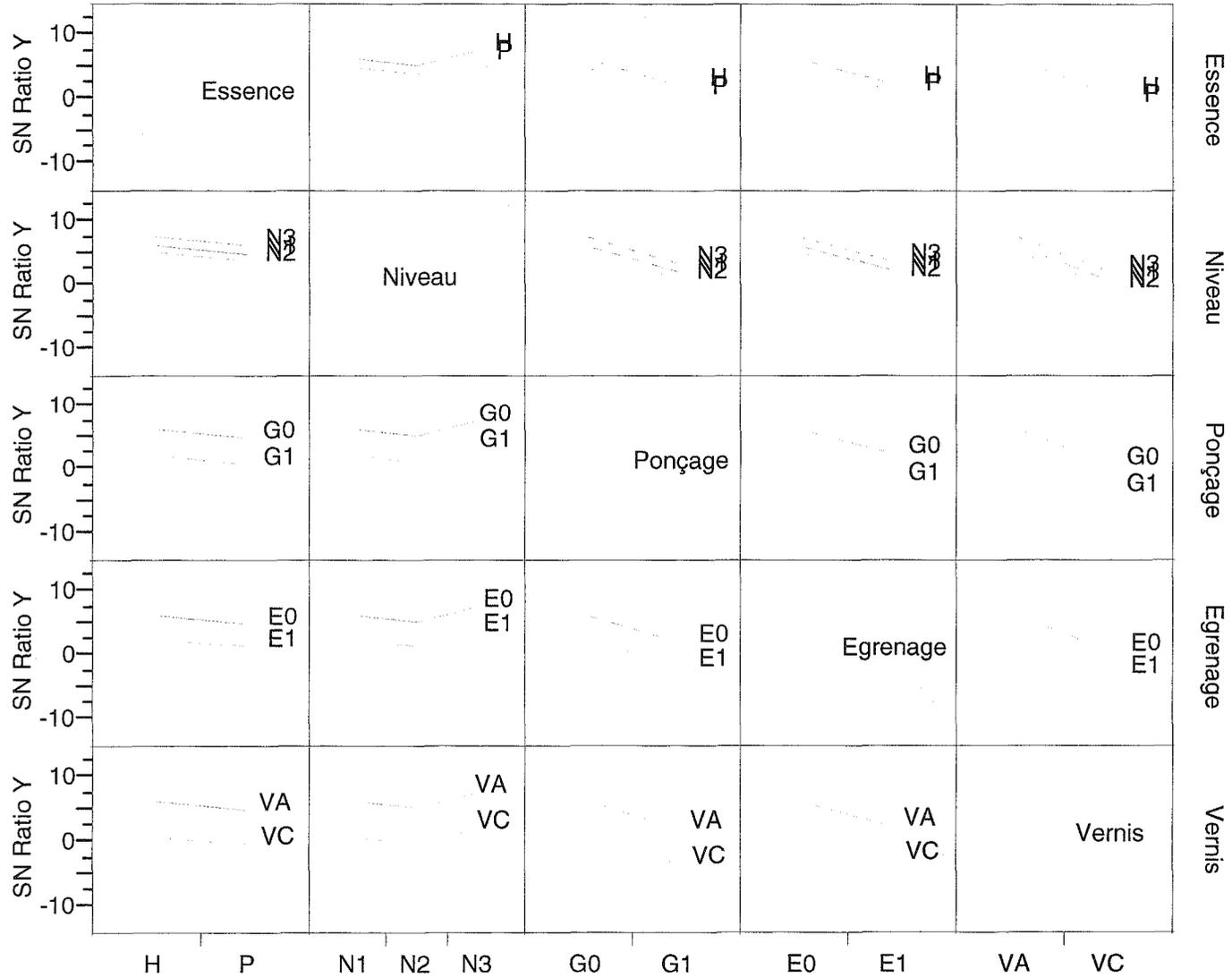
Term	Scaled Estimate	Plot Estimate	Std Error	t Ratio	Prob> t
Intercept	-1,006739		0,633834	-1,59	0,1405
Essence[H]	0,5979701		0,643661	0,93	0,3728
Essence[P]	-0,59797		0,643661	-0,93	0,3728
Niveau[N1]	-0,063116		0,896377	-0,07	0,9451
Niveau[N2]	-1,230323		0,896377	-1,37	0,1972
Niveau[N3]	1,2934389		0,896377	1,44	0,1769
Ponçage[G0]	2,0630941		0,643661	3,21	0,0084
Ponçage[G1]	-2,063094		0,643661	-3,21	0,0084
Egrenage[E0]	1,8585469		0,643661	2,89	0,0148
Egrenage[E1]	-1,858547		0,643661	-2,89	0,0148
Vernis[VA]	2,6747315		0,643661	4,16	0,0016
Vernis[VC]	-2,674731		0,643661	-4,16	0,0016

Prediction Profiler



Interaction Profiles

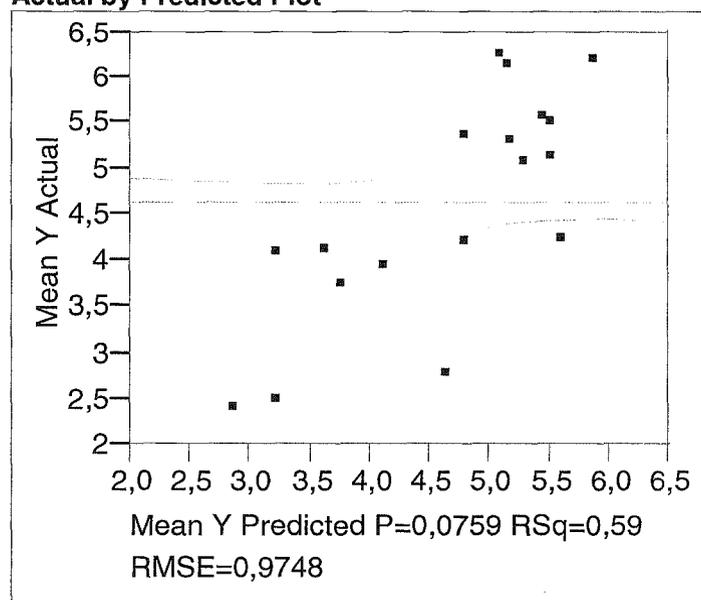




309 118 118 118 118 118  
 Bibliothèque des Sciences  
 Rue du Jardin Botanique - CS 20148  
 54501 - 54501 118 118 118 118 118

L18 - K<sub>rug</sub>

Least Squares Fit  
Response Mean Y  
Actual by Predicted Plot



## Summary of Fit

RSquare	0,592061
RSquare Adj	0,369549
Root Mean Square Error	0,974838
Mean of Response	4,633384
Observations (or Sum Wgts)	18

## Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Model	6	15,171522	2,52859	2,6608

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Error	11	10,453398	0,95031	Prob > F
C. Total	17	25,624919		0,0759

**Lack Of Fit**

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Lack Of Fit	9	9,087261	1,00970	1,4782
Pure Error	2	1,366136	0,68307	Prob > F
Total Error	11	10,453398		0,4675
				Max RSq
				0,9467

**Parameter Estimates**

Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob> t
Intercept	4,6333844	0,229771	20,17	<.0001
Essence[H]	0,1833064	0,233334	0,79	0,4487
Niveau[N1]	0,4727471	0,324946	1,45	0,1736
Niveau[N2]	-0,190597	0,324946	-0,59	0,5693
Ponçage[G0]	0,3347274	0,233334	1,43	0,1792
Egrenage[E0]	0,401845	0,233334	1,72	0,1130
Vernis[VA]	0,5915877	0,233334	2,54	0,0277

**Effect Tests**

Source	Nparm	DF	Sum of Squares	F Ratio	Prob > F
Essence	1	1	0,5864942	0,6172	0,4487
Niveau	2	2	2,0365543	1,0715	0,3757
Ponçage	1	1	1,9556498	2,0579	0,1792
Egrenage	1	1	2,8185502	2,9659	0,1130
Vernis	1	1	6,1086730	6,4281	0,0277

**Effect Details****Essence****Least Squares Means Table**

Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
H	4,8166908	0,32747476	4,66912
P	4,4500780	0,32747476	4,59765

**Niveau****Least Squares Means Table**

Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
N1	5,1061314	0,39797589	5,10613
N2	4,4427878	0,39797589	4,44279
N3	4,3512339	0,39797589	4,35123

**Ponçage**

**Least Squares Means Table**

Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
G0	4,9681118	0,32747476	5,05813
G1	4,2986570	0,32747476	4,20864

**Egrenage**

**Least Squares Means Table**

Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
E0	5,0352294	0,32747476	5,11779
E1	4,2315393	0,32747476	4,14898

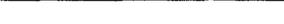
**Vernis**

**Least Squares Means Table**

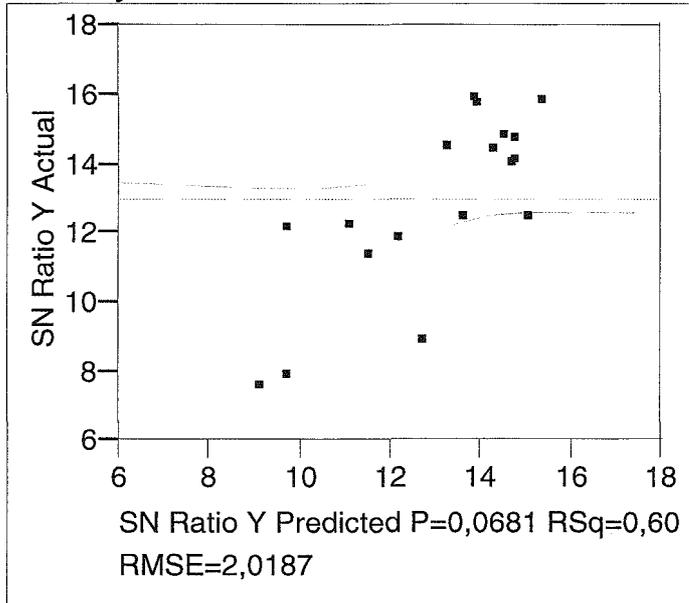
Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
VA	5,2249721	0,32747476	5,28645
VC	4,0417966	0,32747476	3,98032

**Scaled Estimates**

Nominal factors expanded to all levels

Term	Scaled Estimate	Plot Estimate	Std Error	t Ratio	Prob> t
Intercept	4,6333844		0,229771	20,17	<.0001
Essence[H]	0,1833064		0,233334	0,79	0,4487
Essence[P]	-0,183306		0,233334	-0,79	0,4487
Niveau[N1]	0,4727471		0,324946	1,45	0,1736
Niveau[N2]	-0,190597		0,324946	-0,59	0,5693
Niveau[N3]	-0,28215		0,324946	-0,87	0,4038
Ponçage[G0]	0,3347274		0,233334	1,43	0,1792
Ponçage[G1]	-0,334727		0,233334	-1,43	0,1792
Egrenage[E0]	0,401845		0,233334	1,72	0,1130
Egrenage[E1]	-0,401845		0,233334	-1,72	0,1130
Vernis[VA]	0,5915877		0,233334	2,54	0,0277
Vernis[VC]	-0,591588		0,233334	-2,54	0,0277

**Response SN Ratio Y  
Actual by Predicted Plot**



**Summary of Fit**

RSquare	0,601895
RSquare Adj	0,384747
Root Mean Square Error	2,018684
Mean of Response	12,98541
Observations (or Sum Wgts)	18

**Analysis of Variance**

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Model	6	67,77230	11,2954	2,7718
Error	11	44,82593	4,0751	Prob > F
C. Total	17	112,59823		0,0681

**Lack Of Fit**

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Lack Of Fit	9	35,509235	3,94547	0,8470

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Pure Error	2	9,316696	4,65835	Prob > F
Total Error	11	44,825931		0,6495
				Max RSq
				0,9173

**Parameter Estimates**

Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob> t
Intercept	12,985413	0,475808	27,29	<.0001
Essence[H]	0,3246912	0,483186	0,67	0,5155
Niveau[N1]	0,8749104	0,672895	1,30	0,2201
Niveau[N2]	-0,103783	0,672895	-0,15	0,8802
Ponçage[G0]	0,6666838	0,483186	1,38	0,1951
Egrenage[E0]	0,8828527	0,483186	1,83	0,0949
Vernis[VA]	1,2704543	0,483186	2,63	0,0234

**Effect Tests**

Source	Nparm	DF	Sum of Squares	F Ratio	Prob > F
Essence	1	1	1,840134	0,4516	0,5155
Niveau	2	2	8,225260	1,0092	0,3959
Ponçage	1	1	7,757976	1,9038	0,1951
Egrenage	1	1	13,604577	3,3385	0,0949
Vernis	1	1	28,172582	6,9134	0,0234

**Effect Details****Essence****Least Squares Means Table**

Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
H	13,310104	0,67813124	12,9968
P	12,660722	0,67813124	12,9741

**Niveau****Least Squares Means Table**

Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
N1	13,860324	0,82412425	13,8603
N2	12,881630	0,82412425	12,8816
N3	12,214286	0,82412425	12,2143

**Ponçage****Least Squares Means Table**

Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
G0	13,652097	0,67813124	13,8553
G1	12,318729	0,67813124	12,1155

**Egrenage****Least Squares Means Table**

Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
-------	---------------	-----------	------

Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
E0	13,868266	0,67813124	14,0474
E1	12,102560	0,67813124	11,9234

**Vernis**

**Least Squares Means Table**

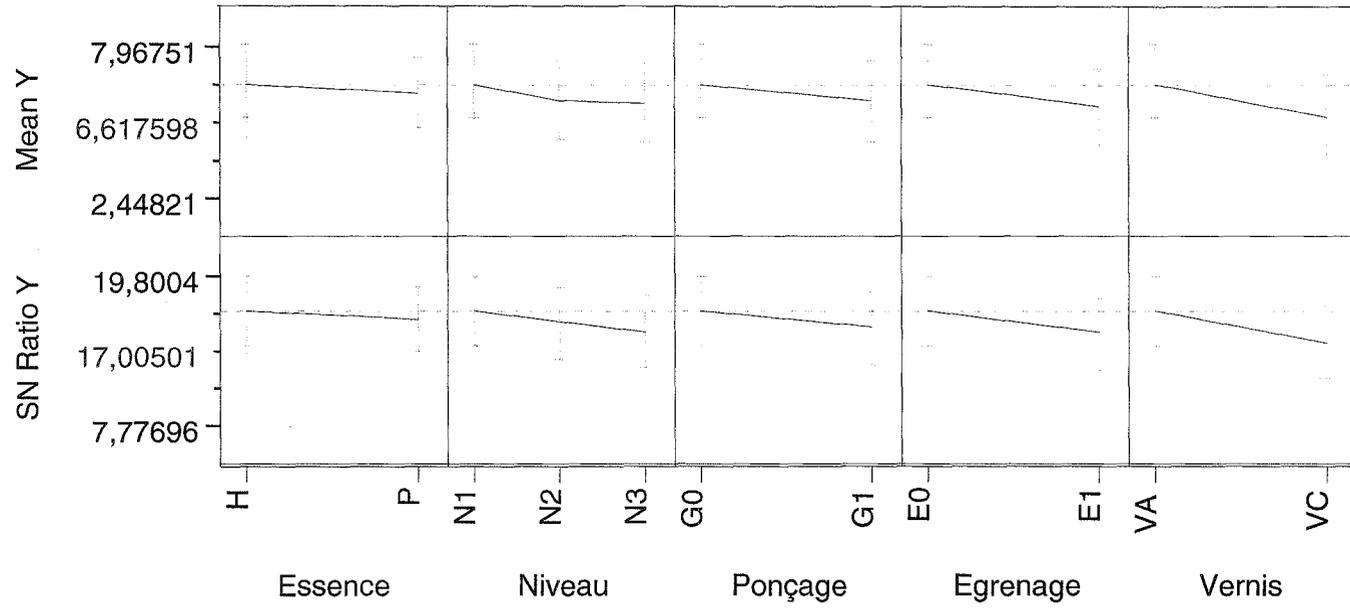
Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
VA	14,255867	0,67813124	14,3920
VC	11,714959	0,67813124	11,5789

**Scaled Estimates**

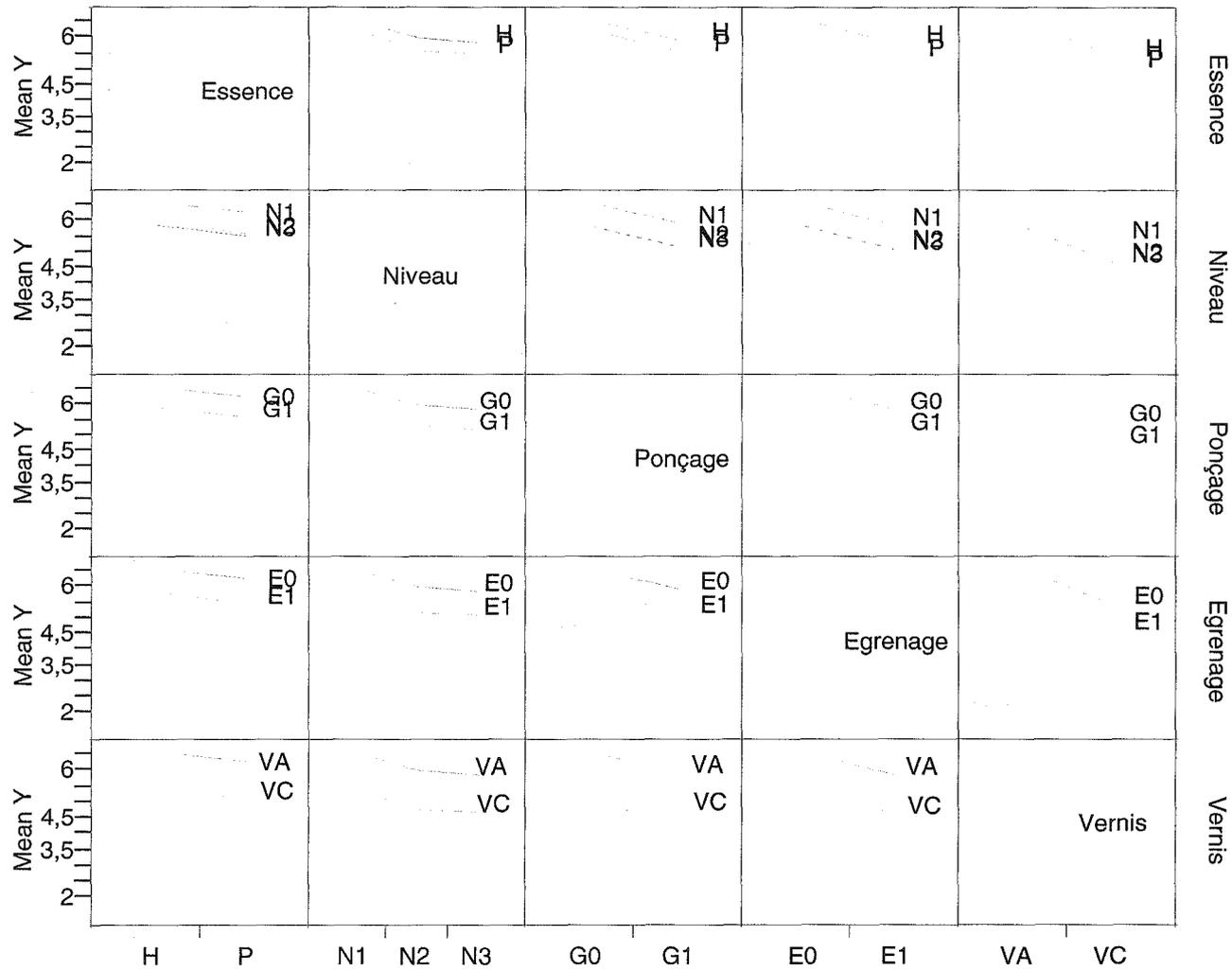
Nominal factors expanded to all levels

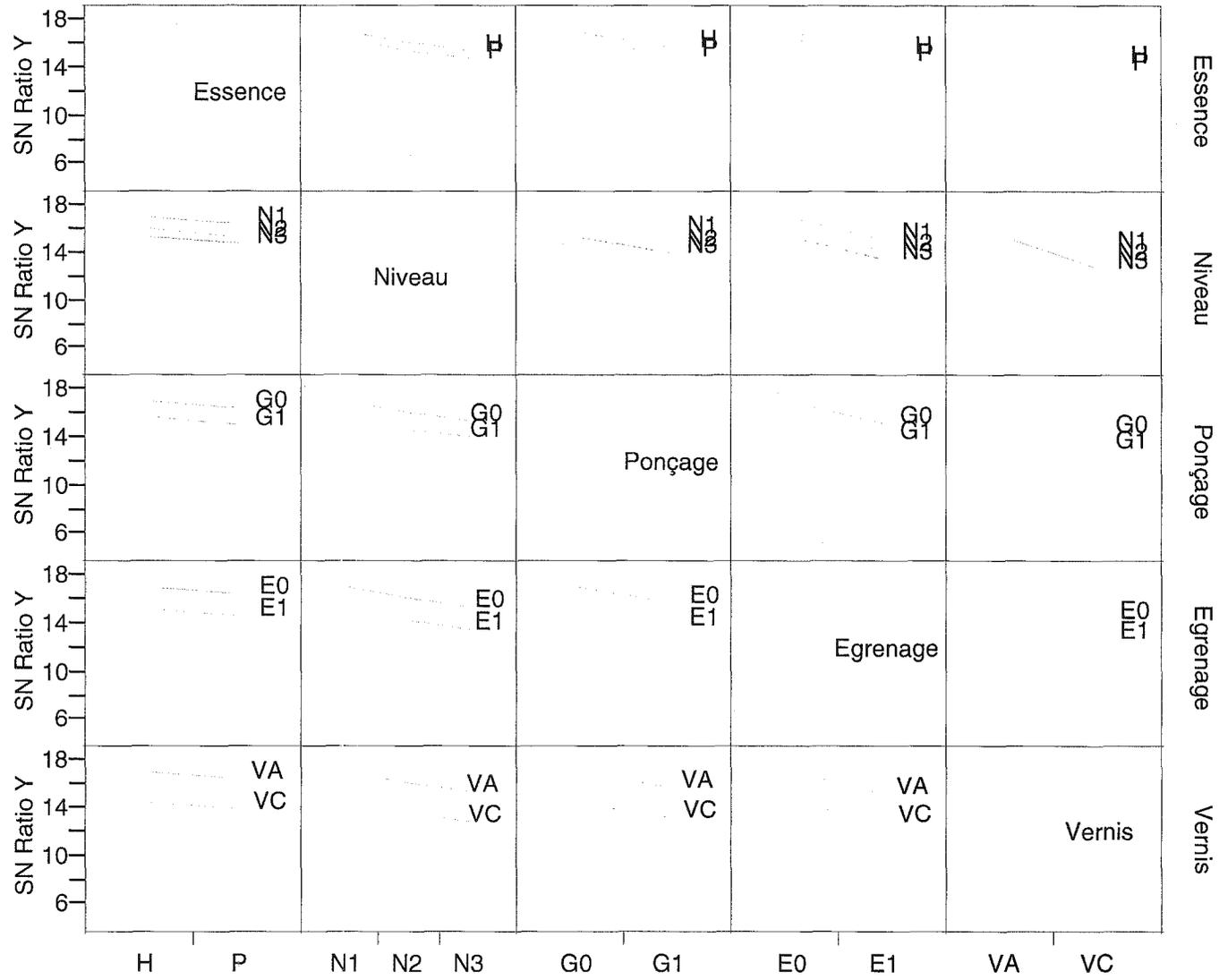
Term	Scaled Estimate	Plot Estimate	Std Error	t Ratio	Prob> t
Intercept	12,985413		0,475808	27,29	<.0001
Essence[H]	0,3246912		0,483186	0,67	0,5155
Essence[P]	-0,324691		0,483186	-0,67	0,5155
Niveau[N1]	0,8749104		0,672895	1,30	0,2201
Niveau[N2]	-0,103783		0,672895	-0,15	0,8802
Niveau[N3]	-0,771127		0,672895	-1,15	0,2761
Ponçage[G0]	0,6666838		0,483186	1,38	0,1951
Ponçage[G1]	-0,666684		0,483186	-1,38	0,1951
Egrenage[E0]	0,8828527		0,483186	1,83	0,0949
Egrenage[E1]	-0,882853		0,483186	-1,83	0,0949
Vernis[VA]	1,2704543		0,483186	2,63	0,0234
Vernis[VC]	-1,270454		0,483186	-2,63	0,0234

Prediction Profiler



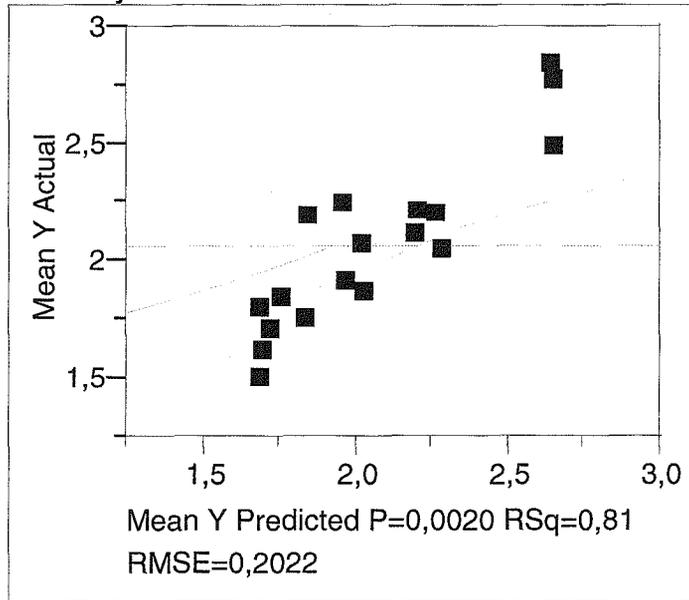
Interaction Profiles





L18 - K<sub>sub</sub>

Least Squares Fit  
Response Mean Y  
Actual by Predicted Plot



Summary of Fit

RSquare	0,807817
RSquare Adj	0,702989
Root Mean Square Error	0,202237
Mean of Response	2,055653
Observations (or Sum Wgts)	18

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
--------	----	----------------	-------------	---------

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Model	6	1,8910908	0,315182	7,7062
Error	11	0,4498995	0,040900	Prob > F
C. Total	17	2,3409903		0,0020

**Lack Of Fit**

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Lack Of Fit	9	0,37169020	0,041299	1,0561
Pure Error	2	0,07820933	0,039105	Prob > F
Total Error	11	0,44989954		0,5766
				Max RSq
				0,9666

**Parameter Estimates**

Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob> t
Intercept	2,0556533	0,047668	43,12	<.0001
Essence[H]	-0,003634	0,048407	-0,08	0,9415
Niveau[N1]	-0,067599	0,067412	-1,00	0,3375
Niveau[N2]	-0,039734	0,067412	-0,59	0,5675
Ponçage[G0]	0,1057062	0,048407	2,18	0,0515
Egrenage[E0]	0,1469631	0,048407	3,04	0,0113
Vernis[VA]	0,2235944	0,048407	4,62	0,0007

**Effect Tests**

Source	Nparm	DF	Sum of Squares	F Ratio	Prob > F
Essence	1	1	0,00023055	0,0056	0,9415
Niveau	2	2	0,10601335	1,2960	0,3123
Ponçage	1	1	0,19503347	4,7685	0,0515
Egrenage	1	1	0,37698572	9,2173	0,0113
Vernis	1	1	0,87263025	21,3357	0,0007

**Effect Details****Essence****Least Squares Means Table**

Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
H	2,0520190	0,06793708	1,99910
P	2,0592877	0,06793708	2,11221

**Niveau****Least Squares Means Table**

Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
N1	1,9880544	0,08256306	1,98805
N2	2,0159189	0,08256306	2,01592
N3	2,1629867	0,08256306	2,16299

**Ponçage**

**Least Squares Means Table**

Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
G0	2,1613595	0,06793708	2,20294
G1	1,9499472	0,06793708	1,90837

**Egrenage**

**Least Squares Means Table**

Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
E0	2,2026164	0,06793708	2,23961
E1	1,9086903	0,06793708	1,87170

**Vernis**

**Least Squares Means Table**

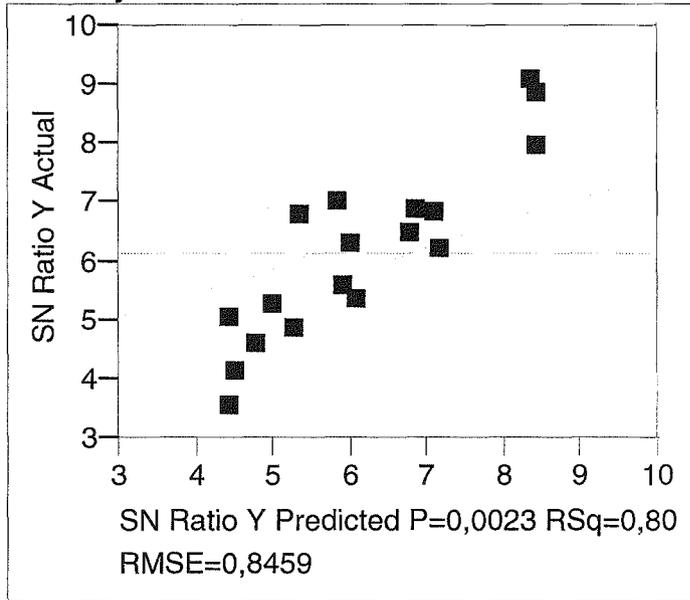
Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
VA	2,2792477	0,06793708	2,30773
VC	1,8320590	0,06793708	1,80358

**Scaled Estimates**

Nominal factors expanded to all levels

Term	Scaled Estimate	Plot Estimate	Std Error	t Ratio	Prob> t
Intercept	2,0556533		0,047668	43,12	<.0001
Essence[H]	-0,003634		0,048407	-0,08	0,9415
Essence[P]	0,0036344		0,048407	0,08	0,9415
Niveau[N1]	-0,067599		0,067412	-1,00	0,3375
Niveau[N2]	-0,039734		0,067412	-0,59	0,5675
Niveau[N3]	0,1073334		0,067412	1,59	0,1396
Ponçage[G0]	0,1057062		0,048407	2,18	0,0515
Ponçage[G1]	-0,105706		0,048407	-2,18	0,0515
Egrenage[E0]	0,1469631		0,048407	3,04	0,0113
Egrenage[E1]	-0,146963		0,048407	-3,04	0,0113
Vernis[VA]	0,2235944		0,048407	4,62	0,0007
Vernis[VC]	-0,223594		0,048407	-4,62	0,0007

**Response SN Ratio Y  
Actual by Predicted Plot**



**Summary of Fit**

RSquare	0,801316
RSquare Adj	0,692942
Root Mean Square Error	0,845873
Mean of Response	6,130386
Observations (or Sum Wgts)	18

**Analysis of Variance**

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Model	6	31,742660	5,29044	7,3940
Error	11	7,870520	0,71550	Prob > F
C. Total	17	39,613180		0,0023

**Lack Of Fit**

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Lack Of Fit	9	6,3137179	0,701524	0,9012

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Pure Error	2	1,5568025	0,778401	Prob > F
Total Error	11	7,8705204		0,6291
				Max RSq
				0,9607

**Parameter Estimates**

Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob> t
Intercept	6,1303858	0,199374	30,75	<.0001
Essence[H]	-0,034425	0,202466	-0,17	0,8681
Niveau[N1]	-0,203683	0,281958	-0,72	0,4851
Niveau[N2]	-0,074399	0,281958	-0,26	0,7968
Ponçage[G0]	0,4215187	0,202466	2,08	0,0615
Egrenage[E0]	0,6066876	0,202466	3,00	0,0122
Vernis[VA]	0,9422805	0,202466	4,65	0,0007

**Effect Tests**

Source	Nparm	DF	Sum of Squares	F Ratio	Prob > F
Essence	1	1	0,020685	0,0289	0,8681
Niveau	2	2	0,746113	0,5214	0,6077
Ponçage	1	1	3,101289	4,3344	0,0615
Egrenage	1	1	6,424492	8,9790	0,0122
Vernis	1	1	15,497759	21,6600	0,0007

**Effect Details****Essence****Least Squares Means Table**

Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
H	6,0959609	0,28415207	5,87702
P	6,1648106	0,28415207	6,38375

**Niveau****Least Squares Means Table**

Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
N1	5,9267023	0,34532638	5,92670
N2	6,0559866	0,34532638	6,05599
N3	6,4084684	0,34532638	6,40847

**Ponçage****Least Squares Means Table**

Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
G0	6,5519044	0,28415207	6,72784
G1	5,7088671	0,28415207	5,53293

**Egrenage****Least Squares Means Table**

Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
-------	---------------	-----------	------

Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
E0	6,7370733	0,28415207	6,89243
E1	5,5236982	0,28415207	5,36834

**Vernis**

**Least Squares Means Table**

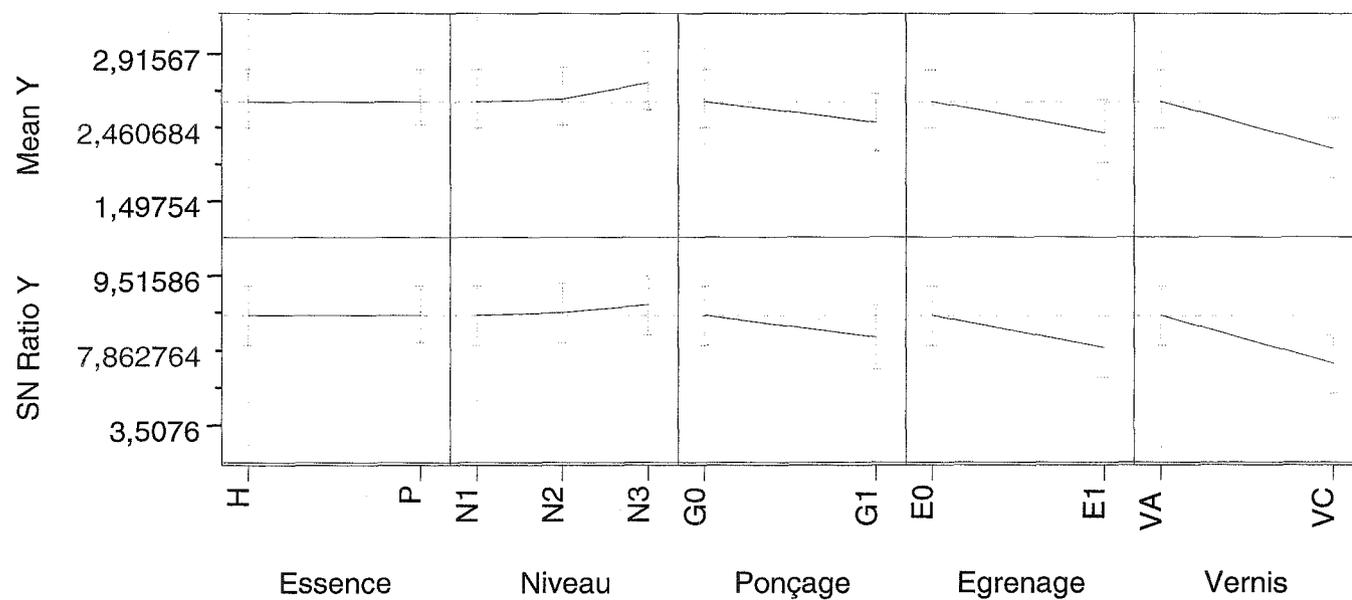
Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
VA	7,0726662	0,28415207	7,19074
VC	5,1881053	0,28415207	5,07004

**Scaled Estimates**

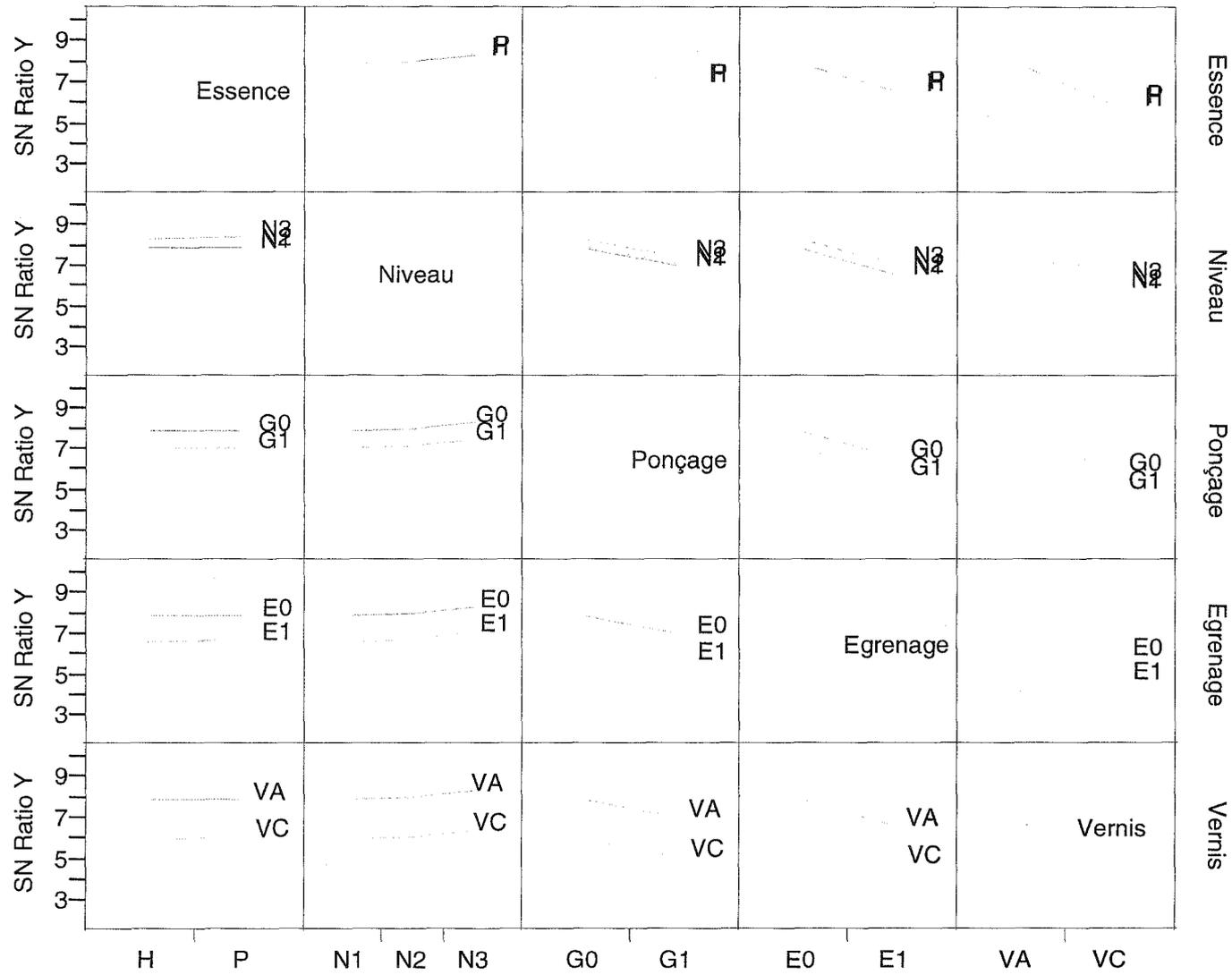
Nominal factors expanded to all levels

Term	Scaled Estimate	Plot Estimate	Std Error	t Ratio	Prob> t
Intercept	6,1303858		0,199374	30,75	<.0001
Essence[H]	-0,034425		0,202466	-0,17	0,8681
Essence[P]	0,0344248		0,202466	0,17	0,8681
Niveau[N1]	-0,203683		0,281958	-0,72	0,4851
Niveau[N2]	-0,074399		0,281958	-0,26	0,7968
Niveau[N3]	0,2780827		0,281958	0,99	0,3452
Ponçage[G0]	0,4215187		0,202466	2,08	0,0615
Ponçage[G1]	-0,421519		0,202466	-2,08	0,0615
Egrenage[E0]	0,6066876		0,202466	3,00	0,0122
Egrenage[E1]	-0,606688		0,202466	-3,00	0,0122
Vernis[VA]	0,9422805		0,202466	4,65	0,0007
Vernis[VC]	-0,94228		0,202466	-4,65	0,0007

Prediction Profiler

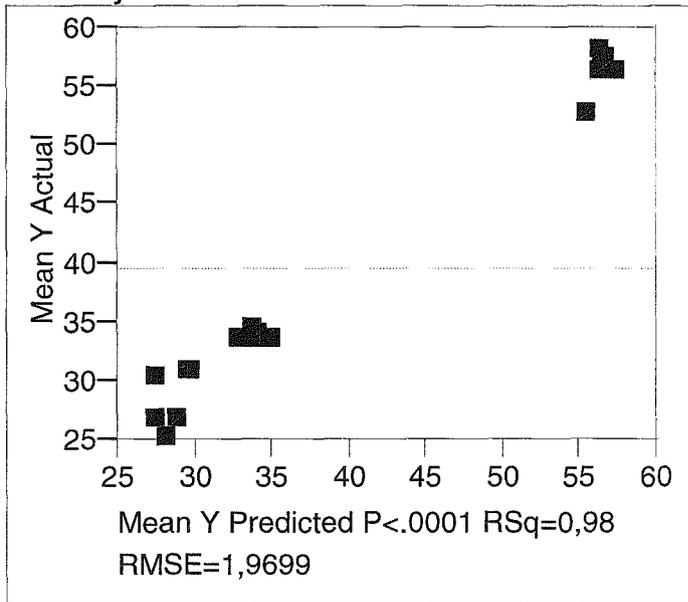






**L18 - Énergie spécifique**

Least Squares Fit  
 Response Mean Y  
 Actual by Predicted Plot



**Summary of Fit**

RSquare	0,98415
RSquare Adj	0,975504
Root Mean Square Error	1,969909
Mean of Response	39,53531
Observations (or Sum Wgts)	18

**Analysis of Variance**

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
--------	----	----------------	-------------	---------

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Model	6	2650,3930	441,732	113,8326
Error	11	42,6860	3,881	Prob > F
C. Total	17	2693,0790		<.0001

**Lack Of Fit**

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Lack Of Fit	9	42,234394	4,69271	20,7845
Pure Error	2	0,451559	0,22578	Prob > F
Total Error	11	42,685953		0,0467
				Max RSq
				0,9998

**Parameter Estimates**

Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob> t
Intercept	39,535311	0,464312	85,15	<.0001
Essence[H]	0,4189362	0,471511	0,89	0,3933
Niveau[N1]	-11,10464	0,656636	-16,91	<.0001
Niveau[N2]	16,848395	0,656636	25,66	<.0001
Ponçage[G0]	0,6319663	0,471511	1,34	0,2072
Egrenage[E0]	0,0450686	0,471511	0,10	0,9256
Vernis[VA]	-0,053003	0,471511	-0,11	0,9125

**Effect Tests**

Source	Nparm	DF	Sum of Squares	F Ratio	Prob > F
Essence	1	1	3,0634	0,7894	0,3933
Niveau	2	2	2641,0332	340,2919	<.0001
Ponçage	1	1	6,9710	1,7964	0,2072
Egrenage	1	1	0,0355	0,0091	0,9256
Vernis	1	1	0,0490	0,0126	0,9125

**Effect Details****Essence****Least Squares Means Table**

Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
H	39,954248	0,66174640	39,8849
P	39,116375	0,66174640	39,1857

**Niveau****Least Squares Means Table**

Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
N1	28,430667	0,80421196	28,4307
N2	56,383706	0,80421196	56,3837
N3	33,791561	0,80421196	33,7916

**Ponçage****Least Squares Means Table**

Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
G0	40,167278	0,66174640	40,1198
G1	38,903345	0,66174640	38,9508

**Egrenage****Least Squares Means Table**

Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
E0	39,580380	0,66174640	39,5982
E1	39,490243	0,66174640	39,4725

**Vernis****Least Squares Means Table**

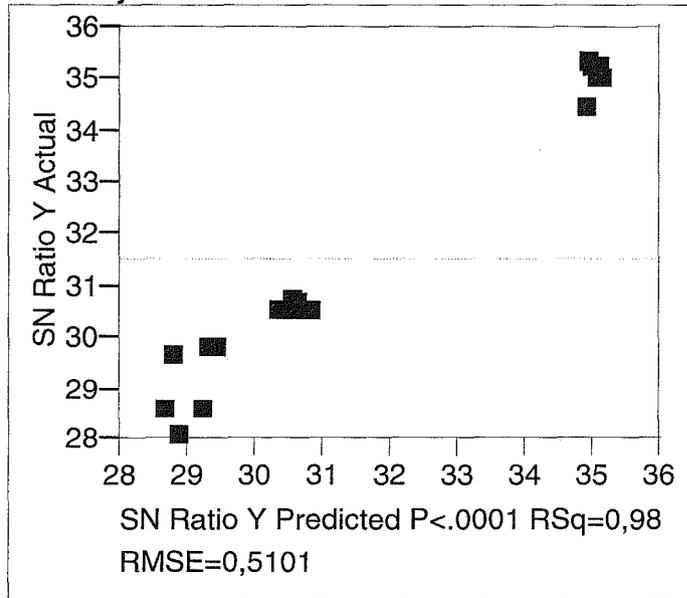
Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
VA	39,482308	0,66174640	39,5110
VC	39,588314	0,66174640	39,5596

**Scaled Estimates**

Nominal factors expanded to all levels

Term	Scaled Estimate	Plot Estimate	Std Error	t Ratio	Prob> t
Intercept	39,535311		0,464312	85,15	<.0001
Essence[H]	0,4189362		0,471511	0,89	0,3933
Essence[P]	-0,418936		0,471511	-0,89	0,3933
Niveau[N1]	-11,10464		0,656636	-16,91	<.0001
Niveau[N2]	16,848395		0,656636	25,66	<.0001
Niveau[N3]	-5,74375		0,656636	-8,75	<.0001
Ponçage[G0]	0,6319663		0,471511	1,34	0,2072
Ponçage[G1]	-0,631966		0,471511	-1,34	0,2072
Egrenage[E0]	0,0450686		0,471511	0,10	0,9256
Egrenage[E1]	-0,045069		0,471511	-0,10	0,9256
Vernis[VA]	-0,053003		0,471511	-0,11	0,9125
Vernis[VC]	0,0530031		0,471511	0,11	0,9125

**Response SN Ratio Y  
Actual by Predicted Plot**



**Summary of Fit**

RSquare	0,975943
RSquare Adj	0,962821
Root Mean Square Error	0,510103
Mean of Response	31,54714
Observations (or Sum Wgts)	18

**Analysis of Variance**

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Model	6	116,11494	19,3525	74,3741
Error	11	2,86225	0,2602	Prob > F
C. Total	17	118,97719		<.0001

**Lack Of Fit**

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Lack Of Fit	9	2,8325977	0,314733	21,2273

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Pure Error	2	0,0296536	0,014827	Prob > F
Total Error	11	2,8622513		0,0458
				Max RSq
				0,9998

**Parameter Estimates**

Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob> t
Intercept	31,547136	0,120232	262,38	<.0001
Essence[H]	0,0918339	0,122097	0,75	0,4678
Niveau[N1]	-2,49979	0,170034	-14,70	<.0001
Niveau[N2]	3,4712722	0,170034	20,42	<.0001
Ponçage[G0]	0,1574032	0,122097	1,29	0,2238
Egrenage[E0]	0,0550291	0,122097	0,45	0,6610
Vernis[VA]	-0,06844	0,122097	-0,56	0,5863

**Effect Tests**

Source	Nparm	DF	Sum of Squares	F Ratio	Prob > F
Essence	1	1	0,14720	0,5657	0,4678
Niveau	2	2	115,45476	221,8537	<.0001
Ponçage	1	1	0,43245	1,6620	0,2238
Egrenage	1	1	0,05286	0,2031	0,6610
Vernis	1	1	0,08176	0,3142	0,5863

**Effect Details**

**Essence**

**Least Squares Means Table**

Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
H	31,638970	0,17135744	31,6230
P	31,455302	0,17135744	31,4713

**Niveau**

**Least Squares Means Table**

Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
N1	29,047345	0,20824852	29,0473
N2	35,018408	0,20824852	35,0184
N3	30,575654	0,20824852	30,5757

**Ponçage**

**Least Squares Means Table**

Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
G0	31,704539	0,17135744	31,6928
G1	31,389733	0,17135744	31,4014

**Egrenage**

**Least Squares Means Table**

Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
-------	---------------	-----------	------

Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
E0	31,602165	0,17135744	31,6018
E1	31,492107	0,17135744	31,4924

**Vernis**

**Least Squares Means Table**

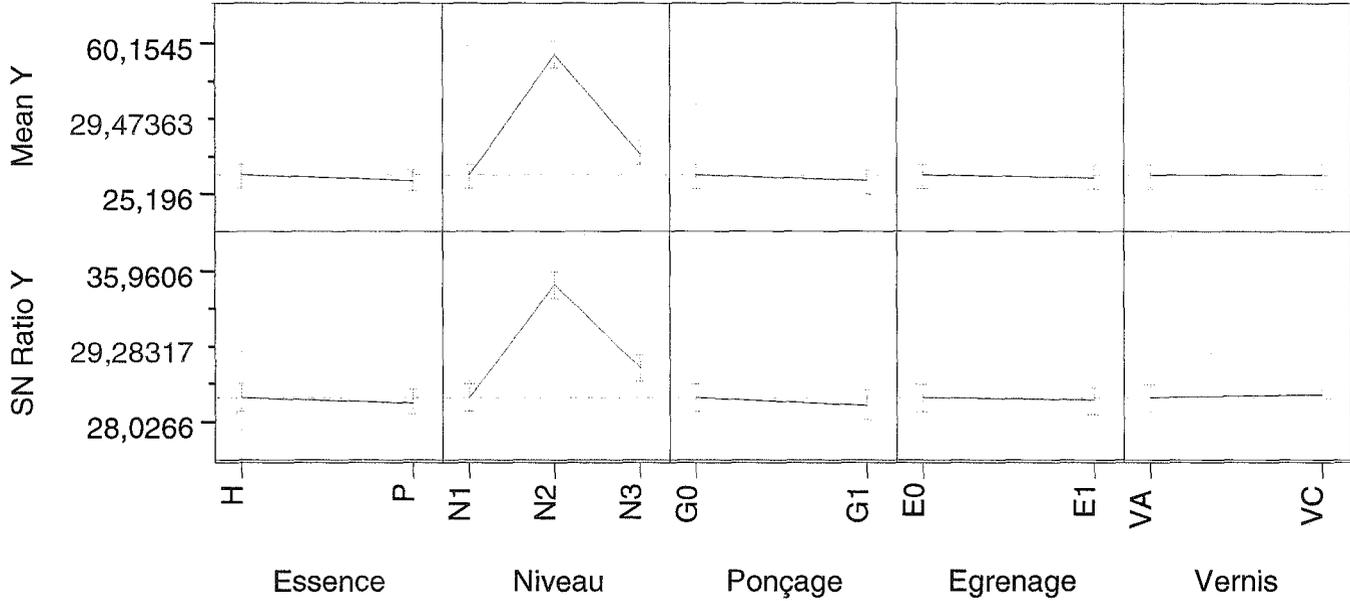
Level	Least Sq Mean	Std Error	Mean
VA	31,478696	0,17135744	31,4921
VC	31,615575	0,17135744	31,6022

**Scaled Estimates**

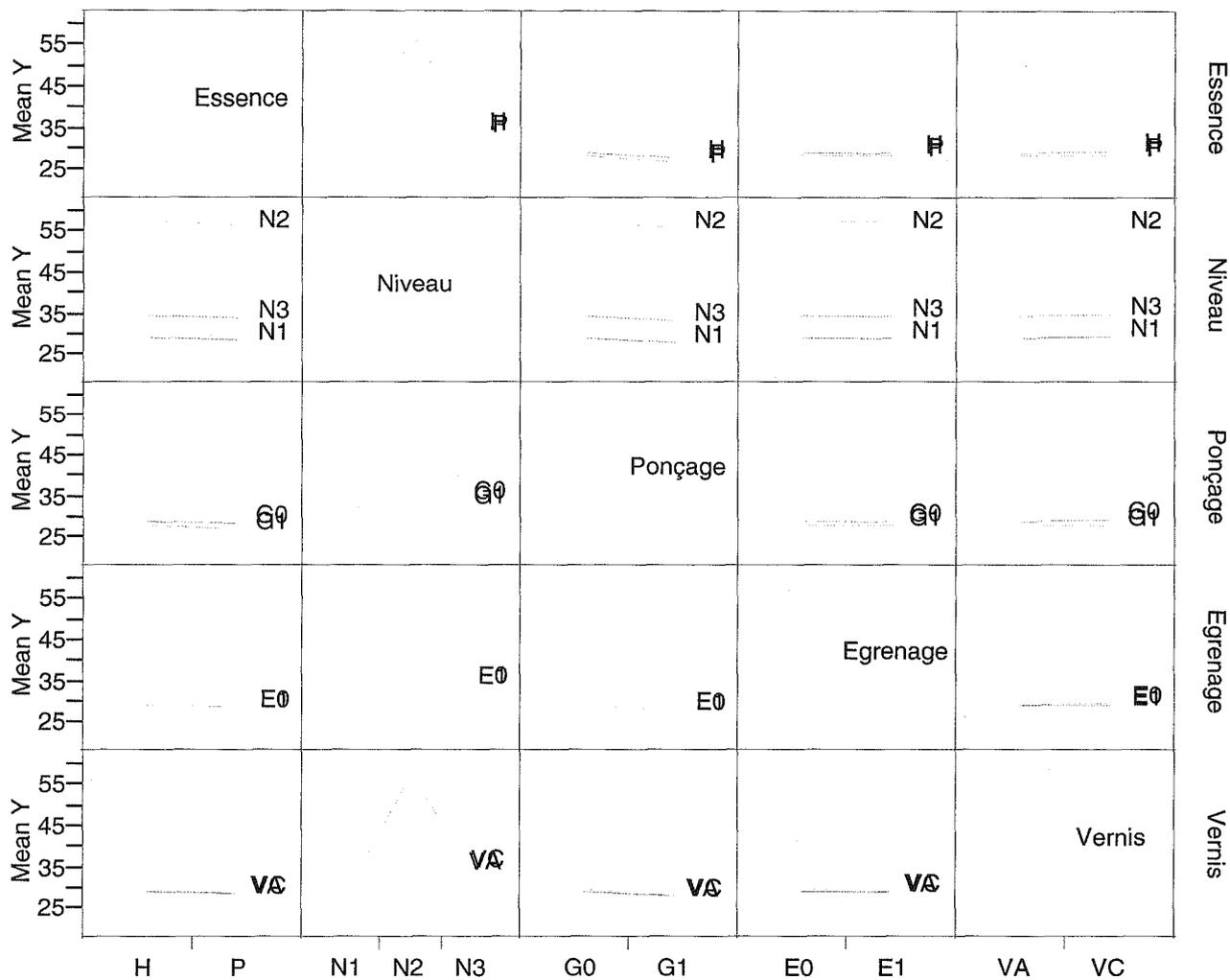
Nominal factors expanded to all levels

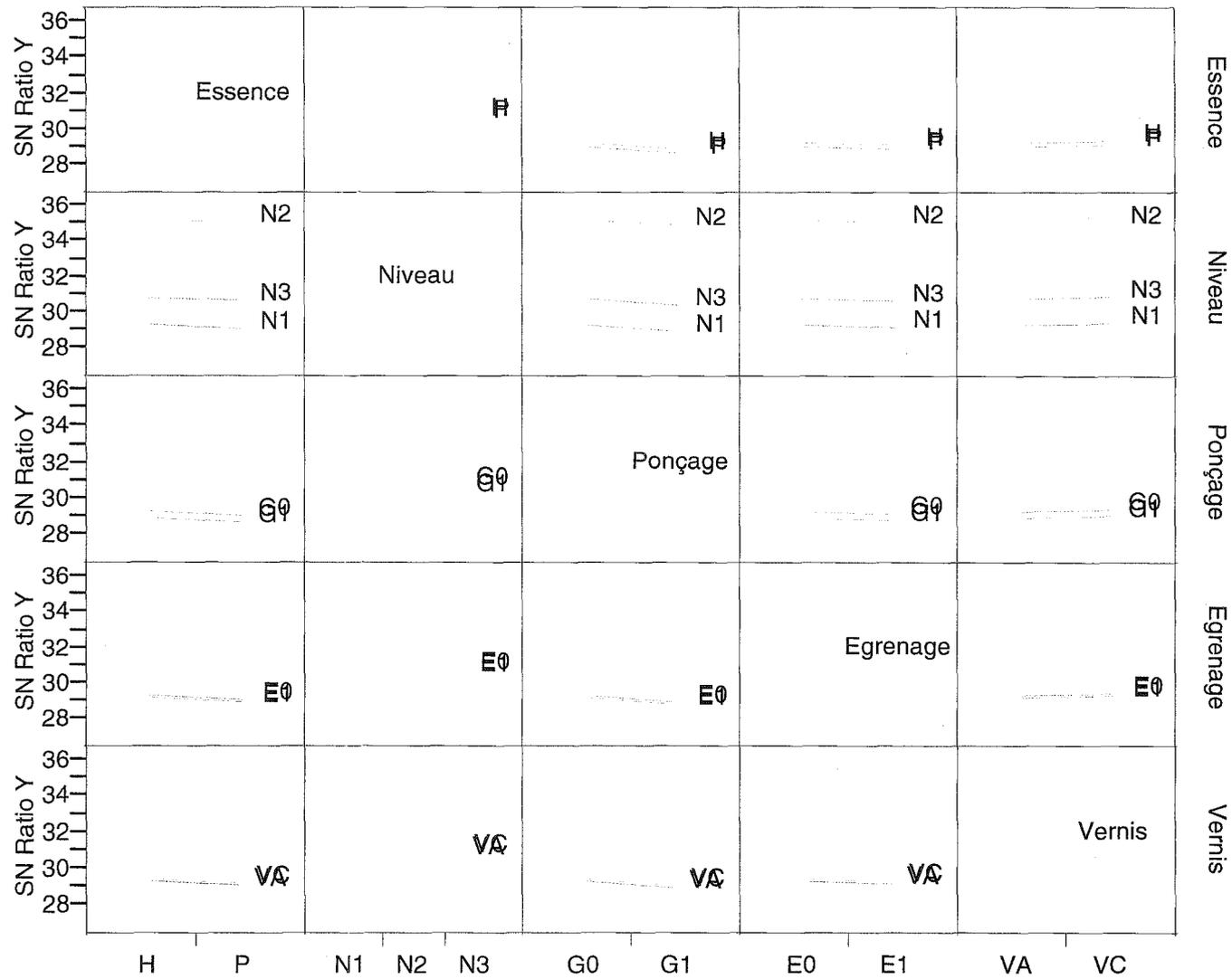
Term	Scaled Estimate	Plot Estimate	Std Error	t Ratio	Prob> t
Intercept	31,547136		0,120232	262,38	<.0001
Essence[H]	0,0918339		0,122097	0,75	0,4678
Essence[P]	-0,091834		0,122097	-0,75	0,4678
Niveau[N1]	-2,49979		0,170034	-14,70	<.0001
Niveau[N2]	3,4712722		0,170034	20,42	<.0001
Niveau[N3]	-0,971482		0,170034	-5,71	0,0001
Ponçage[G0]	0,1574032		0,122097	1,29	0,2238
Ponçage[G1]	-0,157403		0,122097	-1,29	0,2238
Egrenage[E0]	0,0550291		0,122097	0,45	0,6610
Egrenage[E1]	-0,055029		0,122097	-0,45	0,6610
Vernis[VA]	-0,06844		0,122097	-0,56	0,5863
Vernis[VC]	0,0684395		0,122097	0,56	0,5863

Prediction Profiler



Interaction Profiles





## Annexe 4 - Fiches techniques des produits de finition



CIN - CORPORAÇÃO INDUSTRIAL DO NORTE, S.A.

BOLETIM TÉCNICO

VZ. SAI AQUOSO MATE

9A-130

Data revisão: Abril 2003

**DESCRIÇÃO**

Verniz aquoso mate de natureza uretano-acrílica, estudado de forma a obter superfícies com boa transparência, aspecto sedoso e de boa dureza superficial.

**UTILIZAÇÃO**

Na indústria de mobiliário e outras indústrias da madeira.

**DILUENTE RECOMENDADO**

Água

**CARACTERÍSTICAS FÍSICAS**

<b>COR</b>	Consultar Serviços Técnicos	
<b>ASPECTO DA PELÍCULA</b>	Mate (15)	NP EN ISO 2813
<b>MASSA VOLÚMICA</b>	1,05 ± 0,01 g/mL <sup>(a)</sup>	NCIN 023
<b>VISCOSIDADE</b>	25±5 seg FORD4	ASTM D 1200
<b>SÓLIDOS EM VOLUME</b>	34% <sup>(a)</sup>	valor teórico
<b>PONTO DE INFLAMAÇÃO</b>	>70° C	NP 2943
<b>TEMPO DE SECAGEM</b>	Ar	
	Superficial	0,45 - 1,00 h.
	Endurecimento	1,00 - 2,00 h.
	Estufa (25/30°C)	
	Endurecimento	1,00 - 1,30 h.

<sup>(a)</sup> Para a cor 1482

D0010-B

página 1/2

É aconselhável verificar periodicamente o estado de atualização do presente Boletim Técnico. A CIN assegura a conformidade dos seus produtos com as especificações constantes das respectivas fichas técnicas. Os conselhos técnicos prestados pela CIN, antes ou depois da entrega dos produtos, são meramente indicativos, dados de boa-fé e constituem o seu melhor conhecimento, atento o estado actual da técnica, não podendo, em caso algum, responsabilizá-la. As reclamações apenas serão aceites relativamente a defeitos de fabrico ou não conformidades com a nota de encomenda. A única obrigação que incumbe à CIN será, respectivamente, a substituição ou devolução do preço já pago da mercadoria reconhecidamente defeituosa ou da reposição da encomenda, não aceitando outras responsabilidades por quaisquer outras perdas ou danos.

Estrada Nacional 13 (Km 6) - Apart. 100B - 4471-989 MAIA - PORTUGAL  
 Telef. 22840 50 00 - Fax: 22948 56 61 - URL: <http://www.cin.pt> - email: [cin@cin.pt](mailto:cin@cin.pt)



## BOLETIM TÉCNICO

VZ. SA1 AQUOSO MATE

9A-130

Data revisão: Abril 2003

**CARACTERÍSTICAS DE APLICAÇÃO****PREPARAÇÃO DAS SUPERFÍCIES:**

As superfícies devem ser preparadas com tapa-poros de base aquosa convenientemente lixada e limpa de poeira antes da aplicação.

**PROCESSO DE APLICAÇÃO:**

Pistola convencional, airmix e cortina.

**PROPORÇÃO DE MISTURA DOS COMPONENTES:**

Não aplicável

**TEMPO DE VIDA ÚTIL APÓS MISTURA:**

Não aplicável

**DILUIÇÃO RECOMENDADA:**

Normalmente não é necessária qualquer diluição.

**RENDIMENTO TEÓRICO:**

Variável consoante a gramagem depositada e o tipo de suporte.

**ESQUEMA RECOMENDADO:**

Aplicar 1 demão sobre 9A-050.0000 TAPA POROS SA1 AQUOSO.  
Gramagem aconselhada por demão: 120-140 g/m<sup>2</sup>.

**CONDIÇÕES AMBIENTAIS DURANTE A APLICAÇÃO:**

Temperatura ambiente

15-25°C

Humidade relativa

≤70%

**ESTABILIDADE EM ARMAZÉM**

Componente 1: 12 meses em embalagens bem fechadas armazenadas em local seco e fresco.

DQ010-B

págs. 2/2

É aconselhável verificar periodicamente o estado de actualização do presente Boletim Técnico. A CIN assegura a *confiabilidade* dos seus produtos com as especificações constantes dos respectivos boletins técnicos. Os conselhos técnicos prestados pela CIN, antes ou depois da entrega dos produtos, são meramente *informativos*, dados de *boa-fé* e *constituem* o seu melhor conhecimento, *sem* o estado actual da técnica, não podendo, em caso algum, *responsabilizar*. As reclamações apenas serão aceites relativamente a *defeitos de fábrica* ou não conformidades com a acta de encomenda. A única obrigação que incumbe à CIN será, respectivamente, a *substituição* ou *devolução* do preço já pago da mercadoria reconhecidamente *defectuosa* ou de *reparação* da encomenda, não aceitando outras responsabilidades por quaisquer outras perdas ou danos.

Estrada Nacional II (Km 6) - Apart. 190R - 4471-909 MAIA - PORTUGAL  
Telef. 22948 59 09 - Fax: 22948 56 61 - URL: <http://www.cin.pt> - email: [cin@cin.pt](mailto:cin@cin.pt)



## BOLETIM TÉCNICO

**VERNIZ CINELOSE CERA**

51-030

Data de revisão: Fevereiro 2000

**GENERALIDADES**

**VERNIZ CINELOSE CERA** é um produto com base em resinas de nitrocelulose, adequado para interior, conferindo à madeira um aspecto sedoso, semelhante ao que se obtém por aplicação de cera.

**CARACTERÍSTICAS**

Fácil de aplicar.  
Secagem rápida.  
Acabamento cera acetinado.

**UTILIZAÇÃO**

Verniz cera para madeira no interior.

**PREPARAÇÃO DO SUPORTE**

**Madeiras novas** : lixar a madeira, no sentido das fibras, com lixa de papel de grão médio, até se obter uma superfície macia. Remover todos os vestígios de pó, sujidade e gorduras.

**Madeiras já anteriormente envernizadas** : lixar, a fim de eliminar o brilho e melhorar a aderência. Sempre que haja degradação visível do verniz anterior ou possibilidade de ataque por parte do novo, raspar, a fim de remover completamente o verniz envelhecido; proceder de seguida como para madeiras novas.

**SISTEMA DE PINTURA**

Aplicar 2 ou 3 demãos de Verniz Cinelose Cera directamente à madeira. Para um acabamento do tipo poro fechado, aplicar 2 demãos sobre 1 ou 2 demãos de Verniz Cinelose Tapa-poros (Refº 51-000).

**ASPECTO**

Película transparente cera.

**CARACTERÍSTICAS DE IDENTIFICAÇÃO**

Forma de fornecimento .....	Verniz a diluir para aplicação.	
Massa volúmica .....	0,95 ± 0,02 g/mL	(NCIN 023)
Viscosidade .....	95 – 105 UK	(NP 234)

DQ010-b

pág. 1/2

É aconselhável verificar periodicamente o estado de actualização do presente Boletim Técnico. A CIN assegura a conformidade dos seus produtos com as especificações constantes dos respectivos boletins técnicos. Os conselhos técnicos prestados pela CIN, antes ou depois da entrega dos produtos, são meramente indicativos, dados de boa-fé e constituem o seu melhor conhecimento, atenta o estado actual da técnica, não podendo, em caso algum, responsabilizar-se. As reclamações apenas serão aceites relativamente a defeitos de fabrico ou não conformidades com a nota de encomenda. A única obrigação que incumbe à CIN será, respectivamente, a substituição ou devolução do preço já pago da mercadoria reconhecendo defeituosa ou de reposição da encomenda, não aceitando outras responsabilidades por quaisquer outras perdas ou danos.

Estrada Nacional 13 (Km 6) - Apart. 1008 - 4471-909 MATA PORTUGAL  
Telef. (22) 940 50 00 - Fax: (22) 948 56 61 - URL: <http://www.cin.pt> - e-mail: [cin@cin.pt](mailto:cin@cin.pt)



## BOLETIM TÉCNICO

## VERNIZ CINELOSE CERA

51-030

Data de revisão: Fevereiro 2000

**CARACTERÍSTICAS DE APLICAÇÃO**

Preparação do produto.....	Agitar até homogeneização completa
Temperatura ambiente .....	Superior a 5°C
Humidade do suporte .....	Inferior a 15%
Aplicação .....	Trincha ou pistola
<b>Diluição:</b>	
Trincha .....	Ca. 30% - Diluente Cinelese (ReP 51-500)
Pistola .....	Ca. 50% - Diluente Cinelese (ReP 51-500)
<b>Viscosidade de aplicação:</b>	
Trincha .....	40 – 50 segundo F4
Pistola .....	25 – 30 segundo F4
Espessura seca recomendada .....	25 µm por demão
<b>Tempos de secagem (a 20°C e 60% humidade relativa):</b>	
Superficial .....	Ca. 15 minutos (ASTM D 1640)
Endurecimento .....	Ca. 1 hora (ASTM D 1640)
Para sobrepintura .....	Ca. 1 hora (ASTM D 1640)
<b>Rendimento Teórico</b> .....	Variável conforme o tipo de suporte e condições de aplicação. Para cálculos orientativos podemos indicar cerca de 10 m <sup>2</sup> /L para a espessura seca recomendada.
<b>Estabilidade em armazém</b> .....	Embalagens fechadas ao abrigo do frio e do calor cerca de 2 anos.

DQ010-b

pág. 2/2

É aconselhável verificar periodicamente o estado de actualização do presente Boletim Técnico. A CIN assegura a conformidade dos seus produtos com as especificações constantes dos respectivos boletins técnicos. Os conselhos técnicos prestados pela CIN, antes ou depois da entrega dos produtos, são meramente indicativos, dados de boa-fé e constituem o seu melhor conhecimento, atento o estado actual da técnica, não podendo, em caso algum, responsabilizar-se. As recomendações apenas serão aceites relativamente a defeitos de fabrico ou não conformidades com a nota de encomenda. A única obrigação que incumbe à CIN será, respectivamente, a substituição ou devolução do preço já pago da mercadoria reconhecivelmente defeituosa ou de reposição da encomenda, não aceitando outras responsabilidades por quaisquer outras perdas ou danos.

Estrada Nacional 13 (Km 6) • Apart. 1008 • 4471-909 MAIA PORTUGAL  
 Telef. (22) 940 50 00 • Fax: (22) 948 56 61 • URL: <http://www.cin.pt> • email: [cin@cin.pt](mailto:cin@cin.pt)

**MOVIDUR AQUA CERA**

12-340

Data de revisão: Setembro 2001

**GENERALIDADES**

Verniz aquoso transparente cera, recomendado para o envernizamento de portas e outras estruturas de madeira e mobiliário, no interior. É caracterizado por uma película flexível e dura, secagem rápida, boa resistência à água e a produtos usuais de limpeza doméstica. Possibilidade de acabamento incolor ou colorido, permitindo obter uma grande variedade de aspectos finais.

**CARACTERÍSTICAS**

Rápida secagem.  
Brilho cera.  
Boa dureza e flexibilidade.  
Boa resistência à água.

**UTILIZAÇÃO**

Envernizamento de madeiras, no interior, quando se pretende um acabamento cera com boas características de resistência mecânica e química.

**PREPARAÇÃO DO SUPORTE**

**Madeiras Novas** : lixar com lixa de grão médio no sentido das fibras da madeira. Eliminar poeiras, gorduras e outros contaminantes.

**Madeiras já envernizadas** : se o verniz se encontrar em bom estado, devem remover-se os vestígios de gorduras e de produtos de manutenção anteriormente empregues, usando diluentes sintéticos. Deixar secar e despolir o verniz com lixa de grão fino, a fim de promover aderência do novo envernizamento.

Se o verniz velho se encontrar esfoliado ou fissurado, é necessário removê-lo e proceder a uma raspagem cuidadosa de toda a superfície, assegurando que todas as contaminações eventualmente existentes (ceras e outros produtos de embelezamento e limpeza), que podem ocasionar perda de aderência do novo verniz, foram eliminadas. Proceder de seguida como se indica para madeiras novas.

DQ010-b

pág. 1/2

É aconselhável verificar periodicamente o estado de actualização do presente Boletim Técnico. A CIN assegura a conformidade dos seus produtos com as especificações constantes dos respectivos boletins técnicos. Os conselhos técnicos prestados pela CIN, antes ou depois da entrega dos produtos, são meramente indicativos, dados de boa-fé e constituem o seu melhor conhecimento, atento o estado actual da técnica, não podendo, em caso algum, responsabilizar-se. As reclamações apenas serão aceites relativamente a defeitos de fabrico ou não conformidades com a nota de encomenda. A única obrigação que incumbe à CIN será, respectivamente, a substituição ou devolução do preço já pago da mercadoria reconhecida e devolvida ou de reposição da encomenda, não aceitando outras responsabilidades por quaisquer outras perdas ou danos.

Extrada Nacional 13 (Km 6) - Apart. 1008 4471-909- MALA PORTUGAL  
Telef. (23) 940 50 00 - Fax: (23) 948 56 61 - URL: <http://www.cin.pt> - em: [fi-cin@cin.pt](mailto:fi-cin@cin.pt)



## BOLETIM TÉCNICO

**MOVIDUR AQUA CERA**

12-340

Data de revisão: Setembro 2001

**SISTEMA DE PINTURA**

Aplicar três demãos de verniz **MOVIDUR AQUA CERA** tal qual é fornecido. Depois de seca, cada demão deve ser lixada antes de se aplicar a demão seguinte.

No envernizamento de raiz, pode ser utilizado como primeira demão Tapa Poros Aqua; lixar depois a madeira no sentido das fibras com lixa de papel de grão 180/220, antes da aplicação do Movidur Aqua Cera incolor.

De acordo com a experiência, quando se pretende obter um acabamento colorido, é aconselhada a aplicação de três demãos de Movidur Aqua Cera na cor pretendida, pois realça o aspecto final da cor.

**ASPECTO**

Película cera.

**CARACTERÍSTICAS DE IDENTIFICAÇÃO**

Forma de fornecimento .....	Verniz aquoso pronto a aplicar.	
Massa volúmica .....	1,03 ± 0,02 g/mL	(NCIN 023)
Viscosidade Stormer .....	80 - 90 UK	(NP 234)

**CARACTERÍSTICAS DE APLICAÇÃO**

Preparação .....	Agitar até homogeneização completa.
Método de aplicação .....	Trincha.
Diluição .....	Não necessita.

Condições de aplicação:

Humidade do suporte .....	Inferior a 15%
---------------------------	----------------

Tempos de secagem (a 20°C e 60% humidade relativa):

Superficial .....	Ca. 45 minutos	(ASTM D 1640)
Para sobrepintura .....	Ca. 3 horas	(ASTM D 1640)

A ocorrência simultânea de baixa temperatura e elevada humidade relativa ocasiona tempos de secagem mais longos do que os habituais.

**Rendimento** ..... Para cálculos orientativos, podemos indicar cerca de 13 m<sup>2</sup>/L conforme as condições de aplicação e o tipo de suporte.

**Estabilidade em armazém** ..... Embalagens fechadas ao abrigo do frio e do calor, cerca de 1 ano.

DQ010-b

pág. 2/2

É aconselhável verificar periodicamente o estado de actualização do presente Boletim Técnico. A CIN assegura a conformidade dos seus produtos com as especificações constantes dos respectivos boletins técnicos. Os conselhos técnicos prestados pela CIN, antes ou depois da entrega dos produtos, são meramente indicativos, dados de boa-fé e constituem o seu melhor conhecimento, atento o estado actual da técnica, não podendo, em caso algum, responsabilizar-se. As reclamações apenas serão aceites relativamente a defeitos de fabrico ou não conformidades com a nota de encomenda. A única obrigação que incumbe à CIN será, respectivamente, a substituição ou devolução do preço já pago da mercadoria reconhecidamente defeituosa ou de reposição da encomenda, não aceitando outras responsabilidades por quaisquer outras perdas ou danos.

Estrada Nacional 13 (Km 6) - Apart. 1008 4471-909 - MATA PORTUGAL.  
 Telef. (22) 940 5000 - Fax: (22) 948 56 61 - URL - <http://www.cin.pt> - [ema@cin.pt](mailto:ema@cin.pt)

Madame Cristina COELHO

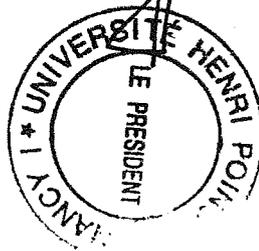
DOCTORAT de l' UNIVERSITE HENRI POINCARÉ, NANCY 1  
en SCIENCES DU BOIS

VU, APPROUVE ET PERMIS D'IMPRIMER *11/01/07*

Nancy, le *29/11/06*

Le Président de l'Université

Jean-Pierre FINANCE



SCIENTIFIC CENTER  
RUE DE LA SCIENCE  
RUE DE LA SCIENCE - CS 20148  
54601 VILLERS LES NANCY CEDEX