

B232 7687

UNIVERSITE CATHOLIQUE DE LOUVAIN
Faculté des Sciences Agronomiques
Unité des Eaux et Forêts



BIBLIOTHEQUE DES SCIENCES EXACTES
1348 3, Place des Sciences
LOUVAIN-LA-NEUVE - Belgium

LA CORROSION DES ELEMENTS METALLIQUES DANS LA CONSTRUCTION EN BOIS

Co-promoteurs :

Professeur T. AVELLA
Professeur F. SIMON

Membres du jury :

M. LAMBERIGTS
D. LANGENDRIES
H. FRERE

Mémoire présenté par **Geoffroy COLYN**
en vue de l'obtention du grade
d'**Ingénieur Agronome**
orientation **Eaux et Forêts**

Année académique 1998 - 1999



BIBLIOTHEQUE DES SCIENCES EXACTES

Avertissement au lecteur

Vous avez en mains le texte d'un mémoire de fin d'études.

Ce mémoire est l'aboutissement d'un travail de réflexion mené au terme d'un programme d'études.

Le texte du mémoire a été jugé suffisant par un jury d'examens en vue de l'attribution d'un diplôme à son auteur : il n'engage que l'auteur.

Un mémoire est un travail scientifique qui n'a pas été soumis à un comité d'édition.

Bien que ce travail ne porte que le nom de l'auteur, il est néanmoins le fruit d'une d'équipe. C'est avec plaisir et reconnaissance que je remercie toutes les personnes qui ont participé à sa conception.

En particulier, je voudrais remercier le Professeur T. Avella et le Professeur F. Simon qui m'ont permis de concrétiser mes projets, ainsi que le Professeur M. Lamberigts et son collègue J. Servais du C.R.M. qui m'ont guidé dans mon approche de la science des métaux. D'avance, je remercie également les autres membres du jury pour l'attention qu'ils vont accorder à ce mémoire.

Mes remerciements vont aussi à Monsieur P. Lardinois pour sa disponibilité et ses conseils avisés, à Monsieur J. Dubois du C.S.T.C. pour son aide dans la collecte des documents, au personnel de l'unité qui œuvre dans la bonne humeur pour le bon déroulement des recherches.

Enfin, je voudrais aussi exprimer ma gratitude à J. Marichal, D. Etienne, D. Daron et S. Marichal pour leur soutien et leur aide précieuse, à D. Houry pour son support logistique efficace, ainsi qu'à tous les membres de ma famille qui m'ont épaulé et sans l'appui matériel desquels rien n'aurait été possible.

LA CORROSION DES ELEMENTS METALLIQUES DANS LA CONSTRUCTION EN BOIS

Geoffroy COLYN
EFOR 23

Ce travail a été réalisé à l'Université Catholique de Louvain, au laboratoire de technologie du bois de l'Unité des Eaux et Forêts.

Résumé – La construction en bois se déploie sensiblement sur le marché belge du bâtiment. Pour occuper la place qu'il mérite sur ce marché, le bois doit répondre à des critères de qualité sévères. Les concepteurs doivent, pour profiter de ses propriétés exceptionnelles, maîtriser les complications qui peuvent survenir lors de l'emploi de ce matériau naturel. Le bois est un milieu corrosif, donc une des contraintes de ce matériau réside dans sa relation parfois délicate avec les matériaux métalliques. Nous avons choisi de décrire les réactions possibles lors du contact du bois avec des éléments métalliques, car il est nécessaire à l'architecte bâtisseur et à l'agronome forestier de comprendre les mécanismes qui participent à la réaction de corrosion pour la contrôler.

Ce travail présente les principes de corrosion par le bois de manière détaillée. Nous entamons la réflexion par le concept du bois dans la construction, ensuite nous décrivons les matériaux d'après les propriétés qui influencent leur emploi en construction et leur réactivité mutuelle. La corrosion est d'une manière générale un phénomène complexe. Dès lors, nous présentons certaines notions de base avant de développer plus particulièrement l'état des connaissances actuelles concernant la corrosion par le bois. Le but recherché est de cerner précisément les mécanismes qui entrent en jeu dans ces réactions corrosives et de les expliquer pour un public multidisciplinaire.

En outre, nous avons effectué une expérience permettant de classer l'action corrosive de plusieurs essences forestières communes utilisées dans le bâtiment, en bardage et en structure : le douglas, le mélèze, le pin sylvestre, le western red cedar, le hêtre et le robinier. Cela devait nous permettre de quantifier les informations de corrosion par le bois et concrètement, déterminer la corrosivité du douglas afin d'évaluer les risques encourus par les accessoires métalliques en aval d'une toiture en douglas.

L'évaluation de la corrosivité des essences est trop souvent réduite à l'appréciation de leur pH. Notre test montre, comme d'autres avant nous, que ce n'est pas correct. Le pH est une fausse estimation quantitative de l'action corrosive. Par contre, celle-ci peut être atteinte par la mesure de la capacité acide des essences. Nos résultats ne permettent pas de quantifier la corrosivité des essences. En effet, notre test a été infecté par des champignons. Dès lors, les résultats obtenus ne sont pas généralisables. Ceci nous permet également de constater que les bois dégradés sont plus corrosifs. Nous avons aussi conclu que le pentachlorophénate de sodium, utilisé comme fongicide réduisait la réaction corrosive par consommation de protons.

T. Aue

TABLE DES MATIERES

	Pages
RESUME	i
TABLE DES MATIERES	ii
LISTE DES TABLEAUX.....	vi
LISTE DES FIGURES	viii
INTRODUCTION	1
PRINCIPES DE LA CORROSION PAR LE BOIS.....	3
1. CONCEPT DU BOIS DANS LA CONSTRUCTION	3
1.1 Etymologie	3
1.2 Du bois aux néo-matériaux.....	4
1.3 Pourquoi le bois ?	5
1.3.1 A propos des qualités constructives.....	5
1.3.2 A propos des qualités écologiques	6
1.3.3 Le matériau bois pour construire	6
1.4 Notions d'habitat bois.....	8
1.4.1 Urbanisme de construction en bois	8
1.4.1.1 Bois non apparent	8
1.4.1.2 Bois apparent	8
1.4.1.3 Règles spécifiques.....	9
1.4.2 Conclusions urbanistiques.....	9
1.5 Durabilité des bâtiments.....	10
1.5.1 Concept.....	10
1.5.2 La durée de vie	10
1.5.3 Les développements actuels.	12
2. LES MATÉRIAUX	13
2.1 Le bois.....	13
2.1.1 Structures macroscopiques	13
2.1.2 Structures microscopiques.....	15
2.1.2.1 Les résineux.....	16
2.1.2.2 Les feuillus	16
2.1.3 Physionomie d'une coupe	16
2.1.4 Les défauts du bois	17
2.1.5 Composition chimique du bois	17
2.1.6 Propriétés du bois	18
2.1.6.1 La masse volumique.....	18
2.1.6.2 La rétractabilité.....	19

2.1.6.3	La stabilité	19
2.1.6.4	La durabilité	20
2.1.7	Les propriétés mécaniques	21
2.1.7.1	Les contraintes de compression	21
2.1.7.2	Les contraintes de traction	22
2.1.7.3	Le cisaillement	23
2.1.7.4	La fissilité	23
2.2	Les métaux	24
2.2.1	Caractéristiques générales	24
2.2.2	L'acier	24
2.2.2.1	Composition	24
2.2.2.2	Caractéristiques physiques	25
2.2.2.3	Caractéristiques mécaniques	25
2.2.3	Aciers traités et aciers spéciaux	25
2.2.3.1	La passivation	26
2.2.3.2	Les aciers galvanisés	26
2.2.3.3	La galvanisation	27
2.2.3.4	Réalisation de la galvanisation	28
2.2.3.5	Aciers inoxydables	29
2.2.4	Le cuivre	31
2.2.4.1	Laitons	32
2.2.4.2	Bronzes	33
2.2.4.3	Autres alliages	33
2.2.5	L'aluminium	34
2.2.5.1	L'anodisation	34
3.	PHÉNOMÈNES DE CORROSION	35
3.1	Généralités	35
3.1.1	Notions de désordre	35
3.1.2	Le concept de corrosion	36
3.2	Description de la corrosion	38
3.2.1	Modes d'action	38
3.2.1.1	Oxydation chimique	38
3.2.1.2	Oxydation électrochimique	39
3.2.2	Les différents types de corrosion	40
3.2.2.1	La corrosion généralisée ou uniforme	41
3.2.2.2	La corrosion localisée	41
3.2.2.3	La corrosion galvanique	41
3.2.2.4	La corrosion par aération différentielle	42
3.2.2.5	La corrosion biologique	42
3.2.2.6	La corrosion atmosphérique	42
3.2.3	Morphologie de la corrosion	43
3.2.4	Facteurs qui influencent la corrosion	43
3.2.4.1	Les facteurs du milieu	43
3.2.4.2	Les facteurs métalliques	44
3.2.4.3	Synthèse des différents facteurs de corrosion	45
3.2.5	Moyens de lutte	45
3.2.5.1	Modification du matériel de construction	45
3.2.5.2	Utilisation de films protecteurs	46
3.2.5.3	Modification de l'environnement	46
3.2.5.4	Protections électrochimiques	46
3.2.5.5	Conception	47
3.2.6	Méthodes d'analyse	47

4.	CORROSION PAR LE BOIS	49
4.1	Le bois : milieu corrosif	49
4.1.1	L'humidité.....	49
4.1.2	L'acide acétique	51
4.1.2.1	Formation et corrosivité.....	51
4.1.2.2	Cinétique de production.....	52
4.1.3	Les tannins	53
4.1.4	Les organismes vivants	54
4.2	L'acidité.....	55
4.2.1	Notes sur le pH.....	55
4.2.1.1	Mesure du pH.....	55
4.2.1.2	Valeurs de pH typiques.....	56
4.2.1.3	Commentaires	57
4.2.2	La capacité acide	57
4.2.2.1	Définition.....	58
4.2.2.2	Comparaison de valeurs de capacités acides	58
4.2.2.3	Débit acide	59
4.3	Types de corrosions en rapport avec le bois	59
4.3.1	Corrosion en phase gazeuse	59
4.3.2	Corrosion par contact direct	61
4.3.2.1	Le cas des bois non traités.....	61
4.3.2.2	Le cas des bois traités	62
4.3.2.3	Conclusions.....	64
4.3.4	Cas de la corrosion aux interfaces.	64
4.3.4.1	Cas des bois de même essence	64
4.3.4.2	Cas d'interfaces entre essences différentes	65
4.3.4.3	Conclusion	66
4.4	Stabilité des différents matériaux métalliques	66
4.4.1	Vitesse de dégradation des principaux métaux.....	66
4.4.2	Acier galvanisé :	68
4.4.2.1	Dans des cas de condensation	68
4.4.2.2	Comparaison de différentes méthodes de galvanisation	68
4.4.2.3	Le développement de l'acier galvanisé	69
4.4.3	Les accessoires de toitures en cuivre et le western red cedar	69
4.5	Action des métaux sur le bois.....	70
4.6	Phénomènes physiques.....	71
4.6.1	La fissilité	71
4.6.2	L'humidité.....	72
4.7	Maîtriser la corrosion.....	73
4.7.1	Corrosion par contact direct	74
4.7.2	Corrosion en phase gazeuse	77
	EXPERIMENTATION: évaluation de l'action corrosive d'essences forestières communes.....	78
1.	MATÉRIEL ET MÉTHODE	78
1.1	Matériel.....	78
1.1.1	Critères de choix.....	78
1.1.2	Les essences choisies	79
1.1.3	La sciure.....	79
1.1.4	Le fer	81

1.2	Méthode	81
1.2.1	Etablissement de la méthode de test	81
1.2.2	Méthode expérimentale	83
1.2.2.1	Mise en contact	83
1.2.2.2	Les prélèvements	83
1.2.2.3	Les filtrations	84
1.2.3	Analyse	84
1.2.3.1	Torche à plasma	84
1.2.3.2	Mesure du pH	85
1.2.4	La filtration	85
1.2.5	Le stockage au réfrigérateur	86
2.	TEST N°1 : INFECTION FONGIQUE	87
2.1	Etablissement des témoins	87
2.2	Résultats	88
2.2.1	Observations colorimétriques	88
2.2.2	La réaction	89
2.2.3	Valeur de solubilisation de Fe^{3+}	89
2.2.4	Etude de la corrélation avec le pH	91
2.2.5	Conclusions et commentaires	94
2.3	Chauffage à reflux	94
2.4	Cinétique	95
2.5	L'infection mycélienne	95
2.5.1	Les champignons	96
2.5.1.1	Le cas particulier du hêtre	96
2.6	La reproductibilité des résultats	97
3.	TEST N°2 : UTILISATION D'UN FONGICIDE	99
3.1	Eliminer l'infection	99
3.1.1	Choix de la technique	99
3.1.2	Traitement des sciures	99
3.2	Résultats	100
3.2.1	La réaction	100
3.2.2	Valeurs de solubilisation du Fe^{3+}	101
3.2.3	Observations colorimétriques	102
3.2.4	Etude de la corrélation avec le pH	103
3.2.5	Conclusions et commentaires	105
	CONCLUSIONS	107
	INDEX BIBLIOGRAPHIQUE	110
	ANNEXES	

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : masse volumique de quelques essences d'après	18
« Pratique du bois : 35 essences et leurs fiches techniques »	
Tableau 2 : valeurs de retrait volumique total [Benoit Y., 1997]	19
Tableau 3 : catégorie de stabilité des essences [Benoit Y., 1997].	20
Tableau 4 : valeurs des contraintes de rupture en compression axiale pour	21
plusieurs essences [Benoit Y., 1997].	
Tableau 5 : valeurs des contraintes de rupture en traction axiale pour	22
plusieurs essences [Benoit Y., 1997].	
Tableau 6 : types de dégradations [Vittone, 1996].....	35
Tableau 7 : les facteurs de corrosion [Hache, 1966].	45
Tableau 8 : humidité d'emploi des bois [Benoit Y., 1997].	50
Tableau 9 : modification de la teneur en acétate après deux ans	52
de stockage humide [Richner, 1996].	
Tableau 10 : risques de corrosion observés pour différentes essences,	54
d'après « Pratique du bois : 35 essences et leurs fiches techniques ».	
Tableau 11 : Valeurs de pH d'extraits aqueux et leur influence sur la corrosion	56
de l'acier brut sans contact avec le bois [Richner, 1996]. Valeurs du mélèze et	
du robinier [Sanderman, 1959].	
Tableau 12 : comparaison de valeurs de capacités acides pour différents.....	58
types de couverture.	
Tableau 13 : résultats d'un test de dégradation par corrosion en	60
phase gazeuse sur de l'acier brut.	
Tableau 14 : évaluation de la dégradation de différents métaux (en $\mu\text{m} / \text{an}$), en	67
conditions atmosphériques, avec et sans contacts avec de l'épicéa humide	
[Ormstad, 1973].	
Tableau 15 : vitesse relative de dégradation de différents métaux. Les données de	67
bases sont celles du tableau précédant. L'aluminium représente l'unité.	
Tableau 16 : fissilité de quelques essences, d'après « Pratique du bois : 35 essences	71
et leurs fiches techniques ».	

Tableau 17 : risques de corrosion par contact direct	74
Tableau 18 : comportement des métaux en contact avec le bois.	75
Tableau 19 : mesures de protection agissant contre la corrosion.....	75
Tableau 20 : risques de corrosion en phase gazeuse	77
Tableau 21 : humidité des sciures des essences étudiées.....	80
Tableau 22 valeurs de pH et quantité de fer solubilisé des échantillons	88
témoins : limaille et sciures.	
Tableau 23 : classement des essences selon les valeurs de solubilisation	91
du fer obtenues lors de la première expérience.	
Tableau 24 : comparaison du pH moyen des solutions réactionnelles et le pH.....	91
des solutions témoins qui n'ont contenu que de la sciure.	
Tableau 25 : valeurs moyennes de solubilisation du fer pour des essais dont les.....	100
solutions ont des concentrations en PCP différentes.	
Tableau 26 : variations du pH au cours de l'expérience.....	103

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : tronc en coupe.	15
Figure 2 : micrographie d'un cerne annuel	17
Figure 3 : le système de corrosion.....	37
Figure 4 : réaction de corrosion en milieu acide.	39
Figure 5 : réaction de corrosion en milieu alcalin	40
Figure 6 : réaction de formation de l'acide acétique à partir de cellulose et d'eau.....	51
Figure 7 : schématisation des zones atteintes par le phénomène de corrosion.	61
Exemple d'un simple clou fiché dans une pièce de bois	
Figure 8 : schématisation des dégradations qui peuvent apparaître	65
sur une fixation à l'interface entre deux pièces de bois	
Figure 9 : quantité de fer solubilisé lors du test n°1.....	89
Figure 10 : pH moyen des solutions réactionnelles et des valeurs.....	90
moyennes de fer solubilisé pour chaque essence.	
Figure 11 : expression de la quantité de fer solubilisé en fonction de.....	92
la consommation en H^+ .	
Figure 12 : valeurs de fer solubilisé pour les différentes essences.....	101
après un traitement avec une solution à 5 % de PCP	
Figure 13 : comparaison des couleurs des échantillons de toutes les essences.....	102
Figure 14 : solubilisation du fer en fonction de la consommation de H^+ pendant	103
la réaction (partie 1)	
Figure 15 : solubilisation du fer en fonction de la consommation de H^+ pendant	104
la réaction (partie 2)	
Figure 16 : valeurs moyennes de pH et de fer solubilisé.....	105
pour toutes les essences.	

I

INTRODUCTION

Les Facultés des Sciences Appliquées et des Sciences Agronomiques ont mis sur pied, par l'intermédiaire de leurs Unités d'Architecture et des Eaux et Forêts, une structure qui gère le projet « Conception, construction et filière bois ». Il s'agit, en fait, de réaliser une activité de recherche dans le domaine du bois, reposant sur une approche multidisciplinaire. Ce double regard , architectural et agronomique, porté sur le bois en tant que matériau, ouvre des perspectives nouvelles quant à son développement. Cela aura pour avantage de comparer des points de vue très différents sur un même objet. Il ressortira de ce travail une connaissance beaucoup plus complète du bois.

La création de cette organisation répond à un constat d'échec du développement de la filière bois en région wallonne. Certains vont même jusqu'à comparer notre région au tiers – monde sur le plan de la production de bois, puisque nous produisons de la matière première en quantité et en qualité sans la transformer de manière systématique. Pour améliorer cette situation, l'idée maîtresse est d'améliorer et d'augmenter l'utilisation du bois dans la construction. En effet, le bois trouve un de ses débouchés principaux dans la construction, bien que son emploi reste encore actuellement cantonné dans des usages très traditionnels. De multiples raisons expliquent ce manque d'innovations, mais la plus importante est sans aucun doute la méconnaissance du bois de la part de ses utilisateurs potentiels. C'est contre cette méconnaissance et les a priori qu'elle engendre que ce projet veut réagir.

Pour y parvenir, plusieurs objectifs ont été fixés. Le premier est de mettre en place une structure de formation continue pour enseigner aux architectes et aux ingénieurs les subtilités de l'utilisation rationnelle du bois en construction. Cette formation a vu le jour et il faut maintenant qu'elle se fasse reconnaître dans le milieu professionnel. De plus, il fallait réaliser un inventaire de ce qui a déjà fait l'objet de recherches dans le domaine, ce qui permet d'orienter les travaux futurs . Enfin, une fois cette première phase d'étude terminée, le projet doit encore atteindre un but : celui de diffuser les informations récoltées vers les professionnels de la construction et un large public.

C'est dans le cadre de ce projet que s'inscrivait, en 1998, une conférence intitulée « Construire et aménager en bois », présentée par Monsieur Storti, membre du CNDB. L'exposé aboutissait à la conclusion que le bois est un matériau très efficace et que son avenir se concevrait très probablement selon une logique d'association bois – béton, bois – résine et, bien sûr, bois – métal. Dès lors, la question qui se posera est : « que se passe-t-il à la frontière entre les matériaux ? »

De nombreux systèmes ayant le bois comme composante principale existent déjà. L'un des plus anciens est sans aucun doute celui qui associe le bois au métal. De nombreux chercheurs se sont déjà penchés sur la question des frontières entre ces matériaux. Pourtant, cela ne signifie nullement que les réactions qui se déroulent à l'interface de ces deux matériaux tellement courants soient complètement comprises et maîtrisées. En effet, si l'aspect physique de nombreuses combinaisons de bois et de métaux a largement été étudié et l'est encore chaque fois qu'un nouvel assemblage paraît, les relations chimiques que ces matériaux entretiennent, restent par contre assez floues. Ces relations chimiques sont principalement la corrosion des métaux par le bois et la dégradation de ce dernier par des produits de corrosion.

Ce travail s'attachera essentiellement à améliorer la compréhension du phénomène de corrosion par le bois. En effet, beaucoup connaissent l'attitude corrosive du bois vis-à-vis des métaux mais ignorent les mécanismes réellement mis en jeu. L'analyse de nombreux cas de corrosion en relation avec le bois est essentiellement empirique, voire intuitive.

Le premier objectif de mon travail sera donc de rendre clair l'action du bois sur le métal pour tous les acteurs de la filière, ce qui constitue un public très large : de l'agronome à l'architecte en passant par les producteurs de bois et bien sûr, le dernier maillon de la chaîne, c'est-à-dire l'acheteur. La description des matériaux qui composent le système étudié sera développée succinctement pour permettre à chacun d'appréhender les propriétés du bois et du métal qui influencent la corrosion. L'analyse des principes de corrosion aboutira à la création d'outils, sous forme de tableaux, qui guideront le raisonnement de l'utilisateur afin de prévoir ou de contrecarrer la corrosion.

L'objectif suivant est de classer différentes essences forestières wallonnes selon leur action corrosive, de manière à déterminer les risques encourus lors de leur utilisation. Ce classement sera réalisé sur base des résultats d'un test de corrosion. Concrètement, cette étude devrait aider à évaluer les risques que courent les accessoires métalliques en aval d'un recouvrement de toit en douglas sur une pisciculture.

Enfin, l'expérience devrait servir à dégager des données chiffrées qui aideraient à exprimer la corrosion de manière quantitative. En effet, la corrosion par le bois est plutôt connue de manière qualitative.

II
PRINCIPES DE LA CORROSION
PAR LE BOIS

1. CONCEPT DU BOIS DANS LA CONSTRUCTION

L'écrivain français Roland Barthes célèbre le bois en ces mots : « Le bois ôte, de toute forme qu'il soutient, la blessure des ongles trop vifs, le froid chimique du métal. Lorsque l'enfant le manie et le cogne, il ne vibre ni ne grince, il a un son sourd et net à la fois. C'est une substance familière et poétique qui laisse l'enfant dans une continuité avec l'arbre, la table, le plancher. Le bois ne blesse ni ne se détraque. Il ne se casse pas. Il s'use, peut durer longtemps, vivre avec l'enfant, modifier peu à peu les rapports de l'objet et de sa main. S'il meurt, c'est en diminuant, non en se gonflant comme ces jouets mécaniques qui disparaissent sous la hernie d'un ressort détraqué. Le bois fait des objets essentiels, des objets de toujours. »

1.1 ETYMOLOGIE

De tout temps, l'homme a demandé à la nature de l'approvisionner en moyens de construire et de fabriquer. Ainsi, la nature nous fournit les matériaux : la terre pour les briques, les fils pour la vannerie et le tissage, mais aussi le bois et les métaux. Cependant, d'un point de vue étymologique, le bois occupe une place privilégiée dans l'ensemble des matériaux. En effet, selon Ernout et Meillet [1979], il permet de comprendre les mots matériau et matière, inséparables du mot mère. Les termes - *materia*, *materies*, *materius* – de la langue latine qualifient le bois de substance maternelle, parce que le tronc dont on coupe les branches ne cesse de rejeter. Ainsi, *materia*, le matériau privilégié, indique la partie ligneuse, la partie génératrice qui est bien différente de l'écorce et des feuilles. Le mot bois possède dans son sens premier les notions de « substance » et de « ce qui engendre » (la maternité). Il est « la mère » de la construction. Il a permis à l'homme de se fabriquer ses premiers habitats artificiels.

1.2 DU BOIS AUX NEO-MATERIAUX

Dès que l'homme sort des cavernes, il n'utilise plus le bois uniquement pour se chauffer. En tant que chasseur-cueilleur, il se déplace et, grâce au bois, construit des abris rudimentaires. Seul le bois lui permet d'avoir une habitation mobile, légère et qu'il peut fabriquer sans outils.

Avec la sédentarisation, les constructions vont grandir et se compliquer. Les Romains inventeront la ferme triangulée ce qui permet un grand développement des constructions [Dagognet François]. La pierre est aussi très utilisée et le bois constitue les planchers, les charpentes, etc. Il remplit encore ces fonctions aujourd'hui. Cependant, le bois était utilisé dans tous les domaines de la vie et au Moyen-Age, les utilisations du bois s'étendaient à la construction navale, à la réalisation d'instruments de musique, etc. [Stevens M., 1993].

Ainsi donc, avant l'Age du Fer, il était le moteur de développement des sociétés : matériau modèle, il servait dans les machines, les engrenages, les treuils, etc. En effet, dur et solide, on peut pourtant le façonner : il est à la fois rigide et flexible.

C'est seulement après le XIII^{ème} siècle que les techniques de production du fer seront au point et feront entrer le monde dans une nouvelle ère. Mais dans bien des cas, c'est plus le manque de bois que ses défauts ou les qualités d'autres matériaux qui obligera à son remplacement dans beaucoup d'applications. Il continuera toutefois à être largement utilisé en construction. Ce n'est que depuis le XIX^{ème} siècle que de nouvelles techniques de construction ont réduit le bois à un rôle secondaire [Vittone, 1996].

Le bois appartient-il pour autant au passé ? Nous sommes nombreux à penser que non, un matériau comme celui-là ne meurt pas. Le bois entre dans une nouvelle époque. Pour réduire ses inconvénients et satisfaire aux besoins modernes, il s'associe et se transforme. Revêtements, croisements, lamellages, multi-composition, imprégnation sont autant de réponses de l'industrie aux défauts rédhibitoires du bois : il est anisotrope, il brûle, il est sensible aux variations d'humidité et aux parasites et enfin, il peut contenir certains défauts de croissance. La stratégie qui consiste à associer le matériau bois à d'autres composés, synthétiques ou non, est inéluctable et fournit aux constructeurs des produits comme les panneaux texturés, le MDF, les bois rétifés, les composites de résine, etc. Ces néo-matériaux constituent un nouvel atout pour le développement du bois, mais ils bouleversent notre environnement.

1.3 POURQUOI LE BOIS ?

C'est une question que l'on est en droit de se poser. En effet, le bref survol de l'histoire du bois nous montre que ce matériau est utilisé depuis toujours, mais souffre de défauts que les concepteurs tentent de gommer.

Les motivations qui poussent les constructeurs à utiliser le bois aujourd'hui ne sont plus tout à fait les mêmes qu'hier. Aux qualités technologiques du bois qui permettent la construction s'ajoutent des valeurs annexes qui feront pencher la balance en sa faveur.

1.3.1 A propos des qualités constructives

Nous traiterons des qualités du bois en tant que matériau dans le chapitre 2.1.1. ; nous nous bornerons ici à citer des avantages constructifs qui pourraient influencer un candidat bâtisseur.

La maison en bois est de construction rapide. En effet, les délais demandés pour terminer complètement une habitation est de deux mois. Cela réduit d'autant plus les frais engendrés par un double loyer par exemple. De plus, il ne faut que quelques jours pour fermer la construction et la mettre à l'abri des intempéries [Jacob P., 1999].

Les bâtiments en bois sont des constructions sèches et le climat y est optimal dès la fin des travaux. En effet, les matériaux ne nécessitent pas d'apport d'eau. Dès lors, celle-ci ne devra pas être évacuée du bâtiment avant l'apposition des finitions, parquets, papiers peints, etc.

Les maisons en bois sont économiques en énergie et confortables. Puisqu'il ne faut pas chauffer les murs eux-mêmes, l'air ambiant est immédiatement à une température idéale. L'inertie thermique est beaucoup plus faible que dans les constructions plus lourdes. Un sentiment de confort et de substantielles économies de chauffage peuvent s'en dégager [Caully P., 1993].

Le feu est encore une crainte pour certains utilisateurs potentiels. Cependant, sans entrer dans les détails, nous pouvons affirmer que de gros progrès ont été réalisés, essentiellement dans la conception des immeubles ainsi que dans tous les domaines de la prévention, sécurité de tous les systèmes dans la maison ainsi que des alarmes d'incendie. Le bois brûle, c'est vrai, mais de plus en plus, la recherche a permis de comprendre le phénomène et de garantir une sécurité optimale.

1.3.2 A propos des qualités écologiques

Le marché du bois et particulièrement celui de la construction en bois, se teinte de plus en plus d'une couleur verte écologique, tant sur le plan de l'exploitation des ressources que sur le plan du bien-être des habitants.

Un des avantages majeurs du bois, dans ce domaine, est sa renouvelabilité. Le bois bien géré est une ressource inépuisable. L'agriculture et la foresterie sont, encore aujourd'hui, pratiquement les seules industries à exploiter avec succès l'énergie solaire. De plus, une fois produit par la nature sous la surveillance des hommes, le bois est le matériau le moins coûteux en énergie pour son transport et sa transformation [De Mesel, 1996]. En outre, construire en bois soustrait une quantité non négligeable de carbone au cycle naturel. Même si, sur une échelle de temps, cette soustraction n'est que temporaire, elle permet de réduire le carbone rejeté. Un dernier point, et non des moindres concernant la forêt, c'est que trouver un revenu pour les arbres est le seul moyen qui peut sauver la forêt tropicale. En effet, la d

éforestation est actuellement due aux défrichages sauvages pour permettre une agriculture itinérante et précaire. Le problème nécessite une solution socio-économique globale complexe [FAO, Bulletin du bois 1994-95].

1.3.3 Le matériau bois pour construire

De par le monde, l'homme construit avec le bois portes, fenêtres, planchers, meubles mais aussi maisons, passerelles, ponts, embarcadères, terrasses ; même certains temples et églises ont le bois comme matériau principal.

Une fois extrait de la forêt, le bois est utilisé totalement par une filière industrielle très intégrée qui le produit et le recycle sous toutes ses formes : des sciages bruts au bois combustible en passant par les copeaux. Il n'y a quasiment pas de déchets de bois [De Mesel, 1996] si on excepte les éléments traités, difficiles à recycler.

Enfin, le bois est une richesse de notre région puisque c'est une matière première produite en Wallonie et un pôle important du développement. Près de 300 000 personnes en vivent en Belgique, de l'exploitant forestier aux secteurs de deuxième et troisième transformations [Problématique du Bois en la Construction d'Immeubles, 1992].

D'autre part, les constructions en bois ont été employées dans de nombreux sites ruraux, principalement pour des bâtiments agricoles (hangars, séchoirs à tabac) et urbains avec les maisons à colombages, comme certains vieux quartiers de Stavelot, mais aussi de Troyes ou de

Dijon. Il s'agit donc de perpétuer une certaine tradition [Sarlet ,1999] qui s'intègre parfaitement au milieu naturel.

La notion de bien-être exprimée par les habitants de maisons en bois est aussi un argument en faveur de ces constructions. Elle est cependant difficile à évaluer et repose le plus souvent sur des critères très subjectifs. Il n'empêche que nous pouvons reconnaître au bois son aspect esthétique et chaleureux. De plus, un sentiment de sécurité s'en dégage et certains y voient le lien dans nos maisons avec la nature. Cela participe à une recherche d'harmonie [« un corps sain dans une maison saine »].

Nous devons signaler que le bois réagit à l'humidité ;ce qui est un défaut pour les uns parce que le bois travaille, est une qualité pour les autres, car de ce fait, il agit comme un tampon et régule l'humidité atmosphérique : il règne dans les maisons à forte composition en bois un niveau de confort hygrométrique très élevé. De plus, le bois, par sa structure cellulaire, développe une importante surface de contact avec l'air ambiant, surface qui peut être considérée comme un complexe de sorption, un filtre en quelque sorte [De Mesel, 1996]. Bien sûr, toutes ces qualités de confort et d'harmonie dépendent de la mise en œuvre et il est bien clair que, par exemple, des bois peints ou imprégnés, n'ont plus les mêmes qualités.

Les structures en bois sont aussi d'une grande polyvalence. La conception assistée par ordinateur et la préparation de kits en usine autorisent des formes et des aménagements aussi variés que la diversité des projets [Communication personnelle, Jacob P.,1999]. En outre, les aspects du bois sont tellement diversifiés qu'il y en a pour toutes les bourses et tous les goûts. On ne devrait d'ailleurs pas dire le bois, mais les bois puisque chaque essence et chaque traitement propose des couleurs, des textures, des formats différents.

Après les organismes financiers et les assurances, les premiers à avoir été convaincus par la qualité du produit et le marché qui s'ouvrait, les pouvoirs publics ont eux aussi accepté les maisons en bois. En 1993, on estimait à 12 % la proportion de nouvelles constructions qui utilisaient le bois comme matériau de construction ou uniquement de structure. Actuellement, d'après des estimations réalisées à l'issue du salon de la construction en bois de Namur, le bois occuperait 20 % du marché de la construction et de la rénovation.

1.4 NOTIONS D'HABITAT BOIS

Ce paragraphe nous indiquera la position urbanistique de la région wallonne en matière d'utilisation du bois dans la construction.

1.4.1 Urbanisme de construction en bois

1.4.1.1 Bois non apparent

Les prescriptions urbanistiques de la Région Wallonne, dans le fascicule « Construire en bois » édité en 1999, ne concernent pas le système constructif en tant que tel. Elles ne s'attardent que sur l'aspect extérieur. Pour les maisons dont le bois ne constitue que l'intérieur des murs et non le parement, aucun règlement particulier n'existe, sinon des dispositions spéciales et des contraintes techniques imposées à certains projets d'envergure par le service régional d'incendie.

1.4.1.2 Bois apparent

Les constructions en bois apparent sont plus strictement surveillées puisque « la construction en bois ne peut relever d'un parti architectural différent des constructions environnantes » [Sarlet, 1999]. Il est certain que la réticence des pouvoirs publics aux constructions en bois provenait de craintes sécuritaires dont l'origine était une méconnaissance des matériaux, mais aussi du fait que bien des projets ne s'intégraient pas du tout dans la typologie locale et se cantonnaient à des résidences type chalet. Dans ces conditions, le permis de construire, à l'époque, était refusé.

Maintenant, avec le développement des techniques de construction et le nouvel engouement pour le matériau, les architectes déposent des demandes de permis d'urbanisme pour des projets qui respectent les caractéristiques de la typologie locale et toutes les dispositions réglementaires du R.G.B.S.R. (R.G.B.S.R., Région Wallonne, brochure « Qu'est-ce que c'est ? ») concernant l'implantation, la volumétrie, l'aspect des façades et les matériaux de couvertures. Les constructions « bois apparent » sont tout de même soumises à des règles spécifiques.

1.4.1.3 Règles spécifiques

Le but principal de ces règles est de guider ces projets vers des réalisations qui s'intègrent harmonieusement dans le paysage. Cela concerne premièrement les volumes ; il ne faut pas de débordements de toitures, les crêtes des bâtiments doivent être « nettes et rectilignes » et il n'y aura pas de balcons aux extrémités du bâtiment. Autrement dit, chalets suisses, scandinaves et autres sont interdits !

Le règlement prévu pour les façades concerne plus directement le bois. Une attention particulière est apportée au matériau de recouvrement.

Les pouvoirs publics exigent que les parements extérieurs soient réalisés avec des pièces de bois équarries de manière à former une paroi plane. De plus, les façades sur lesquelles le maître d'œuvre associe plusieurs matériaux devront respecter l'unité de volume de la construction. Des matériaux locaux seront utilisés de préférence.

Le législateur distingue également plusieurs zones où l'implantation est possible : dans un site urbanisé, dans un site homogène ou encore en périphérie d'un site bâti non homogène.

Dans ce dernier cas et à certaines conditions, le bois peut recevoir des peintures et des lasures colorées, cependant toujours dans les teintes de matériaux locaux. Les autres cas ne prévoient pas de couleurs différentes de la teinte naturelle du bois vieilli. Cela impose de n'utiliser que des essences de bois durables qui résisteront au temps sans recevoir de protection.

Cette restriction dans l'utilisation des couleurs peut ne pas satisfaire les concepteurs qui avaient prévu d'autres couleurs que le brun ou le gris pour leurs réalisations. Néanmoins, il y a différentes essences qui peuvent être utilisées en extérieur (voir chapitre choix des essences) et tout une palette de nuances peut être élaborée. La difficulté réside alors dans le travail avec un matériau qui change en vieillissant. C'est un des charmes de l'utilisation du bois en extérieur.

1.4.2 Conclusions urbanistiques.

En conclusion, l'habitat bois est toléré en Wallonie et les réglementations permettent de rendre un avis objectif sur la faisabilité d'un projet. Pourtant, bien des difficultés subsistent au niveau administratif. Trop souvent, il faut encore convaincre des personnes réticentes. Un dialogue doit s'établir, c'est la seule manière de permettre un développement harmonieux du cadre de vie en interaction avec le développement de l'utilisation du matériau bois.

1.5 DURABILITE DES BATIMENTS.

1.5.1 Concept

La durabilité est un concept qui devient fondamental, aussi bien dans des questions d'écologie que de construction. Pourtant, tout comme pour son homologue écologique, la durabilité des bâtiments est assez délicate à prévoir, car l'environnementaliste et l'architecte n'ont bien souvent qu'une seule chance pour réussir ce qu'ils ont entrepris.

Dans le cas des constructions, il est très rare de voir des essais effectués sur des exemplaires grandeur nature. Bien sûr, au fil des années, des informations se sont accumulées et l'observation de ce qui a déjà été réalisé permet aux concepteurs de se faire une idée de l'espérance de vie de certains éléments. Par exemple, la durée de vie moyenne pour une fenêtre standard, avec cadre en bois peint et ferrements en acier dont les joints sont en mastic synthétique, est d'environ trente ans [Vittone R., 1996] : ces données sont plutôt vagues. Ainsi, avec de telles informations, on ne sait pas dans quelles mesures les différents composants de la fenêtre sont affectés, ni même la cause du vieillissement. Cela ne permet pas d'améliorer le processus constructif.

Pourtant, la conception est primordiale dans la pérennité des constructions ; près de la moitié des dégâts qui surviennent sur une construction sont dus à des fautes de conception [Vittone, 1996]. Seule la « matière grise » est un moyen efficace de lutter contre les dégradations [Calvi, 1999]. Il vaut toujours mieux éviter le mal que le réparer.

La prévention des dégâts doit intervenir très tôt dans la chaîne de décision. Il faut concevoir les projets, même les premiers, en prévoyant toujours les dégradations, notamment les phénomènes de condensation, d'amplitude thermique, d'accumulation d'eau, bien sûr de corrosion, etc. Il importe évidemment d'intervenir au moment où des modifications sont encore possibles. Le moyen le plus efficace pour faire cela est de simuler.

1.5.2 La durée de vie

Tout comme le gestionnaire forestier, les bâtisseurs doivent prendre en compte une difficulté supplémentaire : la durée. Les habitations sont conçues pour durer parfois un siècle, voire plus. Les contraintes climatiques et physiques vont peser de manière longue et répétée, cela sans compter d'éventuels accidents, fuites, ruptures, etc. Pour Vittone, bien que la durée soit

importante, les principales et les plus nombreuses défaillances d'une construction étaient décelées dans les premières années. De plus, les matériaux sont hétérogènes, ils ne réagissent pas aux variations et ne vieillissent pas de la même manière. Il convient de prendre en compte, dans le choix des matériaux, les possibilités d'entretien et de réparation.

Dans le but de bien cerner la durabilité, il faut encore mentionner la notion de « permanence des performances » dans le temps. C'est à dire que le matériau utilisé, ou la pièce fabriquée, conservera ses propriétés pendant la durée de vie du bâtiment. Les matériaux modernes pèchent parfois par leur manque de permanence. Ils sont extrêmement performants, mais ils ne sont pas capables de maintenir leur niveau initial. Il y a donc un choix de durabilité à faire. Pour qui construit-on ? Dans quels buts ? Pour combien de temps ? Effectivement, suivant la conception traditionnelle, « on construit pour durer ». Cette idée tend à évoluer sous l'influence justement de l'adaptation de la durabilité. Aujourd'hui, les modes évoluent plus vite, même dans le domaine de la construction. La durabilité est moins en vogue, on préfère changer plus souvent que d'acheter de la grande qualité et on donne la priorité aux exigences de confort et d'économie. Enfin, les évolutions techniques se succèdent tellement rapidement que l'on a tendance à ne pas s'enfermer dans une technologie définie. En effet, l'industrie propose continuellement des produits plus efficaces. Ces affirmations sont étayées par l'explosion du marché de la rénovation et comme corollaire, le marché des matériaux de construction, de bricolage et de décoration dans les grandes surfaces.

La locution « construit pour durer » est également battue en brèche par les nouvelles considérations écologiques. De plus en plus, le choix d'un matériau se fera en pensant au démantèlement de l'édifice, même si cela nous semble paradoxal [Storti G., 1997]. La mode, mais surtout la raison, nous poussent à envisager la seconde vie des matières que l'on utilise. Dans un avenir peut-être proche, les produits manufacturés dont le démontage et le recyclage ne seront pas aisés ou possibles, auront un désavantage par rapport à d'autres produits. Les pénalités pourront être commerciales, par le choix du consommateur, ou elles pourront être fiscales, par des mesures contraignantes de l'Etat. Il ne faut pas voir dans ces produits uniquement les composites entièrement synthétiques, comme les résines polymères par exemple, mais il faudrait penser aux bois traités, aux bois imprégnés de résines et même aux bois peints, etc.

Par contre, cette notion de « recyclabilité » peut être à l'avantage du bois si celui-ci est mis en valeur avec les nouveaux concepts de durabilité, puisqu'il est recyclable, polyvalent (utilisé en structure, en décoration, etc.) et technologiquement performant.

1.5.3 Les développements actuels.

La construction en bois prend de l'ampleur en Belgique. Que ce soit en bois apparent ou en bois de structure, les constructions en bois sont de plus en plus nombreuses du fait de l'accroissement de la demande en bâtiments et de la promotion plus efficace du matériau. En outre, les principes constructifs vont progresser et la connaissance de leurs propriétés ainsi que la démonstration de leur efficacité donnera confiance aux acheteurs. Les Etats-Unis sont-ils un exemple à suivre en ce domaine ?

2. LES MATERIAUX

Les phénomènes de corrosion que nous allons décrire sont le résultat de l'interaction de plusieurs facteurs agissant sur deux matériaux : le bois et le métal. Ces deux matériaux sont mis en contact à différents endroits dans le bâtiment, entre autres aux fixations des bardages et dans les assemblages que nous décrivons succinctement en Annexe I et II. Nous nous intéresserons essentiellement aux matériaux en présence.

La description des matériaux se bornera à une présentation des éléments qui permettent d'apprécier les qualités de chacun et de comprendre les défauts qui peuvent apparaître. Nous étudierons d'abord le bois et ses propriétés, ensuite, le métal dont nous décrirons les principales formes. Nous verrons enfin succinctement les propriétés de quelques métaux courants.

2.1 LE BOIS

Ses propriétés mécaniques particulièrement remarquables par rapport à sa densité, sa facilité d'usinage, ses propriétés d'isolation thermique et phonique largement utilisées dans le bâtiment, sa beauté naturelle, mais aussi ses mouvements dimensionnels ainsi que sa sensibilité aux altérations biologiques, tout est lié très intimement à la structure et à la composition chimique du bois [Leclercq et Seutin, 1989].

2.1.1 Structures macroscopiques

Le bois est un matériau constitué de parois cellulaires produites par les cellules du cambium dans l'arbre vivant. Les cellules du bois que l'on trouve dans le commerce sont mortes et leur contenu cellulaire a presque totalement disparu. Il s'agit de xylème. C'est par lui que circule la sève dite minérale et l'eau. Pourtant, il existe une autre partie dans le bois physiologique : le phloème ; il forme la couche extérieure du tronc. Elle est très mince par rapport au volume de xylème et est retirée avec l'écorce lors de la transformation. Nous ne parlerons donc plus du phloème et la notion de bois sera celle bien connue de tous [Core H.-A., 1979].

Le tronc de l'arbre est organisé en couches concentriques. Celles-ci sont le résultat de l'activité du cambium qui entraîne l'épaississement du tronc par une croissance centrifuge appelée croissance secondaire. La croissance primaire concerne l'allongement du tronc. Sur une coupe transversale de celui-ci, on peut distinguer les couches de cellules produites chaque année [Vittone, 1996]. Cela est dû au fait que le bois initial, qui est formé en début de saison de végétation, est différent du bois final produit en fin de saison de végétation ; le contraste permet de distinguer les années. Chaque couche est appelée cerne annuel. De plus, le cambium produit les cellules de phloème vers la périphérie du tronc tandis que les cellules de xylème sont produites vers l'intérieur. C'est le vieillissement progressif et la mort de ces cellules qui expliquent les différentes parties que l'on distingue dans le tronc :

- la partie centrale s'appelle le duramen, qui est constitué de cellules mortes. Ce sont les premières cellules qui ont été produites, au début de la vie de l'arbre. Plus l'arbre vieillit, plus cette partie croît en volume. Elle est très intéressante car elle se charge en différents produits, que nous désignerons par le terme générique d'extraits. Ils confèrent à cette partie de l'arbre des propriétés de durabilité remarquables. Souvent, ces dépôts de produits antiseptiques s'accompagnent d'une coloration plus intense. Attention toutefois, tous les arbres n'ont pas un duramen nettement différencié et tous les duramen n'ont pas la même valeur de durabilité. Ainsi, le duramen du chêne est durable et visible, alors que celui de l'épicéa n'est pas durable et n'est pas non plus visible. Pour mémoire, la partie tout à fait centrale du tronc, c'est-à-dire les quelques premières années de croissance, s'appelle la moëlle.
- l'aubier est le bois en pleine activité. Il est constitué de cellules vivantes dans lesquelles circule la sève. Souvent, il est plus clair que le duramen, notamment parce qu'il n'est pas encore chargé en éléments préservants. L'aubier des arbres n'est jamais durable. Il doit toujours être protégé.
- le cambium est une mince couche d'une épaisseur de quelques rangées de cellules. C'est lui qui produit toutes les autres cellules. Ce sont ces cellules qui, en vieillissant donnent les différentes parties du bois.

- la couche en périphérie du cambium est, elle, constituée du phloème par où descend la sève organique produite dans les feuilles, ainsi que l'écorce qui protège l'ensemble du tronc des agressions extérieures. Cette couche est très peu valorisée sauf en jardins comme paillage et comme combustible bon marché dans certaines usines.

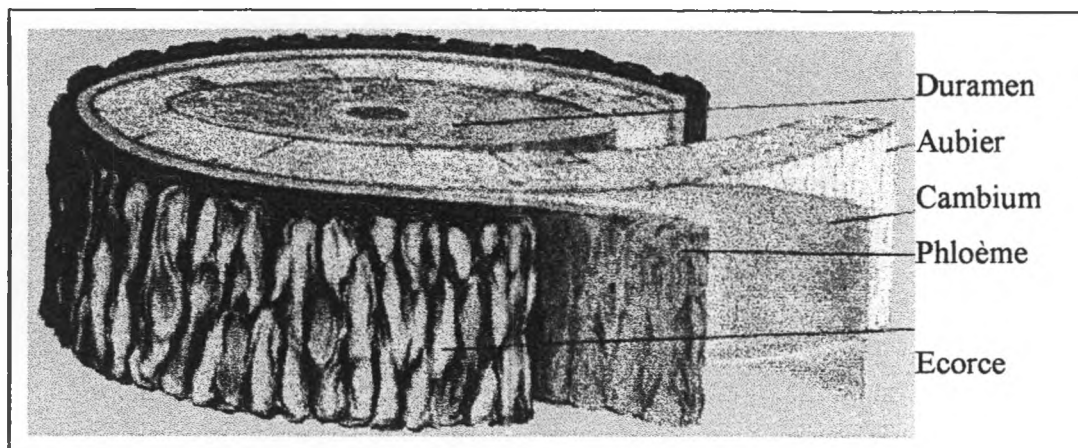


Figure 1 : tronc en coupe.

Pour terminer cette brève présentation de la structure macroscopique des bois, nous devons signaler les trois plans du bois : le transversal, le radial et le tangentiel. Le plan transversal coupe le tronc perpendiculairement à la longueur, le radial coupe le tronc selon un plan parallèle à la longueur de l'arbre et passant par le centre de la grume, le plan tangentiel est aussi un plan parallèle au sens de la longueur, mais ne passe pas par le centre.

2.1.2 Structures microscopiques

C'est à ce niveau qu'il faut différencier les deux grandes classes d'arbres : les feuillus et les résineux. Si les cellules sont toutes issues du cambium, elles n'en sont pas moins différentes. On reconnaît principalement trois types de cellules : celles de structure, celles de conduction et celles de réserve. Sans entrer dans les détails, la répartition des tâches entre les groupes de cellules n'est pas la même dans les résineux et les feuillus [Core H.-A. *et al.*, 1979].

2.1.2.1 Les résineux

Il n'y a pas de différence entre les cellules de conduction et celles qui assurent le soutien. Ce sont les trachéides qui réalisent ces deux fonctions. Elles sont positionnées longitudinalement.

Des cellules parenchymateuses, sans aucune fonction de conduction ou de soutien, se chargent de stocker les nutriments nécessaires au bon fonctionnement des autres cellules. Une partie de ces cellules est organisée en rayons, dits parenchymateux, qui ont une direction radiale. Les autres cellules constituent le parenchyme axial.

De plus, il faut distinguer une classe de cellules qui regroupe les cellules sécrétrices et les canaux résinifères. Elles sont peu importantes en nombre, mais très importantes dans la physiologie de l'arbre [Leclercq A. et Seutin E., 1989].

2.1.2.2 Les feuillus

La structure ligneuse des espèces feuillues est plus élaborée. Elle différencie les trois fonctions de soutien, de conduction et de réserve.

La fonction de soutien est remplie par les fibres. Ce sont des cellules résistantes positionnées dans le sens axial. Elles sont de différentes formes suivant les essences et constituent ainsi un critère taxonomique.

La fonction de conduction est assurée par de véritables conduits : les vaisseaux. Ils sont aussi organisés longitudinalement et sont beaucoup plus performants que les trachéides.

La troisième catégorie de cellules, appelée aussi parenchyme, est constituée de cellules de réserve.

2.1.3 Physionomie d'une coupe

Que ce soit en feuillus ou en résineux, les cellules ont un ordonnancement particulier suivant les essences. Dès lors, chaque essence présente un dessin particulier dans les différents plans. Outre l'essence, l'arrangement des couches de cellules peut nous renseigner sur la vitesse de croissance de l'arbre duquel on a extrait le bois. Si les cernes sont larges, l'arbre a poussé vite, par contre des cernes très fins nous indiquent une certaine lenteur de croissance (voir Photo 3.1 page suivante).

2.1.4 Les défauts du bois

Les croissances primaire et secondaire règlent la forme et la structure des arbres et donc les qualités du bois. Dès lors, les anomalies de croissance induisent des malformations dans le bois qui sont de deux ordres [Vittone, 1996] : les défauts concernent la structure alors que les altérations concernent la composition. Comme défauts, on peut citer les nœuds dus aux branches, le fil tors dû à une déviation dans le fil du bois lors de la croissance, des plaies dues aux exploitations, etc. Les altérations principales sont dues aux champignons qui causent les pourritures, les échauffures, le bleuissement, etc.



Figure 2 : micrographie d'un cerne annuel : BI correspond au bois initial, BF au bois final et CR aux canaux résinifères (photographie réalisée au microscope à balayage sur échantillon de Pinus resinosa) [Core H.A. et al., 1979].

2.1.5 Composition chimique du bois

La formation du bois fait partie intégrante du cycle du carbone qui est introduit dans l'arbre par le processus de photosynthèse [Leclercq et Seutin, 1989]. Comme toute plante, les arbres produisent du glucose dans les feuilles. Ces sucres simples sont assemblés en polysaccharides qui forment les principaux éléments de la substance bois, à savoir la cellulose, l'hémicellulose et la lignine. Il y a bien d'autres composés qui sont élaborés lors de la formation

du bois. La composition chimique du bois n'est pas constante et varie d'une espèce à l'autre, voire d'un individu à l'autre.

Les proportions des constituants principaux sont, lors d'une analyse élémentaire de bois anhydre, 50 % de carbone, 43 % d'oxygène, 6 % d'hydrogène et 0.5 % d'azote. Il faut en plus compter environ 1% de matières minérales diverses.

L'eau est également un constituant essentiel du bois. L'arbre se sert de l'eau pour la croissance des cellules, pour la régulation thermique et pour le transport de la sève. L'eau est adsorbée sur les parois cellulaires, car le bois est un matériau hygroscopique puisque les chaînes de polysaccharides présentent des groupes hydroxyles qui créent des ponts hydrogène.

2.1.6 Propriétés du bois

La description de la croissance, faite au paragraphe précédent, montre que les cellules sont organisées en files sur la longueur du tronc et que lorsqu'elles sont mortes, leur structure peut être comparée à des tubes juxtaposés [Calvis,1999].

Cela a une grande importance dans la compréhension du comportement du bois. Les résistances en traction et compression sont directement tributaires de cette organisation. Toutes les réactions de mouvement du bois sont aussi l'illustration de ce système de croissance. Le bois est anisotrope et hétérogène.

2.1.6.1 La masse volumique

Elle varie selon l'essence et détermine de nombreuses propriétés : durabilité, rétractabilité, résistance, etc.

*Tableau 1 : masse volumique de quelques essences d'après
« Pratique du bois : 35 essences et leurs fiches techniques ».*

Essences	Masse volumique Moyenne (en kg /m³)
Douglas	550
Mélèze	600
Robinier	750
Hêtre	700
Western Red Cedar	370
Pin sylvestre	500

2.1.6.2 La rétractabilité

Le bois travaille suivant les variations d'humidité. Cette modification du volume a lieu dans les trois directions : axiale, radiale et tangentielle. En raison de l'organisation du bois, la direction axiale n'est quasiment pas affectée, contrairement aux deux autres. L'amplitude des variations est environ deux fois plus importante dans la direction tangentielle que dans la direction radiale.

Le taux d'humidité de 30% est, pour le bois, un taux charnière. Il détermine le PSF (point de saturation des fibres), c'est-à-dire qu'au-dessus de cette valeur, le bois est saturé et une variation d'humidité n'entraîne plus de modification du volume. Sous les 30 %, le bois n'est pas dimensionnellement stable. Il gonfle quand la quantité d'eau augmente et se rétracte quand elle diminue, or, pour des raisons de durabilité, il faut garder ces bois sous les 20 % d'humidité.

Tableau 2 : valeurs de retrait volumique total [Benoit Y., 1997]

Essences	Retrait volumique (en %)
Jelutong	4,2
Doussier	7,7
Western Red Cedar	9
Douglas	13,2
Mélèze	14
Pin sylvestre	14,1
Hêtre	18,3

2.1.6.3 La stabilité

Il existe des classements d'essences selon leur stabilité en service. La stabilité est une notion très importante pour l'utilisation du bois, car elle intègre les données concernant le retrait volumétrique total des bois, mais également la différence entre les retraits radiaux et tangentiels, la rapidité d'adaptation hygroscopique ou encore des défauts comme le fil tors.

Tableau 3 : catégorie de stabilité des essences [Benoit Y., 1997].

Catégories de stabilité	Essences
très stable	teck, jelutong, noyer
Moyennement stable	douglas, mélèze, western red cedar, pin sylvestre
peu à moyennement stable	chêne
peu stable	hêtre

Si le bois est sensible aux variations d'humidité, il ne l'est pas aux variations de température. Le phénomène de dilatation n'intervient pratiquement pas dans la stabilité, car elle est faible et elle est compensée par le retrait volumique engendré par l'augmentation de température.

2.1.6.4 La durabilité

C'est la propriété du bois qui lui permet de résister aux agressions extérieures, que ce soient l'eau, les champignons, les insectes ou encore les sollicitations mécaniques. Il n'est pas aisé de résumer les propriétés de durabilité des différents bois. Il est toujours préférable de consulter un ouvrage de référence ou, mieux, de s'adresser à un spécialiste qui saura intégrer aussi bien les caractéristiques du bois que celles du milieu où il sera mis en œuvre. Toutefois, quelques indices permettent de se faire une idée sur les qualités de durabilité de la pièce de bois que l'on veut travailler.

Dans la majorité des cas, les bois les plus durables sont souvent les plus denses et ceux dont la charge en résines (pin, mélèze,...), en oléo-résines (teck,...) ou tanins (chêne, châtaigner,...) est suffisante [Vittone R., 1996]. Il s'agit toujours du duramen de ces arbres. En effet, l'aubier n'est jamais durable, car il contient toujours des matières nutritives, amidon et glucose, très attractives pour les champignons et les insectes.

La durabilité des bois dépend également du milieu dans lequel ils seront utilisés [Leclercq et Seuvrin, 1989]. Ainsi, en atmosphère sèche, aucun problème ne se pose sinon celui des insectes s'ils ont accès au milieu. Notons toutefois que des essences comme l'aulne, le chêne, l'orme résistent très bien à l'immersion [Vittone R., 1996]. Dans le cas de contact avec l'eau ou avec le sol, c'est toujours à la jonction entre les milieux que des dégradations apparaissent. A cet endroit précis, l'humidité est importante et l'aération est inévitable. En effet, pour que les champignons se développent, l'eau et l'oxygène sont nécessaires.

La technique de préservation est à choisir au cas par cas et il sera toujours préférable de sélectionner une essence naturellement durable et de concevoir le projet de manière à éviter les risques, c'est-à-dire ventiler par exemple. Il ne faudra pas oublier cependant que le bois fait partie du cycle du carbone et l'homme ne fait que court-circuiter le cycle. Nous lui imposons une pause aussi longue que possible. Dans certains cas, il ne faudra pas hésiter à utiliser des produits préservants. C'est à ce prix que le bois sera un matériau fiable et apprécié.

2.1.7 Les propriétés mécaniques

Par sa croissance, le bois est hétérogène et anisotrope. Il faut déterminer ses propriétés dans les différentes directions et les valeurs sont obtenues par des essais. Les sollicitations admissibles sont déterminées en multipliant le résultat des essais par un coefficient de sécurité trois [Vittone R., 1996]. C'est un coefficient élevé. L'utilisation de ces normes cantonne parfois le bois à des emplois très traditionnels. Si les calculs étaient réalisés sur base de la contrainte caractéristique plutôt que sur celle de la contrainte admissible, 2,25 fois plus petite, le bois gagnerait certainement en efficacité [Calvi, 1999].

2.2.1.1 Les contraintes de compression

Tableau 4 : valeurs des contraintes de rupture en compression axiale pour plusieurs essences [Benoit Y., 1997].

Essences	Contrainte de rupture en compression axiale (en Mpa)
Balsa	9
Western red cedar	32
Pin Sylvestre	50
Mélèze	53
Douglas	55
Hêtre	58
Azobé	96

La résistance de compression axiale augmente avec la densité et diminue, dans certaines limites avec le taux d'humidité ; une augmentation de 1 % de l'humidité se répercute par une baisse de 4 % de la résistance en compression [Vittone R., 1996]. Les essais permettent de

qualifier les qualités intrinsèques d'une essence. Les éprouvettes sont sans défaut et leur humidité est contrôlée. Donc, les valeurs obtenues ne sont pas directement applicables dans les calculs de structure.

La compression transversale est très dommageable pour les bois et il est préférable de l'éviter. La structure en tubes juxtaposés, qui est schématiquement la structure du bois, ne supporte pas l'écrasement.

2.2.1.2 Les contraintes de traction

Ce sont les contraintes de traction axiale que le bois supporte le mieux. La charge de rupture en traction est à peu près deux fois celle de la compression axiale [Vittone, 1996]. Ce principe a été compris très tôt avec la construction des fermes où les efforts sont repris par l'entrait, ou tirant. La qualité du bois utilisé influence fortement la résistance, ainsi, la fibre torse ou une présence importante de nœuds réduit fortement les performances. C'est en traction que le bois peut s'exprimer de manière impressionnante, mais la difficulté réside dans les connexions entre les pièces. En effet, les connexions réduisent la section servant à l'effort. Il en est de même en laboratoire où le test de traction est rendu délicat par la difficulté d'attacher l'éprouvette de manière à rendre compte de la réelle résistance à la traction du bois plutôt que celle du système de fixation.

Tableau 5 : valeurs des contraintes de rupture en traction axiale pour plusieurs essences [Benoit Y., 1997].

Essences	Contrainte de rupture en traction axiale (en Mpa)
Balsa	30
Western red cedar	55
Pin Sylvestre	102
Mélèze	101
Douglas	93
Hêtre	117
Azobé	180

La traction transversale est à éviter pour la même raison que la compression transversale. Toutefois, la traction transversale est impliquée dans la plupart des problèmes d'arrachement en relation avec les fixations. Il faut être attentif à cette contrainte.

2.2.1.3 Le cisaillement

Contrairement au béton qui casse à 45° ou à l'acier qui rompt transversalement, le cisaillement se produit, dans le bois, de manière longitudinale, par glissement des fibres.

[Calvi, 1999]

2.2.1.4 La fissilité

La propriété qu'ont les fibres de se décoller est exploitée pour la production de tuiles de bois, shingles, bardage. La fissilité explique aussi l'éclatement des fibres quand un clou est planté. Certains bois sont sensibles au fendage. Cela permet à l'eau de s'insinuer dans la fissure produite et favorise la corrosion.

Cette présentation du matériau bois est loin d'être exhaustive, mais elle aborde les propriétés du bois utilisées en construction et les caractéristiques qui permettent de comprendre son comportement face à la corrosion.

2.2 LES METAUX

Les métaux sont utilisés depuis la nuit des temps. Dans la construction aussi, ils ont une place prépondérante. Ils servent de matière première à des structures, des recouvrements, des conduites par exemple. Lorsqu'ils ne se suffisent plus à eux-mêmes, associés, ils améliorent les performances des autres matériaux : ils consolident les bétons et assemblent les pièces, notamment de bois, entre elles. Les métaux sont mis à contribution à tous les niveaux de structure. Cela est dû à leur diversité et à leurs qualités. Nous allons nous attarder sur les qualités remarquables de quelques métaux forcément présents dans toutes nos maisons : l'acier, le zinc, le cuivre et l'aluminium.

2.2.1 Caractéristiques générales

De manière générale, le métal est isotrope. Contrairement au bois, il peut être sollicité de manière identique dans toutes les directions et cela autant en traction qu'en compression [Vittone R., 1996]. Les capacités de résistance requises exigent une quantité plus faible de matière dans les constructions métalliques quand on compare avec d'autres matériaux comme le béton ou le bois. Il est aussi beaucoup plus homogène que le bois.

2.2.2 L'acier

2.2.2.1 Composition

L'acier est un alliage de fer et de carbone. Il contient au maximum 2 % de ce dernier et peut renfermer, volontairement ou non, d'autres éléments. Contrairement à la fonte, l'acier est un métal ductile, c'est-à-dire qu'il peut servir pour la production de pièces par compression ou extension, à chaud ou à froid. La fonte, quant à elle, doit être moulée. La propriété fondamentale qui a répandu l'utilisation de l'acier est qu'il peut être trempé : l'acier acquiert une grande dureté quand il est chauffé à une température élevée et refroidi rapidement. Le travail mécanique à froid, l'écrouissage, permet aussi un durcissement de l'acier [Colombier L. et Henry G., 1995].

2.2.2.2 Caractéristiques physiques

La masse volumique vaut presque 8000kg/m^3 . Pour le métal, les variations d'humidité n'influencent pas la stabilité dimensionnelle, par contre les amplitudes thermiques induisent des variations. Elles ont un coefficient de dilatation thermique de $10 \cdot 10^{-6} \text{ mm/}^\circ\text{C}$ et produisent des contraintes supplémentaires en compression [Vittone R.,1996].

2.2.2.3 Caractéristiques mécaniques

Les propriétés mécaniques des aciers sont nombreuses, nous en citons quelques exemples.

- La malléabilité est une qualité de certains métaux, cuivre, fer, or, etc., capables de se déformer à chaud ou à froid sans se rompre ainsi que d'être transformés en feuilles minces.
- L'élasticité est la propriété qu'ont certains métaux de reprendre leur forme initiale lorsque la contrainte n'agit plus sur eux.
- La plasticité est la propriété qu'ont certains métaux de conserver leur forme quand la force n'agit plus.
- La dureté est l'aptitude à résister à la pénétration. [Vittone, 1996]
- La sensibilité à la corrosion est la propriété des aciers qui nous intéresse. Elle est aussi leur plus gros défaut.

2.2.3 Aciers traités et aciers spéciaux

L'acier ordinaire a des utilisations limitées. Souvent, la résistance aux sollicitations mécaniques auxquelles il est soumis est trop faible. Il souffre également d'attaques chimiques, même par l'atmosphère pour autant qu'elle soit humide ou polluée. Dès lors, pour résoudre ces difficultés, les métallurgistes ont mis au point toute une gamme d'aciers recouverts et alliés qui ne cesse de s'accroître.

Pour répondre de manière spécifique aux attaques chimiques et plus particulièrement à la corrosion, ils utilisent les aciers passivés, les aciers galvanisés et les aciers inoxydables.

2.2.3.1 La passivation

On réduit la vitesse de corrosion en augmentant la polarisation anodique. Le but est de former une couche protectrice d'oxyde ou d'hydroxyde à la surface d'un métal. Certains métaux, comme l'acier, sont dits passivables. La technique consiste à les protéger par un accroissement de leur potentiel de dissolution ; deux moyens sont possibles pour y parvenir. La première solution est de leur imposer un potentiel suffisamment élevé pour provoquer la passivation, mais inférieur à celui de transpassivation qui correspond à la destruction de la couche protectrice. La seconde repose sur l'induction des réactions de réduction en utilisant des peintures oxydantes comme le minium ou en mettant le métal, en général de l'acier doux, en contact avec une solution basique qui provoque la formation d'une couche passivante formée principalement de Fe_3O_4 . Elle est très mince, de l'ordre de la dizaine de nanomètres. Cette couche est adhérente et protectrice dans les solutions basiques et pas du tout dans les solutions acides. Il faut donc respecter les conditions d'emploi de ces métaux, car la couche est altérable [Colombier L. et Henry G., 1995].

Le caractère protecteur des couches est le résultat de la faible vitesse de diffusion des ions du métal à travers l'oxyde, son efficacité réside aussi dans ses qualités d'adhérence [Hache, 1966].

2.2.3.2 Les aciers galvanisés

Il est impossible d'aborder les aciers galvanisés sans présenter le zinc, le métal le plus important dans ce processus de protection des aciers.

Le zinc est un élément chimique métallique blanc bleuâtre. Bien qu'il soit d'une utilisation courante, la première apparition du zinc en tant que tel date seulement du XVI^e siècle. Actuellement, il est principalement utilisé en fonderie, sous forme de zinc laminé, pour l'obtention d'alliage avec le cuivre et bien sûr, pour la protection des aciers.

Cette utilisation du zinc dans la protection contre la corrosion des aciers est fondamentalement basée sur deux de ses propriétés :

- premièrement, son potentiel électrochimique par rapport à l'électrode à hydrogène vaut - 0,74 V, alors que celui du fer vaut - 0,44 V. Suivant les règles de l'électrochimie, la pile zinc/fer fonctionne avec dissolution du zinc et, dans ces conditions, un revêtement même discontinu de zinc sera protecteur.

- deuxièmement, le zinc se corrode lui-même. A l'air libre ou dans des milieux dont le pH est compris entre 5,5 et 13, il forme un film protecteur, généralement un carbonate basique bien adhérent. Ce film limite la vitesse d'attaque du zinc. Nous détaillerons cela plus loin.

Grâce aux propriétés du zinc, la protection du fer par galvanisation est économiquement plus avantageuse que le recours à des aciers spéciaux [Dreulle P., Dreulle N. et Wojciekowski B., 1995].

2.2.3.3 La galvanisation

L'action anti-corrosive de la galvanisation repose sur trois facteurs différents :

- formation de couches anti-corrosives par le carbonate de zinc
- protection cathodique, active, de l'acier par le zinc moins noble
- protection passive de la couche de zinc

Le premier élément de protection est en quelque sorte un processus de passivation. En atmosphère humide, le zinc réagit et se couvre généralement d'une couche de carbonate basique qui, dans des conditions atmosphériques normales, le protège d'une oxydation ultérieure.

En fait, les produits primaires de la corrosion du zinc sont d'abord l'oxyde de zinc et ensuite l'hydroxyde de zinc qui est très hydrosoluble et dès lors, il n'y a pas de film protecteur formé. Cependant, les hydroxydes de zinc continuent à réagir avec le dioxyde de carbone de l'air et alors, se créent les carbonates de zinc non solubles dans l'eau. C'est uniquement à ce moment que l'on a une protection. Le zinc n'est donc pas passivable au sens propre du terme étant donné que la couche protectrice est constituée de carbonate et non d'oxyde. Lorsque la couche de carbonate est formée, la vitesse d'oxydation du zinc est commandée par la vitesse de diffusion de l'oxygène et de la vapeur d'eau dans cette couche. Elle est donc fonction de l'épaisseur de la couche, de la nature de l'atmosphère et de la présence de produits pouvant attaquer et solubiliser la couche de protection. Par exemple, en atmosphère rurale dans l'Ile-de-France, la vitesse de corrosion du zinc est d'environ 1 μm par an alors qu'en atmosphère urbaine parisienne, elle est de 4 μm par an. Les cas les plus graves de corrosion de couches de zinc sont observés dans les atmosphères polluées par des gaz industriels ; elle peut alors atteindre 10 μm par an [Dreulle P., Dreulle N. et Wojciekowski B., 1995].

Pour que puisse se former cette couche protectrice de carbonate, deux conditions doivent être remplies :

- l'élément de construction ne peut se trouver en solution aqueuse car les hydroxydes de zinc seraient solubilisés.
- une arrivée libre d'air, et donc de dioxyde de carbone, doit être garantie.

Si ces deux conditions ne sont pas remplies, il se forme ce que l'on appelle de la « rouille blanche ». Il s'agit d'amas volumineux et non adhérents d'hydroxyde de zinc. Ceux-ci n'ont pas d'action anti-corrosive et ne sont donc pas souhaitables [Richner, 1996].

La seconde barrière anti-corrosive est la protection cathodique assurée par le zinc. La protection cathodique joue son rôle d'une part jusqu'à ce que la couche de carbonate se soit formée et ensuite quand celle-ci est altérée. Lorsqu'il y a une détérioration mécanique de la galvanisation, la brèche est en quelque sorte cicatrisée par l'action du zinc alentour. Cependant, contrairement à l'action de la couche d'oxyde, la protection cathodique consomme le zinc, donc elle n'est pas permanente. En effet, ce type de protection cathodique, appelé également à électrode sacrificielle, est réalisé car le zinc sert d'anode [Hache, 1966].

Enfin et troisièmement, la protection passive de la couche de zinc résulte simplement de la présence physique du zinc entre l'acier à protéger et l'atmosphère agressive.

2.2.3.4 Réalisation de la galvanisation

Les principales méthodes de protection par le zinc sont décrites ci-dessous.

La galvanisation à chaud consiste à recouvrir l'acier par immersion dans un bain de zinc en fusion. La surface de l'acier, convenablement préparée, c'est-à-dire décapée et séchée, est attaquée par le zinc avec formation de composés intermétalliques zinc-fer. Lorsqu'on retire la pièce du bain, le zinc fondu retenu par capillarité par la couche zinc-fer se solidifie à l'air et constitue une couche externe de zinc pur. En plein développement, notamment dans l'industrie automobile, cette technique de galvanisation est vraisemblablement le meilleur système de protection de l'acier contre la corrosion atmosphérique.

La métallisation au pistolet, procédé Schoop, appelé aussi schoopage, consiste à déposer une couche de zinc sur une surface d'acier convenablement sablée ou grenillée en projetant du zinc fondu à l'aide d'un pistolet spécial. Le zinc utilisé peut être sous forme de fil ou de poudre.

Dans le zingage électrolytique, ou galvanoplastie, on dépose sur la pièce à protéger une couche de zinc par électrolyse d'un sel de zinc en solution. Ce procédé laisse une couche de métal pur dont l'épaisseur dépasse rarement 25 μm . Il convient bien aux revêtements complémentaires, par peinture ou plastification.

La shérardisation s'effectue par diffusion à chaud de poudre de zinc à la surface d'une pièce d'acier. Le revêtement est constitué uniquement de composés zinc-fer. Ce procédé est surtout utilisé pour de petites pièces (boulons, raccords, etc.).

Enfin, pour les deux dernières catégories de traitements, on ne peut plus vraiment parler d'acier galvanisé, mais ce sont des techniques importantes de protection qui concernent le zinc.

La matoplastie consiste à traiter des pièces de mécanique ou de quincaillerie, boulonnerie, visserie, colliers, crochets, etc., placées dans un tonneau rotatif en présence de poudre de zinc, de billes de verre et d'un « promoteur » chimique pour faciliter l'accrochage du zinc par action mécanique.

Le zinc en poudre très fine peut être utilisé comme pigment dans les peintures antirouille, dites « peintures riches en zinc ». Le film sec obtenu doit contenir au moins 80 % de zinc (peintures à base de silicates) ou 88 % de zinc (peintures à base de liants organiques). Ces peintures sont utilisées pour la protection des gros ouvrages en acier (charpentes, ponts, coques de navires, etc.) [Dreulle P., Dreulle N. et Wojciekowski B.].

2.2.3.5 Aciers inoxydables

a) Propriétés

Il existe une assez large gamme d'aciers dits inoxydables ; les plus alliés peuvent même résister à l'attaque de réactifs très sévères tels que les acides chlorhydrique ou nitrique concentrés. C'est à leur propriété de passivation, ou autoprotection, qu'ils doivent leur résistance à la corrosion.

Le chrome est l'élément d'alliage essentiel de tous ces aciers et c'est lui qui leur attribue leur caractère inoxydable par la formation en surface d'une couche d'oxyde de chrome [Hache, 1966]. D'autres éléments, comme le nickel et le molybdène, agissent sur la structure tandis que le titane ou le niobium évitent certaines formes particulières d'attaques.

b) Les différents aciers inoxydables

Selon les propriétés de résistances chimique et mécanique recherchées, la formule de base des aciers inoxydables a été complétée, de telle sorte que l'on distingue plusieurs catégories de ces aciers [Colombier L., Henry G., 1995].

- Les aciers martensitiques contiennent de 12 à 16 % ou de 16 à 20 % de chrome avec addition de 2 à 4 % de nickel. Les teneurs en carbone vont de moins de 0,1 à 1 %. L'acier martensitique est plus ou moins dur suivant sa teneur en carbone, il peut même être caractérisé de fragile [Hache, 1966]. En raison de leur forte teneur en chrome, ces aciers ont une forte trempabilité. Un revenu est généralement fait, après la trempe, pour améliorer la ductilité.

Ces aciers sont souvent choisis autant pour leurs propriétés mécaniques que pour leur résistance à la corrosion. Ils ne sont pas altérés par un certain nombre de réactifs : eau et sa vapeur, air, acides faibles, solutions de sels neutres...

Seuls les aciers ayant un pourcentage d'au moins 16 % de chrome (avec du nickel) résistent dans l'eau de mer et les atmosphères marines. Ils sont employés, en particulier, dans les aubages de turbines à vapeur, pour des pièces mécaniques, en coutellerie et pour les instruments de chirurgie.

- Les aciers ferritiques contiennent de 15 à 30 % de chrome. Leurs caractéristiques mécaniques sont beaucoup moins favorables que celles du groupe précédent. En outre, ils sont sensibles à des « fragilisations » lorsqu'ils sont chauffés dans certaines zones de température. Il en résulte des difficultés de mise en œuvre, en particulier pour le soudage.

En revanche, leur résistance à la corrosion est très améliorée. Ils se comportent bien dans l'acide nitrique dilué ($2\text{HNO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) jusqu'à 60 à 70 °C, dans certains acides organiques, au contact des produits alimentaires, dans les atmosphères rurales et urbaines et dans l'eau de mer non stagnante.

Des alliages à 15 à 18 % de chrome sont employés en particulier pour la décoration et la fabrication des ustensiles ménagers. De leur côté, les aciers à 25 à 30 % de chrome résistent bien à l'oxydation et à la sulfuration à haute température, ce qui conditionne leurs principaux emplois.

- Les aciers austénitiques doivent leur structure à la présence d'au moins 8 % de nickel à côté de 18 à 20 % de chrome. Comme les aciers ferritiques, ils n'ont pas de point de transformation et leurs propriétés mécaniques ne peuvent pas être améliorées par un traitement de trempe. En revanche, ils ne sont pas sensibles aux mêmes phénomènes de fragilisation et sont parfaitement soudables.

Le type le plus courant contient 18 % de chrome avec 10 % de nickel (acier dit 18-10). Des variantes contiennent des additions de titane ou de niobium pour combattre la sensibilité à certains types de corrosion. En effet, cet acier peut être sujet à la corrosion intergranulaire, due à la formation d'auréoles de déchromée par précipitation de carbure de chrome. Ces cas de corrosion intergranulaire interviennent lors de processus industriels et pas en construction. Il faut que la pièce soit maintenue à une température de 600 à 800°C. Ces carbures de chrome contiennent près de 90 % de Cr. Donc, leur formation appauvrit le milieu et les auréoles se forment [Hache, 1996].

On peut remédier à la corrosion intergranulaire des aciers austénitiques en évitant le réchauffage des pièces pendant l'usage ou par l'incorporation de titane ou de niobium. Ceux-ci sont plus avides de carbone que le chrome et donc empêcheront la formation de carbure de chrome. Il en existe, là aussi, plusieurs variantes. Le domaine d'utilisation est très élargi dans les acides sulfurique et chlorhydrique.

Ces aciers et leurs variantes sont les plus employés. Il en existe bien d'autres, adaptés à des cas particuliers. Certains sont de véritables alliages où le fer ne joue plus de rôle, ce sont les alliages non-ferreux.

Il existe tout une palette métallurgique impossible à détailler, mais il faut savoir qu'il existe quasiment pour chaque utilisation et chaque problème une solution métallurgique.

2.2.4 Le cuivre

La couleur du cuivre pur est rose saumon, mais nous ne le connaissons que sous sa livrée rouge parce qu'il s'oxyde immédiatement. Cette oxydation est très limitée dans le cas d'une atmosphère peu agressive. Dans les atmosphères urbaines, chargées en anhydrides sulfureux, le cuivre prend une couleur verte qui est une couche de sulfate basique adhérente et protectrice.

Dans la nature, il existe à l'état natif, comme l'or et l'argent, c'est pourquoi il est un des métaux les plus anciennement connus. Le cuivre est le deuxième métal non ferreux le plus utilisé de par le monde après l'aluminium. Longtemps, le cuivre et ses alliages ont été utilisés pour leurs propriétés de résistance à la corrosion et pour leur malléabilité. Ce sont ces propriétés, ainsi que la conductivité électrique du cuivre qui ont généralisé son utilisation et celle de ses alliages en construction [C.I.C.L.A., 1989]. Ce panel de propriétés ne permet pas au cuivre de participer aux structures, mais il a beaucoup d'autres utilisations très spécifiques, comme la conduction du courant et la conduction de l'eau.

Un des points importants de la connaissance et du développement du cuivre est l'usage de ses alliages. En 1966 déjà, près de la moitié de la production de cuivre était utilisée sous forme d'alliages dont les principaux sont le laiton, le bronze et le cupro-nickel [Hache, 1966]

2.2.4.1 Laitons

Les laitons sont des alliages à base de cuivre et de zinc; ils renferment de 5 à 45 % de zinc et, éventuellement, divers autres éléments en faibles proportions.

Selon leur composition, les laitons peuvent être soit moulés, soit travaillés à chaud ou à froid. Ils ont des propriétés d'emboutissage exceptionnelles [Hache, 1966]. Ils sont utilisés sous forme de tôles, de bandes droites ou roulées, de barres, de tubes, de fils, et présentent une remarquable aptitude à la mise en œuvre, supérieure à celle de la plupart des autres alliages industriels.

Leur aspect est agréable, avec des teintes variant du rose au jaune selon leur dosage en zinc et ils ont une bonne tenue à la corrosion. De plus, ils peuvent recevoir un traitement de surface, ce qui permet de réaliser économiquement des objets de belle présentation, d'un usage durable et d'un entretien facile [C.I.C.L.A., 1989].

Il existe des laitons simples. Ce sont des alliages binaires de cuivre et de zinc. L'industrie emploie aussi des laitons au plomb, dits laitons de «décolletage», qui présentent une aptitude à l'usinage supérieure à celle de tous les autres alliages industriels. Pratiquement insoluble dans les laitons, le plomb, à raison de 2 %, y est disséminé en fins globules qui provoquent la fragmentation des copeaux. Il joue également le rôle de lubrifiant grâce à son bas point de fusion.

Les laitons dits spéciaux résultent de l'incorporation d'un ou plusieurs éléments dont les plus employés sont l'étain, l'aluminium, le manganèse, le nickel, le fer et le silicium.

2.2.4.2 Bronzes

Les bronzes sont essentiellement des alliages de cuivre et d'étain, bien que l'on parle parfois de bronze d'aluminium ou de bronze au béryllium. La teneur en étain des alliages industriels est comprise entre 3 et 20 %. Aux teneurs plus élevées, les bronzes deviennent de plus en plus fragiles, et ils sont alors réservés à des emplois très particuliers, comme le bronze à cloche qui renferme de 20 à 25 % d'étain. Les bronzes ont la particularité de bien résister à la corrosion marine.

En raison de leur excellente aptitude au moulage, les bronzes sont surtout des alliages de fonderie.

2.2.4.3 Autres alliages.

Il existe de nombreux alliages avec le cuivre ; les principaux éléments d'addition sont le zinc, l'étain, l'aluminium, le nickel, le plomb et le manganèse.

- Les cupro-aluminiums constituent toute une famille d'alliages, simples ou pouvant comporter des additions de nickel, de fer ou de manganèse. En règle générale, ces alliages, d'une belle couleur or, sont très résistants à la corrosion par de nombreux acides et par l'eau de mer, d'où leur emploi en génie maritime [C.I.C.L.A., 1989].
- Les cupro-nickels sont des alliages composés de 70 à 80 % de cuivre et de 20 à 30 % de nickel. Eux aussi ont un bel aspect et une bonne résistance à la corrosion. Parmi ces alliages, il faut citer le « monel ». Celui-ci contient 67 % de nickel et 30 % de cuivre. Il est obtenu directement par réduction d'un certain minerai. Il est très résistant aux attaques chimiques, sauf à celles de l'acide nitrique [Hache, 1966].
- Les maillechorts sont des alliages ternaires renfermant de 28 % de zinc et de 9 à 26 % de nickel. Leur couleur varie du jaune pâle au blanc. Ils sont malléables et mécaniquement plus résistants que les laitons. Ils peuvent être chromés, nickelés et argentés. Leurs applications vont du couvert en métal argenté aux clefs plates, en passant par les pièces et ressorts de contact utilisés en téléphonie.

2.2.5 L'aluminium

L'aluminium est caractérisé par une très faible masse volumique 2700 kg/m^3 . Il est très ductile, il peut s'emboutir, se tréfiler ou se laminier aisément. Sa faible résistance à la rupture ne permet pas toujours à l'aluminium d'être utilisé à l'état pur, sauf dans le cas où la résistance chimique est primordiale [Hache, 1966].

2.2.5.1 L'anodisation

L'aluminium a une grande tendance à l'oxydation. Pour sa protection, il est intéressant de former par voie électrochimique une couche d'oxyde protectrice. La pièce à oxyder est placée comme anode dans un bain constitué par une solution aqueuse contenant 10 % d'acide sulfurique [Hache, 1966]. L'anodisation, oxydation anodique, de l'aluminium est un des procédés les plus répandus pour protéger les alliages légers. La protection réside dans la difficulté qu'ont les ions du métal à se mouvoir dans l'oxyde, ce qui permet la protection. Cette technique permet aussi de les décorer, car il est possible de teinter l'alumine comme on teinte un tissu [Aucouturier M. et Penelle R., 1995].

3. PHENOMENES DE CORROSION

3.1 GENERALITES

3.2.1 Notions de désordre

Les bâtiments sont aussi des denrées périssables [Vittone,1996]. En effet, ils peuvent être considérés comme des produits dégradables. Les dégradations peuvent provenir des contraintes agissant sur les matériaux et d'incompatibilités entre matériaux associés. Dès lors, les altérations qui touchent les bâtiments sont de différents types et produisent des effets caractéristiques sur les matériaux. Nous reprenons du livre « Bâtir : Manuel de la Construction » un tableau résumant les classes de dégâts régulièrement observés sur les bâtiments ainsi que les principaux indices visibles qui permettent un diagnostic.

Tableau 6 : types de dégradations [Vittone, 1996]

Effets sur les matériaux	Phénomènes caractéristiques
Dépôts et altérations superficielles	Taches, décoloration, coulures, moisissures, concrétions, efflorescences,...
Destructions superficielles	Erosion, épaufrures, écaillage, desquamation, usure,...
Destructions de la matière	Corrosion, pourriture, gel, ramollissement
Discontinuité de la matière	Fissuration, rupture, arrachement
Changements dimensionnels	Dilatation et contraction thermiques, Gonflement et retrait physico-chimiques (corrosion,...)
Déformations de la matière	Fléchissement, fluage, tassement

Les effets agissant sur la corrosion et les constructions en bois découlent principalement de contraintes atmosphériques. L'air, par son contenu en humidité, permet la corrosion et les polluants qu'il contient accentuent le phénomène. L'eau et l'humidité agissent fortement sur la variation dimensionnelle des bois, permettent le développement des moisissures et favorisent

également la corrosion. La lumière, surtout le rayonnement U.V., a un effet de dissolution et de décoloration des produits ligneux. Enfin, le vent et les variations de pression de l'air peuvent produire des arrachements.

Les phénomènes de corrosion ont une influence directe sur la dégradation des éléments mis en œuvre à plusieurs endroits dans le bâtiment. Les performances s'en trouvent réduites dans les secteurs :

- des séparations : l'étanchéité à l'eau est parfois déficiente.
- de la sécurité : la planéité des surfaces peut être affectée par un épaissement de la matière, en cas de rouille, ou par une destruction de la matière et donc des affaissements.
- de la stabilité : la résistance aux charges permanentes, aux charges d'exploitation ainsi qu'à l'action du vent, de la neige et des dilatations, n'est plus assurée.
- de l'entretien : le phénomène de corrosion oblige à un entretien permanent, ou alors à effectuer des réparations et des remplacements. Dans tous les cas, la maîtrise de la corrosion coûte cher.
- de la durabilité : à la vue de ce qui précède, il est évident que les résistances aux chocs ponctuels ainsi qu'à l'usure du temps ne sont plus aussi bonnes que pour le matériau sain.

3.2.2 Le concept de corrosion

Pour pratiquement tous les métaux d'usage courant, la forme métallique, solide, est instable. C'est pourquoi les matériaux tendent toujours à se transformer en leur produit minéral initial. En d'autres termes, ils se corrodent. Le concept de corrosion est défini suivant la norme DIN 50 900 citée par Richner [1996].

« C'est la réaction (1) d'un matériau métallique avec son environnement qui induit une transformation (2) mesurable de ce matériau et qui peut porter préjudice à la fonction (3) d'un élément métallique ou de tout un système. »

Dans cette définition, nous remarquons que le législateur distingue :

(1) mécanisme de corrosion :

la base en est une réaction électrochimique ou chimique.

(2) L'apparition de la corrosion :

modification du système suite à la réaction corrosive. La corrosion du matériau donne lieu par exemple à la formation de rouille, de trous et de déchirures. Ce phénomène altère l'intégrité du milieu, par exemple l'eau se charge en oxyde de fer, ou des aliments, au contact de l'emballage métallique, changent de couleur ou encore des taches se forment sur certains revêtements.

(3) La dégradation due à la corrosion :

altération de la fonction du système matériau / environnement suite à l'apparition de la rouille (par exemple, non-étanchéité, perte de résistance, cassure, pollution)

Dès lors, la simple apparition de la rouille n'est pas encore un dommage par corrosion. Par exemple, les rails de chemins de fer remplissent leur fonction malgré la rouille. Par contre, la décoloration par la corrosion peut porter préjudice à la fonction esthétique d'une montre de valeur.

Le raisonnement est essentiel à la compréhension de la corrosion dans la pratique : il tient compte du concours des facteurs temps et espace, ainsi que de leur importance relative.

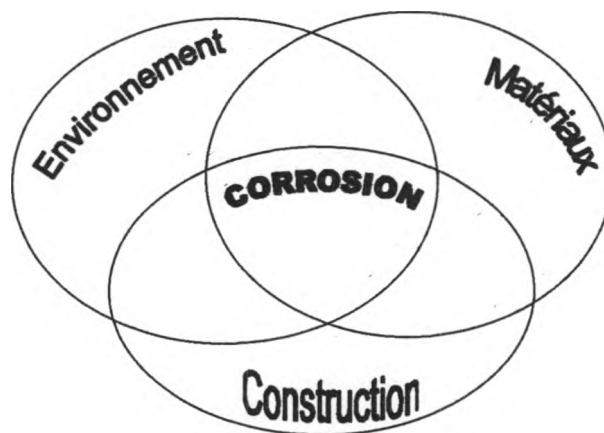


Figure 3 : le système de corrosion

3.2 DESCRIPTION DE LA CORROSION

L'attaque des métaux résulte de leurs interactions avec l'environnement, entre autres l'atmosphère qui, en Europe, est souvent humide et agressive. Les métaux sont également en contact avec d'autres métaux et d'autres matériaux de construction, ce qui peut créer des conditions corrodantes. Enfin, dans les bâtiments, la corrosion des métaux peut être induite par des eaux à pH faible ou chargées de matières dissoutes ; cela est principalement un problème rencontré en tuyauterie [Dugniolle, 1988].

Les métaux susceptibles de corrosion, tels le fer et l'aluminium, proviennent d'oxydes métalliques que l'on traite pour obtenir les métaux désirés. La transformation du minerai consiste grossièrement en une réduction. Thermodynamiquement, on est en droit de penser que plus ils ont consommé de l'énergie pour être produits, plus ces métaux auront tendance à être « instables » et à être oxydés jusqu'à leur état initial. Les aspects thermodynamiques sont très importants. L'application de la thermodynamique chimique permet de calculer les énergies libres et, pour un métal pur placé dans des conditions particulières, de prévoir son comportement. Si l'énergie libre est positive, soit le métal est actif et se corrode, soit le métal est passif et ne se corrode pas, ceci quand les conditions ne permettent pas le développement des réactions. Si l'énergie libre est négative, le métal est indifférent aux agents agressifs habituels ; c'est le cas des métaux nobles [Hache, 1966]. Cependant, la thermodynamique chimique ne suffit pas à l'étude des phénomènes, notamment en milieu humide. En effet, Pourbaix affirme que la corrosion en milieu humide est électrochimique ; il a étudié la stabilité thermodynamique d'un métal en fonction du pH et de la tension d'électrode ; ce sont les célèbres diagrammes de Pourbaix.

3.2.1 Modes d'action

Les deux grands modes d'action qui régissent les phénomènes corrodants sont principalement l'oxydation chimique et électrochimique.

3.2.1.1 Oxydation chimique.

L'oxydation chimique consiste en la formation d'un film solide à la surface du métal quand il est exposé à l'air. L'exemple typique est la passivation de l'aluminium par un oxyde, qui a pour conséquence de rendre mat le métal mais qui le protège de dégradations futures en

raison de la couche imperméable que forme cet oxyde. Si cette couche ne se formait pas complètement, la corrosion se poursuivrait jusqu'à épuisement d'un des réactifs.

3.2.1.2 Oxydation électrochimique

En solution, le processus est électrochimique. Nous proposons un bref rappel électrochimique de la composition et du fonctionnement d'une cellule galvanique. Un rappel plus détaillé se trouve en annexe I. Imaginons un morceau de fer plongé dans une solution électrolytique. Le milieu agressif, par exemple composé de protons, entre en contact avec le fer ; celui-ci lui cède des électrons. Ces électrons proviennent de l'oxydation du fer qui par cette réaction est solubilisé. C'est à cet endroit que se produit le dommage. Les réactions qui se produisent sont une oxydation et une réduction, mais elles ne se produisent pas exactement au même endroit.

La réaction partielle anodique est une oxydation, le métal se dissout et libère des électrons. Ce flux d'électrons va se diriger au sein du métal vers la cathode où il entre en contact avec le milieu agressif.

La réaction partielle cathodique est une réduction. Là, à la surface du métal, les électrons vont servir à réduire le milieu agressif, l'oxydant. Cette partie de la réaction dépendra du pH de l'électrolyte. Les électrons sont transportés depuis l'anode vers les régions où ils réduiront le milieu agressif.

a) Milieu acide

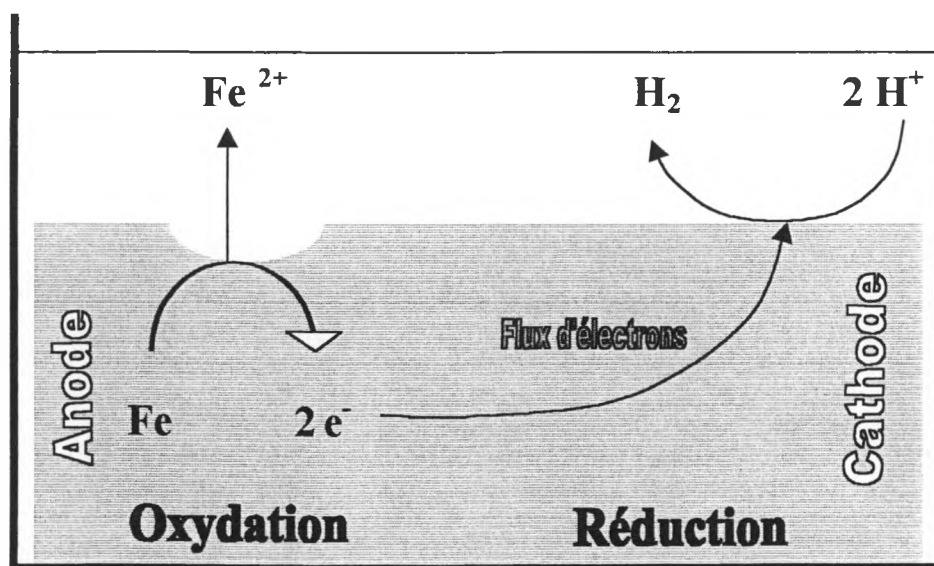


Figure 4 : réaction de corrosion en milieu acide.

Les protons sont réduits en H^+ avec production d'hydrogène. Un $pH = 4$ est parfois renseigné comme étant nécessaire à cette réaction.

b) Milieu faiblement acide à alcalin

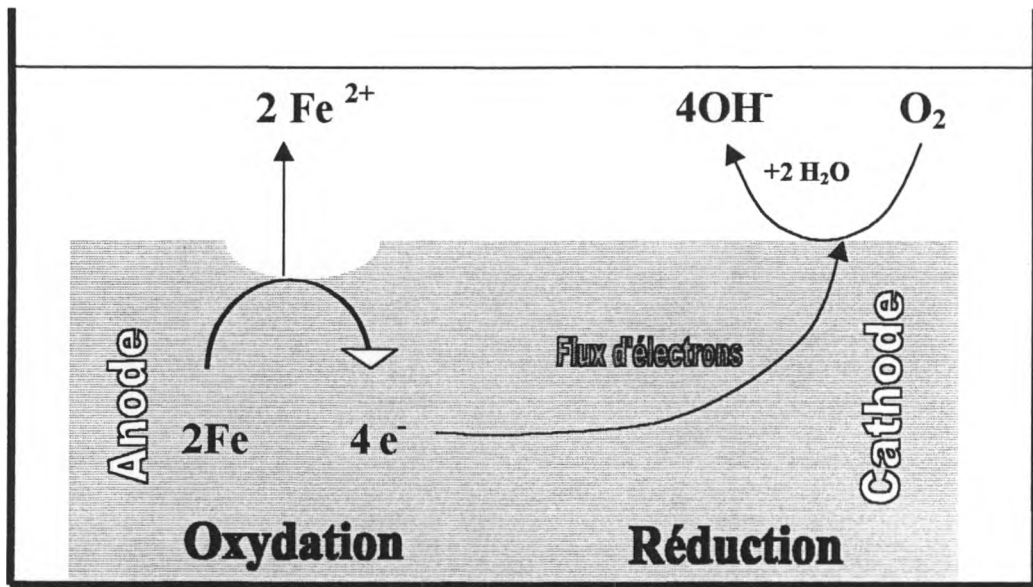


Figure 5 : réaction de corrosion en milieu alcalin.

En solution neutre ou faiblement basique, l'oxygène est réduit avec consommation d'oxygène. Le pH de la solution est au moins supérieur à 4.

3.2.2 Les différents types de corrosion

Pour décrire les types de corrosion, la classification selon Fontana [1975] répertorie huit formes : la corrosion généralisée, la corrosion localisée, la corrosion galvanique, la corrosion par flux ou par cavitation, la corrosion intergranulaire, la corrosion par désalliage, la corrosion de tension et la corrosion à haute température.

Remarquons d'emblée que certaines formes citées par Fontana traitent de la morphologie de la corrosion tandis que d'autres font référence au mécanisme d'attaque. Nous avons choisi de décrire les types de corrosion qui nous semblent les plus importants dans les applications aux bâtiments. Les autres types de corrosion (par cavitation, de désalliage, intergranulaire, de tension et à haute température) sont plus spécifiques à des utilisations industrielles et nécessitent des moyens d'investigation importants. En outre, nous trouvons dans la littérature, plusieurs

descriptions intéressantes de types de corrosion qui n'entrent pas entièrement dans les classes de Fontana. Souvent, elles se chevauchent. Dès lors, on parlera aussi de corrosion par aération différentielle, biologique et atmosphérique.

3.2.2.1 La corrosion généralisée ou uniforme.

Ce type de corrosion est caractérisé par une perte de métal répartie régulièrement à sa surface. Tous les métaux sont sujets à ce type d'attaques, cela dépend des conditions. C'est la corrosion la moins redoutée. En effet, puisqu'elle est répartie sur toute la surface du métal, il est possible de prévoir la durée de vie de la pièce [Talbot J. et Beranger G., 1995].

3.2.2.2 La corrosion localisée.

Cette corrosion est plus pernicieuse parce que les pertes de métal peuvent être sévères. En effet, elles sont très localisées et souvent en des endroits discrets. Les piqûres, voire les trous, apparaissent sur des surfaces non – homogènes [Dillon C.-P., 1982]. Des cellules de corrosion y sont installées par des différences métallurgiques ; il peut y avoir des impuretés dans le métal ou même, simplement une différence de structure du métal.

Cette corrosion peut aussi apparaître sous un dépôt. Cette corrosion sous dépôt, bien connue dans les tuyauteries, est un cas particulier d'aération différentielle [Dugniolle E., 1988].

Enfin, elle peut intervenir aux endroits où un film protecteur fait défaut.

3.2.2.3 La corrosion galvanique.

C'est la corrosion occasionnée par contact entre des conducteurs différents dans un même électrolyte. L'intensité de la corrosion dépend premièrement des potentiels standards des métaux mis en contact. Il faut se référer à une échelle de potentiels et prendre en compte la composition de l'électrolyte. Deuxièmement, il faut tenir compte de la surface relative entre anode et cathode et de la géométrie qui influence également le phénomène. Couramment, cette corrosion se rencontre dans le bâtiment quand, par exemple, on associe des éléments en cuivre et des éléments en acier galvanisé dans les tuyauteries. L'acier galvanisé sert d'anode et se corrode. Par exemple, observons un bouchon en acier galvanisé sur un tuyau de cuivre. Dans ce cas, une très grande cathode est en présence d'une petite anode ; la corrosion est très rapide [Dugniolle E., 1988].

3.2.2.4 La corrosion par aération différentielle.

Elle intervient dans de nombreux cas de corrosion et notamment des cas de corrosion localisée. Elle fut mise à jour par Evans qui a montré que si l'on plonge un métal dans un milieu dans lequel toutes les zones ne présentent pas la même teneur en oxygène, il apparaît un courant électrique entre la zone aérée et la zone moins aérée. Ce courant est généré par la dissolution du métal dans la partie la moins aérée qui est donc l'anode [Dugniolle E., 1988]. Ce type de problème peut apparaître sous plusieurs formes, à chaque fois que l'oxygène sera empêché de circuler librement. Premier exemple, le bateau qui stationne longtemps dans un port ; ce phénomène est connu des marins sous le nom de corrosion à la ligne d'eau [Hache, 1966]. Anciennement, certaines coques étaient littéralement coupées en deux pièces sur le sens de la longueur. En construction, ce phénomène n'est pas rare, mais on le rencontre plutôt dans les installations d'eau courante ou de chauffage central. C'est la corrosion sous dépôt. Elle apparaît dans les tuyauteries là où des dépôts peuvent se produire. Prenons un exemple : des ouvriers réparent une canalisation et une certaine quantité de terre est emmenée dans le circuit de distribution. Cette terre pénètre dans l'installation d'une habitation et une fraction se dépose à un endroit calme de la conduite. Là se crée une cellule de corrosion par aération différentielle.

3.2.2.5 La corrosion biologique

Les effets microbiologiques peuvent être ressentis : soit le métabolisme de la bactérie produit des composés corrodants, soit les bactéries peuvent se fixer ou produire un dépôt tel que l'on assiste à la création d'une cellule de corrosion par aération différentielle. Les bactéries sont le plus souvent responsables de détériorations localisées, mais cela dépend de leur espèce et de leur mode de vie ; c'est pourquoi une analyse biochimique est nécessaire [Hache, 1966].

3.2.2.6 La corrosion atmosphérique

Le climat, principalement la température, l'humidité et, de plus en plus, le taux de pollution, influencent le comportement des métaux. Ainsi, dans un climat très sec (inférieur à 30% d'humidité relative) et froid, comme au Pôle Nord, il n'y a pas de corrosion atmosphérique [Hache, 1966]. Par contre, dans une atmosphère urbaine chargée en gaz corrodants et mouillée de pluies acides par exemple, la corrosion peut prendre des proportions très importantes. On peut

aussi citer le climat maritime, humide et avec une importante quantité de chlorure dans l'air, qui est très défavorable aux aciers inoxydables.

L'apparition de phénomènes de corrosion est difficile à prévoir en raison de la multitude de microclimats plus ou moins favorables à la corrosion. Le mécanisme qui régit cette corrosion atmosphérique est le plus souvent une attaque électrochimique.

De plus, reproduire en laboratoire les conditions naturelles est tout à fait impossible. La variabilité des facteurs est tellement grande et ils sont tellement nombreux que les tests normalisés n'étudient la variabilité que de quelques facteurs et ne font qu'approcher la réalité. C'est pourquoi de nombreux tests sont mis en route pour de longues périodes dans des endroits différents, par exemple au Japon où plusieurs maisons situées en certains endroits du pays sont littéralement sous surveillance permanente [Kage I., Fujita S., 1998].

3.2.3 Morphologie de la corrosion

Les phénomènes de corrosion peuvent se manifester de quatre façons [Talbot J. et Beranger G., 1995]. Si elle se développe à la même vitesse en tous les points du métal, il s'agit de corrosion uniforme. C'est le cas de l'attaque du fer par l'eau avec formation de rouille.

Dans certains cas, l'attaque est localisée aux joints des grains du métal. On dit alors qu'il y a corrosion intergranulaire ou intercristalline. Ce type de corrosion est très dangereux, car il se produit en profondeur et, bien que la perte de métal soit faible, il conduit rapidement à une chute des qualités mécaniques du métal.

La corrosion dite par piqûres se localise en des points précis du métal. Elle peut résulter d'une discontinuité dans la couche protectrice.

Enfin, dans d'autres cas, la corrosion peut se manifester à l'intérieur des cristaux. Il s'agit alors de corrosion intragranulaire ou intracristalline. Ce phénomène de corrosion apparaît souvent sous des conditions de contraintes.

3.2.4 Facteurs qui influencent la corrosion

3.2.4.1 Les facteurs du milieu

La corrosion des métaux dépend des facteurs qui caractérisent le milieu corrodant, aussi appelé réactif, c'est-à-dire principalement la concentration, le pH et la température.

3.2.4.2 Les facteurs métalliques

Les facteurs métalliques sont évidemment essentiels à la compréhension de la corrosion. Evidemment, il est essentiel de connaître le métal ou la composition de l'alliage utilisé. Cependant, il y a encore trois caractéristiques qui doivent être connues : ce sont celles qui résultent des traitements mécaniques, thermiques et superficiels subis par les alliages.

a) Traitements mécaniques

Ces traitements consistent généralement en un écrouissage du métal. La réactivité de ce dernier est augmentée. C'est la raison pour laquelle, sur les pièces fabriquées par emboutissage, la corrosion se manifeste préférentiellement sur les zones les plus déformées. On peut libérer les tensions par un chauffage à faible température (250°C).

b) Traitements thermiques

Reprenons l'exemple, utilisé par Gellins [1985], de l'acier inoxydable 18-8 (soit 18 % de Cr et 8 % de Ni). Si celui-ci subit une hypertrempe depuis 1150 °C, il résiste très bien à l'acide sulfurique contenant des sulfates de cuivre. Par contre, s'il est refroidi lentement, il devient très sensible à la corrosion intergranulaire. Cela est dû au fait qu'un refroidissement lent provoque la précipitation de carbure de chrome (Cr_{23}C_6) aux joints des grains. Dès lors, il existe des zones appauvries en Cr sensibles au processus électrochimique de la corrosion intergranulaire.

c) Traitements de surface

L'état de surface peut être défini par des caractéristiques cristallographiques, chimiques, physico-chimiques ou microgéométriques ; les caractéristiques cristallographiques dépendent du type de structure, de la dimension des grains et du degré de perfection du réseau cristallin, cela en relation avec le mode de fabrication et les conditions d'emploi du métal ; les caractéristiques chimiques font intervenir essentiellement le degré de pureté du métal ; les caractéristiques physico-chimiques concernent la barrière entre le métal et le réactif : les films d'oxydes, de gaz adsorbés ou de composés organiques ; les caractéristiques microgéométriques déterminent en particulier la surface réelle soumise à l'action du milieu extérieur.

3.2.4.3 Synthèse des différents facteurs de corrosion

Tableau 7 : les facteurs de corrosion [Hache, 1966].

Facteurs du milieu	Facteurs métalliques
Concentration des réactifs	Composition du métal ou de l'alliage
Impuretés	Procédés d'élaboration
Teneur en oxygène	Impuretés
PH	Traitements thermiques
Température	Protections
Pression	
Particules solides	
Conditions d'emploi	Influence du temps
Etats de surface	Conditions d'entretien
Moyens de protection	Vieillessement
(peintures, inhibiteurs,...)	Modification des enduits de
Sollicitations mécaniques	protection (lumière, température,...)
Formes des pièces	
Types de connexion	
(soudures, rivets,...)	

3.2.5 Moyens de lutte

Synthétiquement, nous pouvons distinguer cinq techniques principales pour contrôler la corrosion. Nous pouvons d'ores et déjà affirmer que la protection totale est rarement atteinte. De plus, la prévention impliquera souvent un éventail de moyens depuis la définition d'une durée de vie limitée du matériau jusqu'aux techniques les plus sophistiquées permettant de diminuer sensiblement le taux de corrosion.

3.2.5.1 Modification du matériel de construction

La protection la plus évidente consiste à choisir un métal ou un alliage qui n'est pas ou peu attaqué par le milieu extérieur. Effectivement, l'addition d'un élément d'alliage améliore le plus souvent les caractéristiques mécaniques des trois grands métaux de base que sont le fer,

l'aluminium et le cuivre, ainsi que la résistance à la corrosion dans certains milieux. L'exemple bien connu des alliages de fer adjoint de chrome, de nickel et de molybdène à différentes teneurs constituent les diverses classes d'aciers inoxydables.

3.2.5.2 Utilisation de films protecteurs

L'utilisation d'aciers alliés constitue une solution onéreuse. Quand cela est possible, il vaut dès lors mieux protéger les pièces construites dans un acier ordinaire par un revêtement mince de métal ou d'alliage résistant au milieu corrosif. Généralement, on emploie des revêtements de zinc, d'étain, de nickel, de chrome, d'acier inoxydable ou encore de métal précieux.

Dans le même ordre d'idées, il existe des films protecteurs en résine ou encore des peintures dont le but, identique, est d'isoler la pièce du milieu corrodant.

3.2.5.3 Modification de l'environnement

La troisième solution est d'ajouter, au milieu en contact avec le métal, de faibles quantités d'un corps que l'on nomme inhibiteur de corrosion. Ceux-ci forment à la surface du métal un film continu et étanche qui l'isole du réactif corrodant. Ils peuvent être de natures très variées : composés minéraux comme les phosphates et les chromates, ou composés organiques comme les amines ou les alcools. Leur utilisation n'est pas toujours aisée, car ils doivent être présents en permanence et ne peuvent être lessivés. On les utilise principalement dans des réservoirs pétroliers ou des échangeurs de chaleur.

3.2.5.4 Protections électrochimiques

La quatrième classe de protection est basée sur une réaction à caractère électrochimique. Il s'agit d'imposer à la pièce de métal à protéger un potentiel qui lui permet de ne pas être attaqué par le milieu. C'est une solution très élégante. Son principe d'action réside dans

l'association de la structure à protéger avec un métal moins noble. Ce dernier joue le rôle de l'anode dans la pile ainsi formée. En utilisant des anodes de zinc ou de magnésium, qui sont détruites préférentiellement, on protège des hélices ou des coques de bateaux, ou encore des canalisations enterrées. Ces anodes sont appelées anodes sacrificielles.

Dans cette catégorie de protections électrochimiques, il existe également la protection cathodique [Pourbaix, 1975]. Son principe est de donner au métal, avec une source extérieure de courant, un potentiel suffisamment négatif pour que l'oxydation ne se produise pas. Il s'agit d'atteindre la zone d'immunité sur les diagrammes de Pourbaix. Cette solution nécessite une source de courant permanente.

3.2.5.5 Conception

Les techniques précédentes peuvent être efficacement améliorées en utilisant des principes de conception qui prennent en compte par exemple les flux dans les canalisations, les phénomènes de condensation, les tensions résiduelles dans les structures, etc. Le concepteur agit par le raisonnement dans le but de diminuer l'influence des facteurs favorisant la corrosion.

3.2.6 Méthodes d'analyse

Il existe plusieurs techniques qui permettent d'étudier la corrosion. Tout d'abord, l'examen visuel ou micrographique permet souvent de déceler le début du phénomène de corrosion, par exemple les premières piqûres, et également d'en déterminer sa morphologie.

Les méthodes pondérales ont pour objectif de déterminer la perte en poids d'un échantillon métallique plongé dans un milieu corrodant pendant un certain temps. Si la corrosion est uniforme, le résultat pourra être exprimé en perte d'épaisseur par an. Cette méthode est la plus évidente et ne pose pas de grande difficulté de mise en place. Elle peut d'ailleurs être utilisée en milieu naturel. Cependant, dans ce cas, le temps de séjour de l'échantillon est très long et dès lors se compte en années. Il est possible d'accélérer les essais, soit en les plaçant dans une chambre climatisée dans laquelle on reproduit le plus fidèlement possible les conditions d'exposition, soit en appliquant aux échantillons une alternance d'immersions et d'émersions dans le réactif. Les deux procédés reposent sur le même principe qui est d'accélérer le cycle humectation/séchage. Notons toutefois que, même si l'accélération peut être sensible, ces tests de corrosion nécessitent du temps.

La méthode des isotopes radioactifs permet de suivre l'évolution du phénomène corrosif. En effet, ils ont été introduits, soit dans le métal lors de son élaboration, ce qui permet de suivre leur élimination progressive, soit dans le milieu réactif pour mettre en évidence leur pénétration dans le métal.

Enfin, les méthodes électrochimiques permettent de mesurer le potentiel de corrosion d'un échantillon ou d'une phase considérée et le courant responsable de la corrosion. Il est ainsi possible, en vertu la loi de Faraday, d'obtenir par cette méthode la perte en poids en un temps donné. Ces techniques ne sont pas applicables dans tous les cas, mais elles sont très rapides et permettent, de façon simple, d'effectuer des tests comparatifs.

4. CORROSION PAR LE BOIS

La plupart des métaux, y compris ceux qui sont couramment utilisés comme fixations dans le bois, sont thermodynamiquement plus stables sous leurs formes oxydes, hydroxydes carbonates, chlorides, etc. Leur comportement naturel les pousse à retourner à leur état minéral initial. Or les clous, vis et agrafes ne peuvent remplir leurs fonctions que s'ils sont relativement sains. Le bois et le métal sont utilisés ensemble dans un grand nombre d'applications dans la construction, l'emballage et l'ameublement. C'est pourquoi il est très important de comprendre la corrosion et de prévenir autant que possible ce phénomène durant la vie de la connexion.

Le bois est reconnu comme étant corrosif par rapport à certains métaux, à des degrés divers suivant le métal que l'on utilise. Il y a donc potentiellement des difficultés dans un grand nombre de connexions entre des fixations métalliques sensibles et des bois qui sont humides ou pourraient le devenir. Le risque de corrosion peut aussi être accru si la période d'humidité est longue ou si l'on fait usage de certains produits retardants d'incendie ou préservants. Des précautions doivent donc être prises dans le choix des composants, de manière à assurer une durée de vie suffisante pour les assemblages.

Les désordres dus à la corrosion par le bois se manifesteront principalement à deux niveaux : premièrement, aux fixations, avec perte de fonctionnalité, et deuxièmement, en surface avec des dégradations esthétiques dues à des taches et des modifications de surfaces. Ce chapitre traitera du bois, des différentes corrosions, ainsi que des conditions dans lesquelles elles se produisent.

4.1 LE BOIS : MILIEU CORROSIF

Le bois est un milieu très délicat à observer en ce qui concerne la corrosion. En effet, c'est un milieu hétérogène où se mélangent intimement les constituants du bois, l'eau, l'air et parfois des organismes vivants. Nous aborderons les principaux composants qui influencent la corrosion.

4.1.1 L'humidité

Le contenu en humidité du bois à l'état naturel est variable. Cependant, tous les bois, avant d'être mis en œuvre, doivent subir un traitement de séchage de façon à homogénéiser les valeurs hydriques et à les harmoniser avec les conditions d'humidité dans lesquelles ils devront travailler. Puisque l'humidité du bois s'équilibre avec son milieu, il convient de sécher les pièces

de bois à des degrés correspondant à leur utilisation, charpentes, bardages, menuiseries intérieures, etc.

Tableau 8 : humidité d'emploi des bois [Benoit Y., 1997].

Utilisation des bois	Humidité d'emploi (en %)
Fermettes	17 – 22
Menuiseries extérieures	15 – 18
Charpentes traditionnelles (emploi ouvert)	15 – 18
Lamellé-collé	13 – 15
Charpentes traditionnelles (Combles habitables)	10 – 12
Menuiseries intérieures	10 – 12
Placages	4 – 6

La faible humidité nécessaire au placage illustre bien que le séchage doit dans certains cas être très intense. Alors que les fermettes ou fermes industrialisées nécessitent un séchage beaucoup moins important, ce qui permet d'accroître la rentabilité. Plus le taux d'humidité doit être bas, plus l'énergie à dépenser est importante. Jusqu'à un taux d'humidité de 14 %, le séchage naturel est toujours possible, mais il n'est pas appliqué partout parce qu'il est très long. Par contre, sous cette valeur limite, le séchage artificiel est obligatoire. Richner marque une différence entre le séchage naturel et artificiel : pour lui, le séchage artificiel présente plus de danger de développement de corrosion que le séchage naturel. Nous signalons ce fait sans l'avoir comparé par des affirmations d'autres auteurs. Les différentes techniques de séchage pourraient avoir une influence sur la répartition des éléments corrodants dans la pièce de bois. Le séchage artificiel (à haute température) crée, par la vaporisation rapide de l'eau en surface, une zone en périphérie de la pièce de bois dont le contenu en substances corrodantes est plus important. Le mouvement de l'eau les emmène avec lui depuis le cœur de la pièce à sécher.

L'humidité est le facteur déterminant de la corrosion. Selon M.J. Schofield [1985], on peut affirmer qu'il n'existe pratiquement aucun risque de corrosion à des taux d'humidité du bois inférieurs à 15-16 %. En observant dans le tableau les classes susceptibles de poser un problème, on peut remarquer qu'elles se situent toutes en conditions d'extérieur. Dès lors, leur mise en œuvre et leur conception permettront d'atténuer le risque. Nous devons savoir que des

réhumectations sont possibles sur le chantier et lors des différents traitements préservants avec des produits à base aqueuse.

En outre, il faut tenir compte des variations saisonnières d'humidité. Généralement, on estime que le niveau d'humidité subit une baisse de 1 à 2 % durant la saison chaude, environ d'avril à août, cela dépend des endroits. De plus, des variations d'humidité apparaissent également suivant la place qu'occupe la pièce de bois à l'intérieur de la maison ; par exemple, les bois des plafonds ont tendance à avoir une humidité plus importante que les planchers quand ceux-ci bénéficient de la chaleur dégagée par les pièces sous-jacentes [John V., Goodwin T.J. et Walker E.F., 1991]. Si ces variations ne sont pas de forte amplitude, il ne faut toutefois pas les négliger.

4.1.2 L'acide acétique

Du fait de sa composition, le bois est corrosif, mais l'intensité avec laquelle cette propriété se manifeste dépend des conditions extérieures. L'action corrosive du bois est causée notamment par sa teneur en acide acétique. Le fait que l'acide acétique est volatil permet de distinguer deux types de problèmes : la corrosion par contact direct avec le bois et la contamination par des vapeurs corrosives en espace fermé ou à proximité de surfaces de bois [Richner, 1996]. Nous traiterons de ces notions dans le chapitre « Types de corrosions en rapport avec le bois ».

4.1.2.1 Formation et corrosivité

L'acide acétique se forme en présence d'eau par hydrolyse des liaisons ester de la cellulose :

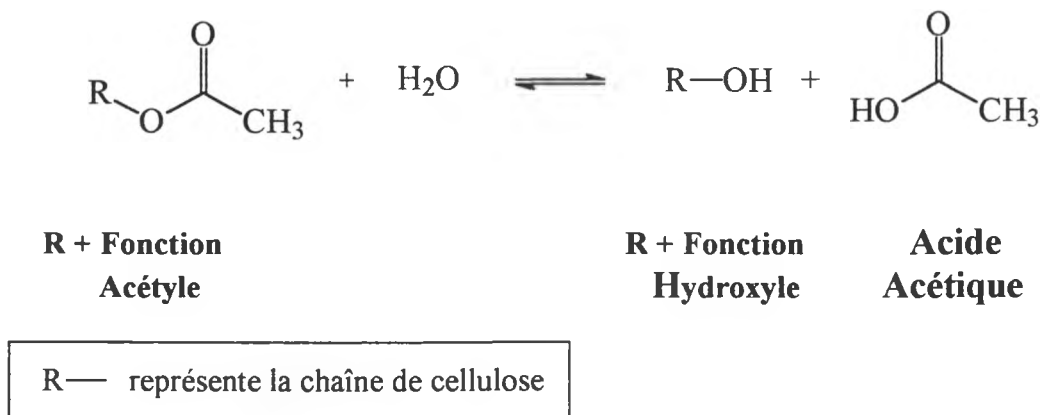


Figure 6 : réaction de formation de l'acide acétique à partir de cellulose et d'eau.

De la réaction ci-dessus, représentée en équilibre, découle une série de conséquences intervenant dans l'appréciation des risques de corrosion :

- le nombre de groupes acétylés dépend de la sorte de bois et définit quelle quantité totale d'acide acétique peut, en théorie, être formée.
- cette réaction se déroule en présence d'eau, cela signifie que plus le bois est humide, plus il y aura de l'acide acétique.
- de plus, puisque l'acide acétique est volatil, la réaction est déplacée dans le sens favorisant la formation de celui-ci, en vertu du principe de Le Chatelier.

4.1.2.2 Cinétique de production

La rapidité de la formation de l'acide acétique varie fortement en fonction de l'essence de bois, comme le montrent les exemples d'un essai de stockage en conditions humides, à une température de 48 °C sur une durée de deux ans.

Tableau 9 : modification de la teneur en acétate après deux ans de stockage humide [Richner, 1996].

Essences	Teneur en acétyle (en % du poids sec)		Quantité Emise (en % du poids sec)	Taux d'émission (en %)
	Au départ	Après 2 ans		
Chêne	2,59	0,13	2,46	95
Hêtre	3,21	1,40	1,81	56
Bouleau	3,64	1,67	1,97	54
Douglas	1,10	0,38	0,72	65

Bien que la teneur en acétate du bois de chêne soit sensiblement plus faible que celle du bois de hêtre, le taux d'émission du chêne est plus élevé, ce qui permet une libération plus importante d'acide. Dès lors, dans ces conditions, le chêne peut avoir un comportement plus agressif que le hêtre. C'est généralement ce qui est observé.

D'autre part, remarquons que, même à ces conditions extrêmes, certains bois ont à peine relâché la moitié de la quantité d'acétate théoriquement présente. Dans des conditions réelles, c'est-à-dire à des températures plus basses et avec un taux d'humidité inférieur, le processus de libération est nettement plus lent. Cependant, il faut rester vigilant, car sur la

durée de vie, assez longue, d'une pièce de bois, il est tout à fait possible de rencontrer des conditions telles qu'elle pourra émettre de plus grandes quantités d'acide.

La quantité d'acide libérée sera fonction de l'essence elle-même, mais aussi de l'humidité. En effet, nous avons vu que chaque essence a une composition originale, notamment en acétate. On sait que la quantité de groupements acétyles présents naturellement sur la cellulose dans les différentes essences est comprise entre 2 et 5 % suivant l'essence. Etant donné que l'eau est un réactif indispensable à la formation de l'acide acétique, la quantité d'acide que peut émettre une essence dépendra du milieu.

La connaissance du contenu acétylique et du taux d'émission donnés par le tableau précédent est importante pour appréhender l'action corrosive des différentes essences. Cependant, ces données sont longues à obtenir et ces mesures ne sont pas systématiques.

4.1.3 Les tannins

En analysant les constituants du bois, on peut observer une structure de base composée de cellulose, d'hémicellulose et de lignine. Ce n'est pas elle qui définit le caractère corrodant des essences. Par contre, les extraits, qui eux aussi sont présents dans le bois, ont une part importante dans la corrosion, nous avons déjà vu le cas de l'acide acétique, mais il n'est pas le seul extrait à avoir une action agressive.

L'action corrosive qu'ont les tannins sur le fer est reconnue ; en 1957 déjà, une étude illustre la variation de couleur des bois en immergeant des feuilles de bois dans des solutions de FeCl_3 . Pour l'auteur, les dégradations de la couleur initiale du bois dépendaient de l'espèce de celui-ci, de la concentration en FeCl_3 de la solution et, dans une certaine mesure, de la température à laquelle le test a été réalisé. La formation de « complexes tannin-fer » était considérée, à juste titre, comme responsable du noircissement des échantillons [Koljo B, 1957]. Toutefois, l'étude de l'influence des tannins sur la corrosion n'est pas bien documentée. Les raisons en sont multiples, mais c'est très certainement la très grande variabilité en qualité et en quantité des tannins suivant l'essence, l'individu ou même l'endroit où l'échantillon a été prélevé, qui empêche d'obtenir des résultats exploitables. Il est dès lors délicat d'aborder la question plus en détail. Certaines essences sont cependant réputées pour leur action corrodante. Ainsi, le chêne et le châtaignier notamment contiennent une assez forte proportion de tannins. Lorsqu'ils sont abondamment humidifiés, l'eau draine ces tannins vers la surface. C'est le contact de cette solution tannique et acide avec des éléments ferreux qui provoque l'apparition de taches noirâtres sur le bois ou sur les matériaux sous-jacents. Ces taches sont composées de tannates de fer précipités [Benoit Y., 1997].

Nous avons relevé dans la littérature une liste de quelques essences présentant des risques de corrosion et de taches. Certaines essences, comme le douglas, ne produisent pas de taches de tannate de fer. Cependant, les coulures émanant des différents sites de corrosion d'éléments ferreux sont présentes puisque les oxydes de fer précipitent. Ce n'est plus vraiment dans ce cas un problème propre à l'essence, mais à la fixation.

Tableau 10 : risques de corrosion observés pour différentes essences, d'après « Pratique du bois : 35 essences et leurs fiches techniques ».

Essences	Caractéristiques
Afrormosia	Corrosion métaux
Afzelia	Corrosion métaux ferreux
Châtaigner	Corrosion métaux, coloration bleu-noire
Chêne (Européen et américain)	Corrosion métaux (Tannin+aération différentielle)
Merbau	Taches
Merisier	Taches grises à noires
Noyer	Taches
Douglas	Corrosion métaux ferreux
Robinier	Corrosion métaux ferreux, taches
Sapelli	Taches
Sipo	Taches
Western Red Cedar	Corrosion des métaux, taches
Acajou d'Amérique	Taches avec fer ou cuivre

4.1.4 Les organismes vivants

Les champignons ont pour effet de mobiliser plus d'extraits. Ils se nourrissent de la cellulose et acidifient leur milieu de vie [Leclercq A. et Seutin E., 1989]. Il se peut qu'ils accélèrent la corrosion de telle sorte que la combinaison de l'attaque du champignon avec la corrosion soit très dommageable. Souvent elles existent ensemble, mais on ne peut distinguer

leurs dégâts respectifs. Ce que l'on constate, c'est que ces dégradations se complètent. Les micro-organismes en mobilisant plus d'extraits et en déstructurant le bois, favorisent la corrosion en ouvrant des voies d'eau notamment.

4.2 L'ACIDITE

4.2.1 Notes sur le pH

Le contenu en acétyle auquel nous avons fait référence au chapitre relatif à l'acide acétique n'est pas le seul à influencer l'acidité d'un bois, c'est pourquoi on mesure toujours le pH des essences. En effet, l'acidité est un élément important pour une bonne compréhension des phénomènes de corrosion par le bois. Le pH d'un extrait de bois en solution aqueuse n'est qu'un indicateur, il ne permet pas, à lui seul, de classer les essences selon leur corrosivité [Savard J., André A.-M., et Caumartin L., 1963]. Cet avis est confirmé par Dugniolle : « si la mesure du pH rend bien compte d'une production acide, elle ne renseigne que très imparfaitement sur le pouvoir corrosif de cette dernière vis-à-vis des métaux » [1989]. Prenons l'exemple des solutions sulfuriques : elles ont un pH bas mais n'ont presque pas d'effet sur le plomb. Un autre exemple est celui de l'eau de pluie, peu minéralisée et donc peu tamponnée : une faible quantité d'acide peut en faire chuter fortement le pH sans augmenter sensiblement sa corrosivité. La nature des acides produits est également indispensable pour analyser les résultats. Cependant, nous ne disposons pas de cette donnée.

4.1.2.1 Mesure du pH

La mesure du pH en elle-même est importante, car suivant la technique adoptée, les résultats seront sensiblement différents. En général, suivant la norme, la mesure du pH se pratique sur des extraits de bois, c'est-à-dire, dans ce cas, sur une solution produite par la macération pendant plusieurs heures d'une certaine quantité de bois dans de l'eau déminéralisée. Il existe aussi des techniques de mesure par électrodes de surface [Sandermann W. et Rothkamm M., 1959] ou par extraction rapide à la vapeur [Kubinsky E. et Ifju G., 1973].

4.1.2.2 Valeurs de pH typiques

Les valeurs mentionnées ci-après sont typiques des bois stockés dans des conditions moyennes de température et d'humidité. Dans des conditions de température et d'humidité plus élevées, ces valeurs peuvent baisser de plus d'une unité. Les valeurs de pH ne sont qu'indicatives ; elles permettent toutefois d'établir une certaine hiérarchie entre les essences.

Tableau 11 : Valeurs de pH d'extraits aqueux et leur influence sur la corrosion de l'acier brut sans contact avec le bois [Richner, 1996]. Valeurs du mélèze et du robinier [Sanderman, 1959].

	Valeur de pH typique	Influence sur la corrosion
Chêne	3,35 – 3,9	Grande
Châtaigner	3,4 – 3,65	Grande
Bouleau	3,85 – 4,2	Moyenne
Hêtre	4,85 – 5,35	Moyenne
Douglas	3,45 – 4,2	Moyenne
Okoumé	4,2 – 5,2	Moyenne
Teck	4,65 – 5,45	Moyenne
Western red cedar	3,45	Moyenne
Pin	5,2 – 8,8	Faible
Epicéa	4,0 – 4,45	Faible
Orme	6,45 – 7,15	Faible
Mahogani	5,1 – 6,65	Faible
Noyer	4,4 – 5,2	Faible
Iroko	5,4 – 7,25	Faible
Ramin	5,25 – 5,35	Faible
Abachi	4,75 – 6,75	Faible
Mélèze	4,3	-
Robinier	5,3	-

Cette acidité donne une valeur de référence, mais l'influence mentionnée est autant basée sur l'expérience que l'auteur a de ces essences que sur les valeurs de pH. Dès lors, les trois classes retenues, en raison de leur large amplitude de pH, paraissent plausibles pour caractériser les essences.

4.1.2.3 Commentaires

De toute façon, ces valeurs de pH ne rendent compte que d'une certaine réalité puisqu'elles ne tiennent pas compte de l'évolution dans le temps de la production d'acide, qui n'est pas constante sur la durée d'utilisation du bois. En effet, la deuxième partie de l'étude à propos des membranes bitumineuses, effectuée par le CSTC [De Cuyper K., Dugniolle E. et Lefevre A., 1990], démontre la variation au cours du temps du pH de plusieurs matériaux de toiture. Les mesures sont effectuées après un traitement de vieillissement en climatiseur et en recueillant les solutions qui ont percolé sur ces revêtements. Malheureusement, cette étude ne s'étend pas au bois, mais si on constate des variations pour l'ardoise, les tuiles ou encore les membranes bitumineuses, il n'y a pas de raison de croire que le bois aura un taux d'émission constant. D'autre part, des chercheurs allemands ont déjà montré, en 1959, par un test sur des copeaux que le pH des bois augmentait de près d'une demi unité avec l'humidité du bois. Les résultats observés sont que l'épicéa passe d'un pH de 4,5 pour un contenu en eau de 5 % à un pH de 5,2 pour 20 % d'humidité ; pour une même variation d'humidité, le frêne passe d'un pH de 5,2 à un de 5,8 [Sandermann W. et Rothkamm M., 1959]. Ceci montre également une variabilité du pH en exploitation.

Une autre étude concernant cette fois des accessoires en cuivre en aval de couvertures en western red cedar montre que l'action corrosive des extraits du bois diminue avec le temps [Dôme B, 1993]. Ceci n'est pas directement en rapport avec la mesure du pH.

Donc, en conclusion, le pH ne fournit pas une corrélation correcte avec la corrosivité des essences. Cependant, la mesure du pH et sa variation ne prouvent qu'une chose : il y a de l'acide produit et cette production est variable dans le temps. Dès lors, il faudra au moins tenir compte d'un certain « débit d'acide » pour concevoir les dangers de corrosion et, pour approcher plus spécifiquement la corrosivité, employer un autre indice, par exemple la capacité acide. Le pH serait un indicateur quantitatif tandis que la capacité acide servirait pour une estimation quantitative.

4.2.2 La capacité acide

Lors de la première étude sur les membranes bitumineuses, plusieurs indices de corrosivité ont été testés, mais seule la capacité acide fournissait une corrélation acceptable avec la corrosivité [Dugniolle E., 1989].

4.2.2.1 Définition

La capacité acide est le nombre d'ions hydroxyles nécessaires à la neutralisation de l'acidité. Il s'agit en fait de réaliser un comptage des fonctions acides par un titrage potentiométrique à l'aide d'une solution de soude caustique (0.01 N dans le cas des membranes). Cela fournit une appréciation supplémentaire à celle du pH qui n'est en réalité que l'analyse des fonctions acides hydrolysées, donc si l'acide organique qui est en solution n'est que faiblement dissocié, le pH sera haut.

4.2.2.2 Comparaison de valeurs de capacités acides

La capacité acide est exprimée en milli-équivalents. Dans le cas de toitures ou d'autres surfaces dont on veut calculer la production d'acide, la capacité acide est exprimée en $\text{m}\ddot{\text{e}}\text{q}.\text{m}^2$ de surface productrice. Cela permet une comparaison en tenant compte des surfaces productrices. Voici un tableau synthétique des valeurs de capacité acide des membranes bitumineuses [Dugniolle E., 1989] et du western red cedar [Dôme B, 1993].

Tableau 12 : comparaison de valeurs de capacités acides pour différents types de couverture

Type	pH	Capacité acide (en $\text{m}\ddot{\text{e}}\text{q}.\text{m}^2$ de surface productrice)
Membrane bitume oxydé pailletée (typeV4a)	7,57	3,11
Membrane bitume oxydé pailletée (type RL4)	3,09	81,09
Membrane bitume-polymère non pailletée	3,79	46,04
Membrane synthétique PVC	4,05	15,06
Western red cedar	3,45	10 – 15

Nous pouvons comparer les valeurs et nous constatons que le western red cedar a des performances tout à fait similaires aux membranes les moins acidifiantes, supérieures à celles en bitume oxydé pailleté (type V4a) dont le niveau est minimal, mais très inférieures à la membrane considérée comme la plus corrodante, en bitume oxydé, mais non pailletée (type RL4). La capacité acide du western red cedar est la seule dont nous disposons actuellement. Cependant, il

est possible d'extrapoler en considérant par exemple le douglas qui peut, lui aussi, être utilisé en couverture.

L'étude renseigne la corrosivité des condensats issus des membranes pour le cuivre, le zinc et le plomb. Des variations existent en fonction des différents métaux qui ne réagissent pas de la même façon aux acides ; nous l'avons déjà mentionné. Cette valeur de capacité acide est corrélée aux valeurs de corrosivité.

4.2.2.3 Débit acide

Pour terminer ce paragraphe sur l'acidité, nous signalons encore que des bois exposés à des intempéries auront une action corrosive variable dans le temps. Le western red cedar a subi un test qui montre que l'action corrosive diminue avec le temps [Dôme B., 1993]. Cela impose aux concepteurs de tenir compte d'un débit acide.

4.3 TYPES DE CORROSIONS EN RAPPORT AVEC LE BOIS

Selon Richner [1996], dans le cas de la corrosion par le bois, il est nécessaire de distinguer deux grands types de mécanismes : la corrosion en phase gazeuse, en milieu fermé ou à proximité de constructions en bois, ainsi que la corrosion par contact direct, et dans ce cas, il faut encore faire la distinction entre les comportements des bois traités et de ceux qui ne le sont pas.

4.3.1 Corrosion en phase gazeuse

Cette corrosion a eu une importance économique énorme, surtout au moment de la seconde guerre mondiale pendant laquelle des machines, des câbles, des armes, etc., ayant une grande valeur militaire et financière furent endommagés parce qu'ils avaient été emballés dans des caisses de bois frais [Narayanamurti D., 1957]. Ces caisses étaient principalement constituées de chêne, de châtaignier, de western red cedar et de douglas. Ce fut une des premières expériences démontrant la corrosivité en phase gazeuse de certaines essences. L'auteur ajoute que le laiton, le cuivre et le zinc se sont bien comportés alors que le plomb, l'étain et l'aluminium ont subi plus de dommages. Cette information n'a qu'une importance très

relative, en effet, on ne dit rien sur la fabrication ni sur l'état de conditionnement des différents métaux. Dès lors, ce classement des métaux est contestable. Le problème est encore d'actualité, puisque des étudiants de UMIST Manchester, en 1998, ont travaillé pour résoudre des cas de corrosion de pièces métalliques dans des caisses en bois [Communication personnelle, Lyon S.B., 1999].

La corrosion à l'intérieur d'un volume d'air dans un environnement avec du bois répond aux mêmes règles que la corrosion atmosphérique. Pour en arriver à la corrosion, un taux minimal d'humidité de l'air est nécessaire. A ce moment, à la surface des métaux, se forme un mince film aqueux dans lequel les réactions électrochimiques peuvent avoir lieu. Il y a une interaction positive de l'humidité relative de l'air et de sa concentration en acide acétique. De plus, l'humidité atmosphérique minimale nécessaire à la réaction dépend de la concentration de l'air en acide acétique.

Les tests réalisés par Berglund et Wallin sur les aciers bruts peuvent nous servir d'exemple [Berglund F. et Wallin T., 1978] :

Tableau 13 : résultats d'un test de dégradation par corrosion en phase gazeuse sur de l'acier brut.

Humidité relative de l'air (en %)	Concentration en acide acétique dans l'air (en %)	Dégradation (en $\mu\text{m}/\text{an}$)
85	1	>100
<75	0,01	négligeable
100	0,01	250

En outre, puisque l'humidité du bois s'équilibre avec celle de son environnement, une humidité relative de l'air de 75% dans un espace fermé renfermant beaucoup de bois peut aisément être produite par ce bois lui-même dès que son taux d'humidité égale ou dépasse 16%.

Cet effet se fait donc surtout sentir dans le cas où des matériaux sensibles à la corrosion sont en contact avec de grandes quantités de bois. Ce qui se produit évidemment quand les pièces métalliques sont emballées dans du bois ou dans des halles de stockage contenant du bois par exemple. On peut également se demander dans quelle mesure les maisons à ossature métallique ne rencontreront pas ce problème. Puisque l'ossature métallique de ces maisons sont recouvertes de panneaux à base de bois, il y aura forcément des volumes mal ventilés, d'où un risque

d'humidité et de concentration élevée en éléments volatils du bois. Ces conditions sont propices au développement de la corrosion. Il faudrait poursuivre la réflexion.

4.3.2 Corrosion par contact direct

Ce mécanisme de corrosion cause surtout des dommages aux fixations telles que clous, vis, agrafes, plaques et connecteurs. Le phénomène se manifeste par des taches autour des fixations et, dans les cas les plus graves, celles-ci sont tellement dégradées qu'elles ne sont plus fonctionnelles.

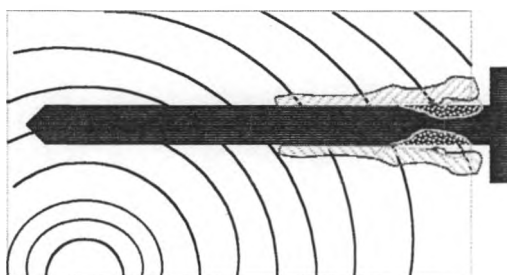


Figure 7 : schématisation des zones atteintes par le phénomène de corrosion. Exemple d'un simple clou fiché dans une pièce de bois. (La zone hachurée représente approximativement l'emplacement où peuvent prendre place les déprédations du bois. La zone pointillée représente la destruction du clou par la corrosion.)

4.3.2.1 Le cas des bois non traités

Les attaques de corrosion dans les bois non traités sont typiquement causées par les acides organiques ou par aération différentielle [Schofield, 1985]. Nous l'avons vu, l'acide organique responsable de la corrosion est l'acide acétique. Par exemple, un bois comme le chêne est plus corrosif envers la plupart des métaux que le ramin, ce dernier ayant un contenu en acide acétique inférieur à celui du chêne.

Sur une surface métallique enfoncée dans une pièce de bois, une cellule de corrosion se crée par aération différentielle quand l'oxygène n'a pas un accès uniforme à cette surface. Nous pouvons observer, par exemple, que la pointe d'un clou enfoncée dans un bois humide rencontre moins d'oxygène. Ainsi, la pointe devient l'anode et la tête la cathode. Cette théorie a été vérifiée par Pinion [1970] qui a montré à l'aide de phénolphthaléine, indicateur coloré, que la zone qui entoure la tête du clou attaqué devient alcaline. Les dommages se remarquent à l'interface entre l'air libre et le bois. Comme le montre la figure précédente, la rupture aura lieu quelques millimètres sous la surface du bois. Ces observations nous enseignent qu'il existe, pour

tous les bois, un taux critique d'humidité sous lequel la corrosion par aération différentielle ne peut pas se produire.

Le facteur décisif pour l'apparition de la corrosion par contact direct entre le bois et le métal, que ce soit par acide organique ou par aération différentielle, est l'humidité du bois. Si elle est inférieure à 15-18%, il n'y aura normalement aucune corrosion, car il n'y a pas assez d'eau dans le bois pour former une solution électrolytique. Un bois normalement séché ne dépasse pas ces valeurs qui persisteront, à une température ambiante, en équilibre avec une humidité relative de l'air de 75 – 80 %. Au cas où l'humidité de l'air dépasserait ces valeurs un court moment, cela n'aurait aucune influence puisque seules les surfaces seraient concernées.

4.3.2.2 Le cas des bois traités

En raison de la haute combustibilité du bois et de son manque de résistance aux insectes et aux champignons, on ne peut refuser l'utilisation de moyens de protection, à base hydrique ou organique, contenant différents sels. Les caractéristiques de bases de la corrosion seront identiques à celles rencontrées dans le cas de bois non traités, mais les produits préservants vont avoir une influence puisqu'ils feront partie du milieu réactionnel.

a) Les préservants organiques

Généralement, nous admettons que les préservants organiques, comme la créosote ou le pentachlorophénol n'ont pratiquement aucune influence sur le comportement de la corrosion, étant donné qu'ils ne contribuent pas à augmenter la conductivité du bois ; la créosote présente même un certain pouvoir inhibiteur [Hennigson B. et Jermer J., 1982]. Ces produits sont actuellement tous deux interdits en Europe. Cependant, ils ont été largement utilisés et il n'est pas rare de se trouver face à des réalisations qui ont subi un traitement avec ces produits.

Les produits organiques de substitution sont du type IPBC (iodo propynyl carbamate) et TBTO (tributyl tinoxide) et n'augmentent pas non plus la conductivité du bois [Smulski S.,1996].

b) Les préservants inorganiques

Pour réduire la toxicité inhérente à l'utilisation de solvants organiques, l'utilisation de produits de préservation en solution aqueuse s'est accentuée. Ainsi, la plupart des produits en bois ou à base de bois destinés à des atmosphères humides et vendus sur le marché sont protégés grâce à l'un des préservants inorganiques. Il est classé sous forme d'un code alphabétique ressemblant à une soupe de lettres peu praticable pour les néophytes. Il y a, entre autres, les

CCA : chromated copper arsenate

ACA : ammoniacal copper arsenate

CZC : chromated zinc chloride

ACZA : ammoniacal copper zinc arsenate

CFK : Chrom, Kupfer, Fluor

Du fait de leur chimie assez similaire, ces produits partagent un certain nombre de propriétés communes. Ainsi, le composant chrome permet de fixer les produits dans le bois. Ils sont donc non lessivables ; le zinc et le cuivre combattent les champignons tandis que l'arsenic repousse les termites et les champignons résistants au cuivre ; le fluor est plutôt un insecticide. La partie ammoniacale de la formulation de ACA et ACZA est utile pour favoriser la pénétration des éléments zinc, cuivre et arsenic dans les bois difficilement imprégnables comme le douglas.

Les produits de préservation en phase aqueuse sont responsables d'une réelle menace de corrosion. Cela est dû principalement à la présence des sels qui améliorent la conductivité du bois. Les sels de cuivre, les CFK par exemple, peuvent aggraver la corrosion [Richner, 1996]. En effet, les ions de cuivre en solution peuvent se déplacer vers les matériaux métalliques moins nobles (acier, Zn) et précipiter en Cu métallique. En échange, le matériau de base se corrode. Il y a des problèmes de corrosion tout spécialement avec des matériaux comme l'acier, le zinc et l'aluminium. En outre, Morgan a réalisé une étude en 1983 à travers tout le Royaume-Uni. Il y étudie une série de toits réalisés avec des fermes traitées et non traitées aux sels de CCA. Son rapport montre clairement que la corrosion des clous est plus avancée dans les constructions traitées. Cependant, il est à remarquer que dans les deux cas, la corrosion n'est pas critique et n'affecte pas les qualités de structure des éléments.

A des taux d'humidité inférieurs à 18 %, les sels n'accroissent pas la corrosion puisqu'elle n'a quasiment pas lieu [Schofield, 1985].

c) Les produits d'ignifugation

Dans les cas où le matériau a subi un traitement retardant contre le feu, le taux de corrosion des métaux non alliés (non traités) peut être multiplié par deux ou par trois [Richner,1996]. En effet, les sels d'ignifugation sont principalement des sels inorganiques comme les phosphates, sulfates et surtout borates. Des fixations en acier doux ne sont évidemment pas recommandées dans des bois ignifugés. Pour ces utilisations, il est recommandé d'utiliser uniquement des fixations en laiton ou en acier inoxydable.

En réalité, il est à remarquer que les préservations contre le feu sont apposées normalement à l'intérieur, c'est-à-dire, la plupart du temps, en conditions sèches. Le mécanisme de corrosion en phase gazeuse n'est pas influencé par le protecteur, sauf dans certains cas, lors de l'utilisation de produits fluorés acides qui, rapidement après l'application, peuvent former de l'acide fluorhydrique. Notons pour terminer que certains nouveaux produits d'ignifugation contiennent des inhibiteurs de corrosion.

4.3.2.3 Conclusions

En conclusion, il est reconnu que les sels n'accentuent pas la corrosion à un taux d'humidité inférieur à 18 % (certains auteurs citent 15 %) puisqu'elle n'existe quasiment pas. Des difficultés importantes peuvent être rencontrées à des taux d'humidité supérieurs à 22%. Il n'y a pas encore de preuves formelles concernant la corrosion des fixations métalliques dans des bois d'humidité moyenne en usage courant (soit 15 à 22 %) [Shofield, 1985]

4.3.3 Cas de la corrosion aux interfaces.

Ce paragraphe consiste en l'étude d'un cas particulier de corrosion par le bois. En effet, une des dégradations les plus dangereuses et surnoises causées par la corrosion est celle qui apparaît à l'interface de deux pièces de bois ou d'autres produits en bois.

4.3.3.1 Cas des bois de même essence

Certaines détériorations d'objets en bois répertoriées dans les bâtiments, telles que l'affaissement de balcons, de rambardes de sécurité, etc., sont souvent attribuées uniquement à la pourriture du bois. Dès lors, il n'y a pas lieu de s'inquiéter de la solidité de l'assemblage tant que

les pièces de bois paraissent saines. Toutefois, dans certains cas, la corrosion des fixations qui relient deux pièces de bois ensemble, plus que la détérioration des bois eux-mêmes, est la cause de l'effondrement. Le corps du clou devient, à l'interface, de plus en plus fin jusqu'à la rupture en charge [Hans Kubler, 1982]. L'humidité est ici aussi l'élément déterminant de la corrosion et à 18%, le risque de corrosion est réel. L'oxygène de l'air est également important, or l'interstice entre les deux pièces de bois est propice au passage assez libre de l'eau de pluie et l'air. On peut penser que le film d'eau à l'interface ainsi que l'eau des cavités cellulaires ont des concentrations en oxygène dissout différentes. Cela crée des conditions très favorables à la corrosion par aération différentielle.

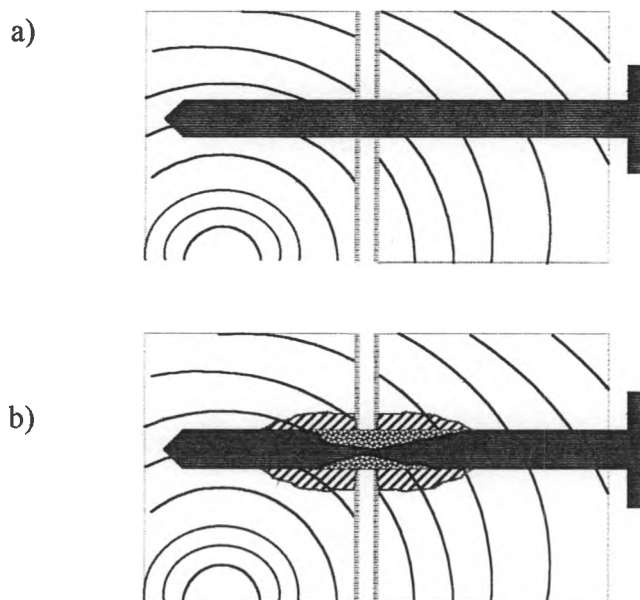


Figure 8 : schématisation des dégradations qui peuvent apparaître sur une fixation à l'interface entre deux pièces de bois. a) schéma du système sain ; b) schéma du système dégradé (la zone hachurée représente les dégradations qui apparaissent sur le bois et la zone pointillée représente la destruction du clou par la corrosion).

4.3.3.2 Cas d'interfaces entre essences différentes

Ici, le processus est semblable au premier cas, mais il est accentué par les propriétés différentes des essences. Schofield [1985] constate que certaines structures composées de différentes essences de bois, en atmosphère humide, souffrent de problèmes de corrosion. Ainsi, des panneaux de bois, dont la nature n'est pas précisée, sont fixés, sur une structure en chêne, par

des clous en acier galvanisé. Très vite, les fixations présentent des symptômes caractéristiques de corrosion. Cela ne serait pas arrivé si, sur cette structure en chêne, le concepteur y avait appliqué des planches en chêne. En effet, dans ce cas, l'environnement en oxygène aurait été uniformément bas en raison de l'imperméabilité du chêne.

Dans le cas d'une construction mixte hêtre sur chêne, la cellule de corrosion aura sa partie cathodique dans la partie en hêtre, où le processus génère des hydroxyles, alors que l'anode se trouvera dans la partie en chêne de sorte que des ions métalliques ferreux y seront introduits.

Des conditions tout aussi favorables à la corrosion aux interfaces sont réunies quand on associe deux pièces de bois ayant un contenu en acide très différent. C'est aux mêmes endroits et suivant un processus semblable que se poseront les problèmes. Si on ajoute à la destruction de la fixation la détérioration du bois causée par les produits de corrosion, on se rend vite compte du danger causé par ces vices cachés.

4.3.3.3 Conclusions

Dans tous les cas, le mieux est d'éviter que l'eau ne pénètre dans le joint, puisque c'est elle qui sert d'électrolyte. On peut aussi utiliser des clous peu sensibles à la corrosion et des bois durables.

Il faut toutefois noter que les dépenses pour des bois traités sous pression et des fixations résistantes à la corrosion dans la conception de balcons, rambardes, etc., sont d'autant plus justifiées qu'il existe des risques, que la surveillance et l'entretien sont délicats ou que le degré de sécurité ne peut souffrir d'aucune faille.

4.4 STABILITE DES DIFFERENTS MATERIAUX METALLIQUES

4.4.1 Vitesse de dégradation des principaux métaux

Dans ce qui suit, nous traiterons rapidement du comportement chimique, lors d'une corrosion, des métaux les plus importants intervenant dans la construction avec bois et, à ce propos, surtout de l'acier galvanisé.

Premièrement, nous pouvons observer le résultat d'un test, réalisé par Ormstad, de dégradation de différents métaux lors d'un stockage à l'air libre avec et sans contact d'épicéa

humide. Les éprouvettes ont une disposition sandwich, c'est-à-dire qu'il y a une superposition alternée de planches de bois et de feuilles de métal.

Tableau 14 : évaluation de la dégradation de différents métaux (en $\mu\text{m}/\text{an}$), en conditions atmosphériques, avec et sans contacts avec de l'épicéa humide [Ormstad, 1973].

	En contact avec le bois	Sans contact
	(Perte en $\mu\text{m}/\text{an}$)	
Acier brut	11	37
Acier galvanisé à chaud	3,3	2,6
Cuivre	0,9	1,2
Laiton	1	-
Aluminium	0,3	0,6
Plomb	2	1,9

Grâce aux chiffres de ce tableau, il nous est possible d'établir un classement des métaux suivant leur vitesse relative de corrosion. Nous choisirons l'aluminium comme représentant l'unité, puisque c'est lui qui présente la plus faible perte en poids (voir Tableau 14).

Généralement, les vitesses de corrosion des métaux non – ferreux sont comparables, qu'il y ait ou non contact avec le bois. Par contre, l'acier présente des taux de corrosion très différents. La corrosion en contact direct avec le bois est moins prononcée que celle en phase gazeuse. On ne peut toutefois pas comparer ces taux directement car ils sont le résultat de deux méthodes expérimentales différentes. Néanmoins, pour chacun des deux types de corrosion, l'acier est beaucoup plus sensible que les autres métaux. Il ne doit donc jamais être utilisé sans protection. Le zinc montre un taux de corrosion plus élevé dans le cas avec contact direct. Il est possible que le contact empêche le zinc de réaliser son autoprotection.

Tableau 15 : vitesse relative de dégradation de différents métaux. Les données de bases sont celles du tableau précédant. L'aluminium représente l'unité.

	Acier brut	Zn (Acier galvanisé)	Pb	Cu (laiton)	Al
En contact avec le bois	35	9	4	3	1
Sans contact	61	4.3	3	2	1

Les aciers inoxydables n'ont pas été traités dans cette étude. En général, ils sont très stables par rapport à la corrosion. Cependant, il faut prévenir tout contact avec des chlorures, en atmosphère marine ou littorale par exemple. La couche inerte risque d'être attaquée localement par les chlorures. Ce phénomène est accentué quand l'acier subit une tension mécanique, car alors vient s'ajouter le problème de la corrosion sous tension. Il faudrait étudier plus en profondeur la stabilité des aciers inoxydables et choisir celui qui convient aux conditions d'exploitation.

4.4.2 Acier galvanisé :

Des éléments en acier galvanisé ont fréquemment été utilisés dans la construction en bois et se sont généralement bien comportés. Cependant, il n'existe pas de protections anti-corrosives durables dans le cas de contact avec du bois ou d'autres matériaux constamment humides.

4.4.2.1 Dans des cas de condensation

S'il faut s'attendre à de la condensation, une aération permanente, donc une arrivée continue de dioxyde de carbone, doit être garantie pour permettre la formation de la couche protectrice de carbonate. Il est intéressant de constater que les galvanisations en piscines couvertes se sont bien comportées lorsqu'il ne s'agissait pas de pièces exposées à une condensation permanente ou du moins fréquente. En effet, dans des bâtiments soumis à des climats à tendance très agressive, on a mesuré des dégradations inférieures à 10 μm par an [Richner, 1996]. Nous avons vu, dans le chapitre concernant les aciers galvanisés, les différentes méthodes de galvanisation. Nous pouvons dresser un inventaire de quelques méthodes utilisées en relation avec le bois.

4.4.2.2 Comparaison de différentes méthodes de galvanisation

En règle générale, on obtient de meilleurs résultats contre la corrosion par une galvanisation à haute température dans un bain de zinc. De cette manière, on arrive à poser une couche compacte, en plusieurs épaisseurs, de plus de 100 μm . Cependant, la prudence est de rigueur dans le cas de pièces de construction massives qui peuvent se déformer dans le bain de zinc. En tout cas, il faut respecter scrupuleusement les règles du processus.

Pour un zingage au pistolet, les exigences quant à l'état des surfaces à zinguer sont plus sévères : un décapage de l'acier jusqu'à un degré de pureté très élevé est conseillé, sinon il faut s'attendre à une adhérence insuffisante. A l'inverse du résultat obtenu par un zingage à haute température, la surface est poreuse et rugueuse [Hache, 1966].

4.4.2.3 Le développement de l'acier galvanisé

Depuis peu, au lieu de zinc pur, on peut aussi utiliser un mélange de zinc et d'aluminium. Le Galfan est un mélange titrant 5 % d'aluminium et le Galvalum en contient jusqu'à 55%. Avec ces nouveaux procédés, la résistance à la corrosion atmosphérique est améliorée par rapport à une galvanisation pure. Ainsi, des couches de 7 à 20 μm sont suffisantes pour un résultat au moins identique [Richner, 1996]. C'est très important, car les limites de l'usage de l'acier zingué sont clairement définies sur base du mécanisme de la constitution des couches de couverture. Une réduction de l'épaisseur des couches permet une augmentation des possibilités de modelage par la diminution du danger de fissures superficielles. Ces dernières sont occasionnées dans la couche de zinc lors des pliages ; plus la couche est épaisse et plus elle est sensible à la fissuration.

Si une agression plus corrodante est à craindre, on peut ajouter une couche organique à la couche de galvanisation. Cette technique est appelée « duplex system ». La protection anti-corrosive devient alors très efficace. Le zingage au pistolet convient particulièrement bien à ce type de technologie en raison de la surface rugueuse qu'il offre, il permet une meilleure adhérence à la couche de finition.

4.4.3 Les accessoires de toitures en cuivre et le western red cedar

La stabilité du cuivre et d'autres métaux non-ferreux en contact avec du western red cedar n'est pas excellente ; en effet, le western red cedar est corrosif face au cuivre notamment. Les avis de bonnes pratiques trouvés dans la littérature ne conseillent pas leur association.

Le CSTC a mené une étude sur le sujet, à la demande du CDA (Copper Development Association) [Dôme B. et Lejeune G., 1993]. Elle concerna plus particulièrement la corrosion d'accessoires en cuivre, gouttières, chenaux, etc., en aval de couvertures composées de western red cedar. Des mesures de capacité acide ainsi que des essais de corrosivité ont été réalisés. La méthode de ce test est de plonger des languettes de cuivre dans une préparation d'eau déminéralisée et de copeaux de WRC. Les conclusions sont bien sûr que le western red cedar est

corrosif par rapport au cuivre, mais ce phénomène diminuera avec le temps. En outre, les valeurs de capacité acide sont relativement faibles en comparaison notamment avec des valeurs obtenues pour certaines membranes bitumineuses.

L'enseignement pratique apporté par cette recherche est que le cuivre peut tout à fait servir comme accessoire de toiture, même en aval de couvertures en western red cedar. Cependant, pour obtenir entière satisfaction de cette combinaison, il convient de respecter certaines recommandations. Il est conseillé de choisir un cuivre désoxydé au phosphore ayant une épaisseur d'au moins 0.8 mm de manière à permettre le développement des réactions de passivation sans altération des propriétés et enfin, les pentes minimales des gouttières seront respectées. Le principe général est de réduire, autant que possible, le temps de contact entre l'eau qui a été en contact avec le western red cedar et le cuivre.

4.5 ACTION DES METAUX SUR LE BOIS

En plus de la dégradation évidente de la connexion entre le bois et la fixation en train de se corroder, il faut tenir compte d'un autre effet de ce phénomène de corrosion ; c'est la dégradation du bois tout autour de la fixation en corrosion.

Deux mécanismes de dégradation ont été identifiés et peuvent être mis directement en relation avec la corrosion métallique [Schofield, 1985 ; Savard *et al* 1965]. Le premier est connu des anglosaxons sous le terme « Nail Sickness », littéralement, la maladie du clou. La maladie du clou désigne un processus par lequel une zone de bois mou, spongieux, se forme autour des clous en corrosion ; le pouvoir de fixation peut en être sérieusement altéré. En fait, ce sont des ions hydroxyles produits par la partie cathodique de la pile qui attaquent les hémicelluloses, la lignine, voire même la cellulose du bois [Pinion, 1970]. Le bois résiste très mal aux bases mais beaucoup mieux aux acides. Les feuillus ont une proportion plus importante d'hémicellulose que les résineux. Cependant, la perméabilité à l'oxygène est sensiblement moins importante chez les feuillus ; dès lors, ils sont moins sensibles à l'aération différentielle et la corrosion sera donc moins prononcée.

Le deuxième mécanisme prend naissance près de la zone de corrosion anodique. Les ions métalliques, notamment le Fe^{++} , agissent comme catalyseurs de la décomposition de la cellulose, ce qui réduit également la capacité fonctionnelle des connexions. De plus, des bois comme le chêne possèdent des tannins qui interagissent avec les composés métalliques solubilisés. Ils

forment un précipité qui est visible sous forme de taches autour des fixations. Dès lors, à la dégradation fonctionnelle vient s'ajouter un dommage esthétique.

4.6 PHENOMENES PHYSIQUES

Dans la littérature, nous n'avons pas relevé d'articles ou même de notes qui font référence à des phénomènes physiques engendrant la corrosion. Nous recherchions des propriétés physiques des bois dont la présence, ou l'absence, favoriserait la corrosion, mais nous n'avons rien trouvé de la sorte. Cependant, il en est au moins deux qui, pour nous, semblent avoir une influence importante sur la corrosion ou ses dégradations.

4.6.1 La fissilité

La fissilité des bois peut être à l'origine de fentes au clouage. Nous utilisons, par ordre croissant de prédisposition à la fente, les termes risques de fentes, fissilité et grande fissilité.

Les bois fissiles forment des fentes au clouage. Les fibres se séparent, en surface et transversalement par rapport à la pénétration du clou, sur une distance plus ou moins longue suivant l'essence. Ce n'est donc pas un trou que forme la pointe en pénétrant dans le bois et cela a plusieurs conséquences.

Tableau 16 : fissilité de quelques essences, d'après « Pratique du bois : 35 essences et leurs fiches techniques ».

Essences	Difficultés au clouage
Châtaignier	Grande fissilité
Western red cedar	Grande fissilité
Mélèze	Fissilité
Chêne	Risques de fentes
Robinier	Risques de fentes
Epicéa	Risques de fentes
Pin sylvestre	Risques de fentes

Premièrement, l'adhérence du clou dans un bois fendu est assurée par une double zone de contact puisque les fibres se sont séparées (du moins en surface). Cette dernière est moins efficace que si les forces agissaient sur toute la périphérie du clou comme dans le bois non fendu. Cela contribue également à accélérer la destruction de l'assemblage puisque la surface à corroder, pour annuler la fonctionnalité, est plus faible.

En outre, ces fentes constituent de véritables pièges à eau. D'une part, celle-ci pénètre plus profondément le long du clou et, d'autre part, elle peut stagner si la disposition de l'assemblage ne l'oblige pas à être évacuée. Cela contribue à accroître les risques que le clou soit corrodé sur une plus grande longueur et donc perde plus rapidement sa fonction de connecteur.

En conclusion, la surface de contact entre fixation métallique et bois est un facteur physique important qui influence la corrosion. Pour résoudre ce problème, il faut améliorer la façon dont le clou et le bois sont en contact ; celui-ci doit être intime et bien réparti. La technique conseillée pour résoudre le problème des bois fissiles est de préforer les bois afin qu'ils n'éclatent pas. Pour les vis, le problème est moins sensible.

4.6.2 L'humidité

Evidemment, l'humidité et ses variations sont typiquement des propriétés physiques et sont majeures dans le déroulement de la corrosion. Cependant, nous en avons déjà abondamment traité et nous ne reviendrons pas par exemple sur les taux d'humidité nécessaires à la corrosion, etc. Toutefois, nous devons signaler que les variations d'humidité ont une grande importance dans le développement des corrosions. L'alternance humidité et sécheresse est très dommageable aux pièces métalliques. Cette propriété est utilisée pour accélérer des tests de corrosion par un procédé qui alternativement immerge et émerge les échantillons. Elle repose sur des principes physico-chimiques qui impliquent des équilibres dans les solutions. Le commencement de la corrosion se fait avec beaucoup de vigueur avant de se stabiliser à une intensité inférieure.

4.7 MAITRISER LA CORROSION

De l'importance de la mise en œuvre...

La lutte contre la corrosion ne présente pas seulement un intérêt scientifique ou académique. Elle possède aussi, et surtout, un intérêt économique et relève, dans le cas des bâtiments, d'exigences légales de sécurité.

Les phénomènes de corrosion sont aussi renommés pour leur complexité et leur nature apparemment capricieuse; de petites causes peuvent avoir de grands effets. Des métaux réputés résistants se corrodent alors que des métaux dont la corrosivité est reconnue se comportent très bien.

L'étude de ces phénomènes nécessite des connaissances solides relatives aux matériaux, à l'électrochimie et à la chimie. Pourbaix [1975] remarque que la grande majorité des cas de dégradations prématurées est essentiellement due à des causes connues associées à une analyse incomplète des éléments intervenant dans le milieu agressif. La recherche et l'identification des facteurs de corrosion doivent, par conséquent, être les premiers objectifs à atteindre en vue d'apporter des solutions.

Dans le cas des connexions entre bois et métaux, les facteurs du milieu agressif sont le bois, le métal, mais aussi les conditions du milieu. Le concepteur a une emprise sur chacun d'eux. Il peut choisir le bois et le métal qu'il sélectionnera pour qu'ils soient compatibles. Evidemment, il lui faudra agir en fonction des conditions climatiques qui existent mais il peut les contrôler par des solutions architecturales qui intègrent correctement les contraintes du milieu et du matériau. L'importance de la mise en œuvre et des conditions climatiques au moment de celle-ci est illustrée par une étude menée par Morgan [1983]. Cette étude est exposée en annexe III. De nombreuses protections existent pour protéger les bois ou les métaux et pour réparer les dommages, leur choix et leur application seront à déterminer, au cas par cas, en se servant de tous les outils cités.

En conclusion, la solution la plus efficace dans tous les cas est une protection constructive. Nous entendons par protection constructive, une conception qui préserve de l'eau, le bois et tous les systèmes de connexion. Le concepteur peut prévoir d'abriter totalement les connexions ou de créer des systèmes efficaces d'évacuation d'eau ; dans tous les cas, il doit veiller à ventiler. A ce propos, nous présentons, en Annexe I, le système Jupit'Air. Il s'agit d'un nouveau système de connexion astucieux qui repose essentiellement sur le principe de protection constructive : éviter le contact avec l'eau et ventiler. Ce système a été mis au point pour lutter

contre les dégradations fongiques du bois, mais sa conception améliore également le comportement face à la corrosion des fixations, ce qui illustre, encore une fois, combien les conditions favorisant les dégradations sont similaires et que la lutte constructive contre la corrosion est aussi la lutte contre les champignons. La protection constructive est donc l'amélioration globale de la durabilité des ensembles construits.

Voici, sous forme de tableaux, une synthèse des principaux aspects auxquels il faut être attentif lorsqu'on aborde la question de la corrosion par le bois. Toutes ces données sont issues de diverses publications consultées tout au long de notre étude. Nous les avons librement adaptées pour réaliser des tableaux homogènes.

4.7.1 Corrosion par contact direct

Les indications exposées dans ce tableau sont les plus courantes dans les applications de construction. En effet, elles concernent les problèmes des fixations, des accessoires métalliques de toitures, etc.

Tableau 17 : risques de corrosion par contact direct

Conditions de départ		Risque de corrosion		
		Faible	Moyen	Elevé
Longévité prévue	Limitée Permanente		X	X
Situation géographique	Moins de 1 km de la côte 1 à 5 km de la côte Intérieur des terres	X	X	X
Conditions de mise en œuvre	Intérieur chauffé Extérieur à l'abris des intempéries Extérieur exposé aux intempéries	X	X	X
Influence du pH sur la corrosion (d'après Tableau 11)	Grande ou moyenne Basse		X	X
Traitement des bois	Ignifugation Préservant inorganique (traitement récent) Préservant inorganique (traitement ancien) Préservant organique	X X	X	X

Tableau 18 : comportement des métaux en contact avec le bois

Métaux		Comportement		
		Mauvais	Moyen	Bon
Acier	Sans couche de recouvrement	X		
	Zingué		X	
	Zingué et recouvert (Duplex – system)			X
Plomb		X		
Aluminium			X	
Cuivre et alliages			X	
Acier inoxydable (austénitique)				X
Monel				X

Tableau 19 : mesures de protection agissant contre la corrosion

Mesures de protection	Influence		
	Faible	Moyenne	Forte
Temporaire, mince film de protection sur métal	X		
Recouvrement par peintures (système prépeint...)		X	
Recouvrement complet et permanent du métal (galvanisation...)			X
Duplex – system			X
Ventilation (des bois pour diminuer l'humidité)			X
Evacuation de l'eau (à la surface des couvertures métalliques...)		X	
Prévenir les réhumectations lors du stockage et de la mise en œuvre		X	

Les mesures de protection renseignées dans ce tableau concernent d'une part celles appliquées aux métaux, et, d'autre part, les principes constructifs généraux.

Cas particulier des essences à tannins

Nous avons vu les taches produites par précipitation de tannates de fer par exemple. Les moyens de protection que nous venons de citer, ils n'en existent pas vraiment pour combattre l'apparition de ces taches. En effet, à moins de protéger tout à fait les éléments corrodables des intempéries, l'humidité agira et les tannins réagiront avec le moindre produit de corrosion. Il faut attendre un ou deux ans pour que le phénomène diminue fortement ou cesse. Dès lors, il faudra procéder au détachage des taches produites. Cela peut se faire à l'aide d'une solution d'acide oxalique (acide éthanedioïque) dosée à 100 ou 200 g.l⁻¹ [Benoit Y., 1997]. Lorsque les tannates de fer ont été redissouts, les taches ont disparu, mais des cristaux de sel se sont déposés en surface. Pour les éliminer, il faut rincer abondamment et poncer légèrement le bois avant d'appliquer une nouvelle couche de finition

4.7.2 Corrosion en phase gazeuse

Les indications exposées dans ce tableau concernent aussi bien les emballages en bois que certains cas particuliers de constructions dans lesquelles il y a une grande proportion de bois, par exemple des halles de stockage de bois, des pièces d'habitation de faible volume et ne bénéficiant pas d'une bonne ventilation, des placards etc..

Tableau 20 : risques de corrosion en phase gazeuse

Conditions de départ		Risques de corrosion		
		Faible	Moyen	Elevé
Durée d'exposition	Moins d'un mois	X		
	1 à 5 mois		X	
	Plus de 6 mois			X
Conditions climatiques	Climat continental sec	X		
	Climat tempéré		X	
	Climat tropical			X
Matériaux métalliques utilisés à proximité de bois	Aciers non et légèrement traités Plomb et alliages			X
	Zn et alliages Cuivre et alliages Aluminium		X	
	Acier inoxydable austénitique Chrome (Etain)	X		
Métaux stockés dans des emballages en bois	Cadmium			X
	Nickel		X	
	Or Molybdène Titane et alliages	X		
Influence du pH sur la corrosion (d'après le Tableau 11)	Grande à moyennement grande			X
	Moyenne (séchage artificiel)		X	
	Moyenne (séchage naturel)	X		

Si le risque est compris entre faible et moyen, on peut éventuellement prendre des mesures de protection, s'il est compris entre moyen et haut, elles sont indispensables.

III

EXPERIMENTATION :

évaluation de l'action corrosive
d'essences forestières communes

Evaluation de l'action corrosive d'essences forestières communes.

« Tests. Clearly the idea, once widely held, that it should be possible, by means of a 'standard corrosion test', to establish an 'order of merit' of materials which would be valid for all conditions is wrong. The order of merit is different in different environments and thus no one test can give results for all cases. »

Evans U.R., 1963.

Le but de l'expérimentation que nous avons entreprise est d'évaluer la corrosivité de certaines essences forestières. Nous désirons en réaliser un classement et, pour autant que ce soit possible, apporter une évaluation quantitative du phénomène de corrosion, qui sera transposable aux conditions de la construction.

1. MATERIEL ET METHODE

1.1 MATERIEL.

1.1.1 Critères de choix

La première étape de notre recherche a été de sélectionner les essences les plus intéressantes à tester. Pour cela, nous nous sommes servis de certains critères. Tout d'abord, il fallait que l'essence soit indigène ou que ce soit une essence dont la production est réalisable dans les conditions écologiques de notre région. En effet, plusieurs études de corrosivité ont été réalisées, mais le plus souvent sur des bois exotiques.

De plus, dans le cadre d'un développement de la foresterie wallonne, nous voulions aborder des essences que l'on est capable de produire dans le but d'affiner leur connaissance et donc d'améliorer leur potentiel d'utilisation.

Ensuite, elles devaient offrir de bonnes aptitudes en construction, notamment la durabilité. Les essences choisies sont pour la plupart des essences utilisées en bardage ou en menuiseries extérieures (sauf le hêtre). Le douglas est un cas particulier, car il doit servir à la couverture de la toiture d'une pisciculture. Nous voudrions connaître sa corrosivité afin d'évaluer les risques de dégradation des accessoires métalliques en aval de ce recouvrement.

Il était également important que ce soient des essences avec un réel potentiel commercial, c'est-à-dire que leur disponibilité existe ou pourrait exister sur le marché du bois.

1.1.2 Les essences choisies

a) Essences résineuses

- Le douglas (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) commence à être connu dans notre région par des productions indigènes de qualité. Il est de plus en plus utilisé car son marché se développe par l'arrivée à maturité des premiers arbres plantés en Ardennes et en France.
- Le mélèze (*Larix x eurolepis* A. Henry) est utilisé depuis très longtemps comme couverture de toitures et de façades des chalets de montagne. Aucun danger particulier de corrosion n'est mentionné à son sujet dans la littérature.
- Le pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L.) est utilisé en extérieur avec préservation. Nous l'avons choisi principalement parce qu'il sert d'essence résineuse de référence dans les expériences de durabilité.
- Le western red cedar (*Thuja plicata* Donn ex D. Don) sert souvent de bardages, de toitures, aux Etats-Unis notamment. Cette essence est la plus acide du panel retenu et a la réputation d'être très agressive. Nous vérifierons cette crainte. En outre, elle sera utile pour comparer l'influence des pH .

b) Essences feuillues

- Le hêtre (*Fagus sylvatica* L.) n'est pas utilisé en extérieur, mais est utilisé comme essence feuillue de référence lors des expériences de durabilité.
- Le robinier (*Robinia pseudoacacia* L.) est encore peu employé, mais cette essence pourrait avoir un avenir intéressant dans des constructions extérieures en raison de sa très bonne durabilité.

1.1.3 La sciure

Tous les bois ont été coupés pour l'expérience, ils proviennent tous du bois de Lauzelle. Nous avons coupé des arbres vivants et sains. Le hêtre est la seule essence pour laquelle nous

n'avons pas dû abattre d'arbre : nous avons pris des rondins déjà façonnés. L'aspect du bois ne dévoilait pas de dégradations visibles, pourtant, il avait certainement déjà vieilli, ce qui aura des conséquences.

Pour produire les sciures, il a fallu préalablement sécher les bois. Ensuite, nous les avons réduits en poudre à l'aide d'une broyeurse en prenant bien soin de purger l'aubier, chose aisée puisque presque tous les bois ont une coloration plus vive du duramen. Les sciures ont ensuite été passées dans un tamis mécanique avec mouvement oscillo-tournant ; premièrement, nous avons travaillé avec un tamis dont la maille est de 0,25 mm et après, la sciure a subi un deuxième passage sur un tamis 0,125 mm de largeur de maille. Les rendements de production des sciures sont assez faibles : par exemple, pour le pin sylvestre, 250 g de bois sont insérés dans la broyeurse et seulement 70 g sont récupérés à la suite du premier passage au tamis 0,25mm.

Nous avons utilisé principalement la sciure dont nous connaissions précisément la granulométrie, c'est-à-dire de 125 à 250 μm . Les sciures ont été stockées dans des sachets étanches et à l'abri de la lumière en attente de l'expérience.

La granulométrie a uniquement l'avantage de rendre homogène le contact entre le bois et le métal pour toutes les essences. Nous savons que dans les conditions telles que nous les présenterons, ce sont les extraits du bois qui agiront et dès lors, la surface de contact n'a pas grande importance.

Les sciures ont une humidité connue mesurée sur des échantillons de 2 g par une balance munie d'un dessiccateur.

Tableau 21 : humidité des sciures des essences étudiées.

Essences	Humidité (en %)
Douglas	6,34
Mélèze	6,04
Pin sylvestre	6,51
Western red cedar	5,25
Hêtre	5,30
Robinier	5,07

1.1.4 Le fer

Nous avons choisi de la limaille de fer commerciale (IRON, POWDER, -325 mesh, 97%). Une granulométrie de -325 mesh, soit 45 μm , permet de réaliser l'attaque sur une surface réactionnelle très grande.

1.2 METHODE

1.2.1 Etablissement de la méthode de test

Après avoir choisi les essences, nous devons effectuer avec celles-ci une série de tests. Nous avons le choix entre les tests de vieillissement en exposition naturelle et ceux en laboratoire.

Les premiers consistent à exposer réellement des assemblages bois et métal sur un site naturel choisi en extérieur. Par exemple, un premier projet pour notre programme aurait été de soumettre aux intempéries des échantillons de toitures. Cela ne fut pas réalisable, car ces tests sont très longs. Ils s'étendent généralement sur plusieurs années. De plus, aucun contrôle n'est possible concernant la quantité et la qualité des pluies recueillies. En effet, comment différencier, dans les résultats, les effets dus aux essences utilisées pour la toiture et ceux dus aux pluies dont l'acidité peut varier ? D'autres facteurs climatiques peuvent aussi influencer le résultat. Pourtant, ces tests sont ceux qui réalisent un vieillissement le plus conforme à celui subi par des assemblages en menuiseries extérieures. Ils ne garantissent toutefois pas des conditions exactement identiques à celles qui agiront sur les pièces dans d'autres milieux. De ce fait, il ne sont pas généralisables.

Les autres méthodes de tests tendent à résoudre le problème du temps que demandent les essais en atmosphère naturelle. Le test en climatiseur a également été analysé. Il consiste à insérer des échantillons dans une enceinte qui imite les variations climatiques. Les paramètres de rayonnement, de température et d'humidité sont tout à fait contrôlés dans ce genre d'appareil. Les études qui s'y déroulent sont basées sur des cycles humectation – dessiccation, chaud – froid, jour – nuit (le rayonnement U.V. a de l'importance pour certains phénomènes, notamment le vieillissement des bois ou des membranes bitumineuses par photo-oxydation). Le contrôle de ces paramètres permet aux chercheurs d'accélérer le vieillissement d'un facteur 10 au maximum. Ce procédé est plus rapide que le précédent, mais il demande néanmoins beaucoup de temps. De plus, il aurait fallu, comme le test en milieu naturel d'ailleurs, expérimenter des fixations

commerciales dont la composition n'est pas connue exactement et qui très souvent sont protégées, passivées ou constituées d'un alliage résistant, allongeant encore l'exercice.

De toutes ces considérations, il ressort qu'il nous est impossible de réaliser des tests dans des conditions d'emplois réels. C'est pourquoi nous avons décidé de mener l'expérience en laboratoire. L'essai devait reproduire les facteurs principaux qui dans les systèmes de fixations normaux agissent sur la corrosion. Ceux-ci viennent du métal, des conditions atmosphériques et du bois.

En laboratoire nous l'avons vu, les conditions atmosphériques sont difficilement imitables. Nous avons dès lors décidé de ne pas en tenir compte. Le test se déroulera dans une étuve thermostatisée et les échantillons seront isolés pour n'avoir aucun contact avec l'air extérieur.

Ce sont les métaux qui se corrodent, donc ce sont leurs propriétés intrinsèques qui autoriseront ou non la corrosion. La variété des métaux est tellement grande qu'il est impossible de s'aventurer bien loin pour un non averti. De plus, nous voulons classer les bois et non les métaux. Nous choisissons un métal non allié pur (ou dont on connaît exactement la composition) et qui se corrode aisément. Nous avons porté notre choix sur le fer.

Les facteurs du bois qui influencent la corrosion sont principalement ses extraits et son humidité. Les variations d'humidité ne seront pas observées, bien qu'elles puissent jouer un rôle, notamment dans la cinétique de corrosion. Les extraits nous intéressent beaucoup car ils permettront de réaliser un classement des essences. A ce stade, deux possibilités s'offrent encore à nous. On peut travailler avec le bois tel quel ou en utiliser uniquement les extraits. Cependant, les techniques d'extraction occasionnent des modifications chimiques du bois, ce qui donne lieu à des résultats variables quant à la composition des substances extraites.

Il fallait encore trouver le meilleur moyen de mettre les bois et le métal en contact. L'idée finalement retenue nous a été fournie par des auteurs français, Savard *et al.*, qui ont réalisé des tests sur des essences tropicales. Ils ont mis en contact de la limaille de fer et de la poudre de bois. Cela permet de respecter l'intégrité chimique du bois tout en facilitant la sortie des extraits. De plus, la limaille permet d'obtenir un contact très proche du bois et du fer ainsi qu'une grande surface réactionnelle sur celui-ci. En outre, ce test n'exige une mise en contact que de dix jours. Cela est beaucoup plus rapide que les autres expériences envisagées.

1.2.2 Méthode expérimentale

1.2.2.1 Mise en contact

La technique que l'on utilise pour mettre en contact la poudre et la limaille est la suivante :

Dans un bécher de 250 ml dont la surface de base est de 30 cm², on étend uniformément 5 g de limaille que l'on recouvre d'eau déminéralisée. Ensuite, 2 g de poudre de bois sont éparpillés à la surface de l'eau. La sciure coule assez rapidement pour se déposer en une couche très régulière à la surface de la limaille. On y ajoute de l'eau jusqu'à ce que le bécher contienne 200 ml. Ensuite, on isole le milieu de réaction en coulant une couche d'huile de paraffine sur l'eau pour empêcher tout accès de l'oxygène de l'air. De plus, on ferme le bécher par une feuille de parafilm pour éviter toute entrée d'éléments indésirables dans la réaction.

Dans l'étuve, il n'y a de la place que pour un maximum de trente échantillons, or nous voulions qu'ils soient tous soumis aux mêmes conditions. Nous avons donc opéré avec cinq répétitions par essence.

Afin d'accélérer le processus d'attaque, nous travaillons à une température constante de 45°C. Les échantillons sont isolés dix jours en étuve. Nous avons également soumis des témoins à ce test. Ceux-ci contenaient la même quantité d'eau et de bois, ou la même quantité d'eau et de limaille. Ils ont été exposés aux mêmes conditions, mais pas en même temps que les autres tests en raison du volume restreint de l'étuve.

1.2.2.2 Les prélèvements

Tout d'abord, pour plus de facilité, il faut retirer l'huile de paraffine qui recouvre les échantillons. Ensuite, on homogénéise la solution. Nous réalisons cette opération, très doucement de manière à ne pas soulever la couche de sciure, à l'aide d'un agitateur qui consiste en une barrette de verre que l'on a coudée.

Nous prélevons, à l'aide de micro-pipettes de 5 ml, 20 ml de solution.

1.2.2.3 Les filtrations

Nous désirions éviter le plus possible les manipulations inutiles et nous aurions souhaité que les solutions puissent être analysées directement par la torche à plasma. Malheureusement, même après plusieurs tentatives, celle-ci se bloque lorsqu'on lui soumet des solutions non filtrées ; le nébuliseur est obstrué par des impuretés solides se trouvant dans la solution. La filtration permet l'analyse. Nous filtrons avec du papier filtre WHATMAN 540 caractérisé par une vitesse de filtration moyenne.

1.2.3 Analyse

1.2.3.1 Torche à plasma

Nous recherchons dans un premier temps le fer solubilisé, soit des cations Fe^{++} . L'outil le plus adapté en ce qui concerne la précision et la rapidité pour rechercher ces cations dans l'eau est la torche à plasma.

Le plasma est un mélange gazeux conducteur. Dans le plasma d'argon, utilisé pour ces analyses, les ions Ar^+ et les électrons sont les principales espèces conductrices. Les ions Ar^+ sont formés dans le plasma par une ionisation du gaz, qui est initiée par une étincelle. La source extérieure leur fournit suffisamment d'énergie pour maintenir, par collisions, la température à un niveau très élevé et entretenir indéfiniment l'ionisation dans le plasma.

La torche à plasma du laboratoire est un analyseur ICP (Inductively Coupled Plasma), ce qui veut dire qu'elle utilise un générateur de radiofréquences comme source extérieure d'énergie.

L'élément essentiel de cet appareil est le brûleur. Celui-ci est constitué de trois cylindres concentriques de quartz. C'est au sommet du brûleur que se trouve l'inducteur de radiofréquences (2 kW de puissance et 27 MHz de fréquence). L'alimentation en argon se fait par le cylindre intermédiaire. L'argon est ionisé en Ar^+ et immédiatement accéléré par le champ puissant de l'inducteur. Les ions accélérés transfèrent l'énergie à la totalité du gaz par le biais de collisions entre atomes. En exploitation, la température avoisine les 8000K. La température est tellement élevée que l'ensemble est refroidi par un flux de gaz inerte injecté dans le cylindre extérieur. L'échantillon, quant à lui, est introduit dans la flamme par le cylindre central après avoir été nébulisé.

L'analyse du plasma et de l'échantillon atomisé est réalisée par un spectromètre. Chaque élément excité, quand il retourne à son état initial, émet un spectre caractéristique. Ce spectre d'émission est composé de pics qui varient en intensité ; celle-ci est exprimée par la hauteur du pic, qui est directement proportionnelle à la quantité d'éléments présents. Dès lors, cela permet de réaliser une analyse quantitative de l'échantillon.

Le fer en solution s'y trouve sous la forme de cation Fe^{++} . La torche à plasma donne les valeurs de cations en ppm, c'est-à-dire « part par million ». Le ppm est une quantité très faible de l'ordre du mg.l^{-1} .

1.2.3.2 Mesure du pH

Le pH est un élément important à connaître pour caractériser les solutions. De plus, nous désirons vérifier qu'il n'est pas représentatif de la corrosivité, comme l'ont remarqué Savard *et al.* [1963].

Les mesures de pH sont réalisées à l'aide d'un pH-mètre à électrode de verre, de type PHM 83 Autocal. L'électrode est de type Hamilton Flushtrode P/N : 238'060 , pH = 0 à 14 à des températures de 10 à 50 °C.

Les mesures des échantillons ont toujours été réalisées après le calibrage de l'appareil, d'abord dans une solution de pH = 7 puis dans une autre de pH = 4. Les échantillons étaient également toujours mesurés à la température ambiante sur laquelle on a également étalonné le pH-mètre.

1.2.4 La filtration

Filtrer permet d'analyser les échantillons à la torche. Nous analysons le fer en solution. Dans nos conditions de pH et à l'abri de l'air comme nous travaillons, le fer en solution y reste sous la forme de Fe^{++} .

Pourtant, filtrer a pour effet d'aérer la solution. Ce qui pourrait engendrer une précipitation d'oxyde de fer et ainsi diminuer la quantité de fer trouvée dans la solution. Pour déterminer cela, nous avons réalisé un test de dosage du fer se trouvant sur les filtres qui ont servi à retirer les impuretés avant le passage à la torche.

Après filtration normale des 20 ml prélevés, nous dissolvons les oxydes de fer qui auraient pu se former sur le filtre dans une solution d'acide chlorhydrique (3.10^{-2} M). Cette solution est mise en conformité avec les exigences de la torche par dilution. Nous connaissons alors la quantité de fer perdue dans le filtre par 20 ml de solution réactionnelle.

Il faut répéter l'opération pour toutes les essences, car nous soupçonnons également certains extraits de se combiner avec le fer pour former des précipités.

Les résultats, disponibles en Annexe V (Tableau A1), obtenus nous apprennent que ce sont seulement des traces de fer qui sont retrouvées sur les filtres, de l'ordre de maximum 0.081 ppm pour le douglas. La filtration ne modifie donc pas les valeurs de contenu en fer et peut être appliquée à tous les échantillons.

1.2.5 Le stockage au réfrigérateur

Pour certains tests, il n'a pas été possible de procéder immédiatement à l'analyse. Les échantillons ont donc séjourné dans le réfrigérateur avant d'être examinés. Nous devons vérifier que leur stockage n'engendrait pas de modification des résultats.

Nous avons mesuré la quantité de fer dans les échantillons à deux moments différents. La première mesure a été effectuée juste après la filtration et la seconde une semaine plus tard. Les résultats sont reportés en Annexe V (Tableau A2).

En conclusion, malgré des variations généralement peu importantes, nous pouvons dire que le stockage au réfrigérateur exerce une certaine influence, mais il est envisageable à court terme. Nous avons respecté cette prescription puisque le stockage n'a jamais excédé deux jours.

2. TEST N°1 : INFECTION FONGIQUE

Le premier test a été réalisé avec de la sciure dont la granulométrie est inférieure à 125 μm . La granulométrie n'a en réalité pas de conséquence sur les valeurs obtenues puisque ce sont les extraits qui agissent sur le phénomène de corrosion. Notons toutefois que la finesse des grains ajoute une difficulté à la préparation de l'échantillon, la tension de surface de l'eau empêchant la sciure de se déposer rapidement sur la limaille.

2.1 ETABLISSEMENT DES TEMOINS

Les témoins sont soumis exactement au même traitement que les échantillons. Le prélèvement des solutions témoins se pratique également de la même manière.

Nous avons évalué des valeurs témoins pour la limaille, à raison de deux répétitions. Les éprouvettes ne contiennent que de la limaille et de l'eau. Les valeurs obtenues sont négligeables, de l'ordre du millième de ppm. Nous voyons qu'il y a une réaction dès que la quantité de fer solubilisée en présence de bois est plus importante que les mesures des témoins.

Les témoins pour le bois ont été réalisés pour chaque essence, à raison de deux répétitions. Les éprouvettes ne contiennent que de la sciure et de l'eau. La mesure réalisée représente la quantité d'ions fer qui se trouvent sur le bois et qui s'en dégagent. Cette quantité peut provenir des constituants du bois, mais il faut certainement aussi prendre en compte toutes les manipulations que le bois a subies, par exemple le broyage mécanique des bois entre des pièces en acier. Ces manipulations sont susceptibles de laisser du fer en trace sur le bois. Il y a donc de très faibles quantités de fer déjà présentes sur le bois.

Les quantités de fer retrouvées en solution sont extrêmement faibles. Nous les négligerons lors de l'analyse de la première expérience. Les contenus en fer des solutions témoins ne comprenant que de la limaille sont extrêmement ténus, ce qui montre bien que le bois solubilise beaucoup plus de fer que l'eau déminéralisée.

Tableau 22 valeurs de pH et quantité de fer solubilisé des échantillons témoins : limaille et sciures.

Limaille	pH	Fe (ppm)
L1	9,88	0,008
L2	9,96	0,005

Sciures		pH	Fe (ppm)
Douglas	1AT1	5,61	0,019
	1AT2	6	0,014
Mélèze	2AT1	5,39	0,028
	2AT2	5,22	0,033
Pin sylvestre	3AT1	5,24	0,039
	3AT2	5,25	0,033
Western red Cedar	4AT1	4,57	0,014
	4AT2	4,58	0,021
Hêtre	5AT1	6,06	0,009
	5AT2	6,09	0,009
Robinier	6AT1	4,98	0,019
	6AT2	5,08	0,012

2.2 RESULTATS

2.2.1 Observations colorimétriques

Au départ, les solutions étaient toutes incolores ; la sciure était par contre rose pour le douglas, rouge – orangé pour le mélèze, beige clair pour le pin sylvestre (le bois est encore jeune et peu duraminisé), rouge pour le western red cedar, brun très clair pour le hêtre et vert – jaunâtre pour le robinier. Pour la plupart, après le passage en étuve, les solutions ont pris une teinte analogue à celle des sciures, surtout dans les cas du robinier et du western red cedar où les solutions sont devenues presque opaques. La solution du hêtre s’est aussi sensiblement colorée, mais est restée transparente. Ces teintes résultent de l’activité chimique dans le réacteur. En effet, on ne constate pas du tout les mêmes colorations ni les mêmes intensités dans le cas des solutions témoins sans limaille. Toutefois, ces colorations ne sont pas révélatrices de l’action corrosive, nous le voyons avec les résultats concernant le fer solubilisé. La sciure du pin sylvestre par exemple garde, après dix jours, sa couleur initiale et la solution sa transparence. On y trouve pourtant 8,99 ppm de fer solubilisé. Le western red cedar, lui, a solubilisé une quantité moyenne plus faible : 6,36 ppm. Sa sciure par contre a foncé au contact du fer et la solution s’est fortement colorée, dans les tons rouges. Le contenu en tannins des essences les plus colorées est

responsable des différences de teintes. Le fait qu'elles ne soient pas identiques au témoin indique également la présence d'une réaction et un environnement différent.

La limaille ne s'oxyde pas et reste grise comme au départ de l'expérience, car nous travaillons à l'abri de l'oxygène de l'air (Annexe 7, Figure A5).

2.2.2 La réaction

La réaction qui se produit est une oxydoréduction (cf. phénomènes de corrosion). La réaction se déroule en milieu acide à faiblement acide. Les deux demis – réactions sont :



La réaction peut se produire car son potentiel vaut +0,47 V. De plus, le dégagement de l'hydrogène gazeux entretient la réaction qui le produit, en vertu de la loi de Le Chatelier. Ce dégagement gazeux est confirmé par l'observation des bulles de gaz se dégageant des échantillons tout au long de l'expérience. L'hydrogène n'a pas été dosé. Le chauffage de l'étuve à 45°C est aussi bénéfique pour le développement de la réaction.

2.2.3 Valeur de solubilisation de Fe^{++}

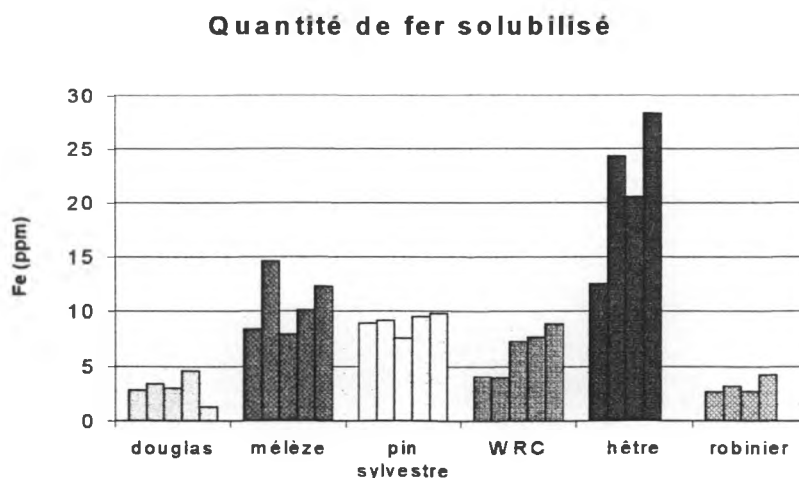


Figure 9 : quantité de fer solubilisé lors du test n°1. Les concentrations de Fe^{++} ainsi que les pH détaillés sont disponibles en annexe V.

Le premier graphique (Figure 9) nous montre qu'il y a une réelle action corrosive des essences par rapport au fer. En première analyse, on remarque aussi une variabilité importante des résultats. Nous traiterons de la reproductibilité des résultats ultérieurement.

L'analyse de ces résultats doit prendre en compte l'infection généralisée qu'ont subie les échantillons à des degrés divers. Les valeurs ne sont dès lors pas nécessairement représentatives des essences. Toutefois, elles sont utiles comme bases de réflexion et, notamment, nous pouvons nous servir des valeurs moyennes de pH et de fer solubilisé pour établir un premier classement des essences.

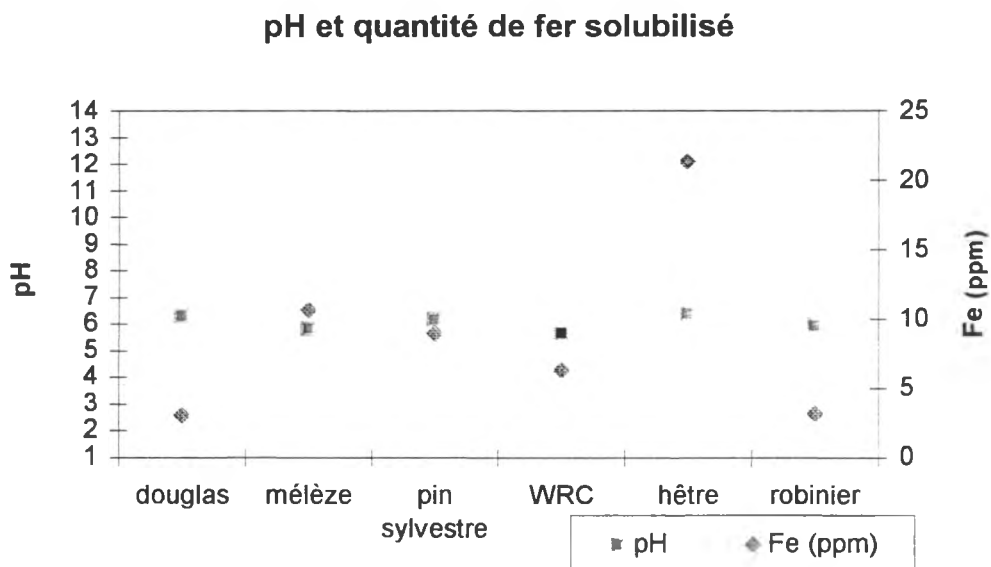


Figure 10 : pH moyen des solutions réactionnelles et des valeurs moyennes de fer solubilisé pour chaque essence.

Le classement le plus simple suivant ce graphique positionnerait les essences dans l'ordre suivant : le hêtre (21,4 ppm), le mélèze (10,65 ppm), le pin sylvestre (8,99 ppm), le western red cedar (6,36 ppm), le robinier (3,20 ppm) et enfin le douglas (3,05 ppm). Pourtant, nous pensons qu'il est préférable de ranger les essences suivant plusieurs classes d'activité corrosive, par exemple fortement, moyennement et faiblement active.

Le classement, repris dans le Tableau 23, n'est valable que dans nos conditions expérimentales. Il ne prend pas en compte ni l'infection, ni les variations de pH, ni même les précipités possibles.

Tableau 23 : classement des essences selon les valeurs de solubilisation du fer obtenues lors de la première expérience

Classes d'activité corrosive	Essences
Forte	Hêtre
Moyenne	Mélèze, pin sylvestre et western red cedar
Faible	Douglas, robinier

2.2.4 Etude de la corrélation avec le pH

Comme nous l'avons expliqué lors de l'analyse théorique de ce sujet, le pH des extraits d'une essence n'est pas l'indicateur unique de corrosivité. En effet, le western red cedar est caractérisé par un pH beaucoup plus acide que le hêtre ou le pin sylvestre, alors que la corrosivité n'imit pas cette différence. Le pH ne nous renseigne pas sur les fonctions acides présentes sur l'essence et qui sont potentiellement corrosives. Par contre, il repère les H^+ en solution et cela est très utile pour suivre les variations d'acidité du milieu qui peuvent nous renseigner sur l'évolution de la réaction.

Voici un tableau reprenant les valeurs de pH de témoins et des solutions résultant de l'expérience. Nous pouvons comparer l'évolution de l'acidité sur des valeurs moyennes, car elles donnent la tendance.

Tableau 24 : comparaison du pH moyen des solutions réactionnelles et le pH des solutions témoins qui n'ont contenu que de la sciure.

Essences	pH moyens témoins	pH moyens tests	Augmentation du pH
Douglas	5,80	6,30	0,5
Mélèze	5,30	5,85	0,55
Pin sylvestre	5,25	6,17	0,92
WRC	4,58	5,66	1,08
Hêtre	6,08	6,41	0,33
Robinier	5,03	5,99	0,96

Le pH augmente pour toutes les essences, ce qui confirme notre hypothèse de départ quant à la réaction de corrosion qui se produit. En outre, des différences significatives apparaissent entre les essences. Cela est peut être dû à l'intensité variable de la réaction de corrosion.

Nous avons tenté, sans succès, d'obtenir des corrélations entre le pH et la quantité de fer solubilisée. Pour cela, nous avons transformé l'augmentation de pH en la quantité de H^+ qui avait été consommée en nous basant sur la définition du ΔpH :

$$pH = - \log [H^+]$$
$$pH \text{ de la solution du test} - pH \text{ moyen des solution témoins} = \Delta pH$$

Dès lors, la quantité de H^+ consommée égale :

$$H^+ \text{ consommée pendant la réaction} = - (10^{-(pH \text{ test})} - 10^{(pH \text{ témoin})})$$

Nous présentons cette comparaison sous forme de tableau dans lequel nous avons repris tous les échantillons pour illustrer les variations.

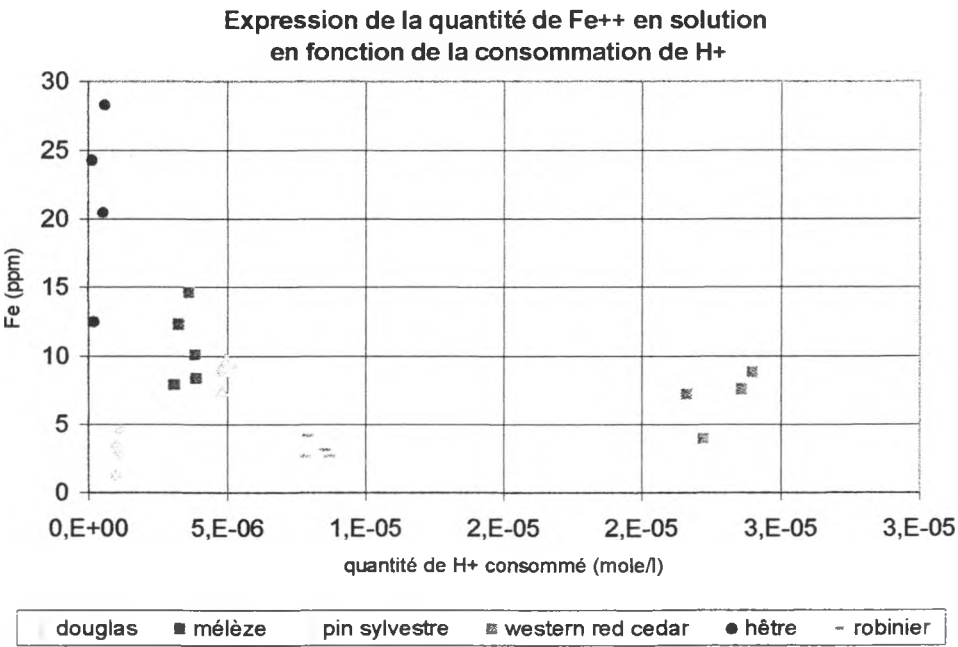


Figure 11 : expression de la quantité de fer solubilisé en fonction de la consommation en H^+ .

Le graphique nous montre combien il est difficile de trouver une relation vraisemblable entre la consommation de protons et la solubilisation de fer. Les valeurs des essences sont trop

souvent dispersées. Le douglas ou le mélèze illustre bien cela : pour une consommation de protons identique, les valeurs de fer solubilisé sont très distantes.

Pourtant, intuitivement, nous pourrions estimer le sens des relations. En effet, puisque le réacteur est fermé, il n'y a pas d'autre production d'acide que celle du bois. Dès lors, l'acide consommé, mesuré par une augmentation de pH, est utilisé principalement à la réaction de corrosion. D'autres réactions, impliquant par exemple les tannins, pourraient également consommer des protons.

Si l'on fait abstraction de ces réactions encore inconnues, la relation la plus évidente que nous pouvons établir sur base de cette proposition est que, pour toute consommation d'acide supplémentaire, la quantité de fer solubilisé doit être plus importante. Cela aurait pu nous permettre d'établir le classement sur base de la quantité de H^+ consommés. Les essences se seraient réparties autour d'une droite ascendante partant de l'origine. Cependant, le graphique montre qu'il n'en est rien.

En effet, la lecture du graphique confirme ce qui se dégage déjà dans le tableau des pH moyens, c'est-à-dire que plusieurs effets antagonistes apparaissent.

Sur les valeurs de pH moyennes, on constate que c'est le hêtre qui subit la moins forte augmentation de pH des essences étudiées, or, selon notre méthode, il est aussi le plus corrosif. De plus, la répartition des essences sur le graphique confirme cette observation. Comment expliquer que la réaction de corrosion qui est une réaction qui consomme des H^+ , très active dans le cas du hêtre, ne produise qu'une si faible augmentation de pH, sinon en tenant compte de l'infection forte du hêtre ? Les champignons acidifient leur milieu ; leur métabolisme produit des H^+ . Il est dès lors possible que la production de protons par les champignons compense l'augmentation du pH due à la réaction de corrosion, et même participe à cette réaction. Cependant, nous ne savons pas dans quelle proportion les champignons produisent de l'acide.

Le robinier est affecté d'une relativement forte augmentation de pH, ce qui signifie une diminution de la quantité de protons dans la solution, et cela malgré l'action acidifiante de l'infection présente également sur le robinier. Pourtant, on constate qu'il a relativement peu corrodé le fer. Pour nous, cela pourrait être dû à la précipitation de certains extraits avec des ions fer. Ceux-ci deviendraient indécélables par notre analyse, mais auraient été bel et bien retirés de la limaille. Ce phénomène a été signalé dans une autre étude, mais il est délicat de préciser ce qui précipite, car la composition tannique est très variable d'une essence à l'autre. Cela mériterait une étude complémentaire.

Le western red cedar manifeste une plus forte consommation de protons que le robinier. Tout comme pour ce dernier, elle ne semble pas être en rapport avec sa corrosivité assez faible.

Les autres essences, quant à elles, présentent une forte variabilité des quantités de fer solubilisé pour des valeurs de H^+ consommés faibles, mais du même ordre de grandeur.

2.2.5 Conclusions et commentaires

La conclusion est triple. D'une part, il est impossible de quantifier précisément la corrosion qui se produira sur un système de fixation réel. Cela est dû notamment à la trop grande variabilité.

D'autre part, l'infection perturbe considérablement les résultats, puisque l'on sait qu'il y a production d'acide et que c'est un réactif. Nous observons des valeurs très élevées en comparaison aux valeurs obtenues lors de mesures françaises [Savard *et al.*, 1963]. Par exemple, pour le pin sylvestre, la quantité moyenne de fer solubilisé est de 2,68 ppm dans l'expérience française alors que nous obtenons 8,99 ppm. Pour le hêtre, ils mesurent 2,332 ppm et nous 21,4ppm.

Troisièmement, il est établi que la corrélation entre la solubilisation du fer et le pH des solutions est incorrecte, la variation de pH non plus n'est pas exploitable dans ce sens. Il faudrait refaire une série de tests en mesurant la capacité acide.

2.3 CHAUFFAGE A REFLUX

Sur les échantillons ayant passé 10 jours à 45 °C, nous avons réalisé un chauffage à reflux. Après avoir prélevé 20 ml de solution pour les soumettre à l'analyse, la sciure, la limaille et la solution réactionnelle sont mélangées dans un ballon. Le mélange sera chauffé à ébullition pendant sept heures.

Le traitement augmente le taux de fer solubilisé, ce qui est normal puisque nous intensifions la réaction par le chauffage.

Le travail qui permet d'obtenir ces résultats est long et fastidieux, mais il réduit la variabilité et nous libère en partie de la contrainte de l'attaque fongique. En effet, cette dernière est évidemment absente pendant l'ébullition, cependant, puisque nous chauffons des éprouvettes déjà attaquées, nous ne pouvons évaluer la proportion de son influence.

De plus, les résultats obtenus dans ces conditions extrêmes ne reflètent pas du tout le comportement du bois : chauffer à ébullition provoque des perturbations dans le bois ; nous y opposons les mêmes objections qu'aux techniques d'extraction.

Pour toutes ces raisons, nous n'avons pas poursuivi l'analyse des échantillons par chauffage à reflux.

2.4 CINETIQUE

Nous signalons que nous avons effectué une seconde série d'expériences avec le même mode opératoire que la première et dont le but était d'établir la cinétique de la réaction. Pour réduire autant que possible la contamination, nous avons travaillé en prenant soin de désinfecter les instruments entre chaque essence.

Sur les cinq répétitions par essence, nous en avons choisi deux desquelles nous avons prélevé respectivement trois et cinq échantillons de 5 ml chacun. Les courbes que nous en avons tirées ne sont pas représentatives d'une cinétique connue (premier ordre, deuxième ordre etc.). Elles ne seront pas présentées ici. Cette impossibilité d'établir des courbes interprétables est due également à la disparité des résultats obtenus.

Malgré le nettoyage des instruments, l'infection était malheureusement encore présente dans toutes les éprouvettes. Cela démontre une fois de plus que la contamination a probablement eu lieu lors du broyage des sciures, nous pouvons affirmer qu'il n'y a pas eu de contacts entre les sciures lors de la préparation de ce test.

2.5 L'INFECTION MYCELIENNE

Après quatre jours d'étuve, lors d'une vérification de température, nous avons remarqué un film blanchâtre sur le dessus de la sciure. Ce film s'est développé tout au long de l'expérience si bien que, à la fin, les échantillons présentaient des indices évidents d'infection. Le mycélium était organisé sous forme de boules blanches. Les opérations de détermination demandent du temps avant de fournir une réponse, nous les avons entreprises pendant que l'expérience de cinétique était en cours.

2.5.1 Les champignons

Nous avons prélevé des fragments de mycélium et nous les avons mis en incubation, à 45 °C et à température ambiante, pendant une huitaine de jours. La température élevée du test de corrosion était un premier indice, car peu de champignons se développent correctement à ces températures. Les cultures ayant très bien fonctionné, il était commode d'observer les hyphes ainsi que les sporangiophores de ces micro-organismes. Après une analyse au microscope et la confirmation de plusieurs spécialistes, il s'est avéré que nous étions en présence de deux champignons : *Aspergillus fumigatus* et *Mucor*. La famille des *Mucor* est une famille de moisissures très répandue ; nous ne connaissons pas l'espèce parce que cette classe d'organismes est compliquée à déterminer. Ils sont tous deux ubiquistes et saprophytes ; il est donc habituel qu'ils se développent sur des matières végétales mortes, voire même des troncs, bien qu'ils ne soient pas spécifiquement lignivores. Leur activité acidifie le milieu et cela peut influencer l'expérience.

2.5.1.1 Le cas particulier du hêtre.

Nous l'avons dit, les échantillons de cette essence proviennent de billons déjà découpés qui étaient stockés en forêt. Ces bois n'étaient pas exploités depuis longtemps et ne paraissaient pas dégradés. De plus, quand nous les avons fendus et découpés pour les broyer, nous n'avons pas été visuellement alarmés par leur l'état.

Cependant, après la découverte de l'infection dans les éprouvettes, nous avons inspecté tous les échantillons de bois qui n'étaient pas broyés. Seul le hêtre manifestait des indices évidents d'un développement mycélien. Il est très possible que les bois étaient entreposés en forêt à un endroit favorisant le développement des champignons, par exemple une clairière humide et ensoleillée. Ne prévoyant pas cet obstacle, nous n'y avons pas prêté grande attention.

Le hêtre a donc été probablement infecté avant le départ de l'expérience. Même si le mycélium n'était alors pas visible en surface, l'infection pouvait très bien avoir commencé son œuvre de dégradation. Celle-ci consiste en la décomposition de la matière organique constituant le bois. Des études [Savard *et al.*, 1963] montrent que des bois dégradés sont caractérisés par des taux d'extraits supérieurs à ceux de bois sains, or, nous le savons maintenant, ce sont les extraits qui participent à la réaction de corrosion. Dès lors, notre échantillon de hêtre peut contenir, mais nous ne l'avons pas mesuré, un taux d'extraits plus élevé que la normale. Cela expliquerait son exceptionnelle corrosivité alors qu'il n'en est fait mention nulle part dans la littérature.

Les résultats du hêtre, mais aussi ceux de toutes les autres essences sont à considérer en tenant compte de cette attaque. Cependant, les autres essences n'ont pas été infectées en forêt comme le hêtre. En effet, les bois étaient vivants et sains, or, les champignons que nous avons repérés sont des saprophytes. De plus, nous n'avons trouvé, dans toutes nos éprouvettes, que *Mucor et Aspergillus* alors que ces deux genres ont aussi été identifiés sur le hêtre. Dès lors, nous pensons que les infections de tous les autres échantillons ne sont que la conséquence de leur contamination par des poussières infectées de l'échantillon de hêtre. Le conditionnement des bois, le broyage et les manipulations de sciures n'ont bien sûr pas été pratiquées de manière stérile.

2.6 LA REPRODUCTIBILITE DES RESULTATS

Bien que les valeurs présentées en Figure 9 paraissent homogènes, la reproductibilité des résultats est médiocre. En effet, l'expérience de cinétique, pourtant effectuée dans les mêmes conditions que l'expérience n°1, n'a pas confirmé les valeurs obtenues. La variabilité est telle que les séries de répétitions ne constituent pas des populations normales. En outre, on ne peut associer les tests entre eux, car nous avons dû modifier plusieurs fois la méthode pour répondre à des imprévus ; les tests ne sont dès lors pas identiques. Puisque nous ne pouvons respecter les règles de normalité, il nous sera impossible de faire de l'inférence statistique avec de telles données. C'est pourquoi nous ne pourrions déduire des expériences aucune conclusion chiffrée exploitable. Nous avons tenté de comprendre pourquoi les valeurs ont une si grande inconstance.

Les premières hypothèses de variabilité qui nous sont venues à l'esprit, concernent les sciures. L'utilisation d'un produit naturel expose souvent l'expérimentateur à de fortes variations. Cependant, nous avons utilisé, pour chaque essence, des sciures fabriquées à partir de bois provenant du même tronc. En outre, grâce à la granulométrie homogène obtenue par tamisage, la répartition des sciures à la surface de la limaille était rigoureusement identique, tout comme les autres conditions du milieu réactionnel d'ailleurs.

L'étuve peut aussi être en partie responsable de la variabilité. La répartition de la chaleur n'est pas tout à fait homogène ; puisqu'il n'y a pas de système de chaleur tournante, la zone près de la porte, par exemple, est moins chaude que celles juste à côté des parois chauffantes. Pourtant, les mesures thermométriques prises au centre de l'étuve révèlent une température constante de 45 – 47 °C et le volume de l'étuve est assez réduit. Donc, si des différences de

températures existent, elles ne devaient pas être importantes. Nous n'avons pas réalisé de rotation des échantillons.

La troisième hypothèse est l'infection des échantillons. Celle-ci a évidemment influencé le processus. L'évaluation de son rôle n'est pas commode à réaliser, mais celui-ci est sensible. L'infection du hêtre est manifeste et son influence sur la réaction est perceptible.

La réaction de corrosion est complexe et les équilibres qui s'établissent dans les conditions du milieu favorisent ou non cette réaction. Les facteurs qui influencent la position de l'équilibre sont, par exemple, les concentrations en H^+ dans la solution qui ne sont pas homogènes, les extraits présents qui ne sont pas identiques et qui interagissent différemment avec le fer, le dégagement d'hydrogène qui peut se faire plus ou moins bien à travers la sciure, etc. La cinétique quant à elle est influencée par la température et par la surface réactionnelle qui est la même pour tous puisqu'on utilise la même limaille.

Enfin, nous avons signalé lors de l'analyse théorique que du fer solubilisé précipitait au contact des extraits de plusieurs essences (châtaignier, chêne, robinier,...) pour former des taches noires de tannates de fer. Ces réactions de précipitation ne sont pas étudiées et les informations dont on dispose à leur sujet reposent uniquement sur l'observation des taches qu'elles engendrent. Dès lors, nous ne pouvons ni quantifier ce phénomène, ni indiquer précisément quelles essences y sont particulièrement sujettes. Il semble acquis que les essences ayant une charge importante en tannins sont les principales responsables. Toutefois, de telles réactions de précipitation sont probables pour des essences contenant moins d'extraits. Ceci nous amène à penser que nous perdons une partie de l'information concernant la corrosivité par ces possibles précipitations non mesurables.

3. TEST N°2 : UTILISATION D'UN FONGICIDE

3.1 ELIMINER L'INFECTION

3.1.1 Choix de la technique

Pour résoudre le problème de l'infection apparu dans le premier test, nous avons envisagé plusieurs solutions. La solution à appliquer devait éliminer les champignons sans modifier les propriétés du bois ou du milieu réactionnel.

La stérilisation par étuvage est une bonne technique pour éliminer les champignons, mais risque d'endommager les qualités des bois. La situation est identique pour la technique de rayonnement gamma. Ceux-ci sont très efficaces pour détruire les organismes vivants, c'est une technique de stérilisation d'ustensiles de chirurgie. Seulement, les sciures contiennent des spores, or celles-ci se trouvent à un état de vie très réduit. Dès lors, le rayonnement gamma, pour être efficace, doit être intense et prolongé et cela peut causer une transformation des molécules organiques. Ce traitement n'est pas recommandé, puisque des molécules comme l'acide acétique, très important pour la corrosion, seraient endommagées.

L'application des produits fongicides commerciaux n'est pas non plus la solution idéale. Les molécules actives qui interdisent le développement des champignons ne perturbent pas l'expérience, notamment en raison de leur très faible dosage, mais les autres composants des fongicides commerciaux rendent impropre l'utilisation de la sciure pour l'expérience.

Pour éviter tous ces écueils, nous avons choisi de recourir à une molécule fongicide très efficace : le pentachlorophénol. Son efficacité contre les champignons a été très largement prouvée par un usage courant en préservation des bois pendant de longues années. Ce produit a très rarement été pris en défaut et, de plus, il est bon marché. Son seul défaut, mais non des moindres, est d'être très toxique pour l'environnement ; d'ailleurs, toutes nos éprouvettes ont été collectées pour être traitées. Le PCP a donc été retiré du marché et n'est plus utilisé qu'à des fins scientifiques.

3.1.2 Traitement des sciures

Pour éviter le plus possible les dérèglements dus à la présence d'un autre produit dans les échantillons, nous désirons utiliser le moins possible de fongicide. Un test a été mené sur une durée de cinq jours avec des sciures de mélèze, de manière à déterminer la quantité minimale de

PCP assurant une protection efficace et une perturbation infime. Les sciures sont rapidement lavées avec des solutions contenant 2 %, 5 % et 10 % de sel de pentachlorophénate de sodium, qui est miscible dans l'eau. Ensuite, les sciures sont filtrées, pour encore éliminer plus de PCP de l'échantillon. Les résultats nous révèlent de très faibles quantités de fer solubilisé. Ces valeurs ne montrent pas de corrélation entre le taux de PCP et la quantité de fer solubilisé. Nous remarquons néanmoins une nette diminution par rapport à la solution témoin. En première analyse, nous attribuons cela à l'élimination de l'influence du champignon. Dès lors, nous choisissons la solution à 5 % qui est celle la plus souvent mentionnée dans la littérature. Cette solution est caractérisée par un pH de 9,92.

Tableau 25 : valeurs moyennes de solubilisation du fer pour des essais dont les solutions ont des concentrations en PCP différentes.

Echantillons	Fe ⁺⁺ (ppm)
Solution témoins (5g de limaille et 2 g de sciure)	2,53
5 g de fer, 2g de sciure lavée avec solution 2 %	0,086
5 g de fer, 2g de sciure lavée avec solution 5 %	0,136
5 g de fer, 2g de sciure lavée avec solution 5 %	0,047
5 g de fer, 2g de sciure lavée avec solution 10 %	0,065

Toutes les sciures sont traitées avec une solution de pentachlorophénate de sodium 5 % en poids, puis, elles sont asséchées par filtration de manière à éliminer le sel qui n'est pas absolument nécessaire. Les sciures traitées subissent alors exactement la même expérience que celles du premier test.

Aucun signe d'infection n'a été repéré pendant le déroulement de l'expérience. Nous avons analysé des échantillons de sciures au microscope et ils étaient parfaitement sains.

3.2 RESULTATS

3.2.1 La réaction

La réaction est identique à celle décrite pour le premier test. Nous devons tenir compte de l'introduction du pentachlorophénate de sodium.

3.2.2 Valeurs de solubilisation

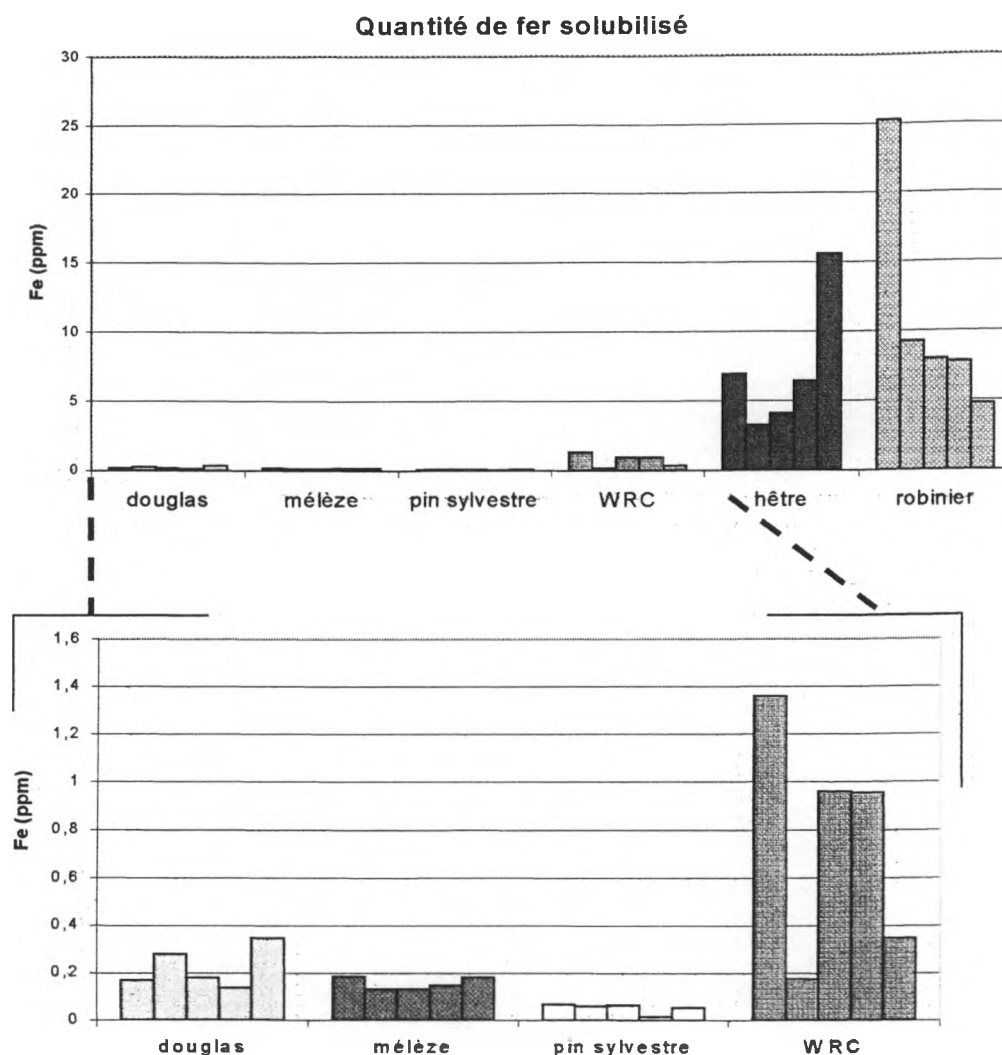


Figure 12 : valeurs de fer solubilisé pour les différentes essences après un traitement avec une solution à 5 % de PCP. Les valeurs sont brutes.

Remarques :

- Nous avons établi ce graphique en utilisant deux échelles de valeurs de fer, de manière à faciliter la lecture pour les quatre premières essences.
- Les valeurs de fer trouvées dans des échantillons de sciure traitée sans limaille sont négligeables : la plus grande valeur est celle du mélèze et est d'à peine 0,027 ppm de fer solubilisé, la plus petite est de 0,003 ppm pour le pin sylvestre.

La première évidence qui transparaît de ce graphe est que la variabilité est encore très marquée. Elle est cependant moindre pour les essences comme le douglas, le mélèze et le pin

3.2.4 Etude de la corrélation avec le pH

Tableau 26 : variations du pH au cours de l'expérience.

Essences	pH moyens témoins	pH moyens tests	Augmentation du pH
Douglas	5,80	7,93	2,13
Mélèze	5,30	7,94	2,64
Pin sylvestre	5,25	7,92	2,67
WRC	4,58	7,47	2,89
Hêtre	6,08	7,54	1,46
Robinier	5,03	7,46	2,43

Comme pour le test précédent, nous avons exprimé les valeurs de fer solubilisé et les valeurs de H^+ consommé lors de la réaction pour tenter de trouver une relation directe.

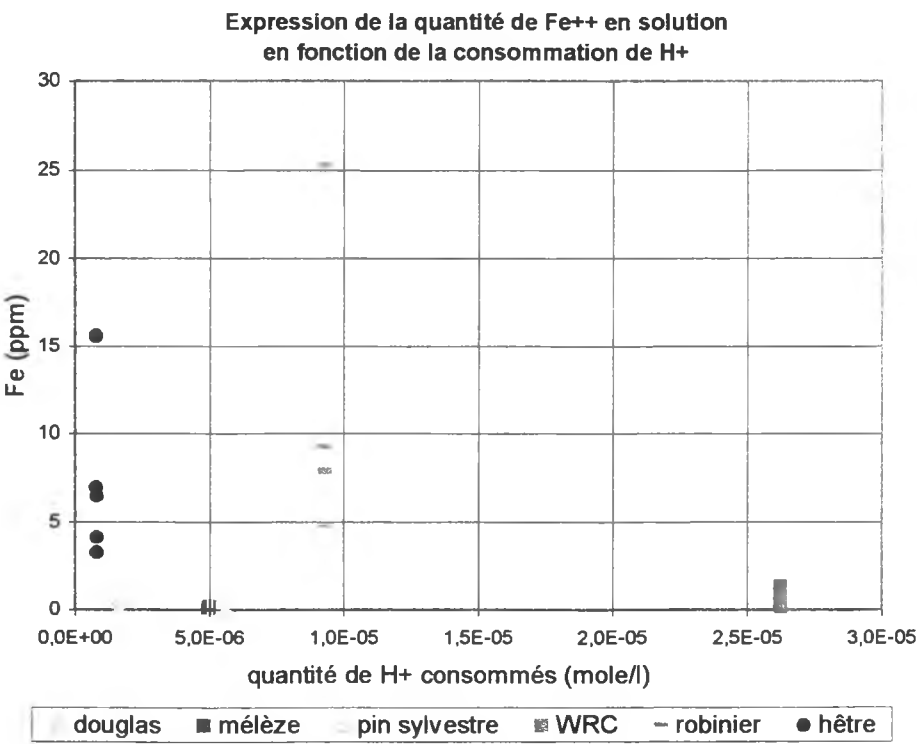


Figure 14 : solubilisation du fer en fonction de la consommation de H^+ pendant la réaction. Toutes les essences y sont représentées.

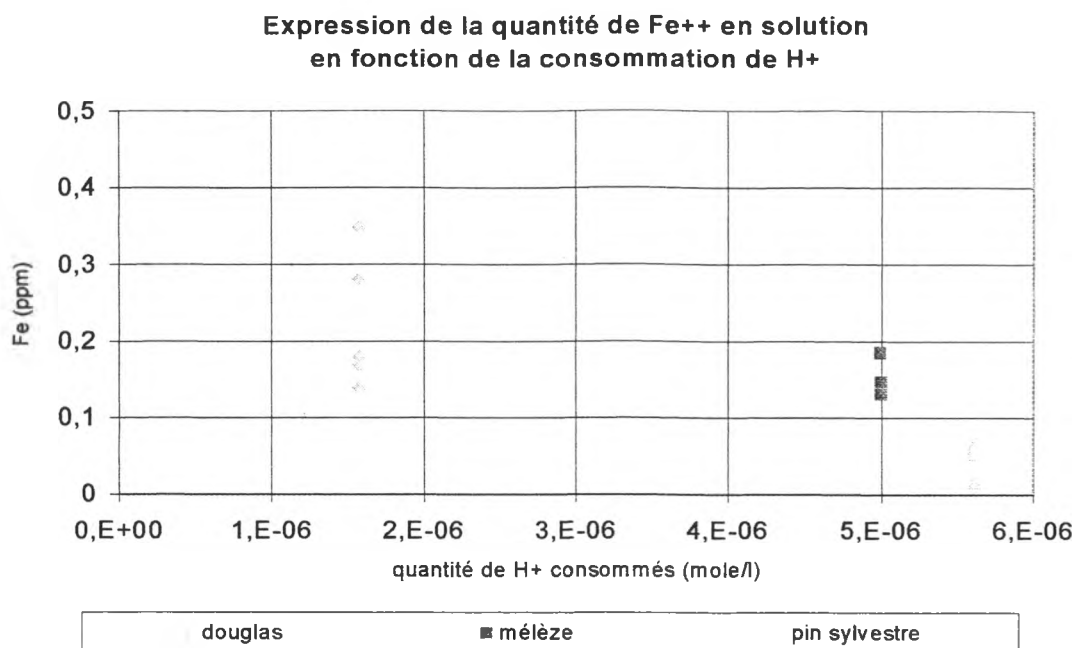


Figure 15 : solubilisation du fer en fonction de la consommation de H^+ pendant la réaction. Ce graphique reprend spécifiquement le douglas, le mélèze et le pin sylvestre.

Du tableau des variations du pH, il ressort que celle-ci a été très forte, bien plus que pour le premier test. Pourtant, elle n'entraîne quasiment aucune corrosion, sauf chez le hêtre et le robinier. L'ordre de grandeur de la consommation en H^+ est très supérieur à celui du Fe^{++} solubilisé.

Le western red cedar est, lui, caractérisé par une très forte variation de pH et une relativement faible corrosivité, moins prononcée que lors du premier test, avec de plus une variabilité importante.

Le robinier et le hêtre sont les deux seules essences à avoir gardé une corrosivité considérable. Dans le cas du hêtre, elle est tout de même plus faible que lors du premier test. L'infection précoce de ces échantillons est probablement encore à l'origine de cette activité.

Le robinier montre un comportement étonnant ; il est le seul à accroître nettement son action corrosive par rapport à la première expérimentation. La quantité moyenne de fer solubilisé était de 3,2 ppm et passe à une valeur de 11,4 ppm en présence de PCP. Nous avons refait une série d'expérimentations pour vérifier cette valeur et nous avons trouvé 12,4 ppm de moyenne (malgré des variations encore fortes). Le robinier est très corrosif dans ces conditions. Cette modification de comportement du robinier n'est certainement pas due uniquement à l'élimination

des champignons. Cette corrosivité accrue pourrait être causée par une interaction des sciures de robinier avec le pentachlorophénate de sodium. En effet, lorsqu'on baigne ces sciures dans une solution de PCP à 5 %, il y a une réaction qui se produit. Elle est matérialisée par la couleur de la sciure qui vire instantanément à un brun-orangé foncé alors que la sciure initiale est vert-jaune. Les tannins du robinier sont très certainement responsables de cette réactivité, mais nous ne connaissons pas de composant du robinier qui soit directement impliqués.

3.2.5 Conclusions et commentaires

L'élément le plus marquant de ce test est le niveau très faible de fer solubilisé retrouvé dans les échantillons. Cela nous a étonné et nous devons trouver une explication.

Tout d'abord, nous avons attribué cette chute des valeurs au contrôle de l'activité fongique, donc à une baisse de la production de protons provenant du métabolisme. Cependant, en comparant avec nos témoins et d'autres valeurs de corrosivité (obtenues avec d'autres types d'expériences), il semblait peu probable que seule la disparition des champignons ait tant d'influence.

Les données dont on dispose nous montrent que cette baisse de corrosivité quasiment généralisée est concomitante à une forte hausse du pH, ce qui est pour le moins paradoxal en vertu des hypothèses que l'on a proposées. De plus, le pH est d'une homogénéité remarquable. Comme le montre le graphique suivant :

pH et quantité de fer solubilisé

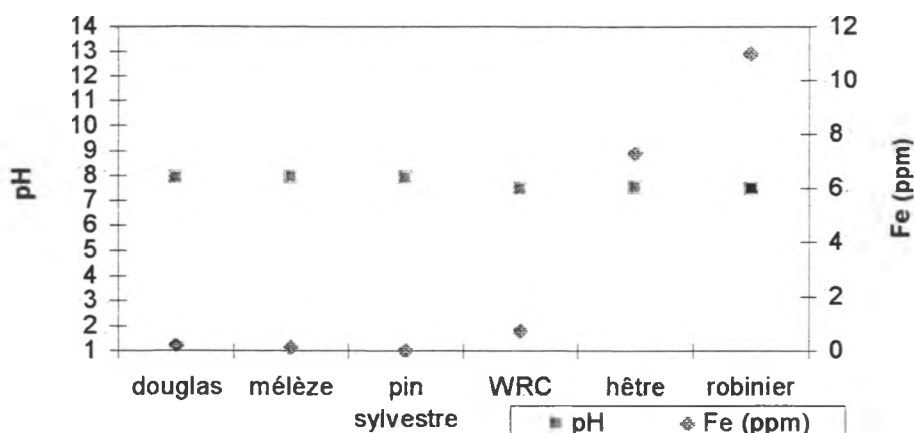
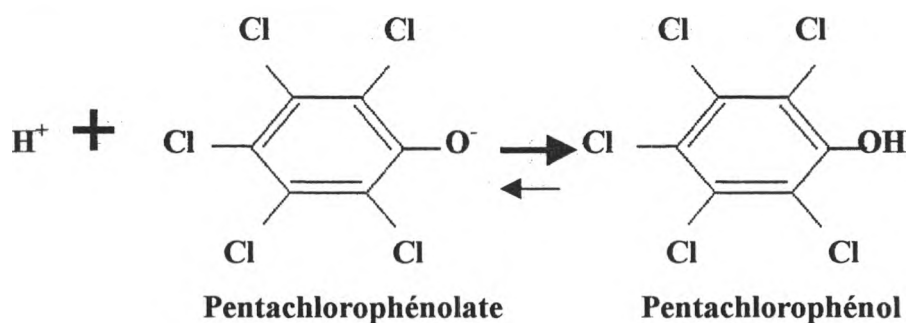


Figure 16 : valeurs moyennes de pH et de fer solubilisé pour toutes les essences.

Cette allure de la courbe de pH est l'illustration de l'action qu'aurait un mélange tampon sur des solutions de pH distincts, comme c'est le cas pour nos solutions réactionnelles.

Outre l'éradication des champignons, la modification majeure des éprouvettes est de contenir du pentachlorophénate de sodium. Ce produit est un sel, amené dans le milieu réactif par la sciure, il se dissocie en phase aqueuse en ions. Les ions phénolates peuvent dès lors réagir avec les protons par une réaction du type :



Le pentachlorophénolate est l'ion résultant de la dissociation du sel de pentachlorophénate de sodium.

Nous comprenons bien, dès lors, que les H^+ qui existent en solution, et qui sont amenés principalement par le bois, réagissent avec l'extrémité O^- du phénolate. Celui-ci joue le rôle de pompe à protons. L'effet tampon est apporté par cette pompe, c'est cette réaction qui stabilise le pH. Précisons que nous ne sommes pas en présence d'un mélange tampon au sens propre. Dans ce cas-ci, nous ajoutons une base (une solution de pentachlorophénate de sodium 5% à un pH = 9,92) dans une solution acide, la solution contenant les extraits du bois. Le pentachlorophénolate va consommer les H^+ formés qui sont mis à sa disposition pour former du phénol.

En outre, nous notons qu'il y a quand même du fer solubilisé, même si, pour certaines essences, c'est en faible quantité. Cela est possible, car les réactions acide – base du PCP et oxydoréduction de la corrosion sont compétitives. De plus, la quantité de Fe^{++} que l'on mesure par notre méthode peut être, par exemple, diminuée par des précipitations d'oxy-hydroxyde de fer. Celles-ci peuvent apparaître à pH = 8, or notre gamme de pH est proche de cette valeur.

Le pH est stable même lorsqu'il y a réaction de corrosion, par exemple celle du robinier, parce que la quantité de H^+ qui y est consommée est faible par rapport au quantité de PCP engagée. Nous avons vérifié l'hypothèse en réalisant des éprouvettes sans limaille pour chaque essence. Les pH sont sensiblement identiques à ceux trouvés dans les échantillons de l'expérience avec la limaille. Dès lors, cela confirme que le pentachlorophénate de sodium consomme la majeure partie des H^+ de la solution.

IV

CONCLUSIONS

La principale difficulté de ce travail réside dans la synthèse de plusieurs disciplines, tant niveau du sujet de l'étude que du public auquel il s'adresse. Nous pensons avoir exprimé clairement la corrosion par les bois de sorte qu'une réflexion quant au choix des matériaux à mettre en œuvre soit possible en connaissance de cause.

Pas plus que nos prédécesseurs qui se sont penchés sur la question, nous n'avons trouvé de moyen expérimental efficace pour refléter fidèlement, de manière quantitative, le comportement corrosif des essences. Nous l'avons signalé, la capacité acide permet d'exprimer, avec des valeurs chiffrées et représentatives, l'action corrosive des essences. Cependant, elle ne permet pas non plus de généraliser les conclusions à toutes les situations

Puisque nous n'avons pas obtenu de résultats chiffrés fiables, nous avons réparti les essences selon plusieurs classes d'action corrosive en interprétant les résultats obtenus.

Tableau 27 : classement des essences selon leur corrosivité.

Essences	Corrosivité
Robinier*	Forte
Hêtre**	Moyenne à forte
Western red cedar	Moyenne
Douglas	Moyenne
Mélèze	Moyenne à faible
Pin sylvestre	Faible

Nous nous basons sur les graphiques présentés en tenant compte de la quantité de fer solubilisé et de toute l'analyse des résultats. Nous avons aussi considéré la possibilité de tacher les matériaux en contact. En effet, l'action corrosive est mesurée par la quantité de fer solubilisé, mais pour un classement utile en construction, il faut aussi tenir compte des dégradations esthétiques. Le pin sylvestre ne colore pas du tout la solution réactionnelle alors que le western red cedar la colore énormément. Des dégradations esthétiques sont donc à craindre avec les bois de cette classe si l'on n'emploie pas de fixations résistantes.

Le robinier* peut avoir une très forte corrosivité quand il est en contact de pentachlorophénate de sodium. Nous ne savons pas pourquoi. C'est une essence fortement

pourvue en tannins et c'est peut être l'un d'eux qui réagit avec le pentachlorophénate de sodium. De prime abord, nous n'avons pas trouvé de réactif simple dans la composition du robinier qui explique aisément son comportement. Il faudrait éprouver de nouveau cette essence, qui par ailleurs commence à se développer.

Le hêtre** se trouve dans la classe la plus corrosive de notre expérience, mais n'oublions pas l'histoire de l'échantillon. Dans la littérature, le hêtre est plutôt renseigné par une action corrosive moyenne à faible. Rappelons également que si nous l'avons choisi, c'est parce que beaucoup d'études utilisent le hêtre et le pin sylvestre comme références. Dès lors, nous avons voulu exploiter ces points de repère. De toute évidence, le hêtre ne sera pas utilisé en extérieur et il est donc moins exposé aux réactions corrosives.

Ces conclusions ne sont valables que dans nos conditions expérimentales ; d'autres paramètres physico-chimiques viennent influencer la réaction complexe de corrosion. Cependant, il est clair que toutes les essences sont potentiellement corrosives, ne serait-ce que par l'eau qu'elles accumulent et mettent en contact avec les fixations.

Les dangers encourus par les accessoires métalliques en aval d'une couverture en douglas sont difficilement évaluables en se basant sur les résultats de nos tests. Nous pouvons affirmer que sa corrosivité est moyenne. Nous savons donc qu'il y aura production d'acide, cependant nous n'avons aucune idée de sa capacité acide.

Une autre observation émanant de nos tests est qu'il faut surveiller plus étroitement les bois échauffés ou ayant subi une autre dégradation fongique. Le cas du hêtre, dans notre expérience, illustre qu'ils sont beaucoup plus prédisposés au développement de réactions corrosives. Nous pouvons ajouter que le processus d'infection est assez rapide, de l'inoculation au développement nuisible. La preuve de cette affirmation est notre échantillon de hêtre qui s'est comporté de manière atypique tout au long des expériences, alors que son exploitation était récente. Cela augmente encore notre souhait de voir les stocks de bois mieux protégés. Cette attention particulière à apporter au bois est valable depuis l'exploitation forestière jusqu'à la mise en œuvre d'un produit en bois. La réputation de durabilité du bois est trop souvent égratignée à cause d'un manque de soins tout au long de la filière de production.

En ce qui concerne la méthode de test, elle doit être améliorée de manière à vérifier si on mesure bien tout le fer solubilisé de l'échantillon métallique de départ. Dans cette expérience,

nous avons parfois des résultats faibles et variables sans pouvoir absolument affirmer que la réaction de corrosion était peu active. Nous mesurons le fer dans la solution, or une proportion variable de fer solubilisé peut être indécélable si elle précipite avec des extraits par exemple. Tout le Fe^{++} n'est dès lors plus dans la solution. Il serait intéressant de peser précisément l'échantillon de fer sur lequel on a réalisé l'attaque et ainsi pouvoir comparer le poids qu'il a perdu et les quantités de cations que la solution a gagnés. Dès lors, l'expérience ne se réaliserait plus sur de la limaille mais avec des languettes métalliques. Celles-ci permettent des manipulations bien plus aisées après l'expérience.

En outre, l'expérience devrait être renouvelée avec un nombre plus important d'échantillons, de sorte qu'il soit possible de réaliser une analyse statistique correcte. Une analyse fine des extraits et tannins qui permettrait de connaître exactement tous les acteurs de la réaction, serait fondamentale. En effet, nous avons remarqué des anomalies qui ne sont expliquées ni par l'action des champignons, ni par l'action chimique du pentachlorophénate de sodium.

Enfin, notons encore que le pentachlorophénate de sodium ralentit fortement l'attaque corrosive. L'utilisation de produits préservants basiques qui consomment les protons pourrait être une solution contre la corrosion par contact direct. Ils feraient office d'inhibiteurs temporaires. Certains produits préservants reçoivent déjà des adjuvants étant vraiment des inhibiteurs, ils ne sont pas à négliger dans certaines conditions. En outre, les inhibiteurs pourraient être efficaces s'ils sont appliqués en quantité importante, juste à l'endroit du contact.

Pour terminer, ajoutons que ce travail est une première approche du phénomène dans de telles configurations expérimentales et que, nous sommes conscients des faiblesses qui affectent les résultats chiffrés obtenus. Toutefois, ils ont permis de mettre en lumière certaines observations utiles pour le développement de l'utilisation du bois en construction.

Les résultats pourraient être avantageusement retouchés en apportant des modifications à la méthode expérimentale, notamment par les améliorations que nous avons recommandées. En outre, il faudrait continuer à faire progresser la connaissance des réactions corrosives impliquant les tannins. Ce préliminaire pourrait servir de base à une expérimentation future.

V

INDEX BIBLIOGRAPHIQUE

INDEX BIBLIOGRAPHIQUE

- Asbl Bois.1997. Pratique du Bois : 35 Essences et leurs Fiches Techniques. ASBL BOIS, Bruxelles, 128 p.
- AUCOUTURIER M., PENELLE R. 1995. Les Traitements de Surface. Encyclopédie Universalis Multimédia, Paris, CD-Rom, 5p.
- BARTHES R. 1957. Mythologie. Seuil, Paris.
- BENOIT Y. 1997. Le Guide des Essences de Bois. Centre Technique du Bois et de l'Ameublement, Eyrolles, Paris, 127p.
- BERGLUND F., WALLIN T. 1978. Meddelese Reports. EMPA Dübendorf, Non édité.
- C.I.C.L.A.. Le Cuivre et ses Alliages : Métallurgie, Application. Centre d'Informations de Cuivre, Laiton et Alliages, Paris, 1989.
- CALVI. 25 mars 1999. Cours - conférence concernant les qualités du matériau bois. Louvain-la-Neuve.
- CAMPREDON J. 1982. Le Bois. Collection Que Sais-je ?, Presses Universitaires de France, Paris, 6^{ème} éd.
- CAULLY P. 1993. Le Bois, un Matériau pas comme les Autres. Le Courrier du Bois, 102 :3-31.
- Collectif. Un Esprit Sain dans un Corps Sain dans une Maison Saine. Association pour la Santé dans la Construction et l'Habitat, Antwerpen, 139p.
- COLOMBIER L., HENRY G. 1995. La Technologie de l'Acier. Encyclopédie Universalis Multimédia, Paris, CD-Rom, 23p.
- CORE H.-A. ; COTE W.-A., DAY A.-C. 1979. Wood Structure and Identification. Syracuse University Press, 2^{ème} éd.
- DAGOGNET F. 1995. Les Matériaux. Encyclopédie Universalis Multimédia, Paris, CD-Rom, 7p.
- DE CUYPER K., DUGNIOLLE E., LEFEVRE A. 1990. De 6000 Corrosion d'Accessoires Métalliques de Toitures en Aval d'Etanchéités Bitumineuses (2^{ème} Partie). Centre Scientifique et Technique de la Construction Rapport d'Etudes, Bruxelles.
- DILLON C.-P. 1982. Forms of Corrosion. Recognition and Prevention. National Association of Corrosion Engineers, USA, 2^{ème} éd., 116p.

- DOME B. et LEJEUNE G. 1993. Couverture en Western Red Cedar et Accessoires en Cuivre. Le Courrier du Bois n°102 p.29.
- DREULLE P., DREULLE N., WOJCIEKOWSKI B. 1995. Le Zinc. Encyclopédie Universalis Multimédia, Paris, CD-Rom, 6p.
- DUFÉY J. 1996. Eléments de Chimie Physique et Analytique première partie. Diffusion Universitaire CIACO, Louvain-la-Neuve.
- DUGNIOLLE E. 1988. Cours – Conférences n°51 : La Corrosion et les Tubes Métalliques Utilisés pour la Distribution d'Eau dans les Bâtiments. Centre Scientifique et Technique de la Construction, Bruxelles, 54 p.
- DUGNIOLLE E. 1989. Corrosion d'Accessoires Métalliques Situés en Aval d'Étanchéités Bitumineuses. Centre Scientifique et Technique de la Construction, Revue n° 3-4 Cahier n°3.
- ERNOUT A. ; MEILLET A. 1979. Dictionnaire Etymologique de la Langue Latine : Histoire des Mots. Klincksieck, Paris, 4^{ème} éd.
- F.E.R.S.I.C.-S.O.F.Z.A.N.. Classeur Infoboïs Belge. Fonds d'Etudes et de Recherches des Scieries et des Industries Connexes a.s.b.l., Bruxelles.
- FONTANA M.-G. 1975. The Eight Form of Corrosion. Process Industries Corrosion, National Association of Corrosion Engineers, pp. 1-39.
- GELLINS P.L. 1985. Introduction to Corrosion Prevention and Control. Coronet Books, Philadelphie.
- GRAHAM R.D., WILSON M.M., OTENG-AMOAKO A. 1976. Wood-Metal Corrosion an Annotated Survey. Research Bulletin, Forest Research Laboratory School of Forestry Oregon State University, Corvallis, 34 p.
- HACHE A. 1966. La Corrosion de Métaux. Collection Que sais-je ?, Presse Universitaire de France, Paris, 126p.
- HART H., CONIA J.-M. 1993. Introduction à la Chimie Organique, Interéditions, Paris, 567 p.
- JACOB P. 1999. Communication personnelle. Visite du site de production Biospeedhome.
- JOHN V, GOODWIN T.J., WALKER E.F. 1991. Environemental Monitoring Methods. Rapport d'Etude, British Steel Document Welsh Technology Centre, Glamorgan, Non Edité.
- KAGE I., FUJITA S. 1998. In Situ Corrosion Monitoring of Steel Framed House by Using ACM Sensor with a Fe-Ag Galvanic Couple. NKK Corporation, Proceedings Galvatech, Japan, pp.394-398.

- KOLJO B. 1957. Untersuchungen über die Holverfärbung durch Eisen. Holz als Roh- und Werkstoff, pp. 496-499.
- KUBINSKY E., IFJU G. 1973. A Simple and fast Method of pH Measurement for Wood. Forest Product Journal, Vol.23, n°2 pp.54-56.
- KUBLER H. 1992. Corrosion in Wood Construction Interfaces. Technical Notes, Forest Products Journal, Vol 42 n°1, pp.47-49.
- LE GOVIC C. 1995. Les Assemblages dans la Construction en Bois. Centre Technique du bois et de l'Ameublement et le Comité National pour le Développement du Bois, Paris, 67p.
- LECLERCQ A., SEUTIN E. 1989. Les Ennemis Naturels du Bois d'œuvre. Les Presses Agronomiques de Gembloux, 134 p.
- LYON S.B. 1999. Senior Lecturer in Corrosion Science and Engineering, University of Manchester Institute of Science and Technology, Communication Personnelle.
- MORGAN J.-W. 1983. Aspect of Wood Protection Research :Trussed Rafter Roofs. Princes Risborough Laboratory, BRE CP5/83.
- NARAYANAMURTI D. 1957. Die Bedeutung der Holzextrakstoffe, Holz als Roh- und Werkstoff, pp. 370-380.
- Nations Unies. 1995. Produits Forestiers : Revue Annuelle du Marché 1994-1995. NationsUnies et FAO, Bulletin du Bois-Volume XLVIII, n°3.
- ORMSTAD E. 1973. (Corrosion of Metal in Contact with Pressure Treated Wood.), Norwegian Institute of Woodworking and Techniques, Translated by Alf Bredland for U.S. Forest Product Laboratory, Madison, 8 p.
- PINION L.C. 1970. The Degradation of Wood by Metal Fastening and Fittings. Timberlab paper, Forest Products Research Laboratory n°27, Princes Risborough, England, 13p.
- POURBAIX M. 1975. Leçons en Corrosion Electrochimique. Centre belge d'étude de la corrosion CEBELCOR, Bruxelles, deuxième édition, 377 p.
- RICHNER P. 1996. Korrosion von Metallteilen im Holzbau. EMPA Dübendorf, non édité, 11p.
- SANDERMANN W., ROTHKAMM M. 1959. Über die Bestimmung der pH : Werte von Handelshölzern und Bedeutung für die Praxis. Holz als Roh- und Werkstoff, pp. 433-439.
- SANDOZ J.L., KRATZEISEN S. 1999. Jupit'Air : le Velcro du bois. E.P.F.L.-IBOIS, Journal de la Construction N°3, Lausanne. 7p.

- SAVARD J., ANDRE A.-M., CAUMARTIN L. 1963. Action des bois sur le fer. *Revue Bois et Forêts des Tropiques*, n°91, Septembre-Octobre, pp. 41-52.
- SCHOFIELD M.J. 1985. *Corrosion and Degradation of Building Materials and System Building*. University of Manchester Institute of Science and Technology, London Press Center, London EC4.
- SMULSKI S. 1996. *Preservative Treated Wood*, Wood Science Specialists Inc., Massachusetts, 7p.,
Adresse URL : <http://ci.mond.org>.
- STEVENS M. 1993. Justification Technologique de l'Utilisation de Bois en Menuiseries extérieures, *Le Courrier du Bois*, 103 : 26-32,
- SUTTIE E.D. 1997. Novel Wood Preservatives. *Chemistry and Industry Issue 18*, 10p.,
Adresse URL : <http://ci.mond.org/9718/971811.html>.
- TALBOT J., BERANGER G. 1995. *La Corrosion*. Encyclopédie Universalis Multimédia, Paris, CD-Rom, 5p.
- VEROUGSTRAETE P. 1996. *Bardages en Bois : Espèces et Pose*. Asbl Bois, Pratique Bois N°2, 8p.
- VITTONE R. 1996. *Bâtir : Manuel de la Construction*. Presse Polytechniques et Universitaires Romandes, Lauzanne, 945 p.

VI

ANNEXES

LISTE DES ANNEXES

Annexe I : Les bardages en bois : le système Jupit’Air

Annexe II : Les assemblages dans la construction en bois

Annexe III : Les fermes de toitures : influence du traitement CCA

Annexe IV : Résultats des tests de certification

Annexe V : Résultats du test N°1 : infection fongique

Annexe VI : Résultats de test N°2 : utilisation d’un fongicide

Annexe VII : Photographies

LES BARDAGES EN BOIS : LE SYSTEME JUPIT' AIR

Ce texte consiste en une synthèse des publications « Bardages en Bois : Espèces et Pose » de Verougstraete P. et « Jupit' Air : le Velcro du bois » de Sandoz J.L et Kratzeisen S.

Le revêtement de façades à l'aide de planches en bois massif est une technique très répandue de par le monde, ce qui témoigne de l'intérêt et de la durabilité du système. Dans la construction moderne, le bois est très apprécié pour ses propriétés. De plus, c'est un matériau d'architecture dont la diversité de teintes, de dessins et de formes lui confère des possibilités quasiment illimitées. Cependant, les caractéristiques du bois imposent aux concepteurs de prendre quelques mesures dès le stade de la réflexion. Elles concernent le choix des essences, des techniques de montage, la finition et l'entretien. Ce sont ces choix de départ qui déterminent pour une grande part la durabilité du recouvrement.

Le bardage est constitué d'un ensemble de lames de bois qui peuvent être posées horizontalement, verticalement ou diagonalement ; l'association de plusieurs de ces modes de pose crée des motifs variés. L'important au niveau de la durabilité est l'évacuation efficace de l'eau.

Nous pourrions présenter le panel de lames ou l'ensemble des finitions mais c'est surtout au niveau sur choix des essences et des fixations que nous allons nous concentrer.

Les espèces de bois

Les espèces les plus couramment utilisées en bardage sont le western red cedar, le douglas, le pin et l'épicéa. On sélectionne ces essences pour répondre à des critères de durabilité, de facilité d'entretien ou encore de coût réduit. Des espèces plus lourdes sont aussi utilisées. Ce sont le plus souvent des espèces tropicales qui servent principalement pour de petites surfaces. Sur les foires d'exposition et chez quelques importateurs de bois, il est possible de trouver du robinier, mais là aussi, il ne servira que sur de petites surfaces en décoration. En effet, les grandes longueurs ne sont pas courantes pour cette essence et la disponibilité n'est pas encore optimale, son emploi reste encore très confidentiel. Pourtant, ce bois est réputé et très durable. La qualité de durabilité est un facteur clé dans le choix des essences, car les bardages sont très exposés aux intempéries puisqu'ils servent à protéger les constructions contre celles-ci. Les bois n'ont pas tous la même durabilité. Pour l'emploi en recouvrement, les essences sont classées

selon la durabilité naturelle. Il faut tenir compte des classes de risques (de I à V) pour sélectionner une espèce de bois en fonction de son lieu de service. Certaines essences seront protégées par elles-mêmes et d'autres nécessiteront un traitement en profondeur ou de surface. Nous l'avons vu, les traitements ont parfois une influence sur la corrosion. Nous devons également nous souvenir que la durabilité des essences repose sur leur charge en éléments répulsifs pour les insectes et les champignons ; on constate que plus le contenu cellulaire est important, plus la durabilité est élevée. Ce contenu cellulaire, principalement les tannins, est toutefois néfaste pour le comportement des fixations.

Les fixations

Les bois ayant une durabilité élevée sont, nous l'avons signalé, propices au développement de réactions de corrosion. Il faudra prendre des mesures préventives et utiliser des fixations en acier inoxydable dans les cas d'utilisation du western red cedar, du merbeau, de l'afzelia, de l'iroko, du chêne.

En outre, les connexions entre la pièce de bois et la fixation représentent un point de sensibilité très important de l'ensemble du système de protections constructives (protection contre les intempéries, pentes du toit et des gouttières, ventilation, etc.). En effet, elles génèrent deux types de problèmes classiques :

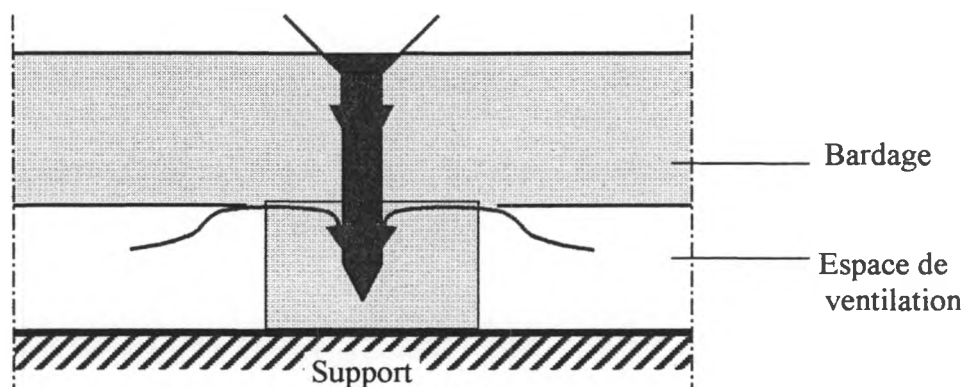


Figure A1 : mode de pénétration de l'eau dans le bois le long d'une fixation (clou ou vis)

- la conductivité de l'eau par capillarité qui amène l'eau au cœur de la pièce de bois en suivant la fixation.

- la conductivité de l'eau par capillarité à l'interface, entre les pièces de bois assemblées, ce qui amène l'eau au niveau de la fixation qu'elle suit comme dans le premier cas.

Ces deux difficultés engendrent des problèmes de durabilité des systèmes. L'eau permet le développement des moisissures et aussi de la corrosion. Le danger de corrosion peut être contrôlé en utilisant des fixations résistantes, mais de toute manière si le bois pourrit autour d'elles, la fonctionnalité sera perdue tout comme s'il y avait eu corrosion. Il existe plusieurs solutions de traitements chimiques pour empêcher la pourriture et des solutions pour éviter à l'eau de rentrer, comme des peintures etc.

Un nouveau système de connexion fixe les bois sans laisser apparaître les fixations. Il est très polyvalent et peut s'appliquer aux bardages, aux recouvrements de terrasse, aux mobiliers urbains, etc. Ses concepteurs le nomme le « velcro du bois », car il est basé sur le même principe. Il s'agit d'un système de double cale emboîtable qui place l'assembleur derrière le bois. Les vis ne sont donc pas exposées. On fixe une partie du système sur un support et l'autre partie est vissée dans le bois, les cales s'emboîtent par un ensemble d'entures multiples et fermées par une sorte de clips. L'étanchéité de ce connecteur est assurée par une barrière en néoprène.

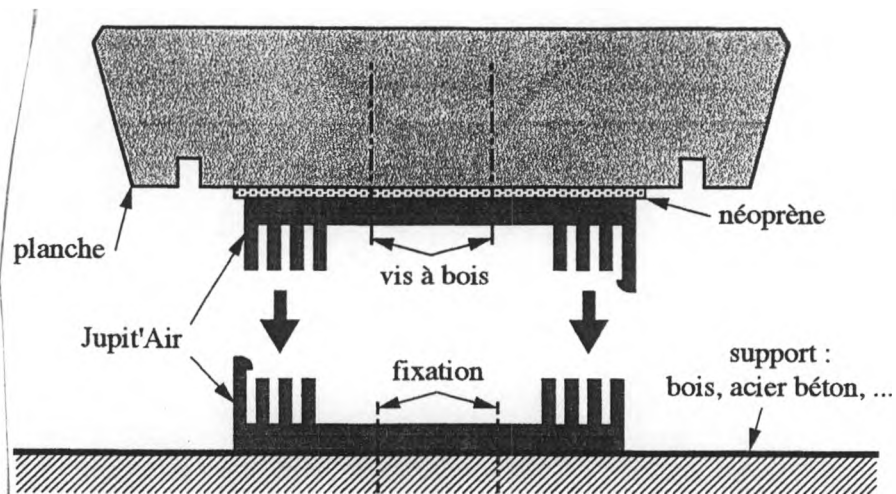


Figure A2 : principes constructifs de la fixation par le système Jupit'Air.

Ce principe de fixation permet les mouvements d'eau et d'air pour ventiler. Le fait que les vis ne soient plus apparentes réduit les dangers de pénétration d'eau par capillarité, ce qui améliore la durabilité du système vis-à-vis des champignons et, bien sûr, diminue les risques de corrosion.

LES ASSEMBLAGES DANS LA CONSTRUCTION EN BOIS

*Ce texte consiste en une synthèse de la publication
« Les assemblages dans la construction en bois » de C. Le Govic.*

Les assemblages sont des éléments capitaux pour la pérennité des constructions, tout autant que le choix des matériaux ou la conception de l'ensemble. Les trois facteurs sont intimement liés l'un à l'autre, mais une erreur de conception ou une incompatibilité entre deux matériaux sera toujours perceptible aux assemblages. Ceci souligne encore la sensibilité de ces points.

Définition

Un assemblage est tout dispositif permettant d'assurer la liaison entre les barres ou les composants d'une structure, ou encore l'ensemble des moyens par lequel on met en liaison des éléments d'une construction. En effet, une construction est un système composé de sous-ensembles ; on y distingue l'adaptation, l'enveloppe, la structure, la partition, les équipements et le parachèvement.

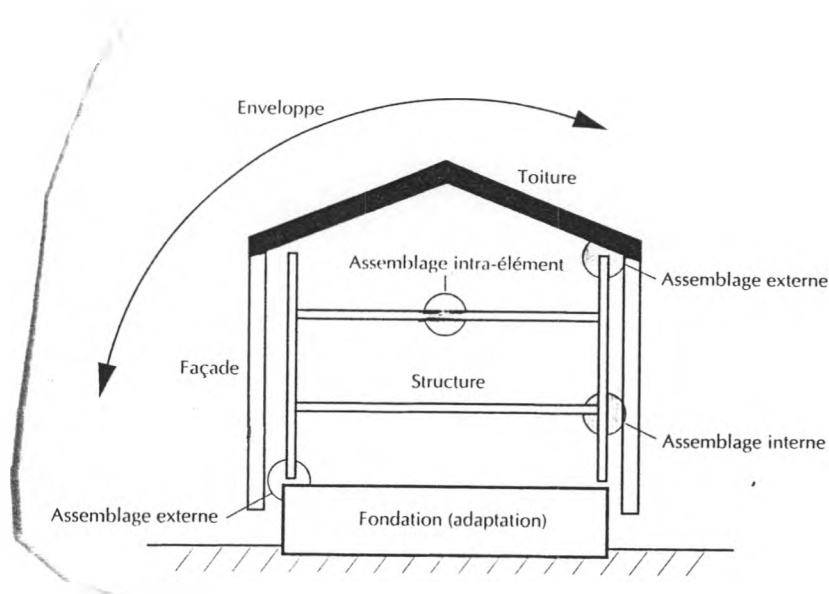


Figure A3 : les différents sous-ensembles d'une construction et les types d'assemblage [Le Govic, 1995].

Types d'assemblages

On peut discerner trois types d'assemblages :

- l'assemblage intra-élément, qui permet de réaliser un élément préfabriqué à partir des matériaux. Il associe du bois avec du bois, un matériau dérivé du bois ou des éléments métalliques.
- l'assemblage interne, qui met en continuité les différents éléments à l'intérieur d'un même ensemble fonctionnel.
- l'assemblage externe, qui assure la liaison entre des éléments d'ensembles fonctionnels différents ; cet assemblage correspond très souvent à l'assemblage du bois sur des éléments métalliques et à la liaison d'éléments métalliques sur du béton.

Fonctions mécaniques des assemblages

L'analyse fonctionnelle de l'assemblage bois permet de distinguer 5 fonctions différentes.

La première fonction remplie par ces assemblages est la transmission des efforts d'un élément en bois vers un autre élément qui peut être en bois, métallique ou une résine . On distingue les organes et les matériaux d'assemblage (adhésifs uniquement) qui peuvent assurer seuls la transmission par des efforts dans les pièces assemblées (clous, broches, aiguilles, goujons), les assembleurs qui transmettent les efforts mais ne peuvent assurer seuls cette fonction et les connecteurs métalliques qui sont constitués d'organes métalliques de type tige et solidarisés de manière irréversible à des plaques métalliques (ils remplissent également une autre fonction, celle de répartir les efforts entre les organes métalliques).

Suivant leur deuxième fonction, ils répartissent et transmettent les efforts entre les organes ou les matériaux d'assemblage situés dans les différentes pièces assemblées, tels les goussets, qui ne peuvent pas transmettre seuls les efforts entre les éléments.

Ils servent également à maintenir le dispositif d'assemblage. Cette fonction est remplie par les organes d'assemblage (dans le cas des assemblages bois sur bois, il s'agit souvent de boulons) ; ils peuvent servir à faciliter ou garantir la mise en œuvre correcte du système d'assemblage (comme les broches de positionnement).

Les deux dernières fonctions visent à accroître l'efficacité globale de l'assemblage : l'une est de supprimer les déplacements entre les organes d'assemblage et le bois, ce qui permet d'augmenter la rigidité globale de l'assemblage (résines diverses telles la résine de béton, le mortier à haute résistance,...) et les adhésifs ; l'autre consiste à renforcer localement le bois, à augmenter sa résistance à la traction transversale et, dans une moindre mesure, au cisaillement (adhésifs et tissus de fibres de verre collé).

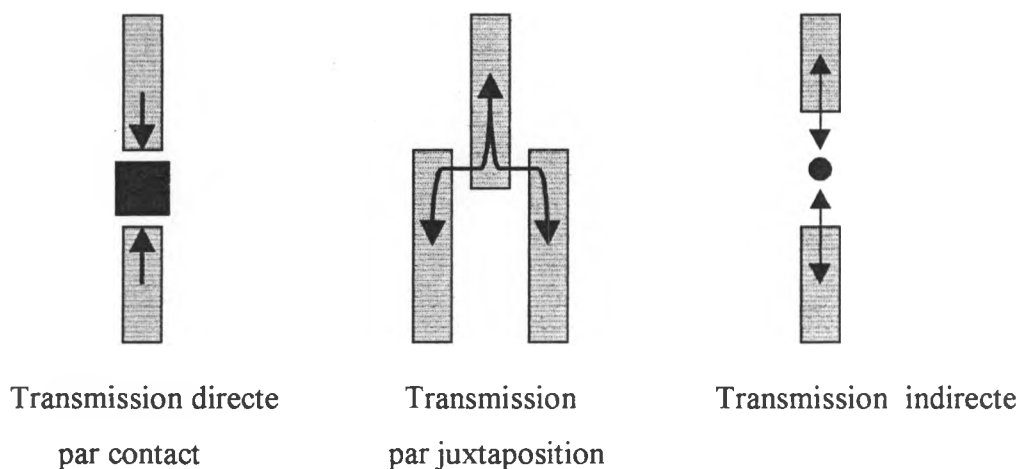


Figure A4 : principes de transmission des efforts dans les assemblages

Trois types de transmission sont possibles :

- la transmission directe, lorsqu'il n'y pas d'assemblage entre les pièces de bois ; c'est le principe de la compression directe qui est appliqué dans une simple compression par contact (ou à la rigueur dans des efforts tranchants et des moments perpendiculaires à la surface concernée).
- la transmission indirecte, quand il y a une surface de recouvrement commune à toutes les pièces assemblées
- la transmission indirecte, quand il n'y a pas de surface de recouvrement commune à toutes les pièces assemblées.

Ces deux derniers types de transmission sont rencontrés dans le cas d'efforts normaux (de traction et de compression), d'efforts tranchants et de moments.

Les assemblages remplissent aussi certaines fonctions secondaires, telles que la résistance au feu, la durabilité et l'esthétique.

Moyens et systèmes d'assemblage

Les quatre modes d'assemblage, classés selon les procédés auxquels ils font appel, sont les suivants :

Assemblage bois sur bois

Assemblage mécanique

Assemblage par collage

Assemblage métallo-collé

Assemblages bois sur bois

La liaison entre les pièces s'y fait par simple contact, sans organe complémentaire pour transmettre les efforts ; ce système s'appuie donc sur le principe de transmission directe des efforts (effort de compression). Ce type d'assemblage est souvent rencontré dans les structures traditionnelles de charpentes, bien qu'il présente des inconvénients (nécessité d'un usinage précis, affaiblissement des éléments par réduction de section conduisant à de médiocres performances).

On rencontre, dans les assemblages bois sur bois, plusieurs modes de mise en œuvre :

- l'embrèvement, lorsqu'on utilise une liaison pour des pièces sollicitées en compression
- le contact « par bois dur » ; parfois, on utilise un élément particulier en bois dur pour assurer la transmission des efforts de compression ; on peut insérer un matériau de fretage dans le jeu entre deux pièces pour supprimer le jeu entre celles-ci.
- Le trait de jupiter permet de transmettre les efforts de traction, malgré une forte réduction de section, donc de performance

Assemblages mécaniques

Ils sont classés selon les éléments d'assemblages qui peuvent y être utilisés :

- éléments mécaniques de type tige (vis, aiguilles, pointes, boulons, broches,...).

Attention, pour les pointes épaisses, un préperçage en atelier peut être utile. Il a deux

avantages : il définit un gabarit pour la mise en œuvre et annule les risques de fissuration du bois.

- assembleurs ou éléments mécaniques de type circulaire (goujons annulaires, anneaux et crampons). Le principe de transmission des efforts auquel ces éléments mécaniques font référence est le principe de juxtaposition des pièces.
- connecteurs ou éléments d'assemblages de type plaque ; ce sont des plaques métalliques sur lesquelles sont solidarisées de manière irréversible des dents par estampage ou des tiges par soudage.

Assemblage collé

Ce système n'est pas beaucoup utilisé en Europe mais il a un fort potentiel de développement. Ces assemblages agissent par transmission directe ou indirecte.

Assemblages métallo-collé

Pour réaliser ce type d'assemblage, les adhésifs employés sont les résines époxydiques ainsi que les polyuréthannes et les résorcinesphénoliques. Deux classes d'assemblages métallo-collés existent :

- assemblage métallo-collé par des tiges filetées collées, mais pour cela il faut un bon accrochage de l'adhésif sur le bois et le métal, et un joint mince d'épaisseur constante
- assemblage métallo-collé de type broché-collé

LES FERMES DE TOITURES : INFLUENCE DU TRAITEMENT CCA

Une étude de Morgan [1983] montre que la corrosion est plus avancée dans les fermes ayant été traitées aux CCA que dans celles non traitées; en outre, l'importance de la corrosion semble ne pas être en rapport avec l'âge des constructions. Ceci prouve bien l'importance du soin lors de la mise en œuvre, puisque la dégradation est plus que probablement due au fait que l'attaque principale s'est produite au moment de l'érection du toit. Cette théorie est confirmée dans certains cas par la forme des fermes et des taches de corrosion qui montrent que l'humidification s'est produite sur le chantier avant la mise en place.

Dans la même étude, on peut suivre un tour d'horizon des entreprises produisant des fermes de toitures. Nous avons relevé trois paragraphes permettant d'avoir une idée plus précise du risque encouru lors de l'utilisation de sels CCA.

Premièrement, une série de 48 toits ont été étudiés dans le but de déterminer le contenu en humidité des chevrons, 85% de ces toits présentaient une humidité inférieure ou égale à 15% et ne courent aucun risque de corrosion. Le pourcentage de toits plus humides, qui présentent un risque de corrosion, a été observé souvent dans les régions côtières de l'Angleterre. Ils sont tous caractérisés soit par un manque évident de ventilation, soit par des fuites qui causent bien évidemment des points d'humidité localisés. Ceci montre bien l'importance de la ventilation et du soin à apporter aux constructions.

Sur 60 sites de construction, toujours en Angleterre, Morgan a mesuré les contenus moyens en humidité des fermes. Dans 20 cas, les fermes présentaient des taux d'humidité allant jusqu'à 30%, ce qui est une valeur excessive par rapport aux 22% maximum autorisés. Dans certains cas, il a pu prouver que cette humidité excédentaire provenait uniquement d'un stockage inadéquat, sur l'aire de production ou sur le chantier de construction.

La dernière constatation chiffrée que l'on trouve dans cette étude est que 8% seulement des sites présentaient des conditions de stockage adéquates pour les fermes, c'est-à-dire posées sur un support et couvertes d'une bâche étanche.

La conséquence de ces observations est que l'augmentation observée de la corrosion par des traitements aux sels CCA est en réalité principalement due à un stockage incorrect, à des mises en œuvre déficientes et une ventilation insuffisante. Ces deux dernières causes entraînent une humidité importante des boiseries, responsable de la corrosion, mais aussi des dégradations de certains revêtements en plâtre, par exemple de ceux en contact avec les fermes. Cette dégradation est accentuée dans les fermes non traitées par le danger des attaques fongiques. Cette étude ne remet bien sûr pas en cause l'augmentation sensible de la conductivité des bois due au traitement par ce sel. Cependant, il faut remarquer que c'est l'association de ce sel et de pratiques peu favorables qui crée le danger, et non pas le traitement seul.

Cette étude remonte à plus de dix ans et nous savons que bien des choses ont été améliorées. Pourtant, des cas de réhumectations sur chantiers sont encore possibles aujourd'hui. Cependant, il faut remarquer que les constructions qui utilisent ce type de fermes se réalisent de plus en plus vite ; les bois sont dès lors très peu en contact avec les conditions atmosphériques.

La reprise d'eau est bien souvent moins importante que celle observée lors du traitement avec les produits de préservation en phase aqueuse. On veillera à ce qu'il y ait une phase de séchage après le trempage.

RESULTATS DES TESTS DE CERTIFICATION

Certification de la filtration

Tableau A1 : quantité de fer trouvée sur le filtre après le passage de 20 ml de solution réactionnelle des échantillons

	Fer sur le filtre (ppm)
douglas	0,081
mélèze	0,011
pin sylvestre	0,041
WRC	0,029
hêtre	0,046
robinier	0,033

Certification du stockage au réfrigérateur

Voici les résultats du test de certification pour le stockage au réfrigérateur :

Tableau A2 : comparaison des quantités de Fe++ trouvées dans des solutions réactionnelles avant et après une semaine de stockage au réfrigérateur.

	N°	Fe++ avant stockage (ppm)	Fe++ après stockage (ppm)	différence (%)
douglas	1	1,13	1,19	5,31
	2	2,43	2,50	2,88
	3	1,54	1,51	-1,95
mélèze	1	2,03	2,10	3,45
	2	2,42	2,47	2,07
	3	4,65	4,65	0,00
pin sylvestre	1	0,854	0,881	3,16
	2	1,45	1,47	1,38
	3	1,41	1,42	0,71
western red cedar	1	1,85	1,82	-1,62
	2	2,82	2,74	-2,84
	3	7,67	7,40	-3,52
hêtre	1	3,66	3,61	-1,37
	2	3,96	3,79	-4,29
	3	31,40	31,50	0,32
robinier	1	32,60	32,00	-1,84
	2	21,40	20,30	-5,14
	3	5,12	5,00	-2,34

RESULTATS DU TEST N°1 : INFECTION FONGIQUE

Tableau A3 : résultats numériques du test présentant une infection fongique

	N°	Fe ⁺⁺ (ppm)	pH	Δ pH	H ⁺ (mole.l ⁻¹)
douglas	1	2,85	6,37	0,57	1.10 ⁻⁰⁶
	2	3,45	6,24	0,44	1.10 ⁻⁰⁶
	3	3,03	6,32	0,52	1.10 ⁻⁰⁶
	4	4,62	6,33	0,53	1.10 ⁻⁰⁶
	5	1,29	6,24	0,44	1.10 ⁻⁰⁶
mélèze	1	8,37	5,95	0,65	4.10 ⁻⁰⁶
	2	14,6	5,86	0,56	4.10 ⁻⁰⁶
	3	7,9	5,72	0,42	3.10 ⁻⁰⁶
	4	10,1	5,94	0,64	4.10 ⁻⁰⁶
	5	12,3	5,76	0,46	3.10 ⁻⁰⁶
pin sylvestre	1	8,92	6,15	0,90	5.10 ⁻⁰⁶
	2	9,16	6,1	0,85	5.10 ⁻⁰⁶
	3	7,53	6,1	0,85	5.10 ⁻⁰⁶
	4	9,52	6,31	1,06	5.10 ⁻⁰⁶
	5	9,8	6,18	0,93	5.10 ⁻⁰⁶
western red cedar	1	4,07	6,37	-	-
	2	4	5,39	0,81	2.10 ⁻⁰⁵
	3	7,26	5,33	0,75	2.10 ⁻⁰⁵
	4	7,63	5,57	0,99	2.10 ⁻⁰⁵
	5	8,84	5,64	1,06	2.10 ⁻⁰⁵
hêtre	1	12,5	6,21	0,13	2.10 ⁻⁰⁷
	2	24,3	6,17	0,09	2.10 ⁻⁰⁷
	3	20,5	6,55	0,47	6.10 ⁻⁰⁷
	4	28,3	6,69	0,61	6.10 ⁻⁰⁷
robinier	1	2,68	6,19	1,16	9.10 ⁻⁰⁶
	2	3,16	6,1	1,07	9.10 ⁻⁰⁶
	3	2,7	5,83	0,80	8.10 ⁻⁰⁶
	4	4,24	5,85	0,82	8.10 ⁻⁰⁶

Tableau A4 : valeurs moyennes

Moyennes	pH	Fe⁺⁺ (ppm)
douglas	6,30	3,05
mélèze	5,85	10,65
pin sylvestre	6,17	8,99
WRC	5,66	6,36
hêtre	6,41	21,40
robinier	5,99	3,20

Légende des colonnes :

Fe⁺⁺ représente la quantité de fer solubilisé trouvé dans les solutions réactionnelles.

pH correspond à la mesure du pH effectuée sur les éprouvettes après filtration et avant analyse à la torche à plasma. Les mesures ont été effectuées à température ambiante.

Δ pH correspond à la différence de pH observée dans la solution réactionnelle, entre le début et la fin de l'expérience. Le pH initial est toujours la valeur moyenne de pH trouvée pour cette essence pour les témoins.

La colonne **H⁺** représente la quantité de H⁺ consommés, exprimée en mole.l⁻¹, pendant la durée de l'expérience. Elle est calculée sur base de la formule du pH.

RESULTATS DU TEST N°2 : UTILISATION D'UN FONGICIDE

Tableau A5 : résultats numériques du test lors duquel nous utilisons un fongicide

	N°	Fe ⁺⁺ (ppm)	PH	Δ pH	H ⁺ (mole.l ⁻¹)
douglas	1	0,169	7,95	2,15	2.10 ⁻⁶
	2	0,281	7,92	2,12	2.10 ⁻⁶
	3	0,180	7,95	2,15	2.10 ⁻⁶
	4	0,139	7,88	2,08	2.10 ⁻⁶
	5	0,349	7,95	2,15	2.10 ⁻⁶
mélèze	1	0,187	7,89	2,59	5.10 ⁻⁶
	2	0,132	7,99	2,69	5.10 ⁻⁶
	3	0,131	7,94	2,64	5.10 ⁻⁶
	4	0,148	7,98	2,68	5.10 ⁻⁶
	5	0,185	7,88	2,58	5.10 ⁻⁶
pin sylvestre	1	0,068	7,94	2,69	6.10 ⁻⁶
	2	0,060	7,88	2,63	6.10 ⁻⁶
	3	0,064	7,92	2,67	6.10 ⁻⁶
	4	0,016	7,89	2,64	6.10 ⁻⁶
	5	0,053	7,95	2,7	6.10 ⁻⁶
western red cedar	1	1,360	7,5	2,92	3.10 ⁻⁵
	2	0,175	7,58	3	3.10 ⁻⁵
	3	0,961	7,6	3,02	3.10 ⁻⁵
	4	0,957	7,33	2,75	3.10 ⁻⁵
	5	0,347	7,34	2,76	3.10 ⁻⁵
hêtre	1	6,960	7,47	1,39	8.10 ⁻⁷
	2	3,290	7,55	1,47	8.10 ⁻⁷
	3	4,140	7,54	1,46	8.10 ⁻⁷
	4	6,480	7,59	1,51	8.10 ⁻⁷
	5	15,600	7,53	1,45	8.10 ⁻⁷
robinier	1	25,300	7,4	2,37	9.10 ⁻⁶
	2	9,280	7,06	2,03	9.10 ⁻⁶
	3	8,000	7,48	2,45	9.10 ⁻⁶
	4	7,810	7,71	2,68	9.10 ⁻⁶
	5	4,8	7,66	2,63	9.10 ⁻⁶

Tableau A6 : valeurs moyennes

Moyennes	pH	Fe⁺⁺ (ppm)
Douglas	7,93	0,22
mélèze	7,94	0,16
pin sylvestre	7,92	0,05
WRC	7,47	0,76
hêtre	7,54	7,29
robinier	7,46	11,04

Légende des colonnes :

Fe⁺⁺ représente la quantité de fer solubilisé trouvé dans les solutions réactionnelles.

pH correspond à la mesure du pH effectuée sur les éprouvettes après filtration et avant analyse à la torche à plasma. Les mesures ont été effectuées à température ambiante.

Δ pH correspond à la différence de pH observée dans la solution réactionnelle, entre le début et la fin de l'expérience. Le pH initial est toujours la valeur moyenne de pH trouvée pour cette essence pour les témoins.

La colonne **H⁺** représente la quantité de H⁺ consommés, exprimée en mole.l⁻¹, pendant la durée de l'expérience. Elle est calculée sur base de la formule du pH.