المادة الخشبية الأثرية و آلية التفاعل مع عناصر المحيط .

ربعين اعمر
أستاذ مساعد
معهد الآثار – جامعة الجزائر2

Résumé : Le bois est une matière naturelle dont les usages sont fréquents et multiples. Cependant, comme tous les matériaux, le bois est soumis à des contraintes liées d'une part à sa propre composition, et d'autre part il subit des altérations dues à l'environnement dont lequel il se situe. Notre intervention a pour objectif de mettre en évidence les mécanismes d'altérations et les moyens idoines pour sa pérennisation.

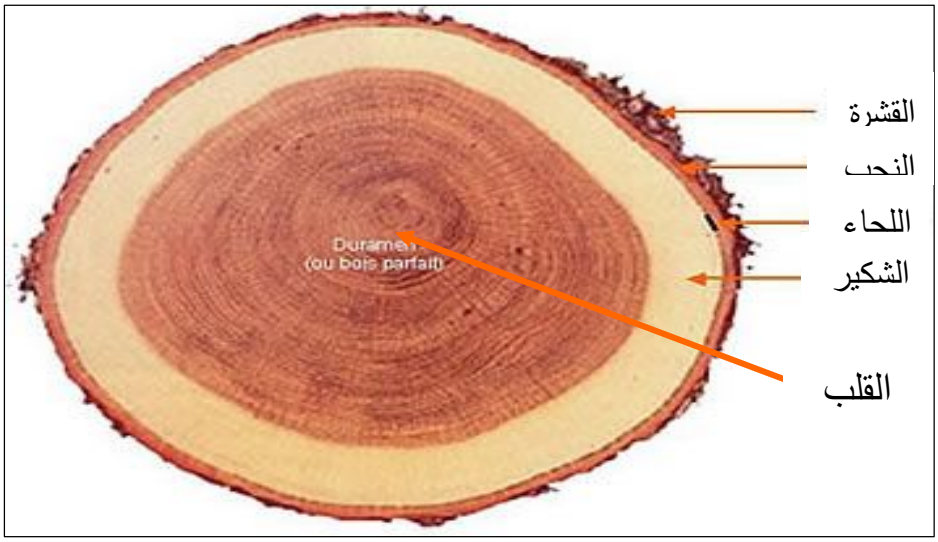
استعمل الخشب عبر العصور التاريخية كمادة للبناء و التشييد، وشكل مختلف الأدوات التي احتاجها الإنسان في حياته اليومية أو في ترجمة ذوقه الجمالي و الفني، وهذا راجع إلى توفر المادة الخشبية بشتى أنواعها في بيئة الإنسان وكذا لسهولة استعمالها و التحكم فيها من الناحية التقنية والفنية، غير أن هذه المادة لا تمتاز بديمومة اكبر مقارنة مع المواد الأخرى، ومادام أننا نهتم في ميدان بحثنا إلى هذه المادة من اجل دراسة السلوك الفني و التقني للإنسان، فإننا نصطدم بهشاشة المادة الخشبية وصعوبة التعامل معها من أجل الدراسة، وهذا راجع إلى الطبيعة التكوينية للمادة وتفاعلاتها المستمرة مع مختلف عناصر المحيط والذي ينتج عنها ظواهر تستدعي الدراسة والتحليل بغرض معرفة آلية التفاعل وبالتالي انتهاج طرق ووسائل تهدف إلى الحفاظ على المادة الخشبية، هذا ما سنحاول معالجته.

I. المادة الخشبية وخصائصها:

1- البنية الخشبية

تتميز المادة الخشبية ببنيتها الفريدة من نوعها، التي تعتبر من بين البنيات الأكثر تعقيدا في عالم المواد العضوية، من حيث المكونات، و من حيث انتظامها داخل بنية النسيج الخلوي، فمن حيث تنوع البنية يمكن تمييز نوعين منها.

فالبنية الخشبية التي يمكن رؤيتها بالعين المجردة تسمى "البنية الكبيرة" (Macrostructure)، والتي لا ترى إلا من خلال عملية التكبير بالعدسات المكبرة (Microscope) تسمى "البنية الصغيرة" (Microstructure)(الشكل رقم:1).



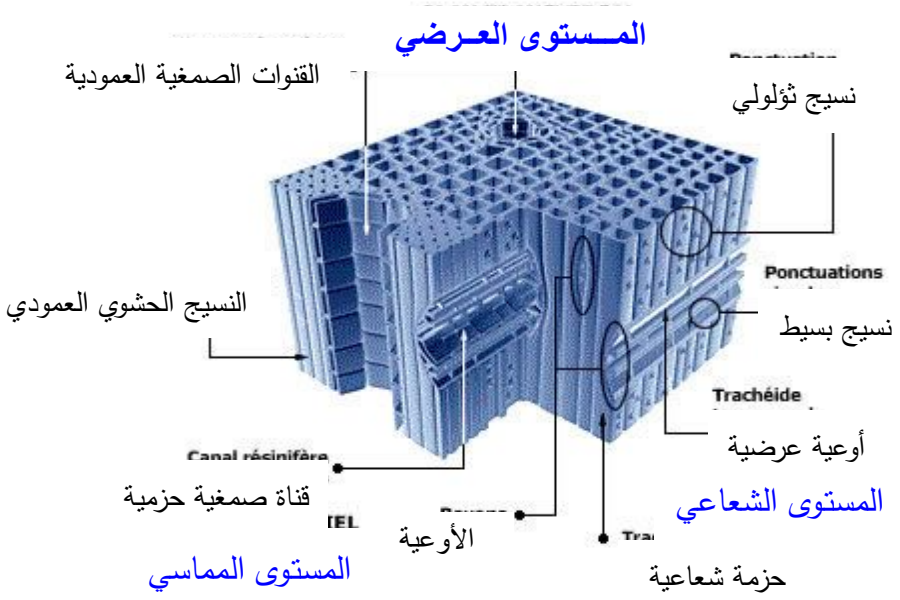
الصورة رقم (1): المكونات المورفولوجية الأساسية لجذع خشبي.

1.1- البنية الخشبية الكبيرة(Macrostructure)

يفحص هذا الجانب من خلال ثلاث مقاطع أساسية للجذع الخشبي وهي: المقطع العرضي، الشعاعي، والطولي (على حسب القطر والشعاع)، والمقطع المماسي الطولي (على حسب الوتر).

في المقاطع العرضية والشعاعية للجذع نميز ستة أجزاء رئيسية، وهي كالتالي:

القشرة (Ecorce)، النجب (Liber)، الشكير (Aubier)أو(Cambium) ، الجلب أو القلب (Cœur) أو(Duramen)، وأخيرا اللب (Moelle) .



الشكل رقم (2): مخطط تشريحي للبنية الخشبية.

2.1.1- الحلقات السنوية للأخشاب

تختلف الحلقات الخشبية السنوية من حيث العرض على حسب شروط نمو الخشب و بيئته، حتى في نفس النوع، وعليه فإن عرض الحلقة مهم بالنسبة لنوعية الخصائص الخشبية، خاصة الكثافة، فكلما كانت الكثافة الخشبية كبيرة كلما كانت المقاومة الميكانيكية مرتفعة.

تتكون الحلقات السنوية من خلال مرور الخشب عبر فترتين من النمو، الأولى تتشكل في فصل الربيع، وتعرف من خلال لونها الفاتح، أما الثانية تكون في فصل الصيف وبلون قاتم.

2.1- البنية الخشبية الصغيرة (Microstructure)

يتميز الخشب ببنيته الصغيرة التي تمثلها الخلايا بمختلف أنواعها، والتي لا يمكن التعرف عليها أو دراستها إلا من خلال عملية تكبيرها، فعند ملاحظتها بالميكروسكوب نجدها تحتوي على عدد كبير من الخلايا الميتة والحية، بأشكال وأبعاد مختلفة، فالخلية الحية تتكون من غلاف، و الجِّبلة الأولى* (Protoplasme)، النسغ** (Sèvre)، النواة*** (Noyau).

1.2.1- الخلايا ومكوناتها

تتكاثر الخلايا الخشبية في طبقة الشكير باتجاه وسط الشجرة، خلال عملية تكاثر الخلية، فإن خلايا الشكير توجد مقسمة إلى قسمين:

القسم الأول: له جدار جد رقيق، وهو متموضع باتجاه القسم الخارجي للجذع.

القسم الثاني: له جدار سميك، يتواجد بشكل منتظمة باتجاه منطقة القلب.

في الربيع يشكل الشكير خلايا عريضة بغلاف رقيق، هذا ما يسمى "خشب الربيع"، أما خلال النصف الثاني من فترة نمو النباتات، فإن الشكير يشكل خلايا ذات جدار سميك مسطح، والتي تمثل الوظائف الميكانيكية وتكون القسم الثاني أي خشب الصيف.

والأنواع الخشبية التي قسمها المركزي بلون قاتم يسمى خشب القلب، ومثال ذلك، خشب البلوط، الأرز (Cèdre)، الصنوبر.

أما الأنواع الخشبية ذات القلب الفاتح اللون، فتسمى خشب الشكير (Aubier)، مثل البتولا (Bouleau)، جار الماء (Aune)، الإسفندان(Erable).

---

* الجبلة الأولى: هي المادة الأساسية المكونة للقسم الأساسي من الخلية النباتية الحية.

** النسغ: هو سائل ينتقل عبر الأنسجة النباتية الناقلة للمواد الغذائية، ويتكون من مجموعة محاليل لمختلف الماد الغذائية الممتصة من الأرض.

***النواة: عبارة عن بنية خلوية تميز الخلايا وتدخل في التكوين الجيني للحمض النووي.

وعليه فان الخلايا الخشبية تتكون كغيرها من أنواع الخلايا الأخرى من العناصر التالية:

2.2.1 - **الغلاف الخلوي**: يتكون الغلاف الخلوي مبدئيا من مادة السيليلوز الذي صيغته الكيميائية ($C_6H_{10}O_5$)، وبالتناسب مع نمو الخلية فإن الغلاف يتلاءم مع مختلف تغييرات البنية والمكونات، أين ينتج المحولات الخشبية وتظهر مادة اللجنين (Lignine) الملتصقة بالسيليلوز، حيث تزيد من صلابة الخلية و تمنحها نوعا من مقاومة عوامل التلف والتحلل.

3.2.1- **الجِّبلة الأولى**: عبارة عن مادة مخاطية لزجة و شفافة، سميكة وذات حبيبات، تتكون من عنصر الكربون، والهيدروجين، والأوكسجين، و الأزوت، والكبريت.

4.2.1- **النواة**: لا تتميز النواة عن البروتوبلازما إلا من حيث احتوائها على مادة الفوسفور، وعلى العموم فالنواة تظهر بشكل بيضوي، و تحدث بعض التحولات المخاطية (Mucus) على مستوى النواة، ويكون ذلك حسب التحولات الكلية أو الجزئية للغلاف الخلوي، حيث يتحول جزء من ذلك الغلاف الخلوي إلى مادة مخاطية قابلة للذوبان في الماء ، ويصبح بيخلوي* (Intercellulaire)، مكونا بذلك نوع من الفتحات والثقوب، وبتجمع بعض الخلايا بين هذه الفتحات تنتج الأوعية الخشبية.

3.1- البنية التشريحية

تتيح لنا البنية التشريحية للخشب بالتعرف على ترتيب الخلايا التي تظهر حسب المستويات والمقاطع الثلاثة للبنية التشريحية، حيث نجد أن الخواص الفيزيائية والميكانيكية تختلف باختلاف ترتيب هذه المقاطع، وعليه فان مورفولوجية الخشب تتكون من ثلاث مقاطع أساسية تتموضع وفقها المكونات الخشبية العامة (الشكل رقم:2).

2- خصائص الخشب

1.2- الخصائص الكيميائية

تتحدد طبيعة النسيج الخشبي الكيميائية بمكونات هذا النسيج الذي يتركب من عدد من البوليمرات* (Polymères) هي السيليلوز و الهيميسليلوز و اللجنين، وعلى هذا البناء يترسب خليط من مواد مختلفة الوزن الجزئي(Poids spécifique) هي المستخلصات** (Extractives) ، ومن الناحية النشوئية فإن الجدار الابتدائي للخلية الخشبية مع الصفيحة الوسطى (اللتان تغلفان الخلية) تتكون عليهما الطبقات الأخيرة من الجدار الثانوي الخشبي، وخلال هذه العملية تترسب سلاسل الميكروفبرلات

* بيخلوي: مصطلح يطلق على موقع الأجسام الدقيقة بين الخلايا أو بين مكوناتها، وهو مصطلح يستعمل في ميدان البيولوجيا والبيوكيميا.

* البوليمرات: مجموعة من المواد المكونة للأجزاء التي تتركب من خلال تعدد نفس النسيج الكيميائي للعناصر المكونة للوحدات القاعدية.

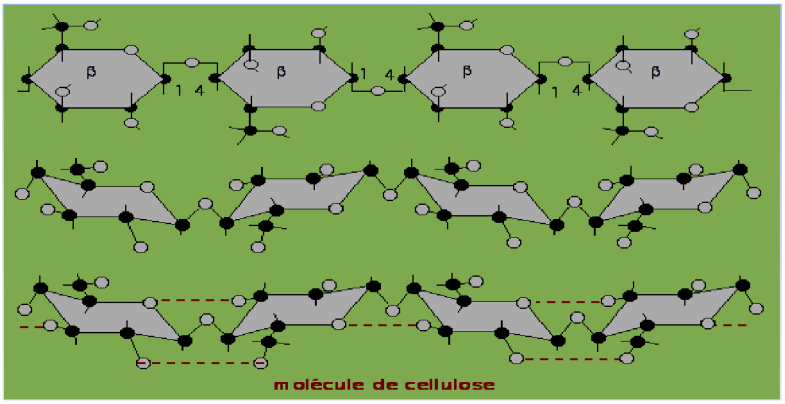
**المستخلصات الخشبية: هي المركبات الموجودة بالنسيج الخشبي القابلة للذوبان في المذيبات العضوية.

السيليلوزية (Microfibres cellulosique) على الجدار الابتدائي مكونة طبقات الجدار الثانوي، ومع هذه الخطوة يكون قد بدأ ترسب اللجنين في أركان الخلايا قبل تمام استطالتها، الذي يترسب فيما بعد مع الصفيحة الوسطى والجدار الابتدائي، ثم يترسب في الجدار الثانوي، وبامتداد عملية النمو إلى الجدار الثانوي، وموت الخلية، تترسب البقايا السيتوبلازمية (Cytoplasmique) للخلية على الجزء الداخلي المبطن للجدار الثانوي، مكونة الجدار المتثألل (Couche verrue) ، ونلاحظ أن السيليلوز يقوم بدور الهيكل البنائي للنسيج الخشبي، أما اللجنين فيقوم بدور المادة اللاصقة المدعمة، في حين أن الهيميسليلوز يقوم بدور المادة المالئة، هذا وتختلف أنواع الأخشاب في محتواها من هذه المواد.

1.1.2- السيليلوز

يعتبر السيليلوز من المكونات الأساسية لغلاف الخلية الخشبية، وهو مادة منظمة في ألياف، ويأخذ شكل الميكروفبرلات (Microfibre)، وهي حزم طويلة من سلاسل جزيئات السيليلوز مرتبة بصورة متوازية ، وإن كان ترتيب هذه السلاسل داخل الوحدات البنائية للسيليلوز ما زال موضع العديد من التساؤلات والدراسات .

يتكون السيليلوز من ثلاث عناصر مهمة: الكربون (Carbone) ، الهيدروجين(Hydrogène) والأكسيجين (Oxygène) ، وتعطى مجموعة هذه العناصر بالصيغة الكيميائية التالية التي تمثل بصفة عامة جزيئ السيليلوز $C_6H_{10}O_5$(الشكل رقم:2)، ويعتبر السيليلوز من عديدات التسكر وحيدة المكون (Homo polysaccharide)، ومكون من وحدات بقايا جلوكوز مرتبطة برابطة جلوكوسيدية (Glucidique) .



الشكل رقم (2): التمثيل الكيميائي لجزيء السيليلوز(Cellulose).

2.1.2- الهيميسليلوز (Hémicellulose)

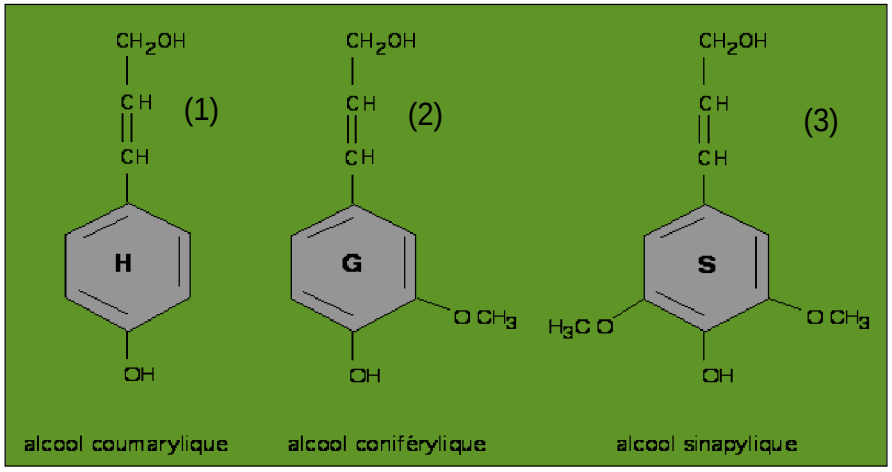
يطلق اسم الهيميسليلوز على مجموعة من عديدات التسكر غير السيليلوزية الموجودة بجدار الخلية الخشبية، كما يطلق عليه تسمية البلويوز* (Polyoses) وهو عبارة عن هكسوز** (Hexoses) ، والذي له نفس المكونات الغذائية مع السيليلوز وصيغته الكيميائية ($C_6H_{10}O_5$)، ويختلف الهيميسليلوز عن السيليلوز في كونه مكون من عديد من الوحدات السكرية في سلاسل قصيرة متشعبة، والوحدات السكرية البنائية لها هي وحدات سكر ناقصة لجزيئي ماء، وتنقسم إلى عدة مجاميع تختلف عن بعضها البعض من حيث خصائصها البنائية، مثل البنتوز* (Pentose) والهيكسوز (Hexose).

بعد أن يتميئ السيليلوز يعطي مكون آخر بصيغة (C_6) مبدئيا هي صيغة المانوز (Mannose)، ويتميز السيليلوز بأن له كتلة جزيئية ضعيفة.

في الجدران الثانوية الليفية (ألياف الخشب)، فإن السيليلوز يتجمع مع مكون آخر وهو اللجنين.

3.1.2- اللجنين (Lignine)

مادة اللجنين أو كما تسمى أيضا اللجنينات، عبارة عن مركب متعدد الأصول أو مكثف، أو مادة مركبة الجزيئات (Polymère)، وهي مادة جد معقدة ومتغايرة الخواص، تتسرب اللجنين في المساحات أو الفراغات التي بين الألياف، و تعوض الماء في الجدران الأولية والثانوية لبعض الخلايا أو النسيج الخشبي، وتمثل هذه المادة قسم هام من كتلة المادة الحية، حيث تتكون من خلال تكثيف أو بلمرة ثلاث عناصر كحولية هي كحول السينيبانين (L'alcool sinapylique)،كحول كونيفيريليك (L'alcool coniférylique)، كحول كوماريليك (L'alcool coumarylique)، وهي ذات التركيب لاكيميائي التالي: $C_9\,H_{7.16}\,O_{2.44}\,(OCH_3)1.36$.



الشكل رقم (3): التمثيل الكيميائي للكحوليات الثلاث الأساسية المكونة لجزيء اللجينين.

(1): كحول الكوماريليك

(2): كحول الكونيفيريليك

(3): كحول السيناب "

---

* البلويوز: عبارة عن سكر طبيعي ينتج من خلال تكثف كمي للسكريات غير القابلة للذوبان في الماء.

** هكسوز: عبارة عن نوع من السكريات الذي يحتوي على 6 ذراة من الكربون.

*البنتوز: عبارة عن نوع من السكريات الذي يحتوي على 5 ذراة من الكربون.

1.3.1.2- خواص اللجنين

بالنسبة للتحليل الكيميائي لعناصر اللجنين فإنها تحتوي على نسبة كربون ما بين 60% إلى 65% حسب نوع الخشب، وهذا راجع إلى محتوى الأوكسجين العالي، وهذا الآخر يكون نتيجة لمجاميع الميتوكسيل العديدة التي تتراوح ما بين 16% إلى 22% ، ويلاحظ انه يتواجد دائما مع مادة اللجنين بقايا عديدات التسكر، وهذا التواجد يكون بصفة مركبة ومعقدة.

تمتص مادة اللجنين الأشعة فوق البنفسجية، وهذا يتوقف على صفاته من حيث مجاميع البروبان الفينوي والعناصر البنائية له، كما هو الحال عند امتصاص الأشعة تحت الحمراء، إلا أنه يتم في مناطق محددة، وحينها يتشكل ويتشوه المثيل في الميتوكسيد، بالإضافة إلى ذبذبات الحلقة العطرية.

4.1.2- المكونات غير العضوية

توجد مكونات غير عضوية في الأخشاب، وهي تظهر في الرماد خلال التحليل الكيميائي للعينات الخشبية، هذا والمحتوى المعدني للأخشاب ضئيل لا يتجاوز 1%، ومعظم مكونات الرماد من الكالسيوم والبوتاسيوم والمغنيزيوم، وفي معظم الأخشاب فإن الكالسيوم يصل إلى 50% من جملة المحتوى المعدني.

3- الخصائص الفيزيائية

1.3- الكتلة الحجمية أو الكثافة

تعرف الكثافة الخشبية من خلال الكتلة الحجمية في كمية من الرطوبة تقدر بـ12%، وتختلف الكتلة الحجمية بين الأنواع الخشبية المختلفة، بل وفي نفس النوع، حيث تؤثر فيها شروط ووسط نمو الشجرة، وتقاس الكتلة الحجمية بوحدة قياس هي الكيلوغرام على المتر المكعب(كلغ/م^3)، وفي الغالب تنحصر الكتلة الخشبية ما بين 80كلغ/م^3 إلى 400 كلغ/م^3 ، وربما تتجاوز في بعض الأحيان 1300كلغ/م^3 .

2.3- الحجم الفراغي

يسمى الحجم الفراغي؛ ذلك الحجم الذي لا تشغله مواد الجدار الخلوي، وهو الحجم الجزئي من الحجم الكلي لقطعة الخشب، و يمثل حجم الفراغات الكلية للقطعة الخشبية.

4.3- رطوبة الخشب

يقصد برطوبة الخشب محتوى أو كمية الرطوبة لقطعة خشبية، والتي تمثل كمية الماء المحتواة في الجدران الخلوية، وفي المساحات الفارغة.

تختلف كمية الرطوبة بحسب عاملي الحرارة ورطوبة هواء المحيط، وهذا الاختلاف يؤثر على الوزن، و الأبعاد، و الديمومة والخصائص الميكانيكية.

يحتوي الجذع الخشبي على 80% من الماء، والفراغ الموجود بين الخلايا يكون مملوء بالماء الحر، الذي يتبخر تدريجيا دون أن يحدث اعوجاج للجذع، ولا يبقى إلا الماء الرابط الذي يكون مغموس في جدران الخلايا، واختلاف تركيز هذا النوع من الماء يؤثر على ظواهر الانقباض، والانتفاخ، والاعوجاج. ونميز أربع حالات للرطوبة الخشبية .

- حالة لا مائية (Anhydre): وحينها الرطوبة تساوي 0% (H=0%).

- حالة من نصف جافة إلى جافة: وتكون نسبة الرطوبة أكبر من الصفر، وأقل من 30% (0<H<90%)، وفي هذه الحالة يوجد الماء في جدران الخلايا، لكنه ينعدم في المسامات (حالة استعمال الخشب).

- حالة التشبع التام: في هذه الحالة تفوق نسبة الرطوبة 30%، وهذا ما يفسر أن المسامات مملوءة تماما بالماء.

5.3- ظاهرة الادمصاص* (Adsorption)

ونعني بظاهرة الادمصاص عملية أخذ غاز أو سائل في حالة بخار، أو ذائبة ليدخل إلى التكوين الداخلي لمادة مسامية، وتحدث هذه العملية بفعل قوة قوى الجذب بين السطح الذي يتم عليه الادمصاص وبين المادة المدمصة، وتكون هذه القوة أقوى من القوة الداخلية الرابطة، وعادة ما يصاحب عملية الادمصاص انبعاث طاقة حرارية، فيتم تفاعل بين سطح الادمصاص والمادة المدمصة، ليكون روابط تعاونية، وتسمى هذه العملية بالادمصاص الكيميائي (Chimio-adsorption)

6.3- الانتفاخ والانكماش (Gonflement et retrait)

ينتج عن انتفاخ وانكماش الأخشاب تغير في الأبعاد الخشبية، بسبب تغير الرطوبة والتي تدفع بزيادة الأبعاد الأولية أو الأصلية، أو انخفاضها وإنقاصها، وتتم هذه العملية بامتصاص الماء فيحدث الانتفاخ، وفقدانه يحدث الانكماش، ويتم الامتصاص والفقدان على مستوى المناطق السيليلوزية وعديدات التسكر، وبالتحديد في المناطق الأمورفية من الميكروفبرلات حيث تؤخذ جزيئات الماء وترتبط بروابط

---

* ظاهرة الادمصاص: تعني هذه الظاهرة عملية أخذ سائل داخل فراغات جسم مسامي بصورة ميكانيكية عن طريق القوى الشعرية. أو هي عملية أخذ غاز أو سائل (في حالة بخارية)، أو ذائب من محلول ليدخل إلى التكوين الداخلي لمادة مسامية، أو مسحوق ناعم، أو مادة غروية منتفخة، وتشير هذه العملية إلى أن قوة قوى الجذب بين السطح الذي يتم عليه الادمصاص و بين المادة المدمصة أقوى من القوى الداخلية الرابطة بين هذه المادة بعضها ببعض. وتختلف هذه الظاهرة عن ظاهرة الامتصاص المعروفة.

هيدروجينية على أسطح السلاسل السيليلوزية وبينها، وعلى أسطح المناطق البلورية وبينها، وبهذا ينتج الانتفاخ والانكماش في اتجاهات عمودية على محور الميكروفبرلات (وهو محور المناطق البلورية للسيليلوز)، ويظهر هذا التغير البنيوي على شكل الخشب في مختلف الاتجاهات، وعلى حسب نسيج الحلقات والألياف، وبالتالي يؤثر على الكتلة الحجمية، ذلك أن الخشب مادة إستطربية (Hygroscopique) .

7.3- الخصائص الحرارية

إذا ارتفعت درجة حرارة الجسم الخشبي ينتج عنه تباعد بين الجزيئات المكونة، وهذا يؤدي إلى زيادة في الأبعاد الطولية، وزيادة في الحجم، أو كما يسمى التمدد الطولي، ويكون في الاتجاه الموازي للألياف والاتجاه العمودي، و زيادة في الوزن النوعي. وهذا التباين راجع إلى التركيبة التشريحية للخشب، حيث أنها تضم ما يقارب 48% من مادة السيليلوز، والزيادة في درجة الحرارة يؤدي إلى جفاف السلاسل الجزئية للمكونات الأساسية، وبعدها تظهر التصدعات والتشققات ، وما الطاقة الحرارية للأخشاب إلا تعبير عن كمية الطاقة الحرارية اللازمة لإحداث تغيير نوعي في الطاقة الحرارية للجزيئات المكونة للمادة الخشبية، وهذه الطاقة تظهر في صورة درجة حرارة، ويعبر عنها بوحدات حرارية كالوري* (Kcal)، أي أن الخشب له خاصية التمدد و الناقلية الحرارية.

8.3- المحتوى المائي في الخشب

تحتوي البنية الخشبية على كمية معتبرة من عنصر الماء، ويوجد الماء داخل تركيبة النسيج الخشبي على شكل جزيئات مرتبطة بالمكونات الكيميائية للخشب، كالسيليلوز والهميسيليلوز بروابط هيدروجينية، ويسمى بالماء التكويني (Eau de constitution) وهو يدخل في تكوين الأخشاب، ولكنه ليس ماء في صورته الفعلية التي نعرفها، إنما هو عبارة عن جزيئات مختلفة مع المكونات الأساسية للأخشاب، ولا يظهر إلا عند رفع حرارة الأخشاب، حيث يتم انفصال مجاميع الهيدروكسيد التي تكون فوق سطح مادة السيليلوز، وعند التجميع تظهر جزيئات الماء التكويني.

1.8.3- حركة الماء في الأخشاب

في الواقع أن حركة الماء في الأخشاب يمكن أن ينظر إليها من منظور مكون من شقين.

---

*وحدات حرارية كالوري: وحدة قياس سعرات الطاقة.

- أولهما ما فوق نقطة تشبيع الألياف: حيث الجدران الخلوية كلها مشبعة بالماء، والماء الحر يشغل الفراغات، وحركة الماء تكون بصورة أكبر في الفراغات الشعرية، وهذا لا يعني أن جميع فراغات الخشب الدقيقة تحتوي ماء بالضرورة.

- أما الشق الثاني لحركة الماء في الأخشاب: فهو حركتها تحت نقطة تشبع الألياف، وهذا عبارة عن حركة ماء مرتبط بالأسطح الخشبية داخل الجدار الخلوية عبر تدرج رطوبي واضح، أما الماء في صورته البخارية يمكنه الحركة سواء تحت نقطة تشبع الألياف أو فوقها، كما أن حركة الماء بالخاصة الشعرية تعتمد على حجم الفراغات الشعرية، فكلما قل قطر الفراغات الشعرية كلما زادت قوة جذب الماء وارتفاعه فيها، وعليه فإن حساب حركة الماء الشعرية من الصعب قياسها، نظرا لتفاوت حجم الفراغات بالجدار الخلوي ودور الأغشية.

4- الخصائص الميكانيكية

باعتبار الخشب حزمة من الأنابيب الميكروسكوبية المتكتلة والمتجمعة بفعل مواد لاصقة طبيعية، وموجهة في اتجاه مفضل، فانه ينتج عن ذلك بنية ذات خواص ميكانيكية مميزة، حيث أن الخشب يمتاز بمقاومته في الاتجاه الشعاعي موازاة مع الألياف، منه في الاتجاه العرضي (طوليا مع الألياف).

وباعتبار الخشب مادة بيولوجية، فإن خصائصه الميكانيكية مختلفة على حسب الأنواع، بل حتى في نفس النوع، هذا ما يؤثر على التعرف وإحصاء مقاومة البنية.

وباعتبار أن الخشب مادة متباينة الخواص (Anisotrope)، فإن المقاومة الميكانيكية تختلف باختلاف الخواص الفيزيائية، كالكتلة الحجمية، فكلما كانت الكتلة الحجمية مرتفعة ازدادت المقاومة، وكذا تأثير الرطوبة، حيث أن ارتفاع درجة الرطوبة نتيجة حتمية لنقص المقاومة الميكانيكية.

1.4- المرونة

يتميز الخشب من الناحية الميكانيكية بخاصية المرونة، وتظهر عندما نضع ثقل معين على قطعة خشبية، فإن هذه القطعة تتأقلم مع الثقل إلى حد ما، ثم تفقد مرونتها فتتصدع أو تنكسر، ولكن عندما يكون الثقل ملائم لدرجة المرونة، فإن الخشب يجد الشكل المناسب لتحمل هذا الثقل، وبعد نزع الثقل يقوم الخشب باسترجاع شكله الأولي، لكن ليس في كل الظروف، فعندما يزيد الثقل عن درجة المرونة، وحتى يظهر اعوجاج على سطح الخشب، ويدوم هذا الثقل مدة زمنية معينة، فإنه يستقر على شكل المعوج حتى ولو نزعنا الثقل، ويحدث الاعوجاج داخل البنية، حيث تتفكك الألياف عن بعضها البعض، وتخرج المواد الرابطة، أي تجف وكأننا نقوم بعصر البنية الخشبية، وهنا نكون قد أجهدنا الخشب وتجاوز الثقل حدود مرونته.

تتأثر هذه الخاصية بنسبة الرطوبة، حيث أن العلاقة تكون طردية، أي أن كلما زادت نسبة الرطوبة الخشبية تزيد درجة المرونة، ذلك أن زيادة الرطوبة يؤدي إلى انتفاخ الألياف أي (التشبع)، وعندما يكون الضغط تفقد الألياف الماء الزائد عنها، وتتأقلم مع الضغط أو الثقل الموزع على الألياف، والعكس صحيح.

2.4- مقاومة الضغط

يتعرض الخشب إلى مجموعة من القوى الخارجية من بينها الضغط، ويستقبل الخشب هذا الضغط ويوزعه على حسب طول الألياف أو العكس، أي في الاتجاه العرضي، وعليه فان نميز نوعين من الضغط، الأول موزع بالتوازي مع المقطع العرضي، و الثاني يقاطع هذا المقطع ويوازي المقطع الطولي.

حدود مقاومة الخشب للضغط في الاتجاه الطولي في نسبة رطوبة 15% تختلف ما بين 300 كلغ/سم^3 إلى 775 كلغ/سم^3 ، على حسب نوع الخشب، أما في الاتجاه العرضي أو (الشعاعي) يتراوح ما بين 40 كلغ/سم^3 إلى 256 كلغ/سم^3 .

تتأثر عملية توزيع الضغط بنسبة الرطوبة، وكذا تواجد العقد، هذان العاملان يقللان من نسبة تحمل البنية الخشبية للضغط، حتى ولو كانت العقد في حد ذاتها أشد مقاومة من البنية الخشبية، لكن تنتج على مستوى مساحتها نوع من التشققات و التصدعات، ومع التجفيف تنزع من مكانها.

3.4- مقاومة التمدد

تستطيع البنية الخشبية بمقاومة عملية التمدد، ويتم ذلك بصفة جد عالية في الاتجاه الطولي للألياف لمعظم الأنواع الخشبية، وهي تقاس بالكلغرام على السنتمتر المكعب(كلغ/سم^3)، وعلى العموم فهي تقدر ما بين 100 إلى 1900كلغ/سم^3، وتتأثر هذه الخاصية بخصائص النمو، وهي بنفس درجة التأثر بالرطوبة مثل الخاصية السابقة.

4.4- مقاومة الالتواء

الخشب مادة مقاومة لقوى الالتواء، هذا ما يبرر استعماله في البناءات ذات الأثقال المختلفة، والتعرف على هذه الخاصية يؤدي بنا إلى معرفة مدى صلابة الجسم الخشبي، وينتج الالتواء عن طريق إحداث قوى في اتجاه مضاد لنهاية الجسم، حيث تتعرض الألياف للالتفاف في شكل حلزوني حول المحور، وعند الالتفاف الشديد تميل إلى الضغط على القطاعات المركزية في المحور، ومع زيادة التشوه والالتواء فإن ارتباط الألياف جانبيا ينتج عنه تفكك وانزلاق بعضها عن بعض حتى تتقطع.

II. عوامل و آلية تلف المادة الخشبية-

1- العوامل الفيزيائية

1.1- المحتوى الرطوبي

يؤثر المحتوى الرطوبي بدرجة كبيرة على الخواص الميكانيكية، خاصة تحت نقطة تشبع الألياف، ويلاحظ أن معظم الخواص الميكانيكية للأخشاب تنخفض مع ارتفاع المحتوى الرطوبي، ماعدا خاصية المرونة.

2.1- درجة الحرارة

تؤثر درجة الحرارة سلبا على الخواص الميكانيكية للأخشاب، حيث تنخفض المتانة مع ارتفاع درجة الحرارة، وتزيد مع البرودة بصورة سريعة ومباشرة، وإن كان التعرض للحرارة المرتفعة لفترات طويلة له تأثير على المركبات الكيميائية للجدران الخلوية مما يخفض من درجة المتانة، وعند ثبات الرطوبة فان العلاقة بين المتانة ودرجة الحرارة علاقة استقامية حتى 100م°، والتأثير بخفض الخصائص الميكانيكية لا يكون دائما، ويلاحظ أن التأثير الدائم في درجة الحرارة العالية بخفض المتانة يرجع إلى تكسير المركبات الكيميائية للجدار الخلوي.

3.1- تأثير الكثافة على الخصائص الميكانيكية

إن السلوك الميكانيكي للأخشاب ما هو إلا عبارة عن ناتج تأثيرات عوامل داخلية في البنية الخشبية، فالتركيب التشريحي والكيميائي لهما علاقة تأثير مباشرة على كتلة الجدران الخلوية التي تمثل الكثافة، والكثافة بدورها مؤثر رئيسي على كافة الخواص الميكانيكية للأخشاب.

4.1- ظروف النمو

يختلف الخشب باختلاف ظروف وشروط نموه، حيث يتأثر من حيث انتظام الألياف والحلقات السنوية، كما أن ثوابت المرونة تختلف كلما كان اتجاه الألياف منحرفا عن اتجاهها الرأسي مع المحور.

5.1- الإشعاعات النووية

تحدث جرعات أشعة قاما العالية، والنيترونات تدهورا في بنية الخشب إذا زادت عن ميجاراد واحد (Mégarad)، ويكون هناك انخفاض ملحوظ يظهر في قوة الشد الموازي وفي الصلابة، أما إذا وصلت الجرعات إلى 300 ميجاراد، فإن قوة الشد تنخفض بنسبة 90%.

2- العوامل الكيميائية

تتعدد عوامل التلف الكيميائية المتدخلة على المادة الخشبية الاثرية ويكون تدخل هذه العوامل على مستوى المكونات الكيميائية للمادة الخشبية ذلك ان هذه المادة تتكون اساسا من عنئر الكاربون والازوت والكبريت وهي مطونات ذات تفاعل كيميائي مستمر مع مختلف العوامل الكيميائية الخارجية وهي:

1.2- تفاعل ثاني اكسيد الكبريت

يتواجد ثاني اكسيد الكبريت (SO_2) بكميات كبيرة في الهواء ويتحول عن طريق الاكسدة ليعطي (Anhydride sulfurique SO_3) و التي تشكل مع الرطوبة ما يسمى بحمض الكبريت (H_2SO_4) وهذا الناتج يشكل خطرا على كل المواد العضوية خاضة الخشب وذلك بتحليل الماد الكيميائية للخشب وبالتالي تتقلص عملية البلمرة (Dépolymérisation).

3.2- تأثير الأحماض والقلويات والأملاح على الخشب

بصفة عامة، فإن الأحماض والقلويات تلعب دورا جد هام في تلف الخشب، فكلما زاد تركيز هذه المواد كلما زاد تأثيرها الهدام، وعليه فإن الخشب يتأثر عندما يكون تركيز الحمض يزيد أو يساوي 2، ($PH\leq2$). ومن الملاحظ أن الخشب الراتنجي عكس الخشب الوريقي، له خاصية استقرار عالية أمام الأحماض التالية: حمض الكبريت (Acide sulfurique)، حمض النتريك (Acide nitrique)، حمض الكلوريديك، حمض الخلات (Acide acétique)، و هيدروكسيد الصوديوم (Hydroxyde de sodium). لا يحافظ الخشب على استقراره في الوسط المالح كماء البحر، ولا في وسط به نسبة من البكتيريا، كالمياه الراكدة أو مياه الصرف.

3- العوامل البيولوجية

تندرج مختلف عوامل التلف البيولوجية للخشب ضمن ظاهرة التحلل البيولوجي أو الحيوي، الذي هو نتاج تفاعل عدة عوامل فيما بينها لتعطي في النهاية فناء لبعض منها وظهور أو تطور واستمرار البعض الآخر، وهذه الظاهرة هي أساسية في استمرار عملية البناء الضوئي التي ينتج عنها صناعة ثاني أكسيد الكربون بالكرة الأرضية، هذه العملية تتأثر بصفة بليغة في غياب التحلل الحيوي ينتج هذا التحلل بفعل عدة عوامل بدءا من الاضمحلال الذي يحدث نتيجة لفقد الغذاء المخزن بدون تحلل حقيقي للنسيج الخشبي وهو ناتج عن عمل الخلايا الحية في مختلف مناطق الخشب، أما المؤثرات الأخرى فتبدأ من الاختراق الميكانيكي للنسيج الخشبي بفعل عوامل بيولوجية بحتة والمتمثلة في الحشرات و الفطريات.

1.3- الحشرات الخشبية

إن عوامل التلف التي تتدخل على الخشب الأثري و تؤدي به إلى التلف و الانهيار عديدة ومتعددة، إلا أن هذه الأنواع متفاوتة الخطورة، خاصة إذا ما تعلق الأمر بعوامل التلف البيولوجية و التي تضم عدة أنواع، فنجد في مقدمتها الحشرات الخاشبة، و الفطريات الخشبية، إضافة إلى الكائنات المجهرية الأخرى التي يصطلح عليها بالكائنات التعايشية، أي التي ترافق النوعين الأولين اللذين سنليهما اهتمام واسع خلال هذه الدراسة، ونتطرق في الأول إلى أنواع الحشرات التي تتدخل على البنية الخشبية وفي الغالب ما تتلفها.

قبل التطرق إلى هذا النوع الأساسي في هضم وإتلاف الخشب تجدر الإشارة إلى أن الحشرات الخاشبة يرافقها أو تنتج نوع من الإنزيمات التي تساهم بشكل أو بأخر في هضم واستهلاك الخشب ومكوناته أو تساعد الحشرات بالقيام بهذه العملية وذلك بتحليل بعض مكونات الخشب، كما سبقت الإشارة إليه.

هناك نوعان أساسيان من الإنزيمات بإمكانهما التدخل معا أو كل بمفرده في هضم الخشب و مختلف مكوناته وهما: الإنزيمات الهاضمة الخفية من طرف الحشرة نفسها، و الإنزيمات التي تنتجها الأجسام المتكافلة (Organismes symbiotiques) ، وتسمى الإنزيمات المتكافلة (Ectosymbiotes)، أو (Endosmotique). ومن بين الإنزيمات التي تنتجها الحشرات نجد إنزيم اللجيناز (Lagninase) إلا أن هذا الأخير لا يتدخل على مادة اللجنين .

وعليه يمكن القول أن للإنزيمات دور لا يستهان به في إتلاف الخشب سواء قامت هي نفسها بالعملية أو ساعدت عوامل أخري على هذه العملية كالحشرات مثلا، لكن لا بد أن تتوفر بعض الشروط الأساسية في نمو وتطور الحشرات وما يرافقها من كائنات أخرى.

1.1.3- التغذية

من أجل دراسة طرق و أساليب تغذية الحشرات، هناك منهجيتين: الأولى تتعلق بالبحث في تأثير مختلف مكونات الخشب على نمو اليرقات التي تنمو داخل الخشب، ثم نقوم بفحص نتائج هذه المعالجة، و الثانية تتعلق بدراسة تأثير الإنزيمات الهاضمة على مختلف مكونات الخشب.

تتغذى الحشرات تقريبا على كل أنواع الأغذية العضوية الموجودة في الطبيعة، فالبعض يتغذى على النباتات أو الأخشاب الجافة، و البعض الآخر على الحيوانات، وأخرى على الفطريات و البكتيريا، ومنها ما يمتص مختلف السوائل الضرورية...

من بين المكونات الفيزيولوجية التي تكون جسم الحشرة نجد جهاز الهضم (Appareil de digestion) الذي يمتاز بتنوع شكله، على حسب أنواع الحشرات وتناسبه مع الاحتياجات الغذائية.ومن الصعب اكتشاف مبادئه الفيزيولوجية العامة وإفرازاته خاصة الإنزيمية منها.

2.1.3- الإحتياجات الغذائية

تستطيع الحشرات الخاشبة أن تنشر الخشب وتستهلك مكوناته الفيزيائية كالنشارة مثلا أو الكيميائية كالسيليلوز ، كما تستطيع أن تستفيد في تغذيتها من بعض الفطريات و البكتيريا التي تجدها في طريقها، وتجدر الإشارة إلى أنه من الصعب تبيان مبادئ تغذية الحشرات في هذا الموضوع.

نجد بعض أنواع الحشرات تأكل النجب (Phloème) كما هو الحال بالنسبة لنوع الكراشة (Scolytide) و الناصعات (Buprestidé) و بعض أنواع حرشفيات الأجنحة (Lépidoptère)، و أخرى تفضل أكل أجزاء الكسيلام (Xylème) ، وهي أنواع مخربة ومتلفة للخشب ويمثلها بالدرجة الأولى المحضار (Sirex) والنمل (Fourmis)، و الأرضة (Termite).

فمن أجل النمو و التطور تستخدم الحشرات كميات كافية من الكربون و الأزوت، والفسفور والكبريت، و الأملاح المعدنية و اللامعدنية، وكل العناصر الأخرى التي يمكن استعمالها في بناء النظام الحي، ومن أجل نشاطها فهي تستهلك خلال فترات طويلة أملاح هيدرات الكربون، ونجد مثلا فصيلة حرشفيات الأجنحة تتغذى على السكريات فقط كالسكر الأحادي (Monosaccharide) وهذا بمساعدة بعض الإنزيمات المرافقة.

تستطيع بعض أنواع الحشرات إعداد بعض الأحماض الزيتية من خلال عناصر التغذية، مثل الأحماض اللينيليكية (Les acide linoléiques) ، والأحماض الأمينية (Les aminoacides) الهامة في عمل حاسة الشم و التي لا يمكن الحصول عليها إلا من خلال تركيب مادة السيترول(مادة كحولية) و الكليستيرول (Cholestérol) .

تحتاج بعض الحشرات إلى نوع من الفيتامينات كفيتامين "ب"(Vitamine B) المذابة في الماء، و التيامين "ب 1وب2 " (Thiamine B1, B2) ، والريبوفلافين "ب 1 " و "ب 2 " (Riboflavine B1, B2)، وحمض النيكوتين(Acide nicotininique) و الكولين (Choline)، وحمض الفوليك (Acide folique)، وهي عناصر هامة تحتاجها الحشرة في التغذية و النمو.

إضافة إلى عناصر التغذية نجد الحشرات تحتوي من خلال تركيبتها الفيزيولوجية على عنصر الدم ، وهو سائل فاتح اللون، أو غير ملون، وفي الغالب يكون ملون بلون اخضر أو أصفر، ووزنه النوعي يتراوح ما بين 1الى3، عند اليرقات، وهو نوعا ما حامض وتبلغ درجة الحموضة PH مابين 6.4 إلى 6.83.

تتعدد وتتنوع الحشرات الخاشبة التي تنمو وتتغذي علي الخشب الأثري، وهي مصنفة ضمن فصائل، والفصيلة تحتوي على عدة عائلات، و العائلات تحتوي على أعداد كبيرة من الأنواع. ويمكن حصرها على حسب الأهمية ضمن المجموعات التالية: مغمدات الأجنحة (Coléoptère)، غشائيات الأجنحة (Hyménoptère)، حرشفيات الأجنحة (Lépidoptère)، مزدوجة الأجنحة (Diptère).

من الواضح أن تسمية هذه العائلات يكون من خلال وصفها وخصائصها الفيزيولوجية، وعائلة الحشرات التي تحتوي على أكبر عدد من الأنواع نجد تلك التي يصطلح عليها بالحشرات الخاشبة (Les insectes xylophage)، و هي عائلة مغمدات الأجنحة.

2.3 - الفطريات

على الرغم من أن هناك أخشاب تعد منيعة بالنسبة للإصابة الفطرية نتيجة لوجود مستخلصات خشبية ذات تركيب كيميائي معين، إلا أن الأخشاب بشتى أنواعها و في معظم الأحيان تصاب ببعض أنواع الفطريات، ومن المهم أن نلاحظ أن الفطريات المحللة أو المدمرة للأخشاب تصيبها تحت شروط استعمالية، أو طبيعية، أو بيئية محددة، أهمها المحتوى الرطوبي للأخشاب الذي يجب أن يتجاوز 20%، ويقترب من نقطة تشبع الألياف و ثانيها درجة حرارة مناسبة ، والدرجة المثلى لمعظم الفطريات تتراوح ما بين 25°م و 30°م، وإذا وصل هذا العامل إلى حوالي 40°م فإنها تعد مثبطة للنمو الفطري، كما أن لعامل الأوكسجين (O_2) أهمية قصوى لنمو الفطريات المحللة أو الملونة للأخشاب الأثرية، ذالك أنه يؤثر على عملية التنفس ، كما أن التركيزات العالية لثاني أكسيد الكربون(CO_2) تعيق نمو الفطريات الخشبية.

تعرف الفطريات التي تعيش بكثافة علي المادة الخشبية، على أنها فطريات هدامة، ومتلفة (Champignons lignivores ou dé-compositeurs)، ويمكن أن تكون عبارة عن تعفن(Moisissures)، و بعض الأنواع الأخرى يطلق عليها اسم الفطريات الملطخة (Champignons tacheurs)، والبعض الأخر يسمى الفطريات الرمامة أو الدعاميات (Basidiomycètes) الهدامة (فطريات محللة)، فالتعفن و الفطريات الملطخة تقوم بتغيير لون الخشب وتلوينه بألوان قاتمة، ولكن لا تفسد بصفة كبيرة البنية الخشبية، والأنواع الأخرى تتدخلها على البنية الخشبية أين تفقدها خصائصها الميكانيكية، وخاصة المقاومة، وهذه الأخيرة تعتبر من أخطر الأنواع، حيث إذا أصيب الخشب بها بصفة كبيرة يصعب معالجتها و إنقاذها و في بعض الحالات يستحيل ذلك .

تحلل وتلف الخشب إن دل فانه يدل على وجود عدة عوامل فطرية متفاعلة فيما بينها، بدءا من العامل الرئيسي ألا وهو الفطريات الكلية الموجودة في الهواء خلال فترة كبيرة من السنة، والتي لا تسبب ولا تشكل أي خطر من الناحية المادية، إلا عند توفر أربعة شروط أساسية لنموها وتطورها، فالفطريات الهدامة مثلا تحتاج إلى الخشب من أجل التغذية ولا تتدخل عليه إلا في نسبة من الرطوبة وكمية من

الماء المناسبة، ودرجة حرارة كافية، ومعدل معين من الأوكسجين، والشروط العامة المناسبة لنمو كل أنواع الفطريات هي:

1.2.3- الرطوبة

لا تتطور الفطريات إلا عندما تكون كمية من الرطوبة تتراوح كحد أدنى 25% وحد أقصى 120%، وتكون هذه الرطوبة إما محتواة في البنية الخشبية أو في الوسط الذي يتواجد فيه الخشب حيث أنها تنبع من عدة مصادر، أغلبها: المياه الراكدة في وسط الخشب (قنوات صرف المياه، دورة المياه...)، الرطوبة المكثفة، الرطوبة الشعيرية لجدران البنايات، رطوبة الهواء المرتفعة بشكل دائم، رطوبة الخشب المرتفعة عند الاستعمال (خشب الصيانة والترميم).

2.2.3- الوسط

تفضل الفطريات الوسط المظلم والضيق أين تتركز الرطوبة وتنعدم التهوية، كالتجويفات، القبو، الأماكن المظللة، والزاوية أو الركن الخفي.

3.2.3- الحرارة

لا تستطيع الفطريات أن تتطور في درجة حرارة أقل من 13 °م، التي تمثل لها درجة البرودة، وأكبر من 35°م إلى 40°م والتي تمثل درجة الجفاف.

4.2.3- الهواء

تتأقلم الفطريات مع نوع خاص من التهوية، حيث أن التهوية الملائمة لوسط الإنسان لا تناسب تواجد الفطريات ونموها.

وعليه فعند توفر هذه الشروط يمكن أن تظهر أنواع معتبرة من الفطريات التي تساهم في إتلاف الخشب الأثري، وجل هذه الأنواع مصنفة ضمن العائلات التالية:

الفطريات الهدامة:

التعفن الأسمر "تلف السيليلوز" (Pourriture brune)، التعفن الأسمر "تلف السيليلوز" (Pourriture brune)، فطريات التجويفات (Corniophore de cave)، التعفن الأبيض "تلف اللجينين" (Pourriture blanche)، الفطريات الرمامة (Champignons Saprophytes).

الخاتمة

تمر الفترات التاريخية و الزمنية على المادة الخشبية الأثرية وهي في تفاعل مستمر مع مختلف العوامل المحيطة بها، نظرا لطبيعة مكوناتها الحيوية التي تتميز بالقابلية للتحلل الحيوي بسرعة، يتم هذا التفاعل بين المكونات الكيميائية و الخصائص الفيزيائية للمادة الخشبية مع المكونات الكيميائية و

الخصائص الفيزيائية و البيولوجية لعناصر المحيط وتنشا بذلك آلية للتفاعل ، وينتج عنها ظواهر جديدة و غريبة عن طبيعة المادة الخشبية وهذا ما يصطلح عليه بظاهرة التلف، أي أن هذه الأخيرة هي نتاج تفاعل يتم على المستوى الفيزيائي و الكيميائي بالدرجة الأولى قبل أن يظهر على مستوى الأداء أو السلوك الميكانيك، لذلك فان عوامل التلف التي يمكن أن تتدخل على المادة الخشبية يمكن تقسيمها إلى ثلاث أنواع:

- آلية فيزيائية مثل المحتوى الرطوبي ودرجة الحرارة وهي تأثر على المكونات الكيميائية ويظهر ذلك بصيغة سلبية على الخصائص الفيزيائية ومن ثم يظهر تدهور على مستوى الخصائص الميكانيكية.
- آلية كيميائية مثل ثاني اكسيد الكبريت (SO_2)، وهذه الآلية تتدخل على المكونات الكيميائية للخشب وتجعله في حالة غير مستقرة كيميائيا، وهذا الأخير يؤثر سلبا على الخصائص الفيزيائية و بالتالي تظهر سلبية الأداء الميكانيكي.
- آلية بيولوجية مثل الفطريات و الحشرات و التي تحدث ضرر فيزيائي و ميكانيكي على المادة الخشبية ينتج من خلال المساس باستقرار المكونات الكيميائية و إحداث نقص في مستوى المميزات الفيزيائية ثم تراجع أداءها الميكانيكي.

وبعد أن تتدهور وتتلف بنية المادة الخشبية تتدهور و تتلف معها المعلومات الأثرية والتاريخية والجمالية التي تحملها، أو يزول معها غرض الاستعمال سواء في المباني الأثرية أو كأدوات أثرية بسبب تدهور السلوك الميكانيكي لهذه المادة.

قائمة المراجع: :

السيد عزت قنديل (عطا الله أحمد)،تقنية الأخشاب، كلية الزراعة، جامعة الملك سعود، نشر عمادة شؤون المكتبات، الرياض، 1993.

- ALMEIDA (G), Influence de la structure du bois sur ses propriétés physico mécanique à des teneurs en humidité élevées, Thèse de doctorat, Université LAVAL, QUIBEC, Mars 2006

- Berducou M.C., La conservation en archéologie, méthodes et pratiques de la conservation – restauration des vestiges archéologiques, Masson, Paris, 1990, p. 225.

- BRESSON (T), Maison de bois, architectures scandinave, 2eme éd, Dunod, 1986.

- CARTWRIGHT (K.G), FINDLAY (W.K), Decay of timber and its Preservation, Chemical Publ, Co, Inc, New York, 1950.

- DAJOZ (R), La digestion du bois par les insectes xylophages, l'année biologique, Edition Eyrond, paris, 1968, p.21.

- DOMINIQUE (G.M), Construction avec le bois, collection technique de conception, Edition le moniteur, Paris, 1999.

- DOMINIQUE (G.M), Construction avec le bois, collection technique de conception, Edition le moniteur, Paris, 1999.

- DUREZ (M), Nouveau traité des matériaux de construction, T.II, Edition Dunod, Paris, 1992.

- Fengel, G. Wegner, Wood, Chemistry, Ultra structure, Reactions, Berlin, 1984, p.113.

- GASC (Y), DELPORTE (R), et al, les charpentes en bois, Edition Eyrolles, s.d..

- GERARD (K), La fabrication du bâtiment, les gros œuvres, édition Eyrolles, Paris, 1997.

- Karl (H.G), Dieter (H), et autres, Construire en bois, Choisir, Concevoir, Réaliser, Presse polytechniques et universitaires Romandes, Suisse, 2001, p. 15.

- KIRK (T.K), COWLING (E.B), Biological decomposition of solid wood, the chemistry of solid wood American Chemical Soc. Washington D.C, 1984.

- KOLMAMM (F), COTÉ (W), principles of wood science and technology, springs, 1968.

- KOMAR (A), Matériaux et éléments de construction, Imprimé en Union Soviétique, URSS, SD.

- MATANA (M), Charpentes : ossatures bois, planchers, assemblages…, éd alternatives, Paris, 1999.

- MORERE (J.L), RAYMOND (P), Dictionnaire raisonné de biologie, Edition Frison Roche, 2003.

du Moniteur, 1983.

- ROGER (D), Ecologie des insectes forestiers, Gouthier - Villars, paris, 1980.

- RUSE (W), Le bois en architecture extérieure, traduit de l'Allemand Delta (s), Edition le moniteur, 1981.

- SAVORY (J.G), Damage to Wood Caused by Microorganisms, Paper III.J.App. Bact, 1954.

- SKOUTARIDES (H), DENANCE (M), Construction a ossatures en bois, conception et mise en œuvre, Edition du Moniteur, Paris, 1992.

- SKOUTARIDES (H), DEMANCE (M), Construction a ossature bois, Conception et mise en œuvre, Edition Eyroles, Paris, 1998.

- SKOUTARIDES (H), DONANCE (M), Construction a ossature bois, Conception et mise en œuvre, Edition Eyrolles paris, 1995.

- SUZUKI (M), Maisons en bois en Europe (exemple traditionnels), Edition Eyrolles, Paris, 1980.

- WIGGLES (W.B), trad. CHOPARD (L), Physiologie des insectes, DUNOD, Paris,1959 .