



AVERTISSEMENT

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

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

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

Contact : ddoc-memoires-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

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

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

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

Projet de fin d'étude du cycle ingénieur :
Les Abris à sel en bois

Amélie Grandjean et Virginie Martin
2012 / 2013

En collaboration avec le CETE de l'EST



Responsable en entreprise : Mario Marchetti et Ethel Jacquot

Enseignants responsables: Marie-Christine Trouy-Triboulot et Romain Rémond

AVANT-PROPOS

Nous tenons à remercier tout d'abord Mario MARCHETTI et Ethel JAQUOT, nos contacts du CETE EST pour leur accueil très chaleureux dans leurs locaux ainsi que pour leur gentillesse, leur disponibilité et la clarté de leurs explications. Ils nous ont été d'une grande aide pour comprendre un peu mieux un univers compliqué qui n'est pas le nôtre (l'équipement et en particulier la viabilité hivernale).

Nous souhaitons remercier nos enseignants responsables Marie-Christine TROUY-TRIBOULOT et Romain REMOND pour leur implication, leurs indications et les aides qu'ils ont pu nous apporter tout au long de ce projet.

Nos remerciements vont également vers Gilbert VALENTIN salarié du Conseil Général des Vosges pour sa disponibilité et sa gentillesse qui nous a permis de récupérer quelques kilogrammes de sel routier. Dans le même registre, un grand merci à nos deux contacts spécialistes du béton, Guillaume RIBOLZI travaillant à EST-Préfa ainsi que Christian ROBACH travaillant pour le groupe Fehr sans qui nos recherches sur le béton n'auraient certainement pas abouties.

Enfin, nous remercions toutes les personnes qui de près ou de loin ont contribué au bon déroulement de notre Projet de Fin d'Etudes.

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS.....	2
SOMMAIRE	3
INTRODUCTION	5
PARTIE I : ETAT DES LIEUX SUR LES ABRIS A SEL EN BOIS	6
1) Historique et chiffres.....	6
a) Inventaire des abris à sel	6
b) Solutions Techniques utilisées.....	8
2) Principales malfaçons des abris bois : à travers des exemples.....	10
a) Les malfaçons dues au soutènement.....	10
b) Les malfaçons dues aux dimensions de l'abri	12
c) Les dégâts sur les assemblages métalliques	14
3) Un mot sur les silos bois	15
PARTIE II : VERIFICATION DE LA COMPATIBILITE DU SEL ET DU BOIS.....	17
1) Le sel et le bois, deux matériaux hygroscopiques.....	17
a) Comportement hygroscopique du sel	17
b) Comportement hygroscopique du bois	18
c) Echanges d'eau entre les deux matériaux	18
2) L'expérience réalisée : protocole	20
3) Résultats et conclusions des expériences réalisées	21
PARTIE III : CONCEPTION D'UN ABRI-MODELE.....	26
1) L'optique suivie connaissant les pathologies à éviter	26
a) La structure globale et les matériaux	26
b) Une modularité	27
2) Calcul de la force de poussée du sel.....	28
a) Caractéristiques du sel de déneigement	29
b) Caractéristiques du mur de soutènement	30
c) Méthode de calcul	31
3) Les modèles possibles	32
a) Le soutènement du sel par un mur béton banché	32
b) Le soutènement du sel par des L béton préfabriqués	32
c) Le soutènement du sel par une structure bois.....	33

d) Le soutènement du sel par les poteaux treillis	34
e) Les trois sortes de poutres (arbalétriers) possibles.	35
4) Détails constructifs considérés.....	36
a) Le sel un matériau corrosif	36
b) Le reste de la construction.....	36
c) Les classes d'emploi du bois	37
d) La liaison entre deux modules	38
5) Le pré dimensionnement pour estimation tarifée.....	38
a) Poids propre	38
b) Charge de Neige	38
c) Charge de vent	39
6) Estimation de la meilleure solution.....	43
a) Les résultats de la simulation.....	43
b) Analyse de ces résultats.....	47
7) Limites de cette approche	47
CONCLUSION	49
BIBLIOGRAPHIE.....	50
TABLE DES FIGURES	52
TABLE DES TABLEAUX.....	53
ANNEXES.....	54
Annexe n°1 : Visite des abris	54
Annexe n°2 : Echange d'informations avec professionnel du béton	57
Annexe n°3 : Détails des calculs des Cpe	58
RESUME	61
ABSTRACT	61

INTRODUCTION

Le climat en France nécessite une gestion particulière, notamment en hiver. En effet, la neige et le gel touchent une grande partie de la France dégradant les conditions de circulations sur les différents axes routiers. Une gestion de viabilité hivernale est donc mise en place afin de rendre les routes praticables. Les chasse-neiges et les saleuses se relaient pour évacuer la neige et saler. Des grandes quantités de sel (de 400000 à 1 million de tonnes [1-Viabilité Hivernale]) sont donc déversées sur les routes chaque année.

Pour assurer un épandage rapide et efficace, un stockage adapté est donc primordial. Il faut que les quantités de sel nécessaires soient disponibles à temps et que son humidité soit la bonne pour que les saleuses soient efficaces. Pour ce faire, des stocks de sel sont répartis sur le territoire à l'échelle des communes, des départements avec des stocks allant de quelques tonnes (commune) à plusieurs milliers (stock intermédiaire). Ces stocks doivent être abrités afin de protéger le sel des précipitations, du vent,... afin d'en perdre le moins possible et de contrôler son humidité. En effet, pour deux principales raisons, il est inquiétant de déverser du sel dans la nature :

- D'un point de vue économique : le sel est une denrée assez chère (près de 80€ la tonne) au vue des quantités utilisées. Avec une pluviométrie moyenne, on peut arriver à une perte de 3 à 4% par an pour un stock de 300 à 400 tonnes [1].
- D'un point de vue écologique : le sel déversé sur les routes se répand dans les sols puis dans les nappes phréatiques. A partir d'une certaine dose, le sel devient toxique pour certains êtres vivants. On peut même observer l'apparition de plantes de bord de mer sur les bords de routes de l'est de la France.

Enfin, il est nécessaire de garder le sel au sec pour éviter en plus des pertes, les phénomènes de mottage et donc la cristallisation du sel sous forme de gros cristaux très solides formant une croûte.

De plus, une humidité contrôlée permet de garantir un dosage prescrit pour les saleuses.

Tous les matériaux ne sont pas à égalité devant le sel. Il se trouve que dans beaucoup de cas, le bois semble présenter des atouts face à des concurrents comme l'acier et le béton. Pourtant, son utilisation n'est pas généralisée parfois même évitée.

Dans un premier temps, un état des lieux sur les abris à sel en bois sera établi afin de déterminer ce qui pourrait attirer des méfiances quant au bois.

Dans un second temps, une étude permettra de déterminer l'influence de la présence de sel dans les conditions d'exploitation.

Finalement, une conception d'un abri-modèle sera présentée afin de répondre aux besoins particuliers de ce type de stockage.

PARTIE I : ETAT DES LIEUX SUR LES ABRIS A SEL EN BOIS

1) Historique et chiffres

Il y aurait environ 20000 sites de stockage de sel répartis sur tout le territoire français avec 50% d'abris en dur. [2-Stocker les fondants routiers sous-abris en maîtrisant les rejets de la Plateforme]

a) Inventaire des abris à sel

Un inventaire des abris à sel en bois a été réalisé par le CETE de l'Est. Cette étude se limite aux régions Lorraine et Alsace, deux régions aux conditions hivernales assez rudes. Une étude sur la France entière aurait été plus précise mais par manque de temps et peut-être de moyens, nous nous contenterons de ces régions. Les chiffres seront donc à considérer avec précaution car ces deux régions ont une culture bois que n'ont pas forcément les régions de l'Ouest par exemple. En effet, la ressource bois y est largement présente et plutôt bien exploitée. Des politiques pour développer la filière ont été mises en place. Cela se ressent sur la proportion du nombre d'abris en bois qui ne sera pas forcément représentatif de la proportion nationale.

Pour chaque abri recensé, un indice a permis de repérer la part de bois (Classement réalisé par le CETE) comme nous le montre le Tableau 1 :

1	Structure porteuse (Portique, Charpente)
2	Soutènement
3	Bardage extérieur
4	Pièces martyres (chocs)
Tout Bois	Abris entièrement réalisés en bois

Tableau 1 : Indice de proportion du bois

38 abris ont ainsi été répertoriés. Ce sont uniquement des abris gérés par des départements ou des gestionnaires autoroutiers. Tous les abris communaux n'ont pas été comptabilisés. Ce sont souvent des abris de petite taille qui n'ont pas le stockage de sel pour fonction première (bâtiments techniques,...).

Type d'abris	Pourcentage
1	15.8%
1- 3	10.5%
1-2-3	5.3%
1-2-4	2.6%
1-3-4	5.3%
1-2-3-4	23.7%
Tout Bois	36.8%

Tableau 2: Type d'abris bois

D'après le tableau 2, on remarque que près d'un tiers des abris sont entièrement en bois. Les abris type 1-2-3-4 représentent un quart supplémentaire. Les autres abris sont pour la plupart composés de murs béton sur lesquels repose une toiture structure bois. Dans l'Est de la France, comme on pouvait s'y attendre, une large proportion des abris sont donc constitués de bois.

Intéressons-nous désormais aux années de construction pour évaluer le parc d'abris existants et s'il tend à être renouveler. Seules 20 données ont été récoltées pour les années de construction des abris. Voici les résultats :

Années de construction	Pourcentage
1970	25%
1980	30%
1990	25%
2000	10%
2010	10%

Tableau 3: Années de construction des abris

Selon le tableau 3, 55% des abris ont plus de 30 ans. 20% des abris ont été nouvellement construits. Même si toutes les données ne sont disponibles, on remarque d'après les photos, que beaucoup d'abris ont l'air anciens et souvent mal entretenus. On peut donc penser qu'une partie des abris va être amenée à être remplacée dans quelques années. De plus, nombreux sont les stocks qui ne sont pas abrités et soumis aux intempéries (environ 25% des stocks [2]). C'est le cas par exemple du stock situé à Golbey à l'Équipement où plusieurs dizaines de tonnes de sel sont stockées à l'air libre. Ce n'est qu'un exemple parmi tant d'autres mais cette situation ne peut pas durer car les impacts écologiques sont devenus préoccupants. Des solutions devront être trouvées faisant intervenir la construction de nouveaux abris par exemple.

Grâce à une visite sur le terrain, les systèmes constructifs ont pu être identifiés.

b) Solutions Techniques utilisées.

D'après l'inventaire réalisé, deux techniques sont prédominantes pour la fonction structure-soutènement : structure en treillis et structure lamellé-collé. Nous allons étudier ces deux structures et dégager leurs avantages et inconvénients.

1^{ère} technique : Poteaux moisés et Arbalétrier « treillis »

La première technique se distingue d'abord par ses poteaux ancrés dans le sol. Pour réaliser ceci, des poteaux moisés sont mis en place (voir Figure 1).

Cette solution présente l'avantage de ne pas utiliser de ferrures qui pourraient être endommagées par le sel. Par contre, il est difficile aujourd'hui d'envisager un tel type de système étant donné que l'utilisation de la créosote et du CCA (Cuivre Chrome Arsenic) n'est plus autorisée. Des jeux d'assemblages sont importants entre les deux essences.

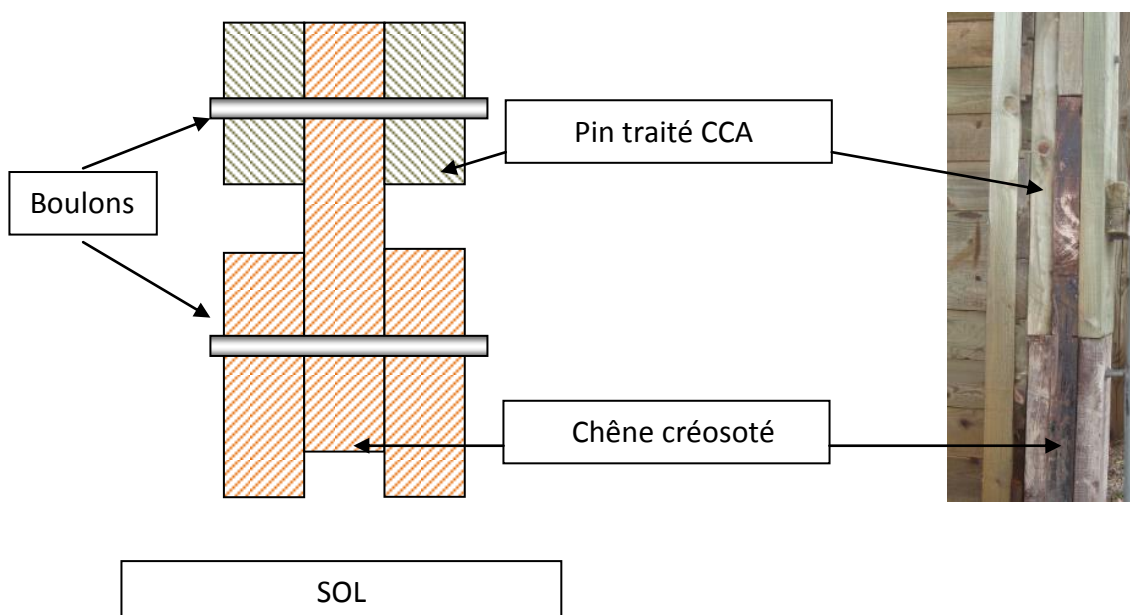


Figure 1: Structure poteaux moisés

Ces poteaux moisés supportent une structure treillis, élément porteur de la toiture comme on peut le voir sur la figure 2.

L'avantage du treillis est d'utiliser des bois de petite section dont l'approvisionnement est plus facile. Le prix est souvent plus faible aussi. Il permet de réaliser des portées suffisantes pour ce type d'abris d'environ 10m de largeur. En cas de chocs, on peut facilement le réparer (par exemple : changer une contre-fiche).



Figure 2: Portique treillis

Cette structure, dans le cas où elle a été réalisée comme sur la figure 2, présente l'inconvénient d'avoir des jambes de forces qui peuvent gêner l'exploitation du sel. Un autre inconvénient est que cette structure nécessite un temps de main d'œuvre important pour la réalisation du treillis.

2^{ème} technique : Le lamellé-collé

L'autre technique utilisée et remarquée lors de nos visites, est la structure lamellé-collé (Figure 3). En comparaison avec le treillis, la matière première est plus chère mais ne nécessite pas de temps de main d'œuvre après l'achat de celle-ci. Ce sont des fabricants particuliers qui fournissent les entreprises de charpente.

Ce type de charpente est souvent fixé grâce à des poteaux eux aussi en lamellé-collé avec un assemblage boulonné (souvent de type couronne) en tête de poteau. Des jambes de force peuvent aussi être présentes. L'inconvénient est qu'en cas de dommages, les réparations possibles sont limitées et plus difficile que dans le cas du treillis. On pourrait imaginer un renforcement avec des vis SFS de type WB mais cela nécessite un outillage approprié.



Figure 3: Structure Lamellé-collé

2) Principales malfaçons des abris bois : à travers des exemples

Vous pouvez trouver en **Annexe 1** un tableau récapitulatif de notre visite avec les moyens de construction et les problèmes rencontrés.

On peut classer les différentes malfaçons en trois catégories :

- Murs de soutènement
- Dimensions de l'abri
- Assemblages métalliques utilisés

En effet, les abris bois souffrent dans la majorité des cas à cause d'une inadaptation de leur conception par rapport à leur utilisation. Par contre, aucun des abris visités ne présentait de dommages dus aux champignons. La seule particularité remarquée est une importante coloration bleue probablement due à une concentration d'agents anti-mottant (Hexacyanoferrate) comme on peut le voir sur la Figure 4.

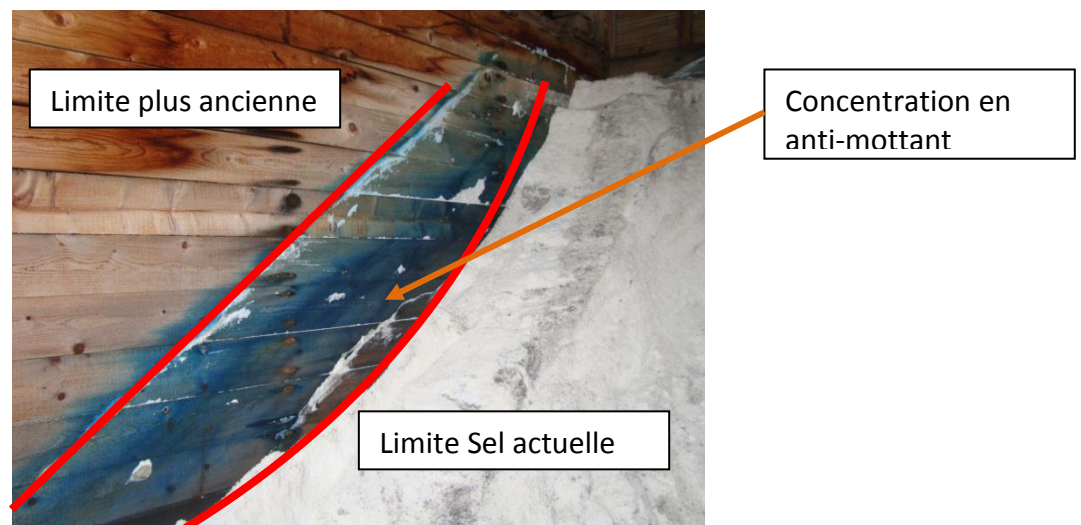


Figure 4: Coloration bleue du parement bois

a) Les malfaçons dues au soutènement

La fonction de soutènement dans un abri à sel est primordiale. C'est cette fonction qui assure le maintien du stock de sel. Le sel avec une masse volumique de 1225kg/m^3 [3- *Fonctionnement des fondants*] se présente sous forme de grains ayant plus ou moins de cohésion entre eux et exerce une force de poussée sur la paroi qui le soutient. Cette force de poussée peut s'avérer importante. Il faut donc bien dimensionner l'abri pour qu'il résiste à la charge de sel pour lequel il est prévu.

Sans oublier que ce sel est exploité par des engins de chantier faisant plusieurs tonnes. Ces engins sont très souvent amenés à monter sur les tas de sel, exerçant une pression supplémentaire sur les murs de soutènement.

Dans beaucoup de cas rencontrés, la fonction soutènement n'était pas dissociée de la fonction de structure de l'abri. Les poteaux servant à supporter la charpente et la toiture sont les mêmes que ceux servant à soutenir le sel. Le problème est donc amplifié, si les poteaux ne résistent pas à la poussée du sel, ils mettent en péril le bâtiment tout entier (Figure 5).

Voici un exemple des dégâts constatés :

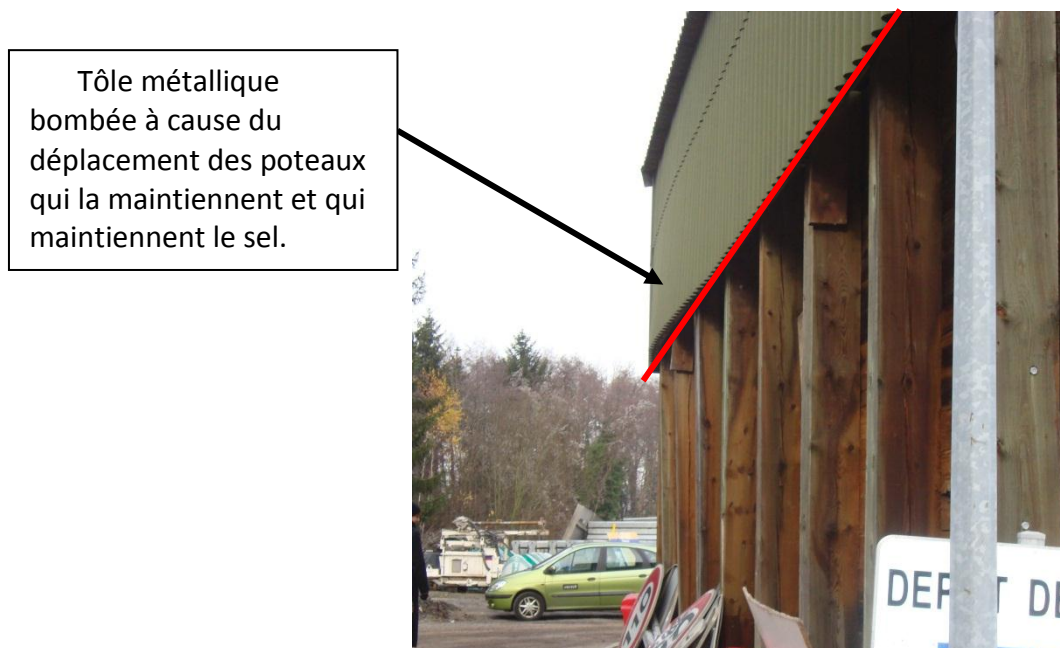


Figure 5: Déplacement de la structure à cause de la masse de sel

Dans certains cas, les utilisateurs des abris ont trouvé des solutions pour faire face à la poussée du sel comme dans l'exemple de figure 6.



Figure 6: Contreforts en bois assurant le soutènement

Il faut donc réfléchir à une solution soit qui sépare les deux fonctions, soit à une solution semblable à ce qui a pu être observé mais qui assure entièrement le soutènement.

D'autres problèmes sont à signaler concernant les murs de soutènement. A force de racler le sel au moyen de chargeurs et de godets, les murs de soutènement sont fortement agressés. La combinaison de la force de poussée et de ces agressions met dans des conditions rudes les parois. On constate beaucoup de dégâts au niveau des parements en bois comme on peut le constater sur la figure 7.

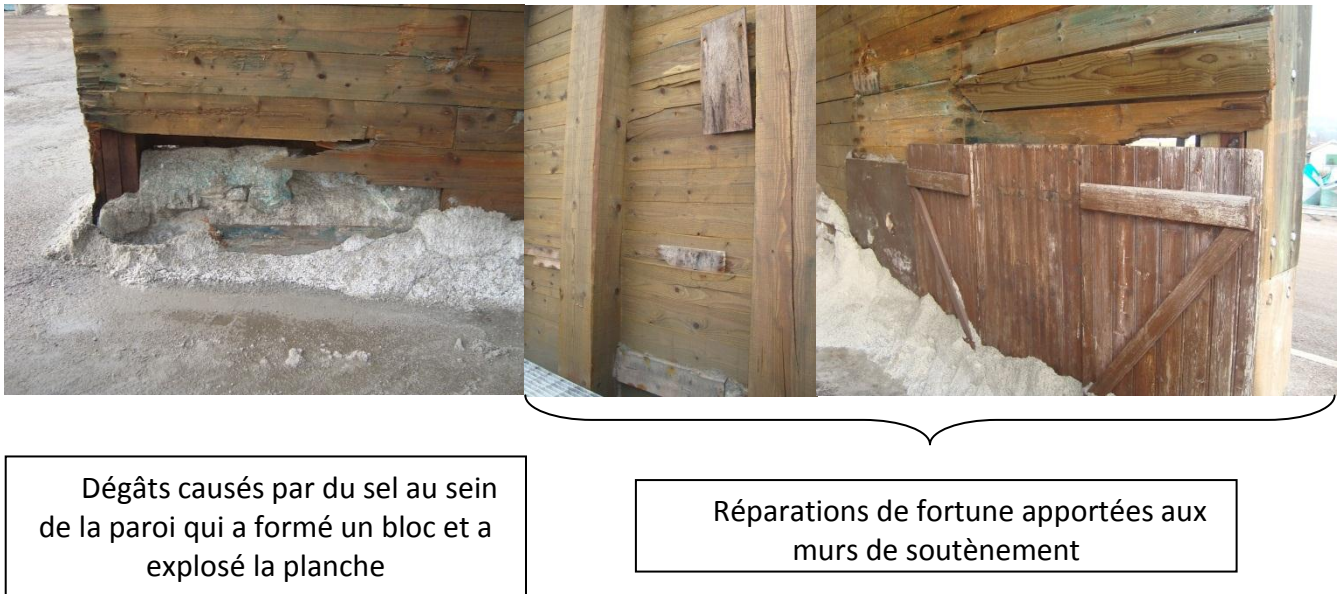


Figure 7: Dégâts subis par le parement bois

Ces éléments de soutènement sont donc des éléments qui doivent pouvoir être changés facilement. Même avec la meilleure des conceptions possible, on ne pourra pas empêcher, les chargeurs de frotter contre les parois. Il faut donc prendre en compte le caractère « fusible » de ces pièces.

b) Les malfaçons dues aux dimensions de l'abri

Les engins de la viabilité hivernale sont des machines de dimensions assez conséquentes. Au niveau de l'abri, plusieurs types d'engins sont concernés :

- Les camions d'approvisionnement : un des fournisseurs des exploitants de l'Est de la France est Rock. Les camions d'approvisionnement sont des camions benne de 24t dont la hauteur une fois la benne levée (50°) peut atteindre 9m [4-Guide technique : Stocker les fondants routiers].
- Les chargeurs : ils sont de « petite » taille. A titre d'exemple, nous avons choisi un chargeur sur pneu de LIEBHERR® de la série L510 [5-Chargeuses Stéréo] dont les dimensions sont indiquées dans le tableau 4.

Largeur avec godet	2,33m
Hauteur (bras levé)	4,27m
Longueur	5,76m

Tableau 4: Dimensions des chargeurs sur pneus

- Les saleuses : ce sont les engins qui vont épandre le sel, la saumure sur les routes. Ce sont soit des saleuses sur camion ou soit des saleuses trois points fixées à l'arrière de tracteurs.

Pour que ces engins puissent circuler facilement, il faut que les dimensions de l'abri soient adaptées. Pour que la livraison de sel se fasse sous l'abri, il faut que celui-ci fasse au minimum 9m de haut. Les saleuses pourront elles aussi être chargées à l'abri. Il faut aussi que l'abri soit assez profond pour éviter que le sel sorte et ne dépasse de la zone protégée des intempéries par le toit.

Dans de nombreux cas, les abris n'ont pas les dimensions adéquates par rapport au tonnage de sel qu'ils abritent. Du sel se répand donc en dehors de l'abri. De plus, leur ouverture, permettant l'accès aux engins et bien souvent trop petite. D'après la figure 8, on observe que des éléments de structure sont abîmés.



Jambe de Force

Poteau

Contreventement

Figure 8: Dégâts subis par des éléments de structure

Pour éviter au maximum ce genre de désagréments, il faut donc prévoir des dimensions suffisantes et éviter les éléments qui dépassent de la structure globale (poteau isolé, jambe de force perpendiculaire au sens de chargement,...)

c) Les dégâts sur les assemblages métalliques

Même dans les abris tout en bois, on retrouve des éléments métalliques permettant la fixation des éléments en bois. Il s'agit par exemple de pointes, de boulons ou encore de ferrures. Dans la plupart des cas, ces éléments sont très corrodés comme on peut le voir sur la figure 9.



Boulons permettant la fixation
du poteau moisé

Pointes fixant le soutènement

Rails métalliques
protégeant les coins

Figure 9: Corrosion des éléments métalliques

Le phénomène de corrosion simple peut s'expliquer de cette façon :

« Les métaux employés dans le génie civil sont des donneurs d'électrons et constituent l'anode. L'eau, additionnée de fondants éventuellement, les protons et l'oxygène sont, quant à eux, des accepteurs d'électrons et constituent la cathode. C'est la présence de ces éléments qui va provoquer l'oxydation des métaux et donc leur corrosion. » [1]

Le sel est un agent de corrosion, en augmentant la conductivité électrique des métaux, il accélère le phénomène. Dilué dans de l'eau, NaCl crée une solution ionique à base de deux ions : Na^+ et Cl^- . Cette solution très conductrice peut conduire à un effet de corrosion électrolytique. En effet, si deux métaux sont présents et en contact avec de la saumure, un phénomène de « pile » va se créer. Chaque métal servant d'électrode, des électrons vont être échangés à travers le métal et des ions à travers la solution saline. L'oxydation du Fer donne : $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$

Le fer va donc passer d'un état solide à un état ionique dissout dans l'eau. Cela est possible pour un bon nombre de métaux.

Pour éviter ces phénomènes, on peut utiliser des inox type A4 conçu pour les constructions navales, ou encore des peintures de protection par isolation en forte épaisseur comme nous le conseille le Setra [4].

Il faudra aussi éviter les contacts directs avec les fondants si cela est possible et éviter les zones où l'eau salée pourrait stagner.

3) Un mot sur les silos bois



Figure 10: Silo à déchargement gravitaire
(source : holtten-gmbh.de)

Outre les hangars de stockage, il existe un autre moyen de stockage qui permet de mettre le sel à l'abri. Il s'agit des silos. Ils présentent l'avantage de limiter la manutention pour charger les saieuses. Les silos sont conçus de manière à ce que le déchargement se fasse par gravité. Les camions peuvent passer sous le silo et se faire charger (Figure 10). Cela représente un gain en temps et en matière (beaucoup moins de pertes) non négligeable.

Ce type de chargement entraîne un surcoût car la livraison de sel se fait par air pulsé. Il faut compter 6 à 10€ de plus pour une tonne de sel.

Ce système est très répandu en Allemagne et en Suisse.

Cette solution n'a pas été retenue dans la suite de l'étude car elle est peu présente en France (1% [2]). Une réflexion sur les hangars s'imposait face aux problèmes rencontrés. On peut néanmoins noter quelques sujets à réflexion.

Tout d'abord, l'utilisation des silos nécessite une qualité de sel supérieure à celle des abris. Voici les classes recommandées par le Setra [4] dans le tableau 5.

Modalité de stockage	Pourcentage en eau (%)	Teneur en antimottants associée selon la norme
Silo	Classe 1	Mini 3 mg/kg – maxi 200 mg/kg Possibilités de spécifications plus restrictives dans le cahier des charges selon les préconisations du fournisseurs de silo.
Abri couvert	Classe 2	Mini 3 mg/kg– maxi 200 mg/kg
Air libre / bâche	Classe 3	Mini 10 mg/kg– maxi 200 mg/kg

Tableau 5: Modalité de stockage et classe de sel

D'autre part, si l'humidité n'est pas correctement contrôlée, il peut y avoir apparition d'un phénomène particulièrement nuisible : l'effet de silo ou effet de voûte.



Figure 11: Illustration de l'effet de voûte

Le sel étant un matériau granulaire, lors d'un écoulement dans un silo, un phénomène d'effet de voûte peut se produire. Les grains se répartissent au hasard en descendant dans le silo et atteignent un état stable sous forme de voûte comme l'illustre la figure 11. Si la voûte cède par le bas, cela conduit à une chute brutale de plusieurs tonnes de sel qui peut provoquer l'implosion du silo.

Pour éviter ce phénomène, il faut retirer le sel par le haut pour éviter qu'il y ait une rupture par le bas.

Ce genre d'accident s'est produit dans l'Isère.

Le bois a lui aussi un caractère hygroscopique. On peut supposer que de l'eau pourrait alors être transmise entre le bois et le sel ce qui aurait pour conséquence d'humidifier le sel. En effet, le sel doit être très peu humide dans un silo mais le bois est soumis aux intempéries, il peut donc devenir assez humide pour que de l'eau passe dans le sel. Ceci reste une hypothèse qu'il pourrait être intéressant de tester.

Il existe plusieurs fabricants de silos en bois pour le sel. On peut citer entre autre le fabricant Sels en stock qui produit des silos de 50 à 500m³. Voici quelques exemples de réalisations (Figure 12):



Figure 12: Silos en bois pour le stockage du sel (source : Sels-en-stock.fr)

PARTIE II : VERIFICATION DE LA COMPATIBILITE DU SEL ET DU BOIS

Les conditions salines sont des conditions assez extrêmes et ne sont pas compatibles avec tous les matériaux. Pour savoir quels bois utiliser et dans quelles conditions, il faut déterminer la classe d'usage de celui-ci.

1) Le sel et le bois, deux matériaux hygroscopiques

Tout d'abord le sel et le bois sont deux matériaux hygroscopiques. Cela signifie que leur taux d'humidité varie selon les conditions climatiques c'est-à-dire la température et l'humidité relative de l'air. Dans un premier temps, voyons le comportement hygroscopique du sel.

a) Comportement hygroscopique du sel

L'équilibre hygroscopique du sel se situe à 75% environ d'humidité relative pour une température comprise entre 0 et 5°C. Cette humidité relative d'équilibre augmente lorsque la température baisse. Voici le diagramme de l'équilibre hygroscopique du sel en fonction de la température et de l'humidité relative [3] (Figure 13):

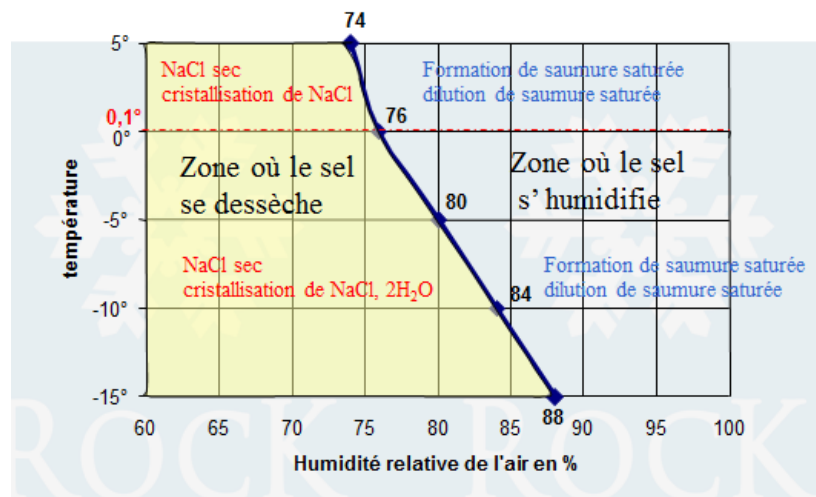


Figure 13: Diagramme de l'équilibre hygroscopique du sel

Pour une température de 0°C, en dessous de 76% d'humidité relative, le sel sèche. Au-dessus de cette humidité, le sel s'humidifie et forme une saumure saturée.

Dans les conditions hivernales (froides et humides), le sel aurait plutôt tendance à s'humidifier (l'humidité relative de l'air est couramment supérieure à 80% en Hiver).

b) Comportement hygroscopique du bois

L'hygroscopie du bois est quelque peu différente de celle du sel car celui-ci ne se dissout pas dans l'eau. Pour un couple de température et d'humidité relative donné, on a une humidité du bois correspondante. Il s'agit de l'humidité d'équilibre ou de l'équilibre hygroscopique. Cet équilibre ne dépend pas de l'essence de bois utilisée. Voici le diagramme de l'équilibre hygroscopique du bois donné par le CNDB (Figure 14) :

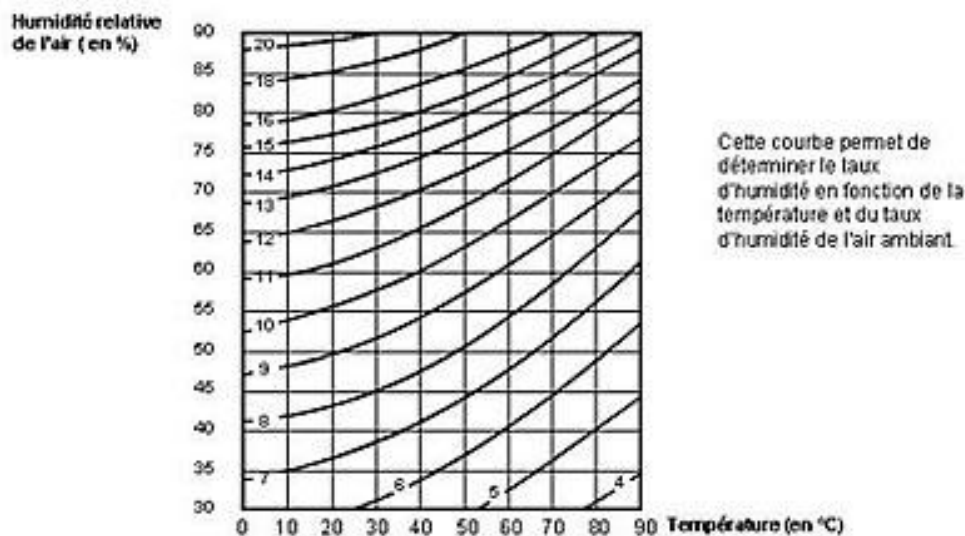


Figure 14: Equilibre Hygroscopique du bois (source: CNDB)

Le bois vert (fraichement coupé) n'ayant subi aucun séchage ($H > 30\%$) n'est pas mis en place en charpente. Il doit être séché. Jusqu'à 30% d'humidité, seule de l'eau libre (eau non constitutive) sort du bois. Puis à partir de 30%, c'est de l'eau liée (constitutive) qui s'évapore. C'est le départ de cette eau liée qui entraîne du retrait. Lors de sa mise en place, on peut supposer que le bois qui servira à la construction sera à une humidité inférieure au point de saturation des fibres (30%), il sera à une humidité voisine de 22% comme l'indique le CTBA dans [6-Bois Massifs Structuraux].

c) Echanges d'eau entre les deux matériaux

C'est deux matériaux étant capables d'absorber et d'adsorber de l'eau, des échanges d'eau auront sûrement lieu entre eux. D'après la figure 15, on peut identifier des zones d'humidité au niveau du bois en relation avec le tas de sel.

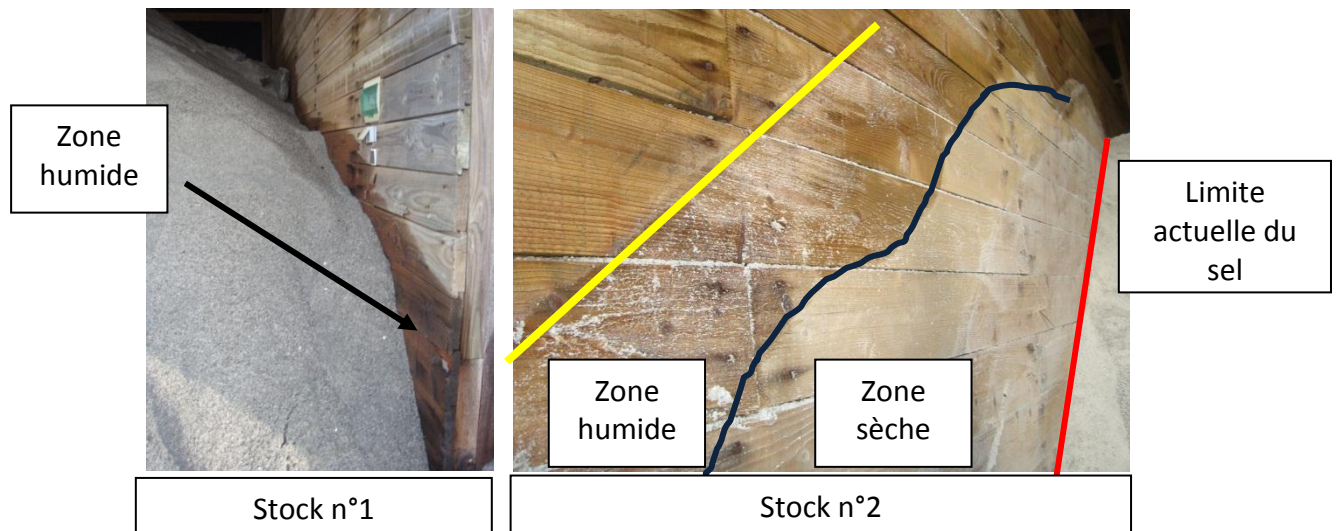


Figure 15: Humidification du bois

Dans le cas du stock n°1, le sel n'a pas subi de chargement ou de déchargement depuis un moment. Dans le cas du stock n°2, du sel a été déchargé quelques minutes avant la prise de la photo. La limite du sel arrivait donc au niveau de la ligne bleue. On peut émettre quelques hypothèses concernant les zones d'humidité.

Stock n°1 :

L'atmosphère étant chargée en humidité et les températures assez froides (journée du 13 décembre, alerte pluies verglaçantes), le sel a dû se charger en humidité. Pour un stock assez important, seule la couche superficielle se charge en humidité. On remarque que le bois à proximité de la limite du tas de sel est gorgé en eau. Ceci peut peut-être s'expliquer par le fait que le bois a imprégné du sel et que ce dernier a amplifié la capacité d'absorption du bois, ce qui se traduit par une forte humidité de celui-ci. Autre hypothèse : le bois en contact avec du sel humide, par son caractère hygroscopique a absorbé de l'eau contenue dans le sel de surface.

Stock n°2 :

Le sel de ce stock était dans les mêmes conditions que le premier. Pour les mêmes raisons que précédemment, on observe qu'environ 20cm au-delà de la limite du tas de sel (ligne bleue), le bois est très humide. On peut remarquer ici, que la zone située entre l'ancienne limite du tas de sel et la nouvelle (zone comprise entre la ligne bleue et rouge) est quasiment sèche. Cela signifie que seule la partie du bois au-dessus du tas de sel est humide et que la partie en contact direct avec le sel reste sèche. On pourrait donc supposer que lorsque le bois est en contact avec une forte épaisseur de sel, l'eau présente dans le bois est absorbée par le sel. Le sel se trouvant en très forte concentration a une capacité d'absorption de l'eau très importante. De plus, le sel en contact avec le bois à ce niveau du stock (plutôt en profondeur) n'est pas soumis aux conditions atmosphériques. Il est donc plus sec que celui se situant en surface.

Ces résultats sont sûrement le fruit d'une combinaison de phénomènes ayant lieu en même temps. Le bois humide l'est sûrement à cause des conditions atmosphériques, de la proximité de sel humide, de l'imprégnation de sel qui dope sa capacité à absorber.

Pour confirmer ces hypothèses, des expériences auraient pu être réalisées pour évaluer en temps réel les échanges d'eau entre l'atmosphère, le bois et le sel.

Nous avons pu remarquer que dans tous les cas, le sel place le bois dans des conditions d'humidité plus élevées que les conditions habituelles. Or les champignons sont assez friands des zones humides. Des expériences ont donc été réalisées afin de déterminer si le sel avait plutôt un effet bénéfique (apport considérable d'humidité ?) ou néfaste sur les champignons (stress hydrique ?).

2) L'expérience réalisée : protocole

L'objectif de cette expérience était de voir si le sel agissait d'une manière ou d'une autre sur la dégradation du bois par des champignons basidiomycètes lignivores. On a testé pour cela des échantillons d'Epicéa et de Hêtre afin d'avoir un résultat sur une essence de feuillu ainsi que sur une essence de résineux.

Nous avons testé 4 souches de champignons : *Gloeophyllum trabeum*, *Coniophora*, *Poria placenta* et *Coriolus versicolor*. Ainsi 6 boîtes de pétri d'essai et 3 boîtes de pétri d'éprouvettes témoin qui furentensemencées par champignon et par essence soit un total de 72 boîtes.

La première étape du protocole fut la préparation du milieu de culture. Pour cela, nous avons mélangé sur un agitateur chauffant 40g de malt avec 20g d'agar agar à 500mL d'eau distillée. Ensuite nous avons complété la solution avec de l'eau distillée de façon à en obtenir 1L que nous avons stérilisé 20 minutes à l'autoclave à 120°C. Une fois le milieu stérile, nous avons coulé les boîtes de pétri en atmosphère stérile.

Parallèlement la deuxième étape fut la préparation des éprouvettes de bois. Celles-ci furent choisies parmi toutes pour leur homogénéité. Ainsi nous avons marqué et pesé 72 éprouvettes de chacune des 2 essences. Ensuite, la moitié de ces dernières furent mise à l'étuve pour sécher alors que l'autre moitié fut imprégnée par une solution saline. L'imprégnation a été réalisée sous vide avec une solution d'eau distillée saturée par le sel de déverglage récupéré à Golbey avec l'aide de M. Valentin Gilbert. Au bout d'une heure d'imprégnation, les éprouvettes furent pesées et mises à l'étuve. On garde ainsi une trace de la masse de sel rentrée dans les éprouvettes. Suite à cela, nous avonsensemencé les boîtes de pétri avec les souches de champignons.

2 semaines plus tard nous avons pu observer la croissance des champignons dans nos boîtes sans contamination autre. Ainsi nous avons mis en place nos éprouvettes de bois dans les boîtes à raison d'une éprouvette saturée de sel et d'une éprouvette non imprégnée par boîte.

Les boites témoin furent uniquement remplies par des éprouvettes non imprégnées le but étant de déceler une éventuelle interaction du sel avec le milieu de culture par exemple qui pourrait avoir des conséquences sur les résultats des éprouvettes non salées. Tout cela a été réalisé en milieu stérile de manière classique (éprouvettes sur joints toriques stérilisés à la flamme).

Nous avons observé l'évolution de la propagation des champignons un mois après la mise en boite des éprouvettes de bois.

Environ deux mois après, nous avons arrêté l'expérience pour relever les résultats.

3) Résultats et conclusions des expériences réalisées

Les observations au bout d'un mois d'incubation mirent en évidence le caractère hygroscopique du sel au sein du bois. En effet, les éprouvettes salées étaient clairement plus humides que les autres (Figure 16). Cependant, extérieurement, les champignons ont semblé se développer indifféremment sur les deux éprouvettes.

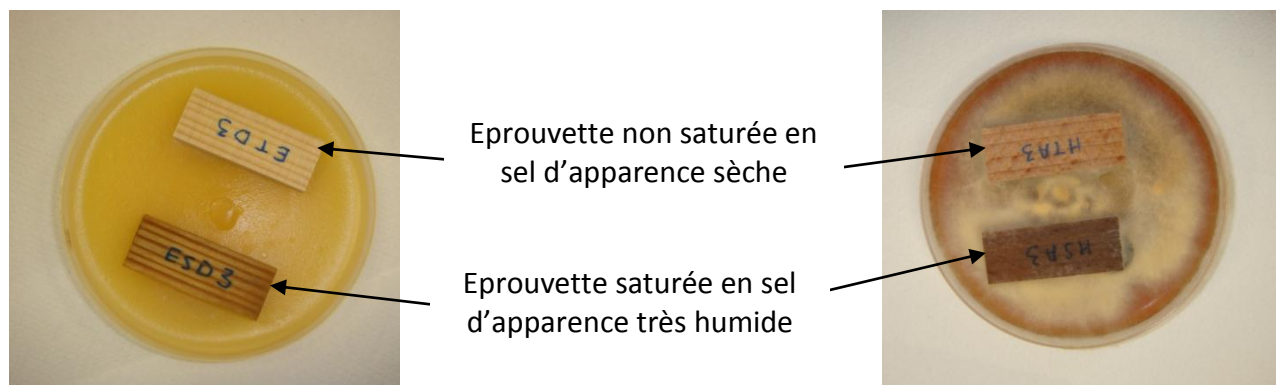


Figure 16 : Eprouvettes de bois après culture du champignon

Après nettoyage et pesée des éprouvettes, nous les avons étuvées pour connaître leur masse finale et en déduire l'ampleur de l'attaque des champignons à travers une éventuelle perte de masse. Nous avons ensuite tout tabulé sur Microsoft Excel puis édité ces graphiques (Figure 17) représentant la perte de masse en pourcentage de masse sèche. Cependant, en ce qui concerne les échantillons saturés en sel, nous avons à la fois établi la perte de masse par rapport à la masse anhydre avec sel ainsi que celle par rapport à la masse anhydre sans imprégnation de sel (masse retrouvée en prenant pour hypothèse une humidité initiale mesurée sur la moitié des éprouvettes).

- Partie II : Vérification de la compatibilité du sel et du bois -

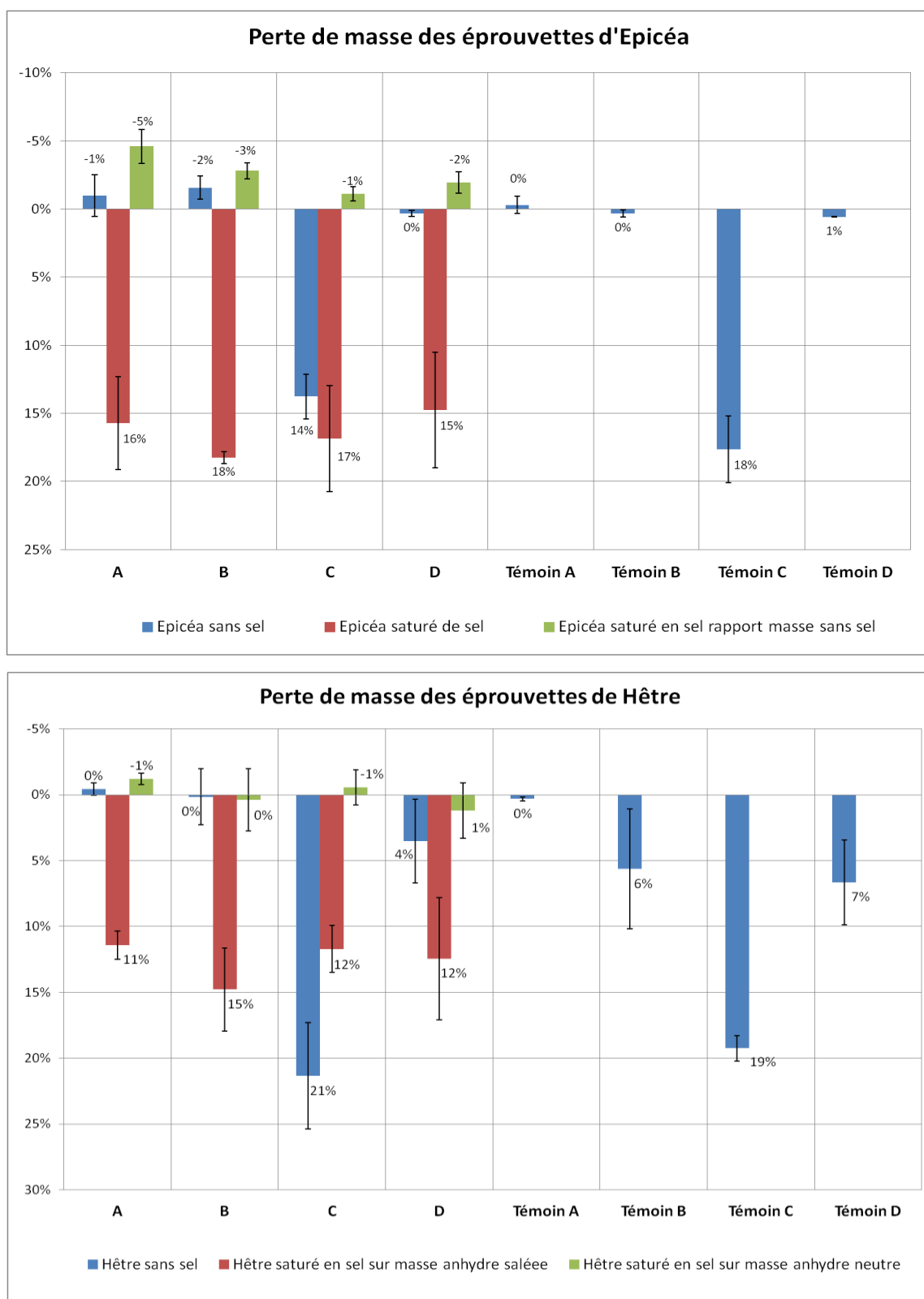


Figure 17: Perte de masse des échantillons de bois

Pour la clarté du graphique nous avons nommé arbitrairement les champignons de cette façon :

A pour *Gloeophyllum trabeum*
 B pour *Coniophora*
 C pour *Poria placenta*
 D pour *Coriolus versicolor*.

La première remarque, avant d'étudier les valeurs séparément, serait concernant les pertes de masse des éprouvettes salines. Il s'avère que si l'on prend en compte la perte de masse des échantillons salés sans préalable (par rapport à leur masse anhydre après imprégnation), alors dans tous les cas de figures sauf un, celle-ci dépasse de loin celle des échantillons non salés. Cela a éveillé notre curiosité de telle sorte que nous avons également représenté sur le graphique des pertes de masses des échantillons salés par rapport à la masse anhydre non imprégnée de départ des échantillons. Ainsi, la différence est flagrante et dans tous les cas de figure, la perte de masse des éprouvettes salées est inférieure à celle des éprouvettes non salées.

Notre interprétation de cette observation est la suivante : les éprouvettes salées contiennent au début de l'expérience une certaine quantité de sel, or avec le temps, ce sel parvient à quitter l'éprouvette, soit par dissolution dans le milieu de culture, soit par absorption du sel par le champignon en surface de l'échantillon par différence de pression osmotique entre les deux corps et alors en nettoyant l'éprouvette du champignon, nous l'aurions débarrasser d'une certaine masse de sel.

Ceci est une hypothèse que l'on peut confirmer en observant par exemple l'attaque du *Gloeophyllum trabeum* (A). Ce champignon n'a apparemment pas affecté les éprouvettes témoins de l'épicéa ni du hêtre. On retrouve le même résultat pour les éprouvettes sans sel des essais. Logiquement, a priori, à moins que le champignon A soit friand de NaCl, il y a peu de chance que les éprouvettes salées aient été attaquées. On note alors la pertinence de notre hypothèse qui considère que la perte de masse des éprouvettes salées est due à une perte de sel et non de matière ligneuse. Pour vérifier cela par un essai, on pourrait mettre en culture le champignon seul en ajoutant dans son milieu de culture dès la fabrication du sel de déverglacement et observer sa croissance par rapport à un milieu classique. Si effectivement, il y a un développement plus important du champignon, alors notre théorie est fausse, mais heureusement, peu d'indices vont dans ce sens.



Figure 18 : Différence entre échantillons témoins et salés

Sur la figure 18, on peut observer deux éprouvettes ayant subi l'attaque d'une pourriture brune (*Poria placenta*). L'éprouvette ETC2 correspond à l'éprouvette témoin et l'éprouvette ESC2 à celle imprégnée de sel. Après un passage à l'étuve, on a pu observer correctement les éprouvettes. On remarque que l'éprouvette témoin semble plus attaquée que l'éprouvette salée. Cela conforte donc l'hypothèse selon laquelle la perte de masse correspond à une perte de sel et non à une perte de matière.



Figure 19 : Dégradation d'un échantillon témoin

On peut remarquer sur la figure 19, que l'éprouvette témoin ETTC3 s'est faite attaquée par *Poria Placenta* ce qui permet de savoir que cette pourriture s'attaque au bois de résineux et que le milieu de culture convenait à ce champignon.

En conclusion, s'il y a eu attaque du champignon sur les éprouvettes imprégnées de sel, elle ne sera clairement visible que si la perte de masse qu'elle provoque dépasse la quantité de sel introduite dans l'échantillon. Nous ne pouvons donc pas la plupart du temps tirer de conclusion sur ces échantillons. Cependant, on observe que quel que soit les champignons en contact, l'étendue de la perte de masse des éprouvettes salées est très faible et a pour valeur moyenne 16,5% pour l'Epicéa et 12,5% pour le hêtre.

On observe également que le hêtre n'est que sensible au champignon *Coniophora* (B) et que l'Epicéa est sensible aux *Poria placenta*(C) et *Coriolus versicolor* (D). Et d'après nos hypothèses, les échantillons salés ne sont pas sensibles aux champignons.

Remarques :

Dans toutes nos boîtes, le champignon *Coriolus versicolor* (D) n'était que peu ou pas développer alors que sa croissance était avérée avant incubation avec éprouvette comme on peut l'observer sur la figure 20.

Les témoins ont révélé que les éprouvettes salées n'ont pas eu d'influence sur les résultats des éprouvettes non salées car ils s'avèrent identiques sauf pour les éprouvettes de Hêtre et les essais avec le champignon *Coniophora* (B) où

il n'y a pas eu d'attaque de champignon sur les éprouvettes non imprégnées. Cela peut s'expliquer par la contamination de certaines boîtes de pétri par une autre moisissure.



Figure 20 : Développement Champignon D

En effet, à l'arrêt de l'expérience, nous avons pu relever la présence dans quelques boîtes de moisissures sur les échantillons de bois ou dans le milieu de culture (Figure 21). Ces moisissures ont pu interagir avec la souche étudiée, nous n'avons donc pas pris en compte ces valeurs quand elles étaient trop éloignées des résultats attendus (moyenne) en étudiant l'écart-type. Ces contaminations sont certainement dues à une faille dans la stérilisation de l'atmosphère durant la mise en boîte des éprouvettes.

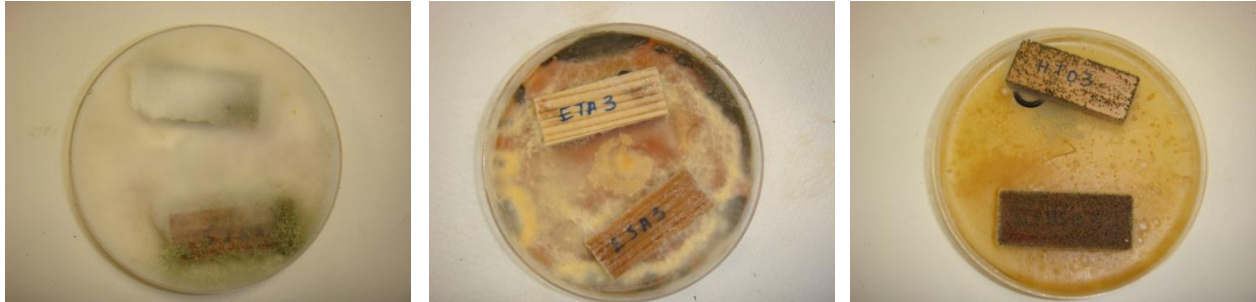


Figure 21 : Différentes contaminations observées dans les boîtes de Pétri

Il faut également noter qu'il y a une source d'erreur potentielle dans les pesées des échantillons car il reste peut-être un peu de champignon après expérience, même après nettoyage, de même que durant cette étape, des particules de bois ont pu être arrachées ce qui fausse quelque peu nos résultats.

En conclusion, nous ne pouvons pas affirmer avec certitude sans plus d'essais que le bois Epicéa ou Hêtre, imprégné de sel est insensible aux champignons. Cependant, tout laisse à penser que les champignons ne sont pas plus particulièrement attirés par des milieux salés. Dans ces conditions, nous pouvons conclure que le bois est protégé des champignons au contact du sel. Nous pouvons même établir une relation entre l'hygrométrie du sel et la résistance aux champignons du bois salé. En effet, il se pourrait que le bois au contact du sel devienne trop humide pour permettre le développement des champignons qui ont certes besoin d'eau, mais également de dioxygène en quantité suffisante pour se développer.

PARTIE III : CONCEPTION D'UN ABRI-MODELE

1) L'optique suivie connaissant les pathologies à éviter

a) La structure globale et les matériaux

L'optique suivie dans la conception d'un abri sel standard est axée sur plusieurs points. Premièrement, il faut prévoir une structure sans points fragiles susceptibles d'être arrachés par les agents de manutention, comme une structure sans bracons intérieurs par exemple. Pour cela, une structure de type portique sera privilégiée en évitant les contreventements trop bas en toiture et en incluant au maximum d'éléments de stabilité dans les parois. Deuxièmement, plusieurs solutions constructives peuvent être abordées concernant les matériaux de construction soit du bois massif (essences locales : Epicéa, Mélèze, Pin) soit du bois lamellé-collé ou également une solution bétonnée.

Ensuite, on préférera avoir de grands espaces de stockage avec des ouvertures les plus larges possibles pour faciliter l'accès des camions de livraison de sel et des camions de dessalage aux abords du tas de sel. Ainsi, les portées à considérer sont importantes et on s'affèrera à trouver la solution la plus adaptée. Enfin, en ce qui concerne les dimensions des abris à sel, nous nous sommes renseignées sur les tonnages les plus courants pour les différentes exploitations existantes.

Il s'avère que l'on peut regrouper les exploitants en 3 ou 4 catégories (Tableau 6) :

Quantité utilisée (par année)	Exploitant concerné
Moins de 100 tonnes	Petites communes, municipalités avec tas de sel souvent non abrités
De 100 à 300 tonnes	Communes, communauté de communes, ou exploitants cantonaux
De 300 à 900 tonnes	Département, stock régionaux ou autoroutiers
Plus de 1000 tonnes	Stock temporaire

Tableau 6: Les différents exploitants selon les besoins annuels en sel

Nous nous sommes intéressées aux catégories intermédiaires. En effet, nous avons considéré que les toutes petites communes qui ne possèdent qu'un petit stock de sel n'ont pas forcément envie d'investir dans un abri qui serait « superflu » par rapport à son utilisation. Certes, il serait alors intéressant de les sensibiliser au stockage sous abri pour des raisons d'économie mais aussi d'écologie. Cependant, cette tâche est difficile sachant que souvent, ils se contentent d'une bâche posée ou même encore de la croute solide de sel formée par sa dissolution pour protéger leur stock. Pour les gros exploitants, l'enjeu et les moyens sont tout autres car ces abris gigantesques devront non seulement répondre à des conditions architecturales particulières pour permettre aux nombreux engins de circuler

facilement mais aussi, le plus souvent, ils seront financés par des organismes plus importants et devront donc justifier de ces dépenses. Ainsi nous avons étudié le cas des petits et moyens exploitants.

b) Une modularité

D'après nos recherches sur le terrain, il s'est avéré qu'il est préférable pour des raisons pratiques de disposer de stocks de sel séparés en « case ». En effet, d'une année à l'autre ou entre deux livraisons, si tout le sel n'a pas été utilisé, on doit pouvoir stocker le nouveau dans une autre case afin de finir le vieux stock. Ainsi l'idée est venue de créer des structures auto stables et juxtaposables de type « module » dont les dimensions varieraient selon les besoins en stockage du client. Notre travail était alors de concevoir ces structures en prenant en compte toutes les exigences à respecter vis-à-vis de l'exploitant mais également d'éviter les caractères pathologiques rencontrés et recensés dans la première partie de ce rapport.

Les exigences des clients en termes de dimensions sont vraiment variées selon les moyens des communes par exemple. En effet, certaines communes vont se faire livrer par un camion benne qui déposera son sel directement sous abri ou à défaut, devant l'abri avec une reprise des engins de type tractopelle/manitou. Ces deux cas nécessitent déjà des dimensions d'abri bien différentes en termes de hauteur avec 9 m minimum en hauteur sous portique pour livraison sous abri.

De la même façon, selon la surface de construction, l'implantation de l'abri, chaque cas est différent mais pour les besoins de notre étude, nous avons sélectionné des dimensions types. Ainsi nous avons étudié le cas d'abris à sel de deux dimensions différentes : un permettant le stockage de 150 tonnes de sel (Abri 150) et un permettant le stockage de 300 tonnes de sel (Abri 300). Ainsi pour les plus petits besoins, un Abri 150 seul suffirait et pour des besoins allant jusqu'à 300 tonnes, il suffirait d'accoler deux modules Abri 150. Pour les plus gros besoins, au choix du client d'accoler plusieurs petits modules ou un seul gros ou jusqu'à deux ou trois gros Abri 300 pour les plus gros besoins de stock.

Tout cela est modulable à l'infini et notre étude, par manque de temps certainement se limitera à ces caractéristiques, mais rien n'empêche de considérer des hauteurs sous portique moins importantes ou des largeurs plus grandes.

L'objectif pour notre conception était de penser une structure modulable, permettant l'utilisation d'essences locales et/ou la construction/pose par des entreprises bois de la région tout en évitant les pathologies classiques des abris à sel et cela à un prix le plus faible possible pour inciter les exploitants à protéger leur stock.

Une toiture mono-pan avec ouverture en pignon fut d'emblée privilégiée (économique, pratique...). De plus, dans la conception, les parties de soutènement du sel et de structure porteuse de la toiture doivent être pensées pour travailler ensemble.

En effet, la poussée du sel, si ces deux parties sont liées, oblige la mise en place d'un système permettant de reprendre l'effort horizontal. Le détail des différentes configurations est présenté dans le Tableau 7.

	Béton	Bois	Toiture liée au soutènement	Caractéristiques
Le soutènement du sel	X		O	Les poteaux bois sont fixés par ferrures inox au mur béton banché, la toiture et le bardage extérieur ne sont pas en contact avec le sel et servent uniquement à le protéger. Les + : indépendance soutènement/toiture Les - : béton fragile aux coups, liaison béton/bois à penser anti corrosion, moins de bois
	X		N	Les poteaux bois descendent jusqu'au sol, fixés par ferrures aux blocs béton souterrains, la structure bardage toiture ne sert que de protection du sel tel un carport. Le soutènement est réalisé par des L préfabriqués en béton Les + : indépendance soutènement/toiture totale Les - : béton fragile aux coups, moins de bois
		X	O	Les poteaux doivent servir au soutènement donc résister à la poussée du sel : poteaux à inertie variable. Les + : tout bois, remplacement facile Les - : poteaux plus larges au sol, soutènement bien calculé pour éviter les ouvertures de murs.
		X	N	Les poteaux ne servent pas au soutènement et une structure bois interne soutiendrait le sel. Les + : tout bois, indépendance soutènement/toiture donc pas de risque d'effondrement Les - : si le soutènement interne à la structure les dimensions doivent être révisées, bloc béton sous soutènement à bien penser et dimensionner

Tableau 7: Récapitulatif des différentes configurations

2) Calcul de la force de poussée du sel

Ce calcul va permettre de dimensionner le mur de soutènement qui retient le sel. Ces efforts sont loin d'être négligeables et sont un point clé de la bonne tenue de l'ensemble de l'abri. Pour faire ce calcul, on se basera sur des méthodes applicables à des murs de soutènements de sols. Cette première hypothèse considère donc que le sel se comporte globalement comme un sol. Cette hypothèse semble cohérente car le sable par exemple est lui aussi un matériau granulaire et il compose les sols. Afin de réaliser les calculs, les caractéristiques du sel sont nécessaires.

a) Caractéristiques du sel de déneigement

Pour les caractéristiques du sel de déneigement, on se basera sur celles du NaCl. On néglige donc la présence des anti-mottants (>10mg/kg), des sulfates (0,9%) et des insolubles (5,7%). Ces pourcentages sont donnés par une analyse chimique réalisée sur du sel sec par ROCK.

Voici les caractéristiques du sel données par [7-Comportement du sel broyé [...]]

Matériau	Courbe intrinsèque	Cohésion MPa	Angle de frottement interne degrés
SEL FIN	résistance maximale	0,02	50,1
	seuil caractéristique	-	46,1
	résistance résiduelle	0	41,5
GROS SEL	résistance maximale	0,04	36,2
	seuil caractéristique	0,02	35,0
	résistance résiduelle	0	34,7
SEL NATUREL	résistance maximale	0,05	39,5
	seuil caractéristique	0,02	39,1
	résistance résiduelle	0	37,5

Tableau 8: Les angles de frottements des différentes formes de sel

On a donc un angle de frottement interne ϕ compris entre 34,7 et 50,1°. Le sel de déneigement s'apparente plus à du gros sel qu'à du sel fin. De plus, il est plus défavorable de prendre un angle de frottement faible. On choisira donc un angle $\phi=35^\circ$ pour la suite des calculs.

L'angle de frottement entre le sel et le mur de soutènement a aussi besoin d'être déterminé.

On peut choisir un angle de frottement entre le sol et le mur $\delta = 2/3 \phi$ [8-Les Techniques de l'Ingénieur intitulé Ouvrages de Soutènement-Poussée et Butée]. On a donc $\delta=23,3^\circ$

Pour ce qui est du poids spécifique du sel, nous avons considéré que le sel sera toujours à une humidité assez faible étant donné qu'il est abrité. Seule la partie supérieure du tas pourrait être plus humide mais cela reste une petite partie en comparaison au volume total du tas de sel. On néglige donc la part de l'eau.

On a choisi de considérer la densité apparente du sel et non la densité « tassée » car il existe des interstices entre les grains de sel. On a donc choisi $\gamma=12,25 \text{ kN/m}^3$. [9-Fiche caractéristique du sel]

b) Caractéristiques du mur de soutènement

Pour les calculs du mur de soutènement, une hauteur de 2,5m a été considérée (Figure 22). En effet, pour les deux abris considérés, la hauteur de sel choisie est la même.

Ce choix est basé sur la hauteur d'application H d'un stock de sel de 300t qui est de 2,2m.

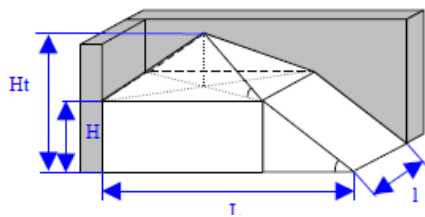


Figure 22 : Schéma des dimensions d'un tas de sel

L'angle η entre l'horizontale et le mur a été choisi à 90° pour des facilités de déchargement et de raclage.

L'angle β (angle de talus) a été choisi en considérant la hauteur Ht au milieu du stock pour une largeur de 10m.

On estime aussi qu'un engin de chantier est susceptible de monter sur le tas de sel. Cela rajoute donc une charge Q selon ce modèle (Figure 23) :

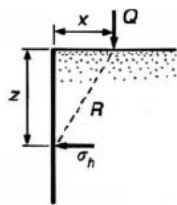


Figure 23: Modélisation de la force Q sur le tas

On a choisi :

$Q= 100\text{kN}$ Cela correspond à un engin de 10t max sachant que les chargeurs utilisés avoisinent au maximum les 6-7 tonnes.

$X= 1\text{m}$

Avec une application au tiers inférieur de la hauteur du mur. On a donc fixé R à 1,12m.

On a donc, grâce à la théorie de l'élasticité et à la formule de Boussinesq [8]:

$$\sigma_h = \frac{3Q}{2\pi} x^2 z R^{-5}$$

Résumé des caractéristiques choisies (Tableau 9):

Caractéristiques	Valeurs
φ	35°
δ	$23,3^\circ$
ρ	$12,25 \text{ kN/m}^3$
H	2,5m
η	90°
β	33°

Tableau 9: Résumé des caractéristiques choisies

c) Méthode de calcul

Parmi les trois méthodes citées dans Les Techniques de l'Ingénieur intitulé Ouvrages de Soutènement-Poussée et Butée [8], une a été retenue : la méthode de Coulomb.

Elle repose sur deux hypothèses :

- Le sol se rompt par une surface de rupture plane passant par le pied de l'écran.
- La force agissant sur l'écran a une direction connue. L'angle δ est donc connu.

Cela amène donc à considérer le système ainsi :

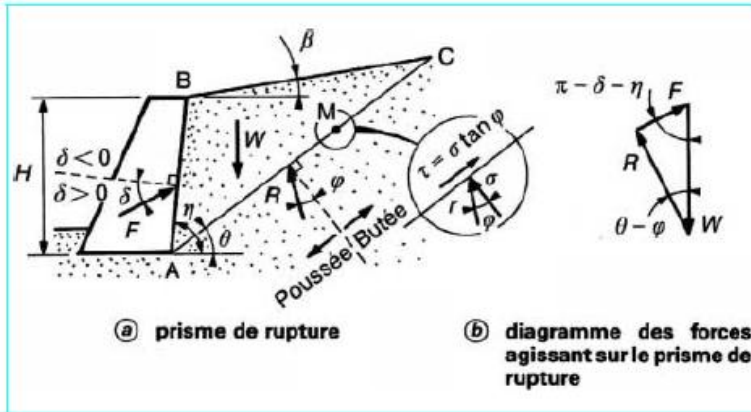


Figure 24 : Illustration de la méthode Coulomb

Avec **W** : poids propre

R : Réaction du sol appliqué sur le plan de rupture AC

F : exercée par le mur et inclinée d'un angle δ par rapport à la normale du parement du mur. (Figure 22)

La force F est maximale pour $\frac{dF(\theta)}{d\theta} = 0$. Ce qui conduit à ces formules :

$$\sigma_h = K_a \gamma z$$

$$F_a = \frac{1}{2} K_a \gamma H^2$$

$$\text{avec } K_a = \frac{\sin^2(\eta - \varphi)}{\sin^2 \eta \sin(\eta + \delta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \sin(\varphi - \beta)}{\sin(\eta + \delta) \sin(\eta - \beta)}} \right]^2}$$

F_a est égal à l'intégrale de σ_h entre 0 et H. La force F_a de poussée doit être appliquée au tiers inférieur de la hauteur. La pression σ_h va nous permettre de dimensionner le mur alors que la force F_a va nous permettre de dimensionner l'assemblage et la stabilité du mur. Pour tous les calculs, on a rajouté la force de poussée supplémentaire due à la surcharge dont la formule de la pression se trouve sur la page 30. Il suffit donc de l'intégrer entre 0 et H et on obtient (Tableau 10) :

$$F_a(\text{surcharge}) = \frac{3Q}{4\pi} x^2 H^2 R^{-5}$$

$$F_a(\text{totale}) = F_a + F_a(\text{surcharge})$$

Ka	0,51
σ_h	14,82 x Z (dépend de l'altitude) N/m ²
Fa	19,54 N /m

Tableau 10 : Les résultats de la méthode de Coulomb

3) Les modèles possibles

Notre étude a porté sur quelques conceptions, non exhaustives, mais réalistes et adaptées aux structures à construire et aux moyens mis en œuvre pour leur réalisation.

a) Le soutènement du sel par un mur béton banché

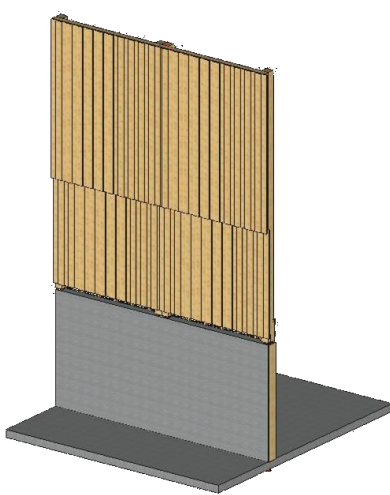


Figure 27: Mur extérieur de la structure en béton banché

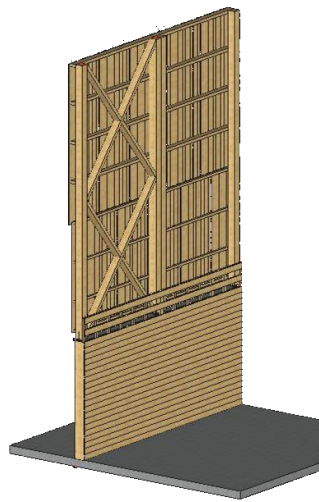


Figure 26: Mur intérieur de la structure en béton banché

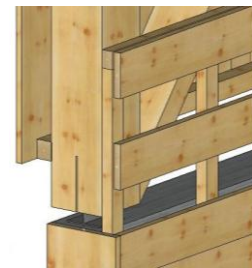


Figure 25: Détail de l'assemblage du poteau sur le mur béton banché

Un mur de béton est coulé sur 2,5 m de hauteur et permet le soutènement du sel (Figure 27). Les poteaux sont alors fixés sur ce mur par des ferrures et assurent le maintien de la structure bardage et contreventement. Le béton banché serait alors protégé par un « bardage » bois (Figure 26) et quelques lames supérieures posées à claire voie permettrait l'écoulement du sel en cas de surcharge (Figure 25).

b) Le soutènement du sel par des L béton préfabriqués

Les L en béton préfabriqués sont fixés à la dalle qui présenterait un décrochement pour les accueillir. La structure bois quant à elle reposerait sur des bois fixés à la dalle par des ferrures et comprendrait bardage et contreventement pour assurer la pérennité de la structure (Figure 28 et 29).

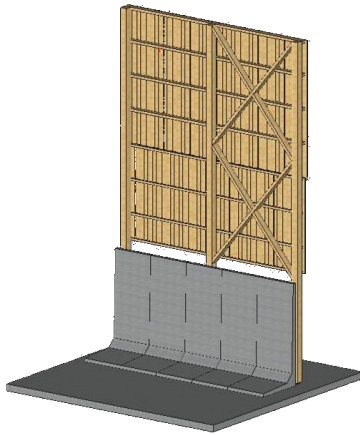


Figure 29 : La structure avec le soutènement en L béton préfabriqué de l'intérieur

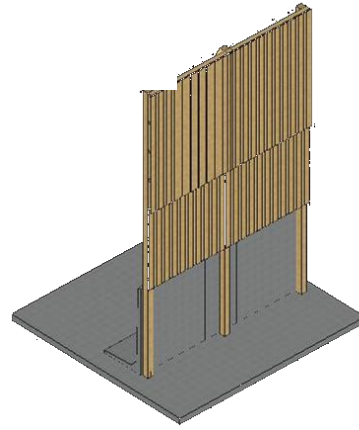


Figure 28: La structure avec le soutènement en L béton préfabriqué de l'extérieur

c) Le soutènement du sel par une structure bois

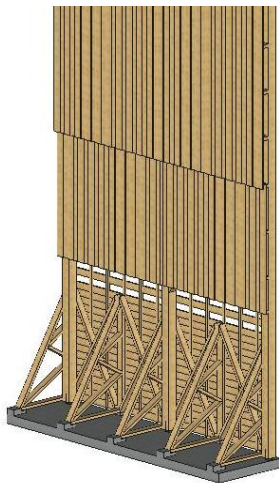


Figure 32 : Structure de soutènement en bois vue de l'extérieur

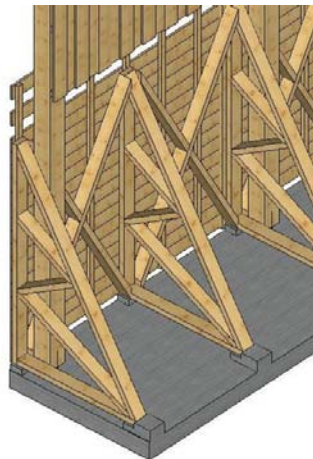


Figure 31: Détail de structure de soutènement en bois vue de l'extérieur

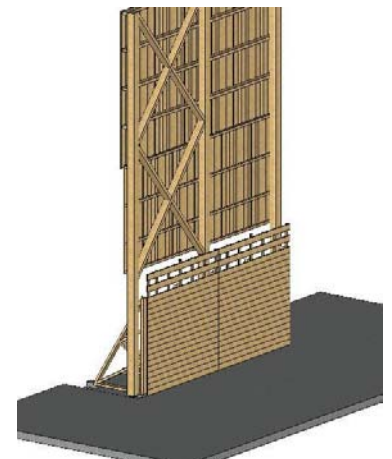


Figure 30 : Structure de soutènement en bois vue de l'intérieur

On pourrait imaginer une structure bois triangulaire reliée à la dalle béton qui ferait transiter les efforts de poussée jusqu'à celle-ci (Figure 32). Le dimensionnement reste à faire, connaissant les forces de poussée du sel appliquées (Figure 31) (voir partie sur le calcul du soutènement). Certaines pièces de bois clé pourraient être envisagées en essence plus résistantes comme en chêne par exemple (résistantes mécaniquement et aux attaques de champignons/insectes).

De la même façon que précédemment, le trop-plein de sel pourrait s'écouler entre la paroi et les poteaux (Figure 30). Ces derniers seraient fixés au sol et pourquoi pas légèrement surélevés sur un plot béton (non représentés) pour éviter le contact trop fréquent des ferrures avec le sel.

d) Le soutènement du sel par les poteaux treillis

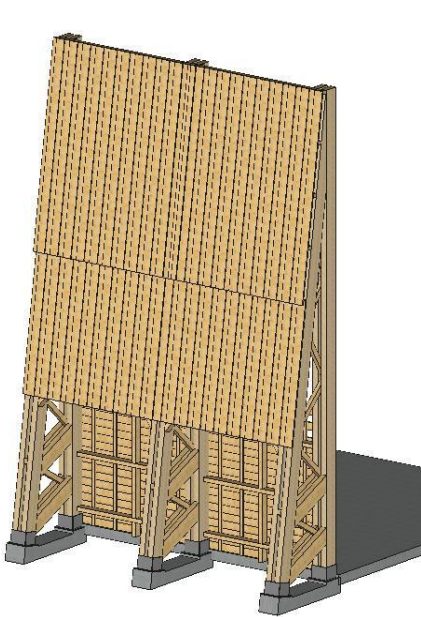


Figure 35 : Structure de soutènement du sel par les poteaux treillis vue de l'extérieur

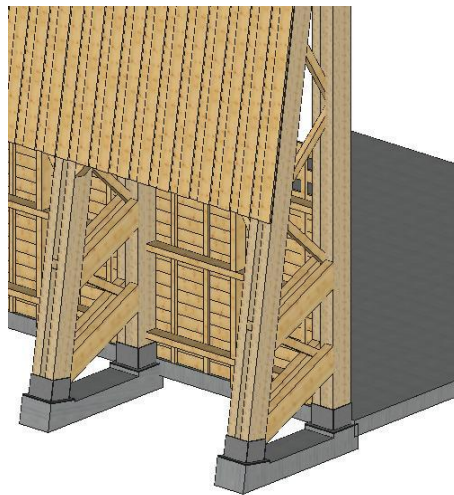


Figure 34 : Détail des poteaux treillis vue de l'extérieur

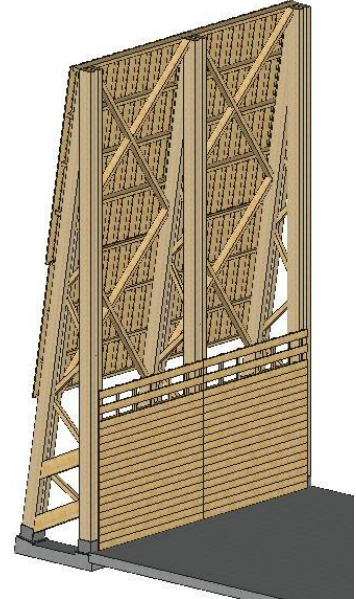


Figure 33 : Structure de soutènement du sel par les poteaux treillis vue de l'intérieur

Les poteaux treillis (pré dimensionnés donc à l'échelle sur le dessin) sont prévus pour assurer le maintien de la structure mais aussi pour reprendre la force de poussée du sel en pied (Figure 35). De la même façon, le surplus de sel est évacuer automatiquement (Figure 33) et pourra être récupérer par les agents en place. Ils disposent également d'une place non négligeable entre les poteaux pour stocker du matériel (panneaux de circulation, barrière, plots...) et pourquoi pas à l'abri en rajoutant des parois bois amovibles (Figure 34).

Au niveau de la ferrure qui permet le maintien des poteaux treillis, une rétention d'eau peut apparaitre entre la ferrure et le béton. Pour cela, nous préconisons de percer le plot béton afin que l'eau puisse s'écouler (faire une gouttière). Un espace de 5 cm sera laissé entre le bois et le béton pour éviter le contact et ainsi seuls les boulons reprendront les efforts longitudinaux.

e) Les trois sortes de poutres (arbalétriers) possibles.

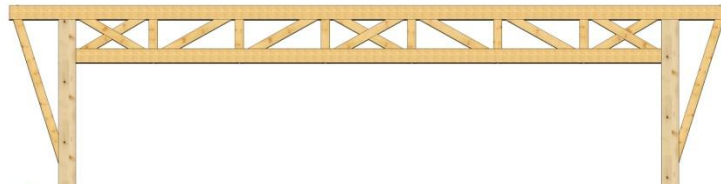


Figure 36 : La poutre treillis simple

La poutre treillis simple (Figure 36) a l'avantage de pouvoir être fabriquée par un agent communal par exemple, avec un simple plan coté. Cependant, il reste à déterminer quel assemblage placé entre les membrures et les poteaux.



Figure 37 : La poutre lamellée collée

La poutre lamellé-collée (Figure 37) est une solution simple qui permet d'atteindre de grandes portées (8m et 12m pour nos deux modules). Le client doit cependant faire appel à un fournisseur. On aurait également pu penser à un portique entièrement en lamellé-collé en deux parties (2 fois poteau+arba) reliées par le faitage avec un appui cantilever. Mais cette solution s'est avérée trop couteuse et a donc été abandonnée.



Figure 38 : La poutre treillis moisée

La poutre treillis moisée (Figure 38) est la deuxième solution constructible par les agents communaux avec un peu de maîtrise de la construction. Celle-ci n'a pas de problème d'assemblage avec le poteau si on envisage d'entailler le poteau au passage des membrures et de boulonner le tout ensuite.

4) Détails constructifs considérés

a) Le sel un matériau corrosif

L'abri à sel doit être pensé pour être toujours au contact du sel ou dans une atmosphère salée. Ce composé est très corrosif vis-à-vis du métal et du béton. Nos recherches ont permis d'évaluer la classe de béton résistant au sel. Ainsi d'après nos différents contacts spécialistes, dans ces conditions d'emploi, un béton « *de type C40/50 - XA3 - CEM III, avec en option un ajout de fumées de silice (dosage 20 à 30kg/m3) est préconisé. Il est cependant indispensable de vérifier en amont les caractéristiques chimiques des sels de déverglacage utilisés* » d'après Christian ROBACH, Responsable Qualité Département Béton / Laboratoire Service Qualité du groupe Fehr **Annexe 2**. Ce serait le béton le plus adapté à notre situation d'après sa classe résistante aux agents chimiques.

Un deuxième contact, M. RIBOLZI Guillaume travaillant à Est Préfa fabricant d'éléments préfabriqués en béton nous a informées sur le fait que c'est ce type de béton qui a été utilisé pour les dalles de la mine de Varangéville (54) et elle est exposée aux mêmes types de produits. Cette classe de béton doit être utilisée pour les murs en béton banché mais aussi pour les L préfabriqués ou les plots qui soutiennent les poteaux. Ce contact nous a également conseillées 4 ou 5cm d'enrobage pour les armatures pour résister à ces conditions.

Vis-à-vis du sel, des visseries galvanisées ou mieux, en acier inoxydable résisteraient aux attaques du sel en masse. Cependant ces métaux sont sensibles au sel par piqûre, c'est-à-dire que si elles subissent un choc même infime, elles peuvent se corroder sans même que ça se voit de l'extérieur ce qui est très problématique. Ainsi pour les quincailleries en toiture ou structure non en contact avec le sel, des vis inox suffisent. Pour les clous ou vis des lames de soutènement, pas de problèmes non plus avec des vis inox car ces parties sont remplaçables facilement et surtout non dangereuse pour les usagers en cas de rupture de l'acier. Cependant, on doit apporter une attention particulière aux pieds de poteaux en les fabricants soit en inox mais régulièrement peintes pour s'apercevoir des coups subits, soit en acier renforcé par du molybdène ou de nickel [10 - Screws and Nuts].

b) Le reste de la construction

Nous préconisons une couverture légère de type bac acier avec un lattage sur les pannes en 200x100. Ces pannes ont été dimensionnées pour résister aux charges permanentes, de vent et de neige extrêmes aux régions Alsace Lorraine (voir partie suivante). L'entraxe entre panne est de 1m et il faudra bien veiller à ce que les pannes reposent sur les verticales de la poutre treillis pour que la descente de charge puisse se faire.

Nous n'avons pas dimensionné la stabilité de la structure, mais un contreventement sera indispensable. Autant en toiture entre portique que dans les parois avec par exemple des croix de Saint André. On évitera de contreventer la structure avec des tirants métalliques pour les problèmes du métal vis-à-vis du sel cité en partie III-4-a

Le bois pourra être utilisé partout où il y a besoin de protégé les éléments fragiles : ferrures des pieds de poteaux, mur béton...

c) Les classes d'emploi du bois

Classes	Situation en service	Exemples d'emplois
1	Bois sec, humidité toujours inférieure à 20 %	Menuiseries intérieures à l'abri de l'humidité : parquets, escaliers intérieurs, portes ...
2	Bois sec mais dont l'humidité peut occasionnellement dépasser 20 %	Charpente, ossatures correctement ventilées en service
3	Bois à une humidité fréquemment supérieure à 20 %	Toutes pièces de construction ou menuiseries extérieures verticales soumises à la pluie : bardages, fenêtres ... Pièces abritées mais en atmosphère condensante
4	Bois à une humidité toujours supérieure à 20 %	Bois horizontaux en extérieur (balcons, coursives ...) et bois en contact avec le sol ou une source d'humidification prolongée ou permanente
5	Bois en contact permanent avec l'eau de mer	Piliers, pontons, bois immergés

Tableau 11 : Les classes de risques pour le bois selon la norme NF-EN-335-2

Source : Site CNDB [11]

Ainsi d'après ce tableau nous auront besoin d'une structure charpente et d'élément de contreventement Classe 2. Cependant le bardage devra être classe 3 car soumis à la pluie. En ce qui concerne les soutènements bois et le bardage de soutènement, nous pourrions penser prendre des bois classe 4 car effectivement, l'humidité des lames au contact du sel est toujours supérieure à 20% (au moins pour une partie des planches). Or nos expériences ont tout de même démontrées que les planches exposées au sel n'étaient pas sensibles aux champignons. Donc pourquoi ne pas rester en bois classe 3. Nous pourrions aller jusqu'à la classe 2 cependant, des pathologies pourraient se déclarer dans des endroits de stagnation d'eau (recoin, entre planches...).

d) La liaison entre deux modules

Quand les modules sont accolés, pour former une structure entière, il est plus judicieux de penser à un poteau central plus gros, plus résistant plutôt que d'accoler deux poteaux seuls. Ainsi pour les poteaux lamellés collé, on passera à du 220x220 pour les Abri 150 et en 24x24 pour les Abri 300. Les poteaux treillis seront quand à eux au centre de deux coté à soutenir d'où l'idée d'un poteau treillis droit.

5) Le pré dimensionnement pour estimation tarifiée

Afin de dimensionner la structure, nous avons besoin de connaître les charges qui s'appliquent sur le bâtiment. 3 types de charges sont à recenser : le poids propre, la neige et le vent. Voici le détail des différents calculs.

a) Poids propre

Le poids propre calculé correspond au poids propre du complexe de toiture (Tableau 12). C'est cette charge qui va être appliquée sur les pannes composant la toiture.

Matériau	Charge (kg/m ²)
Bac acier	7
Lattage	3,4
Marge (5%)	0,4
Total	7,8

Tableau 12: Récapitulatif des charges de poids propre

b) Charge de Neige



Figure 39: Carte des différentes zones de neige

Selon la zone où l'on se situe en France (Figure 39), les charges de neige à considérer ne sont pas les mêmes. Les zones considérées seront donc celles correspondant aux régions de l'Est de la France : Alsace et Lorraine.

Les altitudes considérées sont 500m pour la Meuse, la Meurthe et Moselle et la plaine vosgienne (zones A1 et B1). Pour la zone C1, deux zones seront considérées : altitude de 500m et de 1000m. Pour plus de détails sur les zones de neige, vous pouvez vous référer aux Eurocodes 0 qui donnent les zones de neige par cantons.

Pour le calcul de μ_1 , une toiture à 1 pan a été considéré avec une pente inférieure à 30° ce qui correspond à notre modélisation (Tableau 13).

	Zone A1 (55 + ouest 54-57-88)	Zone B1 (milieu 88 + Est 54-57)	Zone C1 (Est 88 + 67 + 68)	
sk200	0,45 kN/m ²	0,55 kN/m ²	0,65 kN/m ²	
Sad	0,00 kN/m ²	1,00 kN/m ²	0,00 kN/m ²	
Altitude max	500m	500m	1000m	500m
Δs1	0,30 kN/m ²	0,30 kN/m ²	1,05 N/m ²	0,30 kN/m ²
μ1	0,8	0,8	0,8	0,8
Sk	0,75 kN/m ²	0,85 kN/m ²	1,70 N/m ²	0,30 N/m ²
Sn	0,60 kN/m ²	0,68 kN/m ²	1,36 N/m ²	0,24 N/m ²
Sx	0,00 kN/m ²	0,80 kN/m ²	0,00 N/m ²	0,00 N/m ²

Tableau 13: Récapitulatif des charges de neige selon les zones

c) Charge de vent

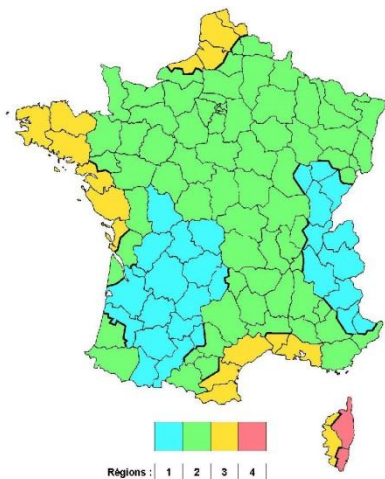


Figure 40 : Carte de France de la répartition des zones de vent

Tout comme la neige, la charge de vent dépend de la zone géographique du bâtiment (Figure 40). La région choisie est donc la région 2 qui correspond à la fois aux régions Lorraine et Alsace.

Il est aussi nécessaire de déterminer une catégorie de terrain qui reflète la rugosité de la zone d'implantation. Deux catégories ont été retenues pour les abris :

- IIIa : Campagne avec des haies, habitat dispersé
- IIIb : Zone urbanisées ou industrielles.

La catégorie correspondant à une zone urbaine a été éliminée car peu d'abris voire aucun se situent en centre-ville mais néanmoins ils se situent près d'autres bâtiments ou de routes ce qui exclue les catégories 0 et II.

Les charges de vent seront étudiées pour les deux modèles de bâtiment.

Voici le tableau récapitulatif du calcul (Tableau 14):

Vb,0	24 m/s	24 m/s
Zone	IIIa	IIIb
z0	0,2	0,5
CsCd	1	1
c0(z)	1	1
ce(10m)	1,8	1,4
ce(7m)	1,6	1,35
ce(5m)	1,4	1,35
ρ air	1,225 kg/m ³	1,225 kg/m ³
qb	352,8 Pa	352,8 Pa
qp(7) B1a	564,48 Pa	476,28 Pa
qp(5) B1b	493,92 Pa	476,28 Pa
qp(10) B2	635,04 Pa	493,92 Pa

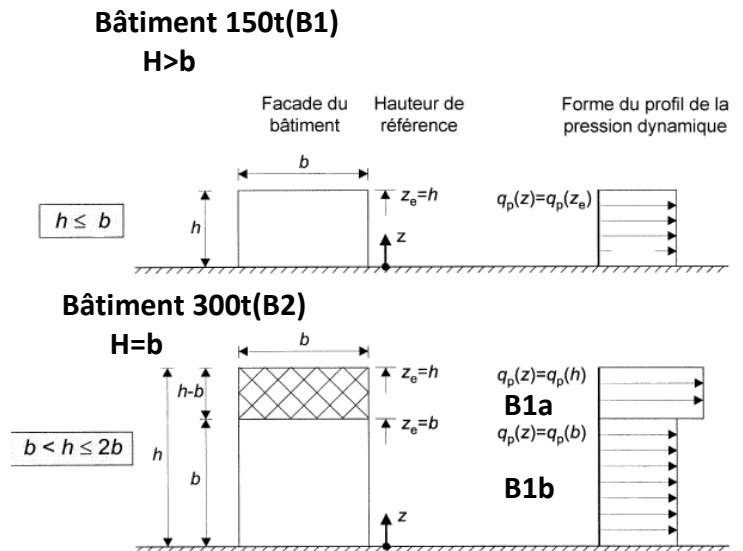


Tableau 14 : les résultats de pression de vent suivant les zones

		Bâtiment 300t	Bâtiment 100t
Vent pignon	Cpe F up	-2,79	-2,79
	Cpe Flow	-2,4	-2,4
	Cpe G	-2,32	-2,32
	Cpe H	-1,2	-1,2
	Cpe I	-0,94	-0,94
Vent long pan rive basse	Cpe F+	0,13	0,13
	Cpe F-	-2,18	-2,18
	Cpe G+	0,13	0,13
	Cpe G-	-1,68	-1,68
	Cpe H-	-0,63	-0,63
Vent pignon rive haute, structure ouverte	cf +	0,55	0,55
	cf -	-1,40	-1,40
	Cpnet A+	1,25	1,25
	Cpnet A-	-1,97	-1,97
	Cpnet B+	2,48	2,48
	Cpnet B-	-2,68	-2,68
	Cpnet C+	1,65	1,65
	Cpnet C-	-2,78	-2,78

Tableau 15: Récapitulatif des CPe

Pour le bâtiment 100t, deux pressions de pointe sont à calculer : celle pour une hauteur égale à la largeur du bâtiment et une autre pour la partie supérieure allant de $z=b$ à $z=h$.

Trois cas de vent sont donc à considérer : Vent Long pan rive haute, Vent long pan rive basse et Vent pignon.

Voici le détail des Cpe à utiliser pour le dimensionnement (Tableau 15):

Vous pourrez trouver le détail des calculs en **Annexe 3**.

Pour le calcul du vent long pan rive haute. Le vent a été calculé pour une structure ouverte avec un degré d'obstruction égal à 1 (à cause du sel et de la paroi du fond). Comme il est indiqué dans les Eurocodes 1 :

« Le coefficient de force globale (c_f) représente la force résultante. Le coefficient de pression nette (C_{pnet}) représente la pression locale maximale pour toutes les directions du vent. Il est recommandé d'utiliser ce dernier pour le calcul des éléments de toiture et des fixations. »

La dépression est due au fait que la structure est ouverte donc même si la structure est sensée ne pas être exposée au vent dominant en pignon ouvert (pour des raisons évidentes d'arrosage par la pluie du tas de sel) nous devons prendre en compte ce paramètre pour le dimensionnement des attaches à la structure du bac acier, des pannes...

Les portiques furent d'abord modélisés sur un logiciel d'aide au dimensionnement Acord-Bat 2D (Figures 41-42-43).

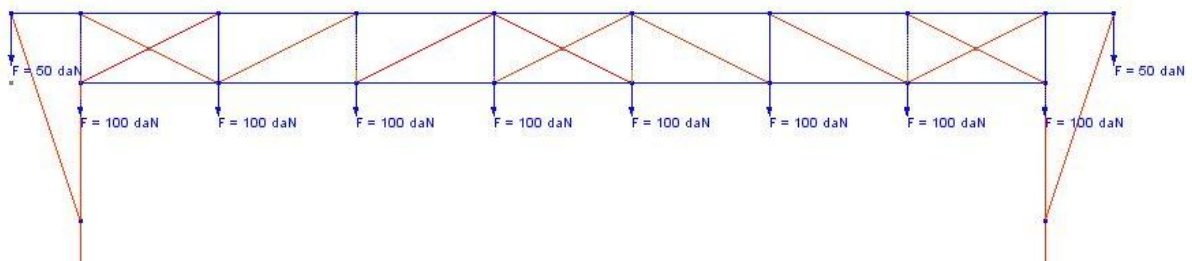


Figure 41 : Modélisation du portique en 2D et charge de poids propre

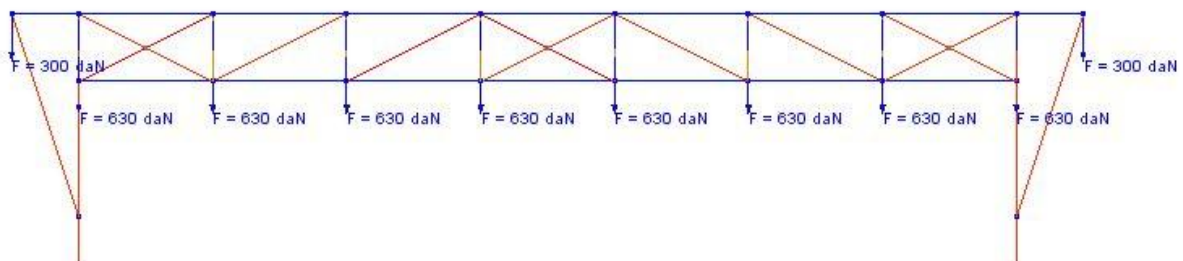


Figure 42: Modélisation du portique en 2D et charge de vent

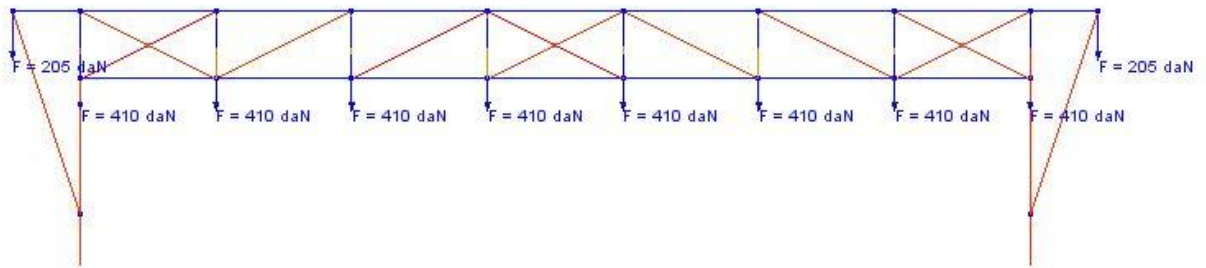


Figure 43: Modélisation du portique en 2D et charge de neige

Puis nous sommes passées sur une modélisation 3D (Figure 44) pour avoir une idée de la déformation globale du bâtiment sous charge notamment.

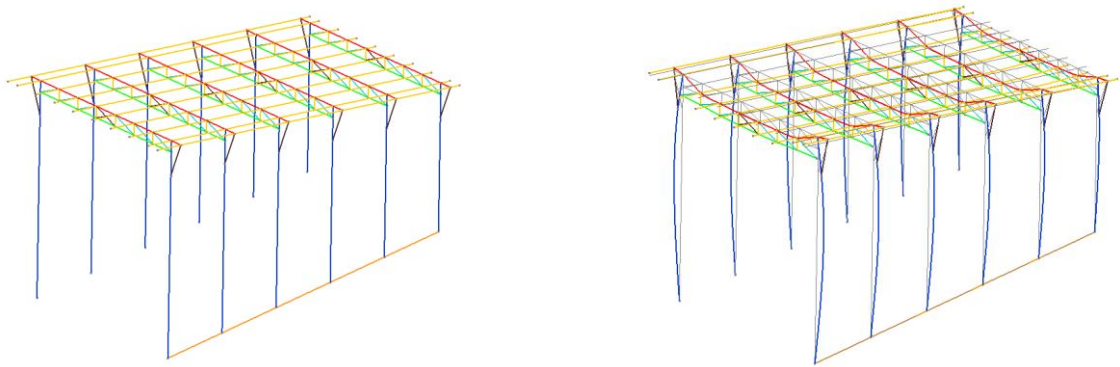


Figure 44 : Modélisation de la déformation des portiques sous charge sur Acord 3D

Ces modélisations furent réalisées en considérant les assemblages rotulés partout en guise de pré dimensionnement. Ensuite il faudrait injecter les raideurs d'assemblage dans notre modèle. Mais encore une fois cette étude si elle était plus poussée serait plus précise, et relative aux réelles conditions d'utilisation des abris à sel. Ce travail a été réalisé dans l'optique de chiffrer une structure bois avec des sections probables et non d'optimiser ses sections.

6) Estimation de la meilleure solution

a) Les résultats de la simulation

Nous avons cherché à estimer une solution optimale en termes de prix des matériaux, de facilité de mise en œuvre, de durabilité dans le temps, de facilité de réparation des dégâts, temps main d'œuvre.

Ces estimations seront plus ou moins pertinentes selon les cas de figure ou une commune construira elle-même son abri à sel ou fera appel à une entreprise...

Cette estimation est exemptée des frais transports, manutention, tva... C'est un comparatif qui ne prend pas en compte les choses identiques à toutes les configurations : couverture sur portique, bardage extérieur, éléments de contreventement, fondation et dalle béton...

Nous avons étudiés les cas de 1 à 3 modules accolés pour les modules de 150 et 300 t soit 6 cas de figure envisagés avec pour chacun la possibilité de construire un soutènement de tous types avec portiques de tous types.

(Tableaux 16 à 21)

- Partie III : Conception d'un abri-modèle -

		Un module = 150 tonnes											
Différents types de structure		A9	A3	A6	A7	A1	A4	A8	A2	A12	A10	A5	A11
Poteau	Lamellé-collé	2 508,00 €	2 508,00 €	2 508,00 €	2 508,00 €	2 508,00 €	2 508,00 €	2 508,00 €	2 508,00 €	- €	- €	2 508,00 €	- €
	Treillis	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	6 171,68 €	6 171,68 €	- €	6 171,68 €
	Central (de même nature que ceux des bords)	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €
Poutre	Treillis moisée	- €	989,65 €	- €	- €	989,65 €	- €	- €	989,65 €	- €	989,65 €	- €	- €
	Treillis	- €	- €	1 690,67 €	- €	- €	1 690,67 €	- €	- €	- €	- €	1 690,67 €	1 690,67 €
	Lamellé-collé	919,30 €	- €	- €	919,30 €	- €	- €	919,30 €	- €	919,30 €	- €	- €	- €
Soutènement	L béton préfabriqué	- €	- €	- €	4 572,46 €	4 572,46 €	4 572,46 €	- €	- €	- €	- €	- €	- €
	Béton banché - moins longueur poteau+ bardage protection	- €	- €	- €	- €	- €	- €	6 295,35 €	6 295,35 €	- €	- €	6 295,35 €	- €
	Poteau + paroi bardage	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	2 759,12 €	2 759,12 €	- €	2 759,12 €
	Triangles bois + paroi bardage	2 998,48 €	2 998,48 €	2 998,48 €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €
Difficulté Niveau 1 à 3	Temps atelier	1	2	2	1	2	2	1	2	2	3	2	3
	Temps pose	2	2	2	1	1	1	2	2	2	2	2	2
	Place au sol	2	2	2	1	1	1	1	1	3	3	1	3
	Fragilité	1	1	1	3	3	3	2	2	1	1	2	1
	Remplacement facile	1	1	1	3	3	3	1	1	1	1	1	1
	Note totale	7	8	8	9	10	10	7	8	9	10	8	10
	Montant total	6 425,78 €	6 496,13 €	7 197,15 €	7 999,76 €	8 070,11 €	8 771,13 €	9 722,65 €	9 793,00 €	9 850,09 €	9 920,45 €	10 494,02 €	10 621,46 €

Tableau 17: Estimation pour 1 module de 150t

		Deux modules de 150t = 300t											
Différents types de structure		A13	A14	A15	A16	A17	A18	A19	A20	A21	A22	A23	A24
Poteau	Lamellé-collé	2 508,00 €	2 508,00 €	2 508,00 €	2 508,00 €	2 508,00 €	2 508,00 €	2 508,00 €	2 508,00 €	2 508,00 €	- €	- €	- €
	Treillis	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	6 171,68 €	6 171,68 €	6 171,68 €
	Central (de même nature que ceux des bords)	1 517,34 €	1 517,34 €	1 517,34 €	1 517,34 €	1 517,34 €	1 517,34 €	1 517,34 €	1 517,34 €	1 517,34 €	5 376,07 €	5 376,07 €	5 376,07 €
Poutre	Treillis moisée	- €	1 979,31 €	- €	- €	1 979,31 €	- €	- €	1 979,31 €	- €	- €	1 979,31 €	- €
	Treillis	- €	- €	3 381,34 €	- €	- €	3 381,34 €	- €	- €	3 381,34 €	- €	- €	3 381,34 €
	Lamellé-collé	1 838,59 €	- €	- €	1 838,59 €	- €	- €	1 838,59 €	- €	- €	1 838,59 €	- €	- €
Soutènement	L béton préfabriqué	- €	- €	- €	9 144,92 €	9 144,92 €	9 144,92 €	- €	- €	- €	- €	- €	- €
	Béton banché - moins longueur poteau+ bardage protection	- €	- €	- €	- €	- €	- €	10 899,70 €	10 899,70 €	10 899,70 €	- €	- €	- €
	Poteau + paroi bardage	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	5 518,23 €	5 518,23 €	5 518,23 €
	Triangles bois + paroi bardage	5 996,96 €	5 996,96 €	5 996,96 €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €
Heures travail Difficulté Niveau 1 à 3	Temps atelier	1	2	2	1	2	2	1	2	2	2	3	3
	Temps pose	2	2	2	1	1	1	2	2	2	2	2	2
	Place au sol	2	2	2	1	1	1	1	1	1	3	3	3
	Fragilité	1	1	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1
	Remplacement facile	1	1	1	3	3	3	1	1	1	1	1	1
	Note totale	7	8	8	9	10	10	7	8	8	9	10	10
	Montant total	11 860,89 €	12 001,61 €	13 403,64 €	15 008,85 €	15 149,57 €	16 551,60 €	16 763,63 €	16 904,35 €	18 306,38 €	18 904,57 €	19 045,29 €	20 447,32 €

Tableau 16: Estimation pour 2 modules de 150t

- Partie III : Conception d'un abri-modèle -

		Trois modules de 150t = 450t											
Différents types de structure		A33	A27	A30	A31	A25	A32	A26	A28	A29	A36	A34	A35
Poteau	Lamellé-collé	2 508,00 €	2 508,00 €	2 508,00 €	2 508,00 €	2 508,00 €	2 508,00 €	2 508,00 €	2 508,00 €	2 508,00 €	- €	- €	- €
	Treillis	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	6 171,68 €	6 171,68 €	6 171,68 €
	Central (de même nature que ceux des bords)	3 034,68 €	3 034,68 €	3 034,68 €	3 034,68 €	3 034,68 €	3 034,68 €	3 034,68 €	3 034,68 €	3 034,68 €	10 752,13 €	10 752,13 €	10 752,13 €
Poutre	Treillis moisée	- €	2 968,96 €	- €	- €	2 968,96 €	- €	2 968,96 €	- €	- €	- €	2 968,96 €	- €
	Treillis	- €	- €	5 072,00 €	- €	- €	- €	- €	5 072,00 €	5 072,00 €	- €	- €	5 072,00 €
	Lamellé-collé	2 757,89 €	- €	- €	2 757,89 €	- €	2 757,89 €	- €	- €	- €	2 757,89 €	- €	- €
Soutènement	L béton préfabriqué	- €	- €	- €	13 717,38 €	13 717,38 €	- €	- €	13 717,38 €	- €	- €	- €	- €
	Béton banché - moins longueur poteau+ bardage protection	- €	- €	- €	- €	- €	15 504,05 €	15 504,05 €	- €	15 504,05 €	- €	- €	- €
	Poteau + paroi bardage	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	8 277,35 €	8 277,35 €	8 277,35 €
	Triangles bois + paroi bardage	8 995,44 €	8 995,44 €	8 995,44 €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €
Heures travail Difficulté Niveau 1 à 3	Temps atelier	1	2	2	1	2	1	2	2	2	2	3	3
	Temps pose	2	2	2	1	1	2	2	1	2	2	2	2
	Place au sol	2	2	2	1	1	1	1	1	1	3	3	3
	Fragilité	1	1	1	3	3	2	2	3	2	1	1	1
	Remplacement facile	1	1	1	3	3	1	1	3	1	1	1	1
	Note totale	7	8	8	9	10	7	8	10	8	9	10	10
	Montant total	17 296,01 €	17 507,08 €	19 610,12 €	22 017,95 €	22 229,02 €	23 804,62 €	24 015,69 €	24 332,06 €	26 118,73 €	27 959,05 €	28 170,12 €	30 273,17 €

Tableau 19: Estimation pour 3 modules de 150t

		Un module = 300 tonnes											
Différents types de structure		A9	A6	A3	A7	A12	A4	A11	A8	A1	A10	A5	A2
Poteau	Lamellé-collé	2 508,00 €	2 508,00 €	2 508,00 €	2 508,00 €	- €	2 508,00 €	- €	2 508,00 €	2 508,00 €	- €	2 508,00 €	2 508,00 €
	Treillis	- €	- €	- €	- €	6 171,68 €	- €	6 171,68 €	- €	- €	6 171,68 €	- €	- €
	Central (de même nature que ceux des bords)	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €
Poutre	Treillis moisée	- €	- €	1 622,28 €	- €	- €	- €	- €	- €	1 622,28 €	1 622,28 €	- €	1 622,28 €
	Treillis	- €	1 065,86 €	- €	- €	- €	1 065,86 €	1 065,86 €	- €	- €	- €	1 065,86 €	- €
	Lamellé-collé	784,63 €	- €	- €	784,63 €	784,63 €	- €	- €	784,63 €	- €	- €	- €	- €
Soutènement	L béton préfabriqué	- €	- €	- €	5 066,78 €	- €	5 066,78 €	- €	- €	5 066,78 €	- €	- €	- €
	Banché - moins longueur poteau+ bardage pro	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	5 776,20 €	- €	- €	5 776,20 €	5 776,20 €
	Poteau + paroi bardage	- €	- €	- €	- €	1 533,40 €	- €	1 533,40 €	- €	- €	1 533,40 €	- €	- €
	Triangles bois + paroi bardage	3 322,64 €	3 322,64 €	3 322,64 €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €
Heures travail Difficulté Niveau 1 à 3	Temps atelier	1	2	2	1	2	2	3	1	2	3	2	2
	Temps pose	2	2	2	1	2	1	2	2	1	2	2	2
	Place au sol	2	2	2	1	3	1	3	1	1	3	1	1
	Fragilité	1	1	1	3	1	3	1	2	3	1	2	2
	Remplacement facile	1	1	1	3	1	3	1	1	3	1	1	1
	Note totale	7	8	8	9	9	10	10	7	10	10	8	8
	Montant total	6 615,27 €	6 896,50 €	7 452,92 €	8 359,41 €	8 489,71 €	8 640,64 €	8 770,94 €	9 068,83 €	9 197,06 €	9 327,36 €	9 350,06 €	9 906,48 €

Tableau 18: Estimation pour 1 module de 300t

- Partie III : Conception d'un abri-modèle -

		Deux modules de 300t = 600t											
Différents types de structure		A21	A18	A15	A24	A23	A20	A19	A22	A17	A16	A14	A13
Poteau	Lamellé-collé	2 508,00 €	2 508,00 €	2 508,00 €	- €	- €	2 508,00 €	2 508,00 €	- €	2 508,00 €	2 508,00 €	2 508,00 €	2 508,00 €
	Treillis	- €	- €	- €	6 171,68 €	6 171,68 €	- €	- €	6 171,68 €	- €	- €	- €	- €
	Central (de même nature que ceux des bords)	3 611,52 €	3 611,52 €	3 611,52 €	5 376,07 €	5 376,07 €	3 611,52 €	3 611,52 €	5 376,07 €	3 611,52 €	3 611,52 €	3 611,52 €	3 611,52 €
Poutre	Treillis moisée	- €	- €	3 244,55 €	- €	- €	- €	- €	3 244,55 €	- €	- €	3 244,55 €	3 244,55 €
	Treillis	- €	2 131,72 €	- €	- €	2 131,72 €	- €	- €	- €	2 131,72 €	2 131,72 €	- €	- €
	Lamellé-collé	1 569,25 €	- €	- €	1 569,25 €	- €	1 569,25 €	1 569,25 €	- €	- €	- €	- €	- €
Soutènement	L béton préfabriqué	- €	- €	- €	- €	- €	- €	10 133,56 €	- €	- €	10 133,56 €	- €	10 133,56 €
	panché - moins longueur poteau+ bardage pro	- €	- €	- €	- €	- €	9 861,40 €	- €	- €	9 861,40 €	- €	9 861,40 €	- €
	Poteau + paroi bardage	- €	- €	- €	3 066,80 €	3 066,80 €	- €	- €	3 066,80 €	- €	- €	- €	- €
	Triangles bois + paroi bardage	6 645,28 €	6 645,28 €	6 645,28 €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €
Heures travail Difficulté Niveau 1 à 3	Temps atelier	1	2	2	2	3	1	1	3	2	2	2	2
	Temps pose	2	2	2	2	2	2	1	2	2	1	2	1
	Place au sol	2	2	2	3	3	1	1	3	1	1	1	1
	Fragilité	1	1	1	1	1	2	3	1	2	3	2	3
	Remplacement facile	1	1	1	1	1	1	3	1	1	3	1	3
	Note totale	7	8	8	9	10	7	9	10	8	10	8	10
	Montant total	14 334,05 €	14 896,52 €	16 009,35 €	16 183,80 €	16 746,27 €	17 550,17 €	17 822,33 €	17 859,10 €	18 112,64 €	18 384,80 €	19 225,47 €	19 497,63 €

Tableau 20: Estimation pour 2 modules de 300t

		Trois modules de 300t = 900t											
Différents types de structure		A33	A30	A36	A27	A35	A32	A34	A29	A31	A28	A26	A25
Poteau	Lamellé-collé	2 508,00 €	2 508,00 €	- €	2 508,00 €	- €	2 508,00 €	- €	2 508,00 €	2 508,00 €	2 508,00 €	2 508,00 €	2 508,00 €
	Treillis	- €	- €	6 171,68 €	- €	6 171,68 €	- €	6 171,68 €	- €	- €	- €	- €	- €
	Central (de même nature que ceux des bords)	7 223,04 €	7 223,04 €	10 752,13 €	7 223,04 €	10 752,13 €	7 223,04 €	10 752,13 €	7 223,04 €	7 223,04 €	7 223,04 €	7 223,04 €	7 223,04 €
Poutre	Treillis moisée	- €	- €	- €	4 866,83 €	- €	- €	4 866,83 €	- €	- €	- €	4 866,83 €	4 866,83 €
	Treillis	- €	3 197,58 €	- €	- €	3 197,58 €	- €	- €	3 197,58 €	- €	3 197,58 €	- €	- €
	Lamellé-collé	2 353,88 €	- €	2 353,88 €	- €	- €	2 353,88 €	- €	- €	2 353,88 €	- €	- €	- €
Soutènement	L béton préfabriqué	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	15 200,34 €	15 200,34 €	- €	15 200,34 €
	panché - moins longueur poteau+ bardage pro	- €	- €	- €	- €	- €	13 946,60 €	- €	13 946,60 €	- €	- €	13 946,60 €	- €
	Poteau + paroi bardage	- €	- €	4 600,20 €	- €	4 600,20 €	- €	4 600,20 €	- €	- €	- €	- €	- €
	Triangles bois + paroi bardage	9 967,92 €	9 967,92 €	- €	9 967,92 €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €
Heures travail Difficulté Niveau 1 à 3	Temps atelier	1	2	2	2	3	1	3	2	1	2	2	2
	Temps pose	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	2	1
	Place au sol	2	2	3	2	3	1	3	1	1	1	1	1
	Fragilité	1	1	1	1	1	2	1	2	3	3	2	3
	Remplacement facile	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	1	3
	Note totale	7	8	9	8	10	7	10	8	9	10	8	10
	Montant total	22 052,84 €	22 896,54 €	23 877,90 €	24 565,79 €	24 721,59 €	26 031,52 €	26 390,84 €	26 875,22 €	27 285,26 €	28 128,96 €	28 544,47 €	29 798,21 €

Tableau 21: Estimation pour 3 modules de 300t

b) Analyse de ces résultats

Les abris avec soutènement en bois occupent les premières place quel que soit les tailles des abris. On peut penser que cette solution est pour le moins intéressante d'un point de vue budgétaire. Cependant ces résultats sont à relativiser car je rappelle que nous ne prenons pas en compte ici les décrochements de dalle ainsi que le prix des ferrures qu'une telle structure nécessiterait.

Les L préfabriqués sont des solutions peu chères pour de petits abris mais pour les grandes capacités de stockage, elle devient trop chère.

On remarque également que plus l'abri est grand, plus la solution poteau treillis pour le soutènement devient intéressante par rapport aux soutènements bétonnés.

Les solutions lamellé-collé pour poteaux et poutres sont peu chères comparées aux autres solutions donc elles méritent d'être envisagées pour de telles constructions.

Les poutres treillis coutent en moyenne 25% de plus qu'une poutre lamellé collé mais selon les régions et les relations au bois du client, il peut se fournir avec du bois massif moins cher que nos estimations et donc cette solution devient alors plus rentable.

Enfin, les solutions les plus pénalisantes en note finale sont les structures poteau treillis pour leur encombrement et leur temps de fabrication et de pose ainsi que les soutènements béton pour leur fragilité et leur difficulté et prix de remplacement.

7) Limites de cette approche

Les tarifs que nous avons utilisés pour chiffrer notre prototype sont des tarifs datant de 2009, des entreprises HAAS-WEISROCK (88) pour le lamellé collé et la Scierie Mathieu (88) pour le bois massif traité classe 2. Ils ne sont peut-être plus d'actualité, mais il nous on permet d'avoir un ordre de prix.

Nous n'avons pas pris en compte les ferrures et la quincaillerie, boulons et vis, le prix des fondations, des prix de livraison, de manutention ainsi que la qualification de la main d'œuvre et le prix de celle-ci vis-à-vis du temps passé...

Il serait vraiment intéressant qu'une étude complète soit poursuivie à partir de nos conceptions en termes de tarif (avec devis complet et réel comparatif), avec une approche concrète du marché et du cout de l'auto construction ou de la sous-traitance.

En tout cas on voit que toutes les méthodes envisagées se valent, selon les tailles des abris considérés, et ont toutes leurs avantages et inconvénients mais il ne faudrait pas écarter les soutènements béton par folie de vouloir tout faire en bois !

Cela reste un soutènement peu cher pour les qualités mécaniques qu'il procure, et même si ce matériau est cassant et fragile, à nous de le protéger par des protections bois remplaçable à moindre cout.

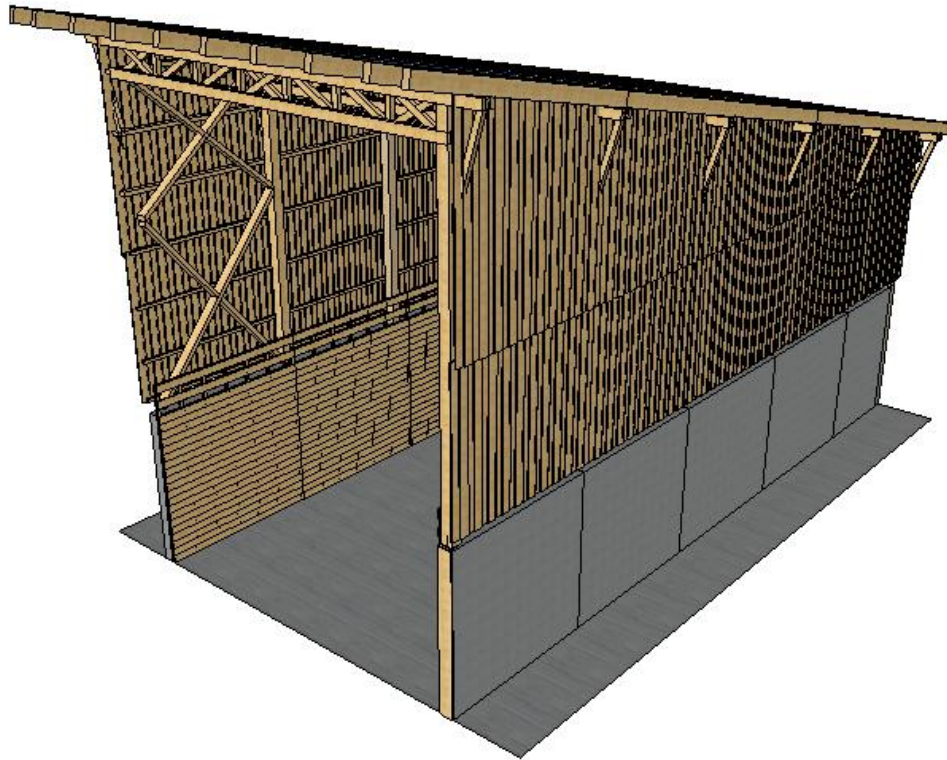


Figure 45: Modélisation 3D de l'abri le plus adapté

Pour nous d'après les calculs, les prix et les connaissances acquises des visites de terrain, le petit abri type serait celui avec soutènement en béton banché de 2,50m protégé par bardage, en soutien de poteaux lamellé-collé avec selon les tarifs des poutres lamellé-collé ou treillis (Figure 45).

CONCLUSION

Comme nous avons pu le voir à travers ce rapport, les stocks de sel occupent une place centrale dans la viabilité hivernale c'est pourquoi il est indispensable de s'intéresser à leur protection.

Ce projet nous a permis d'évaluer les conditions dans lesquelles se trouvent les abris à sel et de trouver des solutions face aux problèmes qu'elles engendrent. Le bois ne subit pas de dégradations particulières dues au sel, cependant sa présence influence fortement les conditions d'humidité dans lesquelles se trouve le bois.

L'étude sur les champignons semblerait montrer que le sel protège le bois. Une étude complémentaire devrait être menée afin de montrer que les pertes constatées correspondent bien à du sel. Malgré l'humidité assez élevée du bois, celui-ci n'est pas forcément dans des conditions plus défavorables qu'à la normale.

Les principales agressions que peut subir le bois sont dues à l'exploitation du sel. La force de poussée, les surcharges des engins mettent le bois à rude épreuve. Des problèmes se posent aussi quant aux assemblages utilisés car métal et sel ne font pas bon ménage. Une bonne conception est donc à prévoir pour éviter des problèmes ultérieurs.

Un abri modèle a donc été proposé mais il faut retenir qu'il est difficile de proposer un concept valable dans toutes les situations et que chaque cas a ses particularités. Cet abri doit donc servir d'abri « conseil ».

Enfin, ce projet nous a beaucoup apporté sur le plan personnel. Il nous a permis de travailler à la fois en autonomie et avec des professionnels de la viabilité hivernale.

Ce projet nous a demandé des connaissances à la fois dans le bois mais aussi dans d'autres matériaux comme l'acier ou le béton. Cela nous a fait découvrir des matériaux que l'on ne connaissait que très peu mais que l'on rencontre dans toutes les constructions.

Cette étude assez généraliste mériterait d'être approfondie dans chacun des domaines qu'elle touche. Une étude pourrait aussi être menée sur les silos très peu implantés en France mais très prisés par nos voisins germaniques et suisses.

BIBLIOGRAPHIE

Références citées dans le texte

[1] Viabilité hivernale

Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie. Le site métier des professionnels de la VIABILITE HIVERNALE [en ligne]. Disponible sur : <http://www.viabilite-hivernale.equipement.gouv.fr/>

[2] Stocker les fondants routiers sous-abris en maîtrisant les rejets de la Plateforme

Jean LIVET et Stéphanie POISSONNIER (Equipe ressource viabilité hivernale du CETE de l'Est)
Guide du Centre d'Etude Technique de l'Équipement.
2007

[3] Fonctionnement des fondants

Guide sur le fonctionnement des fondants routiers, ROCK (producteur de sel)
2009

[4] Guide technique, Stocker les fondants routiers:Gestion et Maintenance

Guide du SETRA (Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes).
Version provisoire n°15 – Octobre 2012

[5] Chargeuses Stéréo

Catalogue des chargeurs sur pneus de la série stéréo de marque LIEBEHRR
Edition 2012

[6] Bois Massifs Structuraux

Assemblages Bois et Dérivés Conception Système
Centre Technique du Bois et de l'Ameublement (CTBA)
2007

[7] Comportement du sel broyé sous l'effet d'une source de chaleur dans des sondages réalisés dans une mine de sel

Rapport final EUR 13638 FR
M. Ghoreychi
1991

[8] Ouvrage de soutènement-Poussée et butée

François SCHLOSSER
In : Les Techniques de l'Ingénieur c242
Document délivré le 30/11/2012

[9] Fiche caractéristique du sel gemme

Document PDF [En ligne]. Disponible sur le site :
<http://www.distrisel.com/DOCUMENTS/ROCK%20gemme%20B%20vrac%20%20%20cond.pdf>
Juin 2006

[10] Screws and nuts

Document PDF (p.26) [En ligne]. Disponible sur le site :

http://www.hydra.co.za/docs/screws_and_nuts.pdf

2005 par Bossard

[11] Tableau des classes d'emploi du bois

Ressource disponible [en ligne] sur le site du CNDB :

http://www.cndb.org/?p=classes_d_emploi.fr

Références non citées

[12] Phase avant-projet : conception de solutions de poutres à treillis et de poteaux

Access Steel

Document crée le 23 septembre 2010

[13] Théorie des poutre : le treillis

Cours dispensé au Lycée Technologique « Le Garros » par AUCH Ch. ALBOUY, G. JOLLY

[14] Données techniques des Mur de soutènement standard

Ressource disponible en téléchargement PDF [en ligne]

Sur le site de Kronimus : http://www.kronimus.fr/fr/Produkte/HG_HEIM-UND-GARTEN/Stuetzmauerfertigteile/Mauerscheiben/index.html

[15] Eurocode 0 : Bases des calculs de structures

Norme Européenne AFNOR NF EN 1990

2003

[16] Eurocode 1 : Actions sur les structures

Norme européenne AFNOR NF EN 1991

2007

[17] Eurocode 5 : Calcul des structures en bois

Norme européenne AFNOR NF EN 1995

2007

[18] Béton : spécification, performances, production et conformité

Norme européenne AFNOR NF EN 206-1

2006

[19] Catalogue Charpente et Couverture

Siat Braun

Edition 2011-2012

[20] Les Poutres lamellé-collé droites

Catalogue des standards Haas-Weisrockligne Lamellix

Edition 2010

TABLE DES FIGURES





Figure 1: Structure poteaux moisés	8
Figure 2: Portique treillis	9
Figure 3: Structure Lamellé-collé	9
Figure 4: Coloration bleue du parement bois	10
Figure 5: Déplacement de la structure à cause de la masse de sel	11
Figure 6: Contreforts en bois assurant le soutènement	11
Figure 7: Dégâts subis par le parement bois	12
Figure 8: Dégâts subis par des éléments de structure	13
Figure 9: Corrosion des éléments métalliques.....	14
Figure 10: Silo à déchargement gravitaire (source : holten-gmbh.de)	15
Figure 11: Illustration de l'effet de voûte.....	16
Figure 12: Silos en bois pour le stockage du sel (source : Sels-en-stock.fr).....	16
Figure 13: Diagramme de l'équilibre hygroscopique du sel.....	17
Figure 14: Equilibre Hygroscopique du bois (source: CNDB)	18
Figure 15: Humidification du bois	19
Figure 16 : Epruvettes de bois après culture du champignon	21
Figure 17: Perte de masse des échantillons de bois	22
Figure 18 : Différence entre échantillons témoins et salés	23
Figure 19 : Dégradation d'un échantillon témoin	24
Figure 20 :Développement Champignon D	24
Figure 21 : Différentes contaminations observées dans les boîtes de Pétri.....	25
Figure 22 : Schéma des dimensions d'un tas de sel	30
Figure 23: Modélisation de la force Q sur le tas	30
Figure 24 : Illustration de la méthode Coulomb	31
Figure 25: Détail de l'assemblage du poteau sur le mur béton banché	32
Figure 26: Mur intérieur de la structure en béton banché	32
Figure 27: Mur extérieur de la structure en béton banché	32
Figure 28: La structure avec le soutènement en L béton préfabriqué de l'extérieur.....	33
Figure 29 : La structure avec le soutènement en L béton préfabriqué de l'intérieur	33
Figure 30 : Structure de soutènement en bois vue de l'intérieur.....	33
Figure 31: Détail de structure de soutènement en bois vue de l'extérieur.....	33
Figure 32 : Structure de soutènement en bois vue de l'extérieur	33
Figure 33 : Structure de soutènement du sel par les poteaux treillis vue de l'intérieur ...	34
Figure 34 : Détail des poteaux treillis vue de l'extérieur	34
Figure 35 : Structure de soutènement du sel par les poteaux treillis vue de l'extérieur ..	34
Figure 36 : La poutre treillis simple	35
Figure 37 : La poutre lamellée collée	35
Figure 38 : La poutre treillis moisée	35
Figure 39: Carte des différentes zones de neige.....	38
Figure 40 : Carte de France de la répartition des zones de vent	39
Figure 41 : Modélisation du portique en 2D et charge de poids propre	41
Figure 42: Modélisation du portique en 2D et charge de vent.....	41
Figure 43: Modélisation du portique en 2D et charge de neige	42
Figure 44 : Modélisation de la déformation des portiques sous charge sur Acord 3D	42
Figure 45: Modélisation 3D de l'abri le plus adapté	48

TABLE DES TABLEAUX





Tableau 1 : Indice de proportion du bois	6
Tableau 2: Type d'abris bois	7
Tableau 3: Années de construction des abris	7
Tableau 4: Dimensions des chargeurs sur pneus	13
Tableau 5: Modalité de stockage et classe de sel	15
Tableau 6: Les différents exploitants selon les besoins annuels en sel	26
Tableau 7: Récapitulatif des différentes configurations	28
Tableau 8: Les angles de frottements des différentes formes de sel	29
Tableau 9: Résumé des caractéristiques choisies	30
Tableau 10 : Les résultats de la méthode de Coulomb	32
Tableau 11 : Les classes de risques pour le bois selon la norme NF-EN-335-2.....	37
Tableau 12: Récapitulatif des charges de poids propre	38
Tableau 13: Récapitulatif des charges de neige selon les zones.....	39
Tableau 14 : les résultats de pression de vent	40
Tableau 15: Récapitulatif des CPe	40
Tableau 17: Estimation pour 2 modules de 150t	44
Tableau 16: Estimation pour 1 module de 150t.....	44
Tableau 19: Estimation pour 1 module de 300t	45
Tableau 18: Estimation pour 3 modules de 150t	45
Tableau 20: Estimation pour 2 modules de 300t	46
Tableau 21: Estimation pour 3 modules de 300t	46

ANNEXES

Annexe n°1 : Visite des abris

Localisation Abris	Structure porteuse	Parement	Ouverture	Problèmes constatés	Nbr stock	Divers
<p>Bayon</p> 	<p>Structure en bois</p> <p>Poteaux moisés : partie sol = chêne créosoté</p> <p>Partie supérieure = pin traité CCA</p> <p>Ferme type treillis avec jambes de force</p> <p>Panne-chevron</p> <p>Système de maintien des poteaux = dans le sol</p>	<p>Partie sup.=bardage vois vertical</p> <p>Partie inf. = soutènement + bardage Horizontal</p> <p>support = poteau pin CCA</p>	<p>Ouverture en pignon</p> <p>Avtg= plus grande hauteur</p> <p>Apparement assez grande</p> <p>Bardage façade non abîmé</p> <p>sur toute la largeur</p>	<p>Parement abîmé</p> <p>Quincaillerie rouillée très attaquée</p> <p>Structure porteuse endommagée pour l'instant sans gros risque</p> <p>Découplage Soutènement/structure imparfait</p>	1	<p>Pas de Porte</p> <p>Pas de dalle</p> <p>Parement très humide: présence de gouttes d'eau</p>
<p>Vézélize</p> 	<p>Même système constructif que Bayon</p> <p>Abris divisé en 2 sens largeur</p> <p>Pas de découplage structure/soutènement</p>	<p>Double mur</p> <p>Intérieur = parement bois sur pare-pluie avec tasseaux</p> <p>Parement horizontal cloué</p> <p>Extérieur = Bardage bois</p>	<p>Ouverture en Long pan en totalité</p>	<p>Problème de rouille des pointes du parement</p> <p>beaucoup de sel sous intempéries = formation croûte de sel en bord d'abris</p> <p>Poteaux structure fréquemment choqués</p> <p>Bardage supérieur ouverture enlevé = Hauteur insuffisante?</p>	2	<p>Pas de porte</p>
<p>Champigneulle</p> 	<p>Même système constructif que Bayon</p> <p>Séparation en 2 de l'abris</p> <p>+ un petit abris sur derrière</p>	<p>Même chose que Bayon</p> <p>Partie sup.= Tôle ondulée</p>	<p>Ouverture Façade sur la totalité</p>	<p>Gros problème de soutènement: Paroi voutée</p> <p>Importants dégâts autant au niveau du soutènement ext que de la séparation centrale</p> <p>Bois qui devient pelucheux à cause des cycles de trempage, détrempe très fréquent. Lessivage des Hémicelluloses?</p> <p>Présence d'étaï pour caler un mur!</p>	2+1	<p>Beaucoup de réparations de fortune (volets!)</p>
<p>Fléville</p> 	<p>Arbalétriers Lamellé collé</p> <p>2 stocks de part et d'autres de l'ouverture</p> <p>un 3ème contre le bâtiment principal</p>	<p>Bardage Horizontal sur tte hauteur</p>	<p>Peu large sur Long pan</p>	<p>Hauteur nettement insuffisante le stock est juste en dessous du toit</p> <p>Arbalétriers subissent quelques dégâts</p> <p>Sel présent en bloc dans la paroi Bardage incertain</p> <p>Poussée du sel sur le pignon</p>	2+1	<p>Vestige d'une porte</p> <p>Présence de nbres coloration bleue = concentration d'antimottant? hexacyanoferrate</p> <p>Pas beaucoup ventilation</p>

PHOTOS MR VALENTIN

<p>- Annexes - Vittel</p> 	<p>Arbalétriers Lamellé collé cintrés Poteaux en LC</p> <p>Soutènement par mur en béton?</p> <p>Toiture courbe</p>	<p>Tôle ondulée</p>	<p>Ouverture en Pignon</p>		<p>1</p>	
<p>Remiremont</p> 	<p>Arbalétriers Lamellé collé cintrés Poteaux en LC</p> <p>Contreventement par tirant métallique Poteaux fixés par ferrure sur dalle</p> <p>Toiture courbe</p>	<p>Tôle ondulée</p>	<p>Ouverture en Pignon</p>		<p>1</p>	
<p>Dompaire</p> 	<p>Portiques en BLC</p> <p>Poteaux BLC fixés sur plot béton par pied de poteau</p> <p>Soutènement = mur béton</p> <p>Toiture 1 pan</p>	<p>Tôle ondulée</p>	<p>Ouverture Pignon</p>	<p>Ouverture trop basse à cause de la poutre lamellé collé</p>	<p>1</p>	<p>Système accroche pour matériel sur mur béton</p>
<p>Gérardmer</p> 	<p>Toiture 1 pan (courbée sens long pan)</p> <p>Stucture portique bois</p> <p>renforcée par jambe de force sur mur central</p> <p>Soutènement assuré par paroi inclinée en bois supportée par les poteaux</p> <p>Soutènement ajouré à partir certaine hauteur pour éviter le trop plein de sel</p> <p>Limite des deux stocks assurée par mur central</p>	<p>Bardage bois horizontal</p> <p>+ ouverture sous toiture (Plexis?)</p>			<p>2</p>	<p>Soutènement ajouré à partir certaine hauteur pour éviter le trop plein de sel</p>

- Annexes -

CNDB Abris

	<p>Mur en béton jusque 2m environ</p> <p>Portique en lamellé collé</p> <p>Chaque case a ses portique qui sont liés entre eux</p> <p>Séparation des stocks assurée par une paroi en tôle maintenue par le contreventement des portiques et un poteau intermédiaire</p>	Tôle	<p>Ouvertures Pignon</p> <p>Toiture 2 pentes sens long pan relevées vers ext.</p>	<p>Contreventement sens pignon, possibilité de casse</p> <p>Beaucoup de sel n'est pas sous le toit</p> <p>Structure trop ouverte (Vent, pluie...)</p>	4	
	<p>Portique dont arbalétrier double inertie lamellé collé et poteaux treillis (inertie la plus grande au sol)</p> <p>Soutènement réalisé par bardage bois vertical fixé sur les traverses des poteaux</p> <p>Pare-chocs sur le bardage traverses fixées grâce à des équerres aux poteaux</p>	<p>Parement réalisé par le soutènement en bois</p> <p>Partie sup: tôle (à qq endroits transparentes)</p>	Ouverture Pignon sur toute la hauteur	1 stock, peu pratique	1	Soutènement et structure non découplée mais la structure a l'air adaptée
	<p>Portique en bois lamellé collé</p> <p>Arbalétrier double inertie reposant sur poteaux à inertie variable</p> <p>Contreventement assuré par deux étoiles en bois</p> <p>Même type de soutènement que précédemment mais pas de pare-chocs</p> <p>Entraxe des traverses plus petit en bas que en haut de l'abris (reprise effort sel)</p>	Parement réalisé par le soutènement en bois	Ouverture Pignon sur toute la hauteur	1 stock, peu pratique	1	<p>Fond de l'abri utilisé en local technique</p> <p>séparé par une cloison du stock de sel.</p> <p>Ouverture long pan entre deux portiques</p> <p>Côté esthétique inutile pour la structure</p>
	<p>Mur en béton banché de 2m environ</p> <p>Poteaux moisés en bois massif (traités?)</p> <p>Panne en Lamellé Collé</p> <p>Contreventement toiture en bord pignon</p> <p>Soutènement assuré par les murs béton</p>	<p>Pas de parement en long pan</p> <p>Bardage partiellement ajouré</p>	Ouverture Long Pan	<p>Béton + sel ?</p> <p>Pas de parement</p> <p>Liaison poteaux bois</p>	3	deux stocks latéraux d'autres produits ou rangements
	<p>Portique bois massif</p> <p>avec poteaux moisés et pièce centrale</p> <p>Soutènement mur béton recouvert d'un bardage pare-choc (incertain)</p>	Parement en tavaillons	Ouverture en Long Pan	<p>Décrochements toiture</p> <p>Hauteur ouverture petite</p>	3	Toiture en Tavaillons

Annexe n°2 : Echange d'informations avec professionnel du béton

Demande d'informations envoyée :

Bonjour,

Nous sommes deux étudiantes en 3ème année d'école d'ingénieur bois (ENSTIB) et dans le cadre de notre projet de fin d'étude, nous aurions quelques questions à vous poser. Notre sujet d'étude est le stockage du sel comme fondant routier. Afin d'établir des comparaisons de systèmes constructifs pour des abris pour ce type de stockage, nous aurions besoin de savoir quelle classe vous semble la plus adaptée à un contact prolongé avec du sel (XA3, XF4, ou encore des classes marines XS). Nous aurions aussi aimé savoir s'il était possible d'avoir un ordre de grandeur du prix d'un m3 de ces types de béton et du surcoût par rapport à un béton "standard".

Cordialement

Amélie Grandjean et Virginie Martin

Réponse recue :

De: "Christian ROBACH" <Christian.ROBACH@fehr-groupe.com>

À: "amelie grandjean6" <amelie.grandjean6@etu.univ-lorraine.fr>

Objet: Question techniques / Etudiant de l'ENSTIB - Ingénieur du bois / Béton contact sel

Bonjour,

Pour ma part, j'opterai pour un béton de type C40/50 - XA3 - CEM III, avec en option un ajout de fumées de silice (dosage 20 à 30kg/m3). Il est cependant indispensable de vérifier en amont les caractéristiques chimiques des sels de déverglacage utilisés. Par rapport à un béton standard, il faut estimer 1.5 à 2 x le prix (en fonction des composants utilisés).

Meilleures salutations / Mit freundlichen Grüßen

Christian ROBACH

Responsable Qualité Département Béton / Laboratoire Service Qualité

Laborleiter / Qualitätssicherung Transportbeton

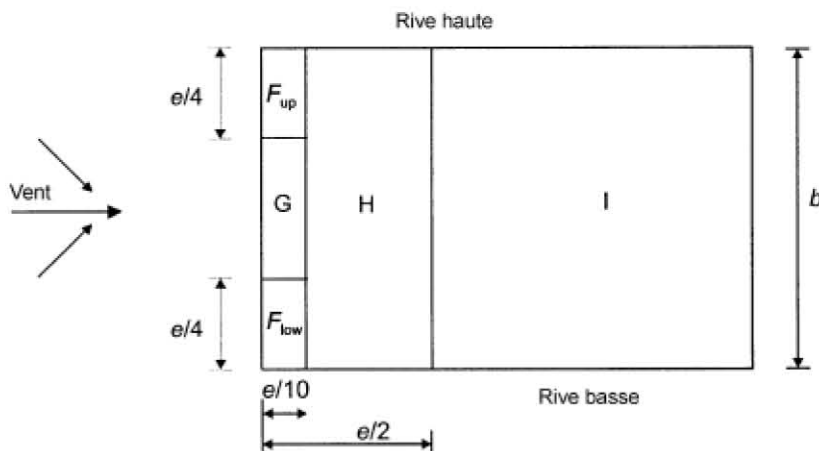
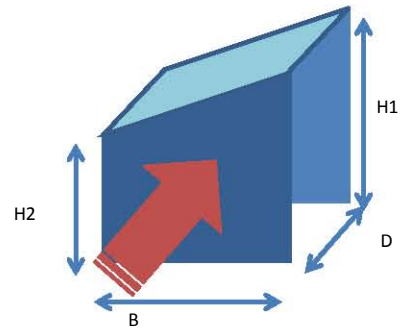
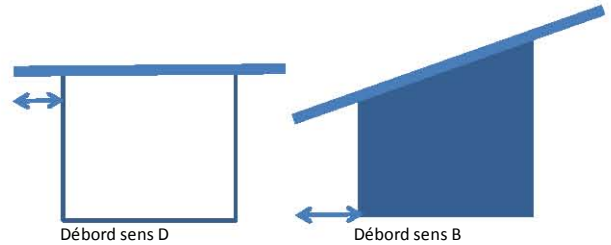
Portable / Mobil: 06 03 31 29 49

christian.robach@fehr-groupe.com

Annexe n°3 : Détails des calculs des Cpe

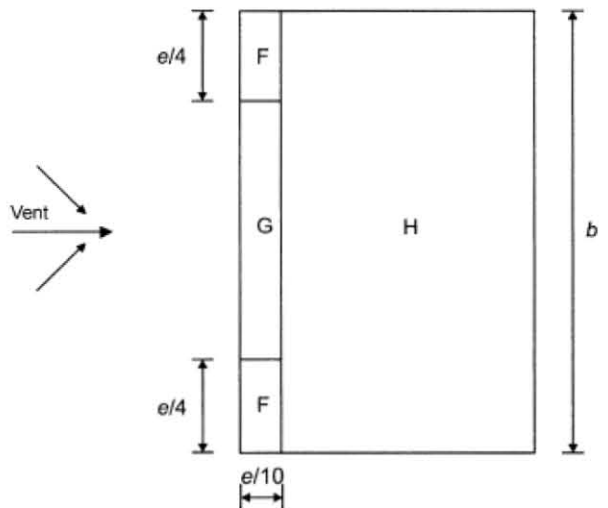
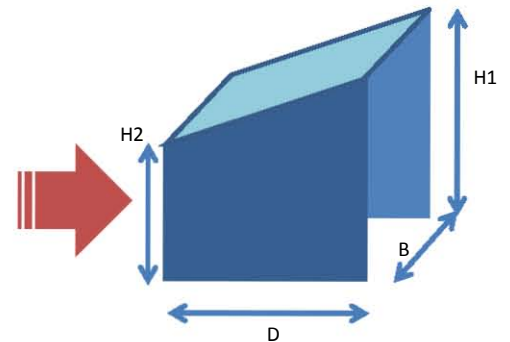
	Bâtiment 300t	Bâtiment 100t
H1	10,00 m	10,00 m
H2	7,00 m	7,00 m
B	15,00 m	15,00 m
D	11,00 m	7,00 m
Angle	11,31 °	11,31 °
Débords sens D	0,50 m	0,50 m
Débord sens B	1,30 m	1,30 m
Longueur toiture (sens B)	17,90 m	17,90 m
Largeur Toiture (sens D)	12,22 m	8,14 m
e	17,90 m	17,90 m
Surface F	8,01 m ²	8,01 m ²
Surface G	16,02 m ²	16,02 m ²
Surface H	128,12 m ²	128,12 m ²
Surface I	58,51 m ²	0,00 m ²
Surface F up locale	8,01 m²	8,01 m²
Cpe	-2,34	-2,34
Cpe 10	-2,29	-2,29
Cpe 1	-2,79	-2,79
Surface F low locale	8,01 m²	8,01 m²
Cpe	-1,843896753	-1,843896753
Cpe 10	-1,78	-1,78
Cpe 1	-2,40	-2,40
Surface G locale	16,02 m²	16,02 m²
Cpe	-1,86	-1,86
Cpe 10	-1,86	-1,86
Cpe 1	-2,32	-2,32
Surface H locale	128,12 m²	128,12 m²
Cpe	-0,726198649	-0,726198649
Cpe 10	-0,73	-0,73
Cpe 1	-1,2	-1,2
Surface I locale	58,51 m²	0,00 m²
Cpe	-0,64	
Cpe 10	-0,64	-0,56
Cpe 1	-0,94	-0,94

Vent Pignon :



Vent long pan rive basse :

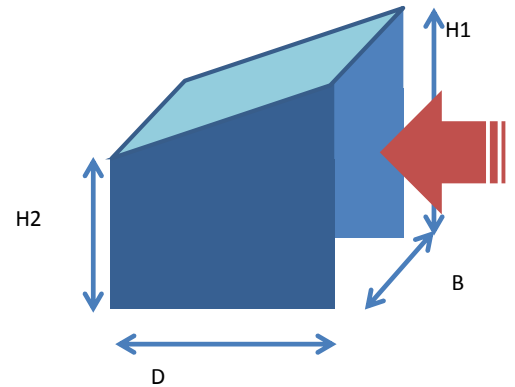
	Bâtiment 300t	Bâtiment 100t
H1	10,00 m	10,00 m
H2	7,00 m	7,00 m
B	10,00 m	7,00 m
D	15,00 m	15,00 m
Angle	11,31 °	11,31 °
Débords sens D	1,30 m	1,30 m
Débord sens B	0,50 m	0,50 m
Longueur toiture (sens B)	11,20 m	8,14 m
Largeur Toiture (sens D)	17,90 m	17,90 m
e	11,20 m	8,14 m
Surface F	3,13 m ²	1,66 m ²
Surface G	6,27 m ²	3,31 m ²
Surface H	187,87 m ²	139,03 m ²
Surface F - locale	3,13 m²	1,66 m²
Cpe	-1,69	-1,97
Cpe 10	-1,20	-1,20
Cpe 1	-2,18	-2,18
Surface F + locale	3,13 m²	1,66 m²
Cpe	-0,82	-0,29
Cpe 10	-1,78	-1,78
Cpe 1	0,13	0,13
Surface G - locale	6,27 m²	3,31 m²
Cpe	-1,10	-1,30
Cpe 10	-0,95	-0,95
Cpe 1	-1,68	-1,68
Surface G + locale	6,27 m²	3,31 m²
Cpe	0,13	0,13
Cpe 10	0,13	0,13
Cpe 1	0,13	0,13
Surface H - locale	187,87 m²	139,03 m²
Cpe	-0,41	-0,41
Cpe 10	-0,41	-0,41
Cpe 1	-0,63	-0,63



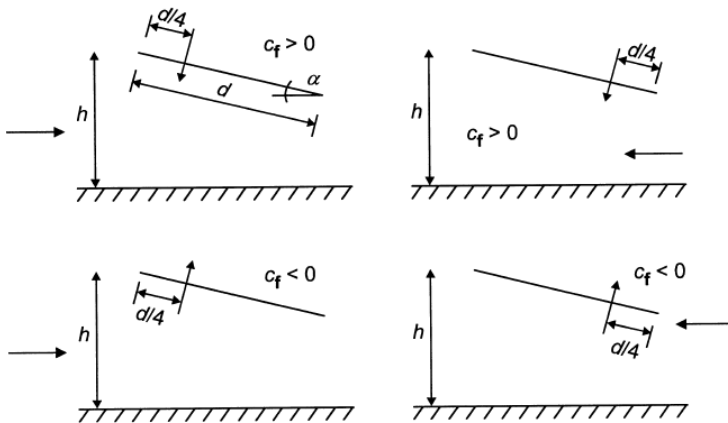
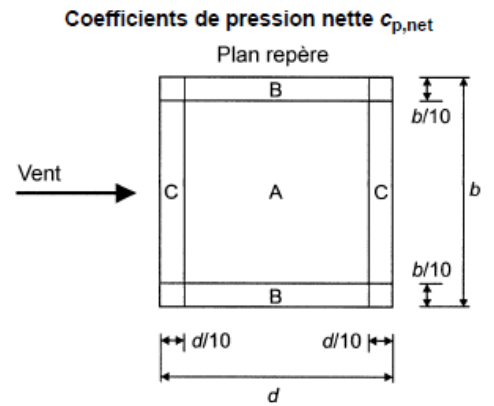
(b) Directions du vent $\theta = 0^\circ$ et $\theta = 180^\circ$

Vent long pan rive Haute :

	Bâtiment 300t	Bâtiment 100t
H1	10,00 m	10,00 m
H2	7,00 m	7,00 m
B	10,00 m	7,00 m
D	15,00 m	15,00 m
Angle	11,31 °	11,31 °
Débords sens D	1,30 m	1,30 m
Débord sens B	0,50 m	0,50 m
Longueur toiture (sens B)	11,20 m	8,14 m
Largeur Toiture (sens D)	17,90 m	17,90 m
e	11,20 m	8,14 m
Surface A	128,26 m ²	93,22 m ²
Surface B	16,03 m ²	11,65 m ²
Surface C	16,03 m ²	11,65 m ²
cf +	0,55	0,55
cf -	-1,40	-1,40
Cpnet A+	1,25	1,25
Cpnet A-	-1,97	-1,97
Cpnet B+	2,48	2,48
Cpnet B-	-2,68	-2,68
Cpnet C+	1,65	1,65
Cpnet C-	-2,78	-2,78



Détails zones données par les Eurocodes



Points d'application de la résultante

RESUME

LES SILOS ET ABRIS EN BOIS DE STOCKAGE DU SEL

En France, peu d'abris à sel sont en bois, y a-t-il des raisons impliquant le comportement du matériau au contact du sel ou est-ce une question d'usage ?

En partenariat avec le CETE (Centre d'Etudes Techniques de l'Équipement) de l'Est, une enquête de terrain a été réalisée à l'échelle de la région pour évaluer les différentes pathologies dont souffrent les abris bois. Le sel, de par son comportement hygroscopique, amplifie les conditions d'humidité dans lesquelles se trouve le bois. Le bois humide étant plus sensible à l'attaque des champignons, des expériences ont permis d'évaluer l'impact du sel dans la durabilité du bois face à ces organismes.

En plus de leur fonction de stockage, l'exploitation quotidienne par des engins de service hivernal doit être prise en compte dans la conception même des abris. En effet, de nombreuses pathologies sont dues au fait que les abris sont inadaptés à leur utilisation. De nouveaux bâtiments doivent être repensés en intégrant les contraintes mécaniques dues à la masse de sel et aux cycles de chargement/déchargement.

Pour se faire, un cahier des charges et un modèle d'abri répondant à ces caractéristiques permettront de donner des bases pour les futures constructions.

Mots-Clés : Sel / Abris / Bois / Champignons / Humidité / Conception

ABSTRACT

WOODEN SILO AND ROAD SALT STORAGE COVER

In France, few road salt shelters are made of wood. Are there some reasons that including the performance of this material on contact with salt or is it a question of old habits?

In collaboration with the technical studies center of Public Works, a practical investigation was realized in a regional area to estimate how the salt shelters are affected. Road salt, with its hygroscopic features, increases the moisture rate in which the timber is. Wet wood being more susceptible to be attacked by fungi, the salt effect in wood durability to these organisms was estimated by some experiments.

In addition to their storage function, the daily utilization by winter maintenance machines has to be considered in the shelters' design. Indeed, many pathologies are caused by the unsuitable utilization of the salt storage cover. New buildings, which would include mechanical restraints of the salt weight and the cycle of loading/unloading, have to be redesigned.

To this end, a specifications and a salt storage cover exemplification with all these attributes will establish some basis for future constructions.

Key Words: Road Salt / Storage Cover / Wood / Fungi / Moisture / Design