



# CAHIER TECHNIQUE

## UTILISATION DU CIMENT PROMPT NATUREL EN MELANGE AVEC LES CHAUX HYDRAULIQUES NATURELLES



## CAHIER TECHNIQUE

# UTILISATION DU CIMENT PROMPT NATUREL EN MELANGE AVEC LES CHAUX HYDRAULIQUES NATURELLES

## SOMMAIRE

<b>1 LE CIMENT PROMPT NATUREL ET LA CHAUX HYDRAULIQUE</b>	<b>P. 3</b>
1.1 Une histoire commune	
1.2 Un process de fabrication commun	
1.3 Une minéralogie commune	
1.4 Une montée en résistance parallèle	
1.5 Tableau récapitulatif des propriétés communes entre les liants	
<b>2 LES PROPRIETES DU CNP VUES SOUS L'ANGLE DE LA CHAUX</b>	<b>P. 5</b>
2.1 Temps de prise	
2.2 Résistances	
2.3 Retrait	
2.4 Module d'Elasticité	
<b>3 APPLICATIONS DES MELANGES CNP – NHL</b>	
<b>3.1 LES ENDUITS</b>	<b>P. 9</b>
3.1.1. Gobetis	
3.1.2. Couche de fond ou corps d'enduit	
3.1.3. Couche de finition	
<b>3.2 LE HOURDAGE</b>	<b>P. 16</b>
<b>3.3 LES INJECTIONS</b>	<b>P. 17</b>
<b>3.4 LE TRAVAIL PAR TEMPS FROID</b>	<b>P. 18</b>
<b>3.5 LES MELANGES CNP – NHL 5</b>	<b>P. 19</b>
<b>3.6 A PROPOS DU REBATTAGE</b>	<b>P. 20</b>
<b>4 CONCLUSIONS</b>	<b>P. 21</b>



## CAHIER TECHNIQUE

# UTILISATION DU CIMENT PROMPT NATUREL EN MELANGE AVEC LES CHAUX HYDRAULIQUES NATURELLES

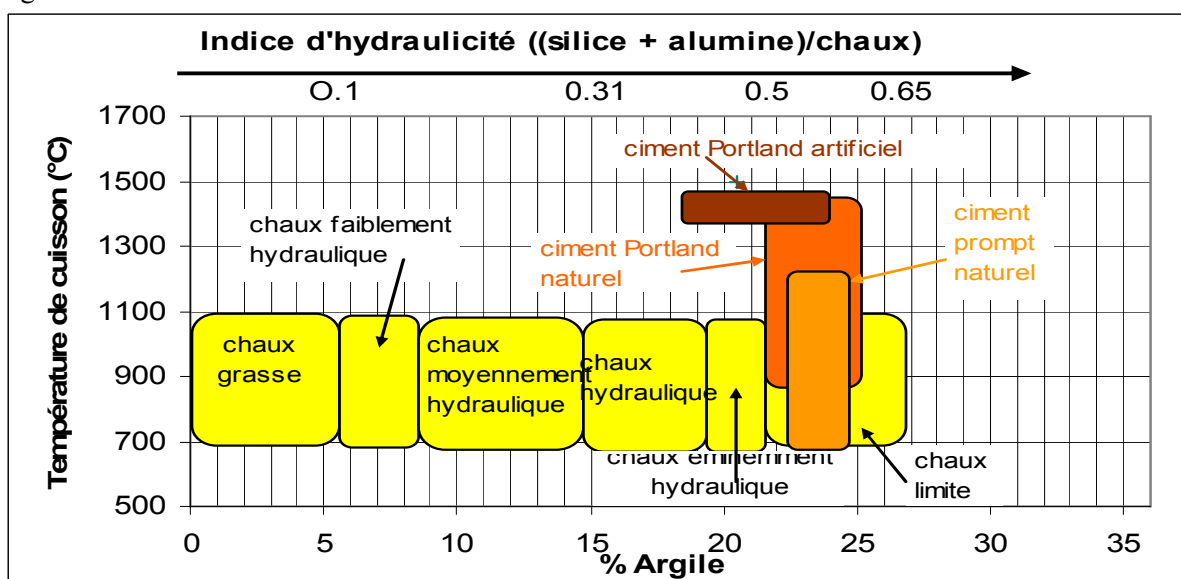
## 1 LE CIMENT PROMPT NATUREL ET LA CHAUX HYDRAULIQUE

### 1.1 Une histoire commune

Au début du 19<sup>e</sup> siècle, dans toute l'Europe, une émulation se créa pour remplacer les fameux mélanges chaux et pouzzolanes datant de l'époque romaine. La pouzzolane, importée d'Italie, était chère et de qualité très inégale. Dans l'esprit du siècle des lumières, pour des raisons économiques, d'indépendance nationale et de recherche de technicité pour aller vers plus d'hydraulicité de nombreux chauxonniers se mirent à cuire des calcaires moins purs de manière empirique avec plus ou moins de bonheur.

En 1818, Louis-Joseph Vicat développe pour la première fois la théorie de l'hydraulicité (propriété des liants de durcir sous l'eau) en démontrant scientifiquement le rôle de la teneur en argiles dans les calcaires de l'époque. En utilisant le rapport argile/chaux, il définit « l'indice d'hydraulicité » ce qui lui permit de classer les chaux et ciments naturels de l'époque (Cf. fig.1) et d'inventer les ciments artificiels en reconstituant des mélanges de chaux et d'argile.

Figure 1 CLASSIFICATION DE L. VICAT



C'est avec cette même clairvoyance que L. Vicat conseilla la première fabrication industrielle de CIMENT PROMPT NATUREL en 1842 à Grenoble sur les lieux même d'une exploitation de chaux où affleure un calcaire argileux qu'il trouva en 1827. Son fils Joseph continua la fabrication de ce ciment naturel en Chartreuse sur le site de « la Pérelle » où il est toujours fabriqué. Du fait des qualités intrinsèques de sa matière première, le CIMENT PROMPT NATUREL VICAT traversa les siècles pour être aujourd'hui le seul ciment naturel produit en quantité industrielle dans le monde. A cette époque, partout ailleurs, des ciments naturels aussi appelés « ciments romains » ou « chaux romaines » ou tout simplement chaux hydrauliques sont fabriqués à partir de calcaires ayant une teneur en argile plus ou moins variable entre les différents gisements et quelquefois même au sein d'un même gisement.

Le ciment naturel fabriqué par Vicat se distingue de ces ciments appelés commercialement « romains » par sa matière première, un calcaire argileux d'une composition exceptionnelle et unique ayant cette double caractéristique :

- sa composition chimique constante permet de faire un ciment de qualité régulière ;
- sa composition minéralogique idéale, grâce à sa teneur optimum en argile, lui permet de supporter des cuissons à plus hautes températures puisqu'il était possible de fabriquer à la même époque avec la même pierre un ciment Portland naturel de bonne qualité. Dans ce sens, il est un précurseur des futurs ciments Portland artificiels actuels.

### 1.2 Un process de fabrication commun

Aujourd'hui, si la technologie des fours a nettement évolué, le process de cuisson du CIMENT PROMPT NATUREL (CNP) est toujours aussi proche de celui utilisé pour la fabrication de la chaux.

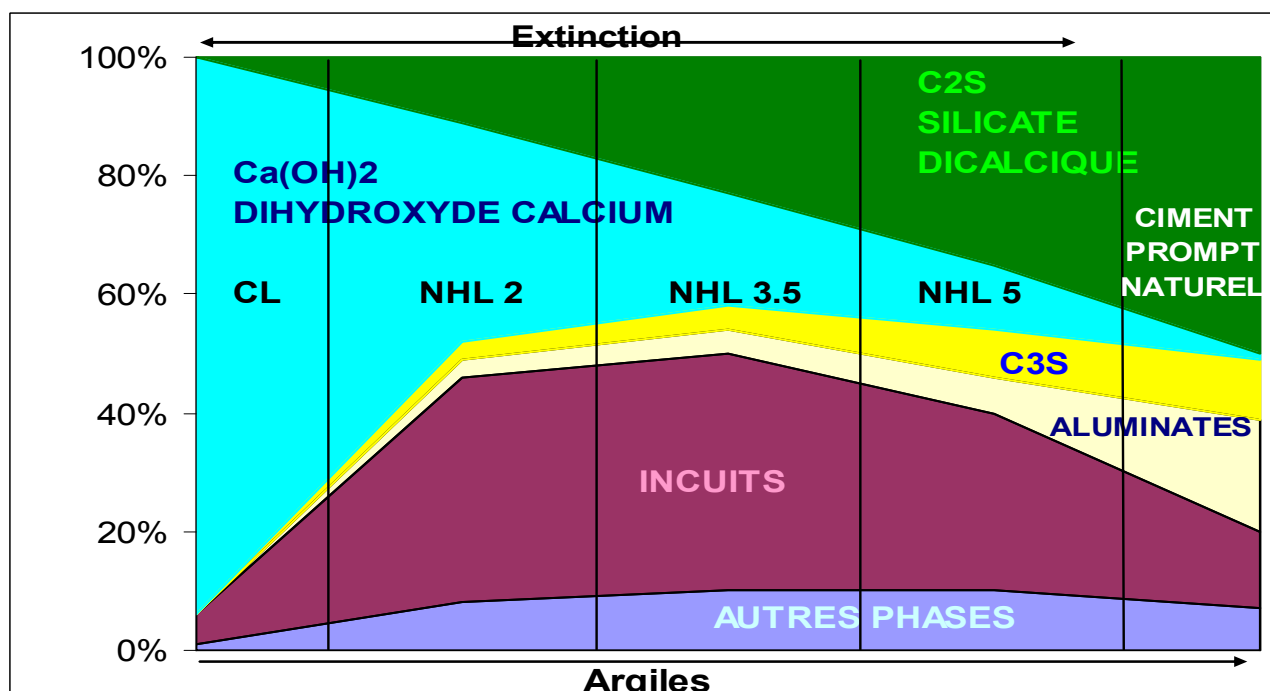
De ce fait, le CNP a de nombreux points communs avec les chaux, notamment les CHAUX HYDRAULIQUES NATURELLES (NHL) :

- Il n'y a pas d'ajout, une seule et même pierre est cuite, c'est pourquoi on les appelle « naturels ».
- Les matières premières sont sélectionnées dans des bancs géologiques bien précis afin d'obtenir une composition chimique optimum et régulière ; les NHL proviennent d'un calcaire siliceux ou argileux ; le CNP d'un calcaire un peu plus argileux que les précédentes.
- La cuisson est identique : mêmes températures inférieures à 1200°C, dans un four droit.

### 1.3 Une minéralogie commune

Comme indiqué sur le diagramme de la figure 2 le CIMENT PROMPT NATUREL comporte les même minéraux que les CHAUX HYDRAULIQUES NATURELLES mais dans des proportions différentes :

Figure 2 : COMPOSITION MINERALOGIQUE SCHEMATIQUE DES CHAUX EN FONCTION DE LA TENEUR EN ARGILE DE LA MATIERE PREMIERE

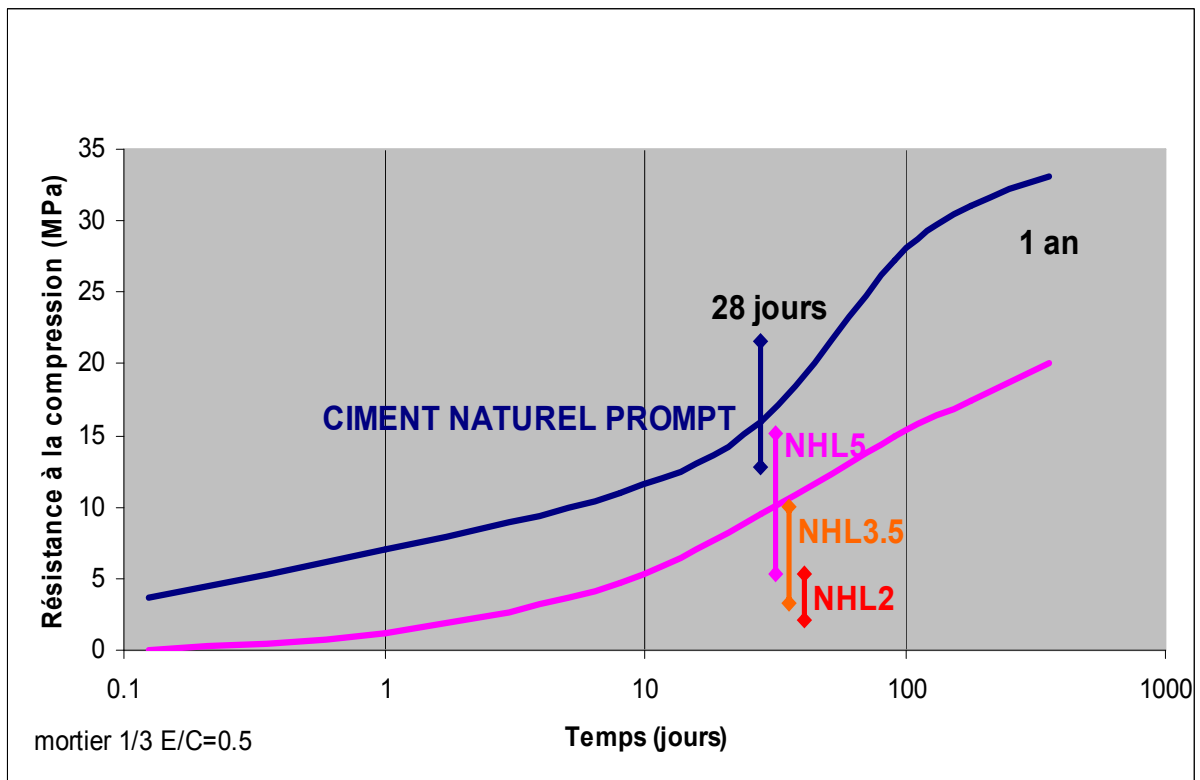


- Le process de cuisson à basse température et à large spectre thermique fait qu'une partie de la pierre reste « incuite ».
- La teneur en silicate dicalcique ou bélite (C2S) est importante dans les deux cas et est fonction de l'apport de silice par la matière première et de la température de cuisson. C'est ce minéral qui apporte l'hydraulicité à la chaux. De faible solubilité, son hydratation sera lente et durera plusieurs mois ce qui explique la lente montée en résistance des NHL.
- Le silicate tricalcique (C3S) est présent en faibles quantités ; il provient d'une fusion partielle et locale dans les points les plus chauds du four. Son hydratation est rapide, pratiquement terminée à quelques semaines.
- Les aluminates, plus présents dans le CNP que dans les NHL, provoquent soit une perte de maniabilité à faible concentration dans les NHL, soit la prise et le durcissement rapide du CNP.
- L'hydroxyde de calcium ou portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  fait sa prise avec le  $\text{CO}_2$  de l'air ; constituant presque unique des chaux calciques (CL), il peut être très présent dans les NHL. Formé sous forme de CaO pendant la cuisson, il a besoin d'être hydraté (phénomène d'extinction) pour que les chaux puissent être utilisées. Quasi absent dans les ciments naturels car ils sont combinés aux silicates et aluminates, ceux-ci n'ont pas besoin de subir d'extinction d'où leur appellation de « ciment ».

#### 1.4 Une montée en résistance parallèle

La figure 3 montre que les courbes de montée en résistance du CNP et de la NHL sont parallèles. Cette dernière relation prouve la similitude de comportement à long terme entre ces deux liants due à l'hydratation du C2S et partiellement à la carbonatation de la Portlandite pour la NHL. Les valeurs des résistances normatives à 28 jours des trois NHL se recouvrent. Avec le même mode opératoire que les NHL, les résistances du CNP à 28 jours recouvrent aussi celles de la NHL5 et ne sont guères supérieures à cette dernière. Si on devait classer le CNP suivant le mode opératoire de la norme des chaux (EN 459-1), il serait l'équivalent d'une NHL12 en résistance puisque celle-ci varie de 12 à 20 MPa.

Figure 3 CINETIQUE DE DURCISSEMENT DU CNP ET DES NHL



### 1.5 Tableau récapitulatif des propriétés communes entre les liants

Liants	Chaux		Ciments	
	CL	NHL	Ciments naturels	Ciment Portland (CEM)
Hydraulicité	non	oui	oui	oui
Extinction	oui	oui	non	non
T° cuisson	< 1200°C	< 1200°C	< 1200°C	1450°C
Trempe	Faible	Faible	faible	forte
Minéral principal	Ca(OH)2	C2S + Ca(OH)2	C2S	C3S
Matière première	Une seule « naturel »	Une seule « naturel »	Une seule « naturel »	Mélange de plusieurs « artificiel »
Couleur	Blanche	Blanc à gris clair	Jaune ocre à brun	Gris ou blanc

Les ciments naturels comme les chaux hydrauliques naturelles se distinguent très nettement des ciments Portland, seule la propriété d'hydraulicité est commune. Par contre les NHL ont 5 paramètres en commun avec les ciments naturels, seule l'extinction de la chaux (abondante dans les NHL) les distingue. Dans ce sens un mélange bâtard NHL – CNP en respectant les caractéristiques minéralogiques des NHL est de loin plus compatible qu'un mélange bâtard NHL – CEM voire même que l'utilisation d'une NHL(Z).

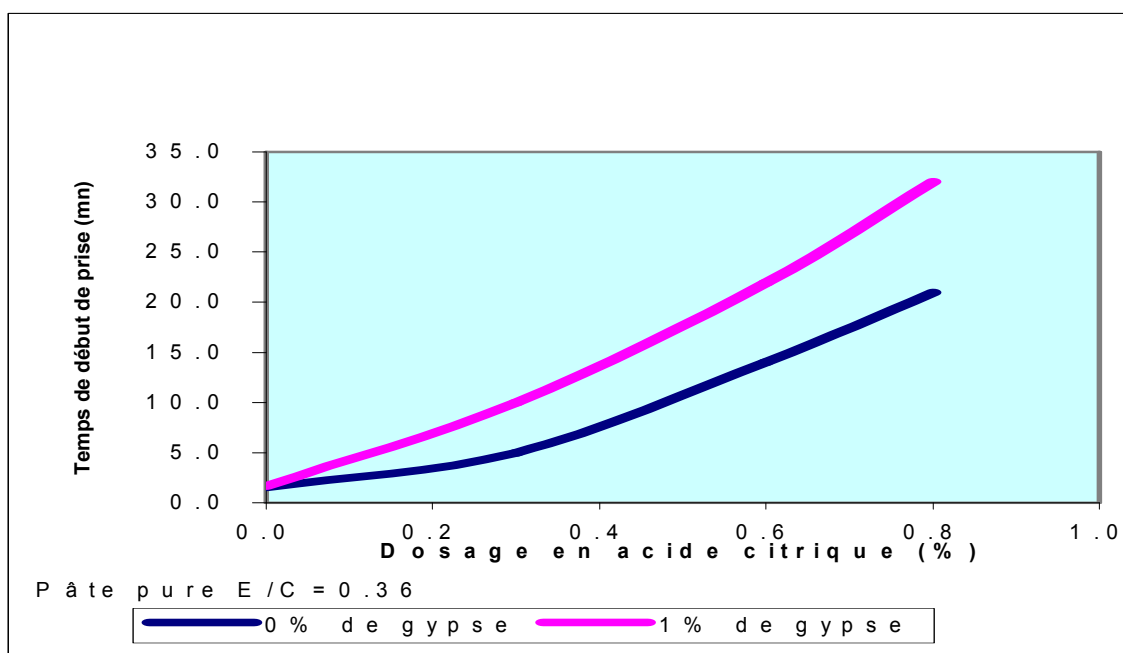
## 2 LES PROPRIETES DU CNP VUES SOUS L'ANGLE DE LA CHAUX

### 2.1 Temps de prise

De nombreuses applications exigent un temps de prise suffisamment long pour que la mise en place se fasse dans de bonnes conditions. Face à ces exigences, la prise du CNP peut être réglée par l'ajout de retardateurs spécifiques tels que le citrate trisodique et l'acide citrique. L'addition d'un peu de gypse renforce encore ce phénomène comme le montre la figure 4.

Un temps de prise d'au moins une heure est possible avec une tenue de maniabilité de 30 minutes grâce au mélange CNP – NHL. Dans ce cas, l'ajout de retardateur est toujours indispensable par temps chaud pour éviter une perte de maniabilité trop rapide.

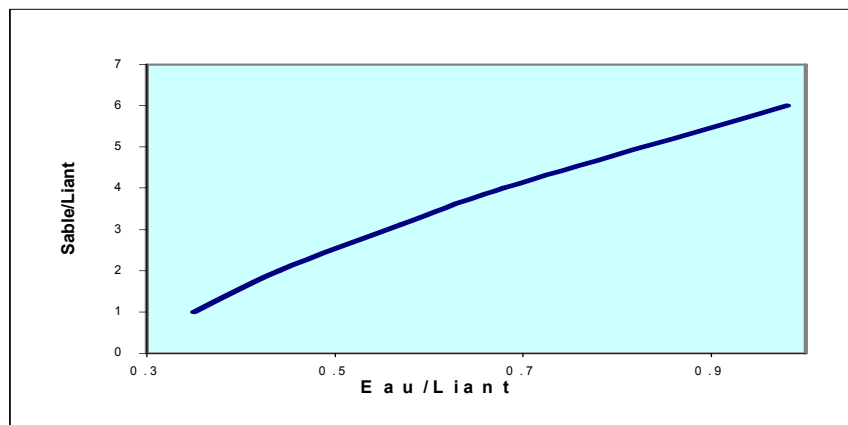
Fig. 4 REGLAGE DU TEMPS DE PRISE DU CNP



### Conditions expérimentales

Tous les essais suivants ont été effectués sur des mortiers en faisant varier le rapport eau/ciment. *Afin de garder une maniabilité constante, le dosage en liant a été modulé : plus le E/C est important plus le dosage en liant est faible.* La figure 5 ci-dessous met en évidence que la relation entre le E/C et le rapport sable/liant est pratiquement linéaire.

Figure 5 CORRELATION DU DOSAGE EN EAU AVEC LE DOSAGE EN LIANT A MANIABILITE CONSTANTE

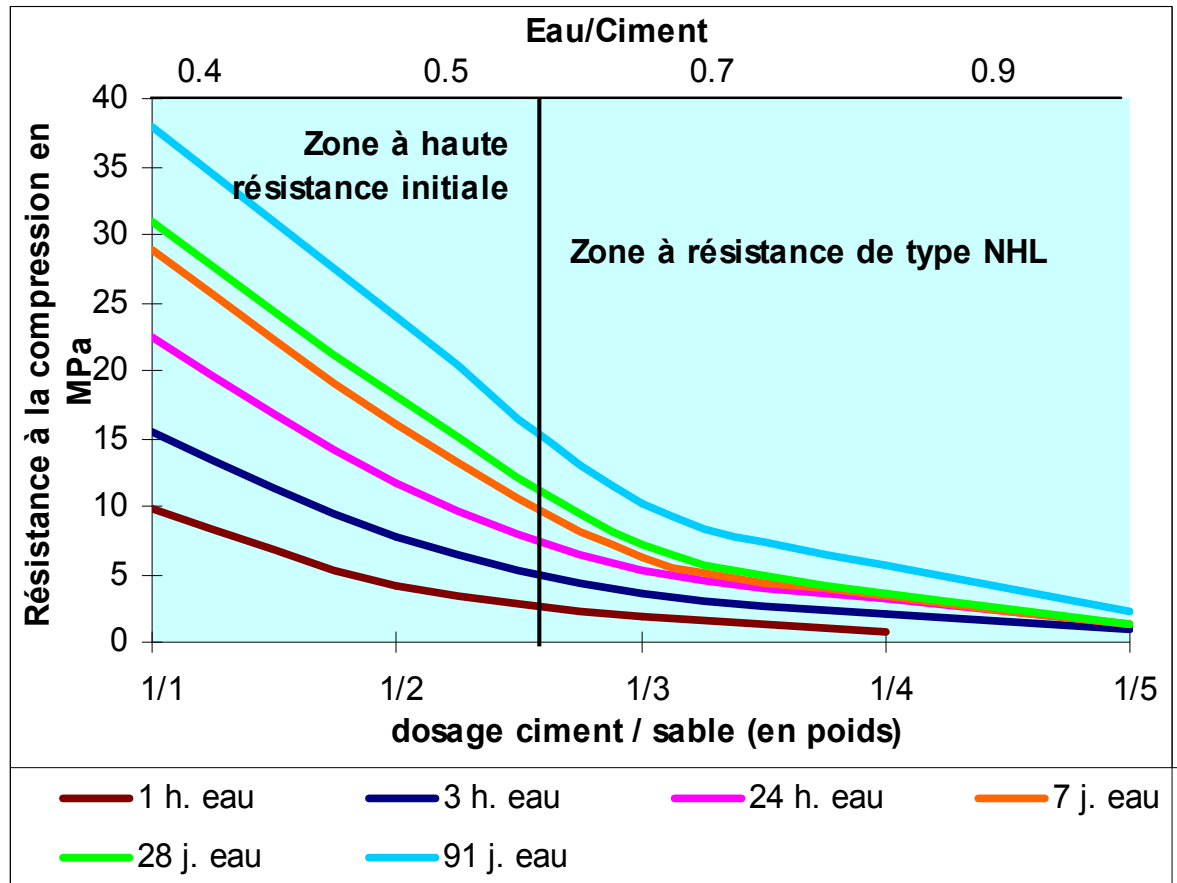


## 2.2 Résistances

La figure 6 indique la montée en résistance en fonction du E/C et du dosage suivant la fonction définie à la figure 5.

Toute formulation à base de CIMENT PROMPT NATUREL doit tenir compte de l'avantage apporté par les résistances aux jeunes âges mais aussi de la montée en résistance qui se poursuit sur plusieurs années, bien au delà des classiques 28 jours.

Figure 6 CINETIQUE DE DURCISSEMENT EN FONCTION DU DOSAGE ET DU E/C



Que ce soit en fonction du E/C ou du dosage, les résistances du CNP peuvent être classées en deux zones :

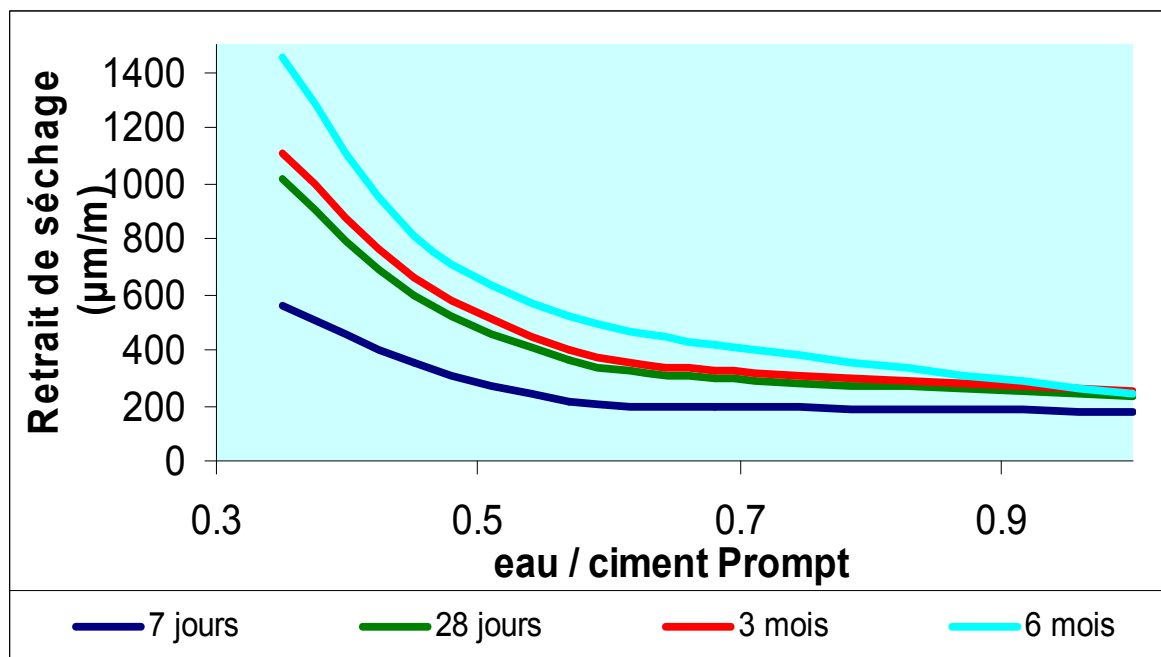
- La zone à haute résistance initiale à E/C inférieur à 0.55 et un ratio ciment/sable supérieur à 1/2.5 ; les applications de scellement, d'étanchéité et d'imperméabilisation en font partie. Cette zone par ses performances aptes à répondre à des efforts structuraux se rapproche des ciments Portland artificiels.
- La zone où les résistances sont voisines des NHL, le E/C est supérieur à 0.5 et les dosages sont plus proches de ceux des emplois de chaux. C'est cette zone qui nous intéresse dans ce cahier technique car son comportement à long terme est similaire à celui des NHL (Cf. Fig 3).



### 2.3 Retrait

Le retrait du CIMENT PROMPT NATUREL est faible pour les rapports E/C supérieurs à 0.5 et S/L supérieurs à 2 donc à dosage faible. Il devient plus important avec les rapports E/C plus bas et avec un S/L inférieur à 2 (cf. figure 7 ci-dessous).

Figure 7 RETRAIT EN FONCTION DU E/C

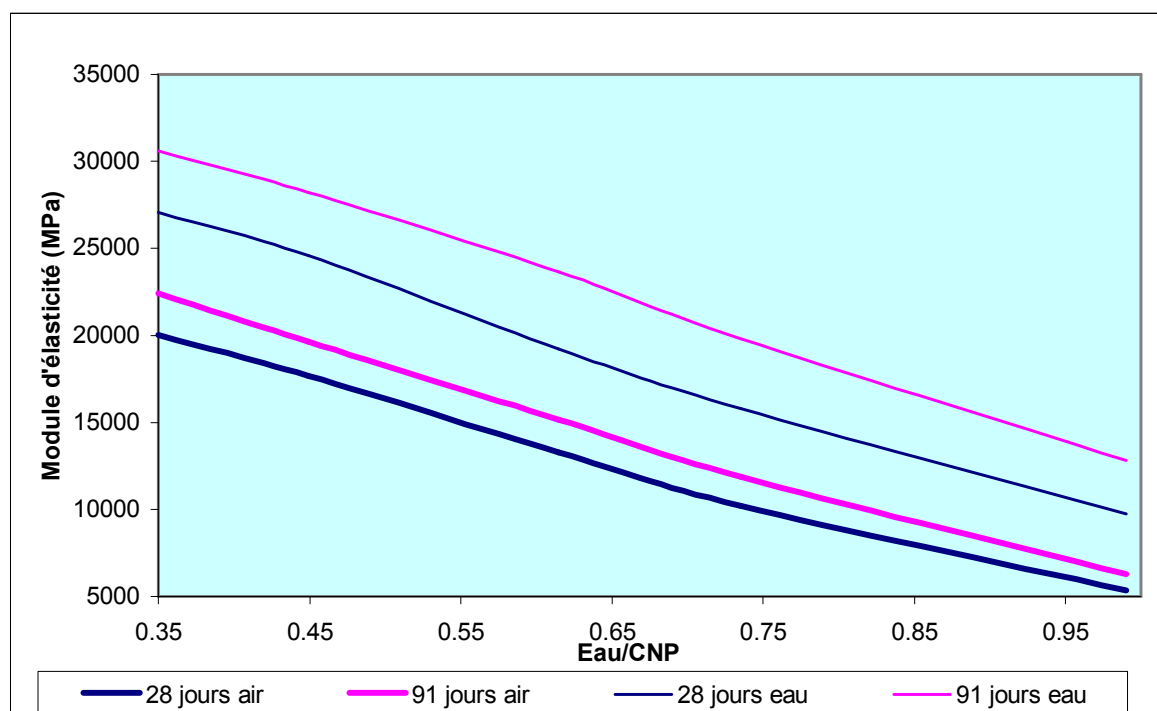


### 2.4 Module d'Elasticité

Le module d'élasticité du CIMENT PROMPT NATUREL varie de manière plus linéaire en fonction des rapports E/C et S/L. aux ratios E/C élevés, le module est proche de ceux des NHL.

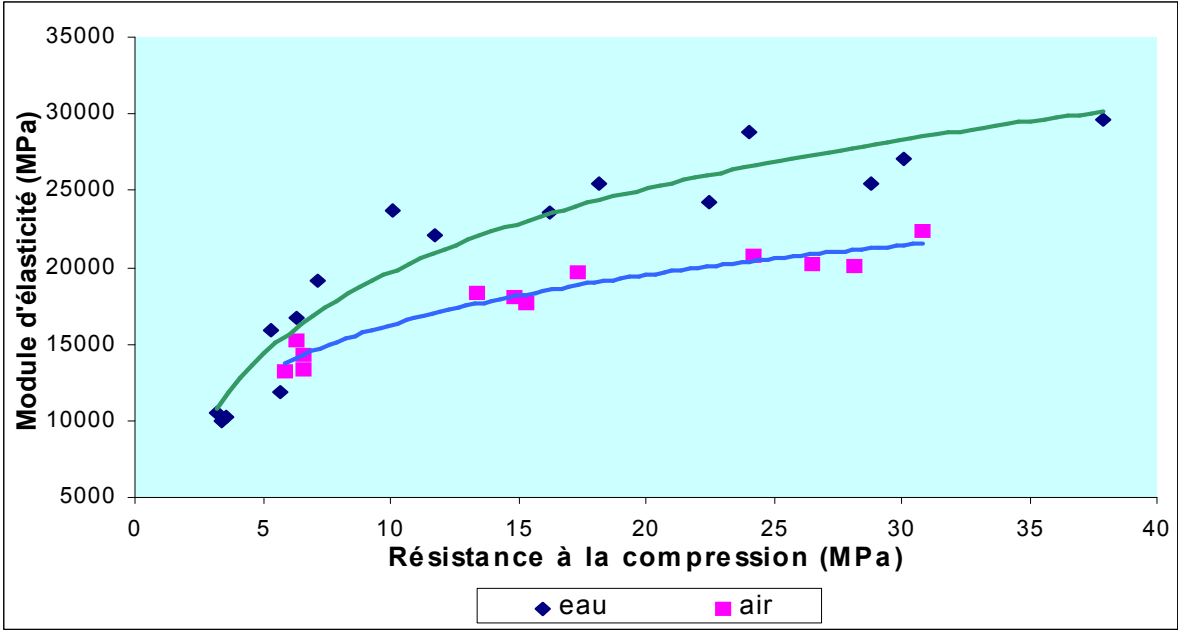
La figure 8 ci-dessous montre l'évolution du module d'élasticité du mortier de CNP après conservation dans l'eau et dans l'air.

Figure 8 MODULE D'ELASTICITE EN FONCTION DU E/C



A titre indicatif, la corrélation entre le module d'élasticité et la résistance à la compression est donnée dans la figure 9.

Figure 9 MODULE D'ELASTICITE EN FONCTION DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION



## 3 APPLICATIONS DES MELANGES CNP – NHL

### 3.1 LES ENDUITS

La chaux hydraulique naturelle est privilégiée pour les mortiers d'enduit car, depuis des siècles, elle a fait la preuve de son efficacité en répondant aux fonctions demandées par le bâti ancien. Pour assurer son rôle de protection de ce dernier elle doit assurer deux fonctions :

1. permettre une évacuation de l'humidité du support tout en le protégeant des eaux de ruissellement. La perméance permet de mesurer ce transfert d'humidité sous forme de vapeur.
2. protéger la maçonnerie existante, elle doit bien adhérer. Deux facteurs sont importants pour l'adhérence : le module d'élasticité car l'enduit ne doit pas être trop rigide pour supporter sans casser les variations dimensionnelles importantes imposées par le support ancien très souvent hétérogène et tendre, le retrait de séchage doit être le plus faible possible pour ne pas apporter de contraintes supplémentaires amenant à la fissuration et au décollement.

Nous avons vu ci-dessus que le CIMENT PROMPT NATUREL employé au même rapport eau/ciment a des caractéristiques finales voisines de la chaux. En ajout à celle-ci, il diminue le temps de tenue de maniabilité ; en contre partie il va apporter une nervosité aux jeunes âges donnant de nouvelles propriétés à la chaux pour permettre de :

- raccourcir les délais d'attente entre les couches,
- limiter la fissuration de retrait, surtout aux jeunes âges,
- limiter la déshydratation excessive de l'enduit aux jeunes âges,
- d'appliquer des surcharges d'enduit (épaisseur plus importante) en une passe,
- renforcer les points singuliers naturellement fragiles : arêtes, tableaux de baies,
- travailler par temps froid.

Trois types de mélanges vont être présentés : un mortier gras pour le gobetis, des mortiers à dosage moyen pour une application manuelle et maigre pour une application au pot à projection pour la couche de fond d'enduit.

#### 3.1.1 Gobetis

Cette sous-couche a uniquement une fonction d'accrochage de l'enduit sur son support. Sa position en interface nécessite une bonne adhérence et un aspect rugueux, le dosage doit donc être assez élevé. Cette couche d'accrochage n'est plus considérée comme indispensable dans le cas où les enduits sont projetés mécaniquement.

#### Les Dosages en mélange

En poids

CNP	NHL 3.5	Sable 0-4R
200 kg	160 kg	1 M <sup>3</sup>

En volume

CNP	NHL 3.5	Sable 0-4R	Eau
3 litres	3 litres	15 litres <sup>3</sup>	5 litres

#### Techniques de préparation et de mise en œuvre sur chantier

Malaxage à la bétonnière dans l'ordre suivant :

1. La moitié de l'eau de gâchage puis,
2. Le sable,
3. La chaux,
4. L'autre moitié de l'eau de gâchage avec le Tempo si nécessaire (1 bouchon arasé par litre de CNP)
5. Le Ciment Prompt Naturel.,
6. Un temps de malaxage de moins de 5 minutes,
7. Le mortier est stocké en petites quantités en cours d'utilisation pour éviter une prise trop rapide par effet de masse,
8. Le mortier ne doit pas être rebattu, lorsque sa maniabilité n'est plus suffisante pour le mettre en œuvre normalement, il doit être éliminé,
9. l'application se fera en manuel ou au pot à projection.

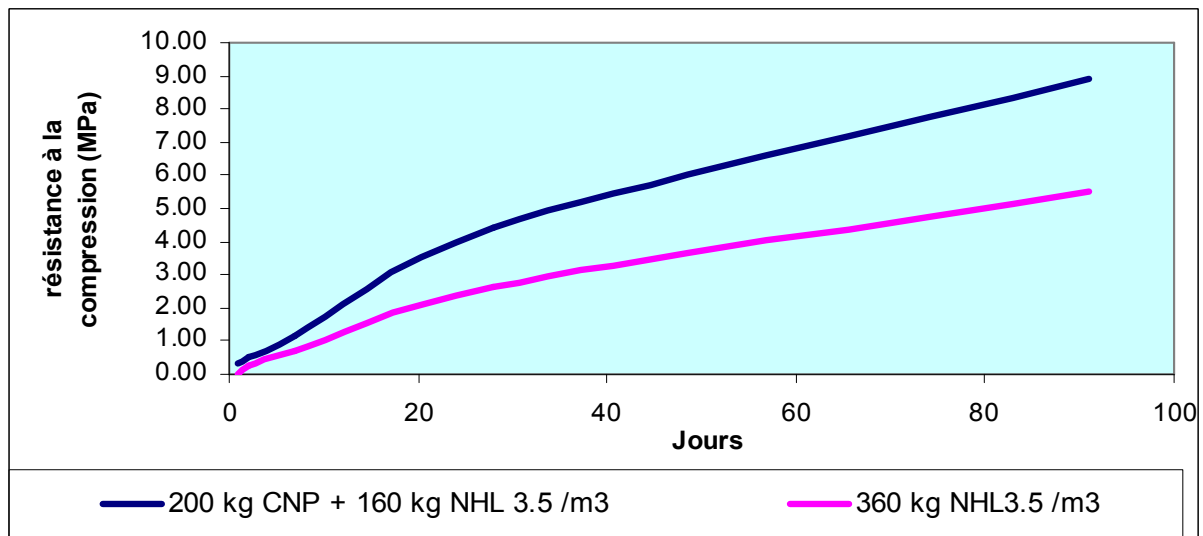
### Les caractéristiques de ce mélange

Ce mortier perd sa maniabilité au bout d'une vingtaine de minutes et sa prise s'effectue vers 40 minutes à la température de 20°C.

Sa perméance (indiquant la perméabilité à la vapeur d'eau suivant M.O. cahiers du CSTB 08/1993) est de 0.60 g/m<sup>2</sup>.h.mmHg pour 0.57 sur le témoin de NHL 3.5 au même dosage. Le mélange est donc tout aussi perméable à la vapeur d'eau que le mortier témoin à base uniquement de NHL.

Par temps chaud, il est conseillé d'ajouter un retardateur afin de conserver une tenue de maniabilité suffisante.

Figure 10 RESISTANCE A LA COMPRESSION DU MELANGE A 360 kg



Bien que les résistances à la compression (figure 10) soit plus fortes avec notre mélange que le témoin, Des modules d'élasticité (figure 11) voisins et un retrait de séchage (figure 12) bien plus faible font que ce mélange présente toutes les garanties de pérennité au niveau de l'adhérence et de la fissuration.

Figure 11 MODULE D'ELASTICITE DU MELANGE A 360 kg

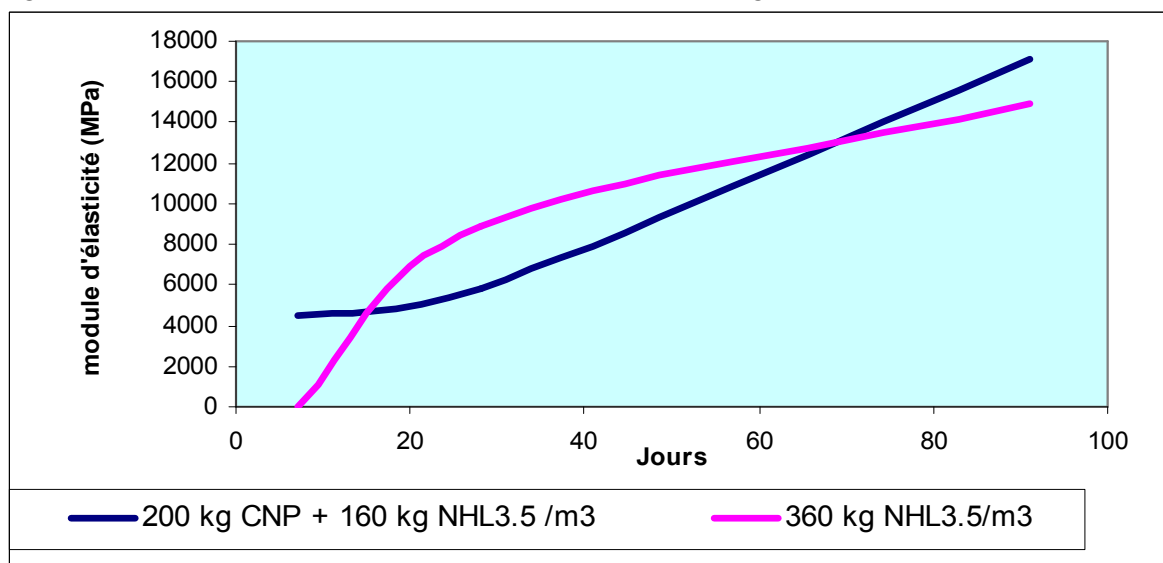


Figure 12 RETRAIT DE SECHAGE DU MELANGE A 360 kg

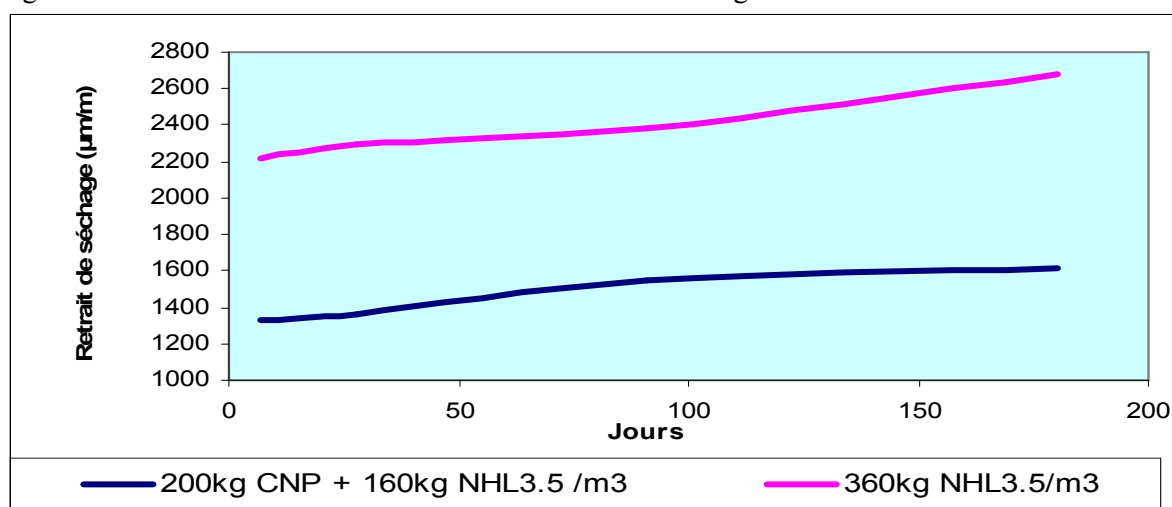
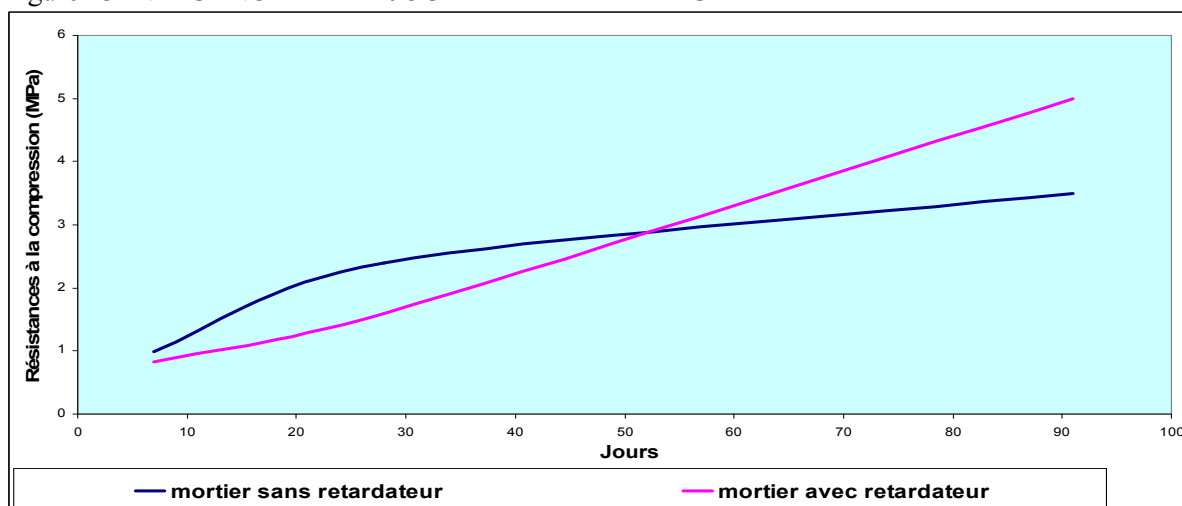


Figure 13 INFLUENCE DE L'AJOUT DE RETARDATEUR



#### Influence de l'ajout de retardateur sur les performances à moyen terme

La figure 13 ci-dessus montre l'influence de l'ajout de retardateur (Tempo) au dosage recommandé sur un mortier gras fortement dosé en CNP de composition : 2 volumes de CNP, 2 volumes de NHL 3.5, 10 volumes de sable 0/3R, Tempo et 3.75 volumes d'eau. Le retardateur baisse légèrement les résistances à 28 jours pour ensuite les augmenter tout aussi légèrement à 91 jours. La durabilité n'est pas donc altérée.

### 3.1.2 La couche de fond ou corps d'enduit

Cette couche permet le dressage du parement et la protection du support. Elle doit être compatible avec ce dernier.

Deux dosages ont été testés : moyen à 340 kg/m<sup>3</sup> pour une application manuelle et maigre à 280 kg/m<sup>3</sup> pour une application au pot à projeter :

Dosages en poids

	CNP	NHL 3.5	Sable 0-4R
Mortier maigre	70 kg	210 kg	1 m <sup>3</sup>
Mortier moyen	100 kg	240 kg	1 m <sup>3</sup>

## Dosages en volume

	CNP	NHL 3.5	Sable 0-4R	Eau
Mortier maigre	2 litres	8 litres	30 litres	9.5 litres
Mortier moyen	1.5 litre	4.5 litres	15 litres <sup>3</sup>	5 litres

### Techniques de préparation et de mise en œuvre sur chantier

Les mêmes que définit précédemment pour le gobetis.

Le dressage se fera à la règle ou talochage suivant la finition désirée.

### Les caractéristiques de ces mélanges

A la température de 20°C, la perte de maniabilité de ces deux mortiers se fera vers 20 à 25 minutes et la prise de ces mortiers sur le mur vers 30 à 60 minutes en fonction de l'absorption du support. Par temps chaud, il est conseillé d'ajouter un retardateur ; un bouchon de Tempo arasé par litre de CNP, afin de conserver une tenue de maniabilité suffisante.

La perméance (indiquant la perméabilité à la vapeur d'eau suivant M.O. cahiers du CSTB 08/1993) est de 0.92 g/m<sup>2</sup>.h.mmHg pour le mortier maigre et 0.78 g/m<sup>2</sup>.h.mmHg pour le mortier moyen ; les témoins à base NHL au même dosage sont à 0.76 et 0.73. Ces valeurs permettent un bon transfert de l'humidité sous forme de vapeur de l'intérieur du support vers l'extérieur en traversant l'enduit.

Le mortier moyen en mélange présente les résistances les plus fortes (figure 14). Le mortier maigre en mélange et les deux mortiers témoins sont similaires.

Les modules d'élasticité (figure 15) vont pour les quatre mortiers considérés de 13 000 à 16 000 MPa soit la même gamme de valeur. Comme les mortiers de NHL, les mortiers en mélange CNP – NHL sont assez « élastiques » pour supporter les variations de longueur des supports.

Le faible retrait de séchage de nos mélanges par rapport aux témoins à la chaux (figure 16) permet d'éviter une contrainte de cisaillement maximum au niveau de l'interface avec le support, l'adhérence est donc améliorée et le risque de fissuration moins grand. Les courbes de retrait de séchage sont toutes parallèles, le mélange CNP – NHL présente dès la première mesure des niveaux très faibles. Le CIMENT PROMPT NATUREL en apportant dès les premières heures un raidissement au mortier de chaux permet de mieux résister aux contraintes de séchage aux jeunes âges.

Figure 14 MONTEE EN RESISTANCE DES MORTIERS MAIGRES ET MOYEN

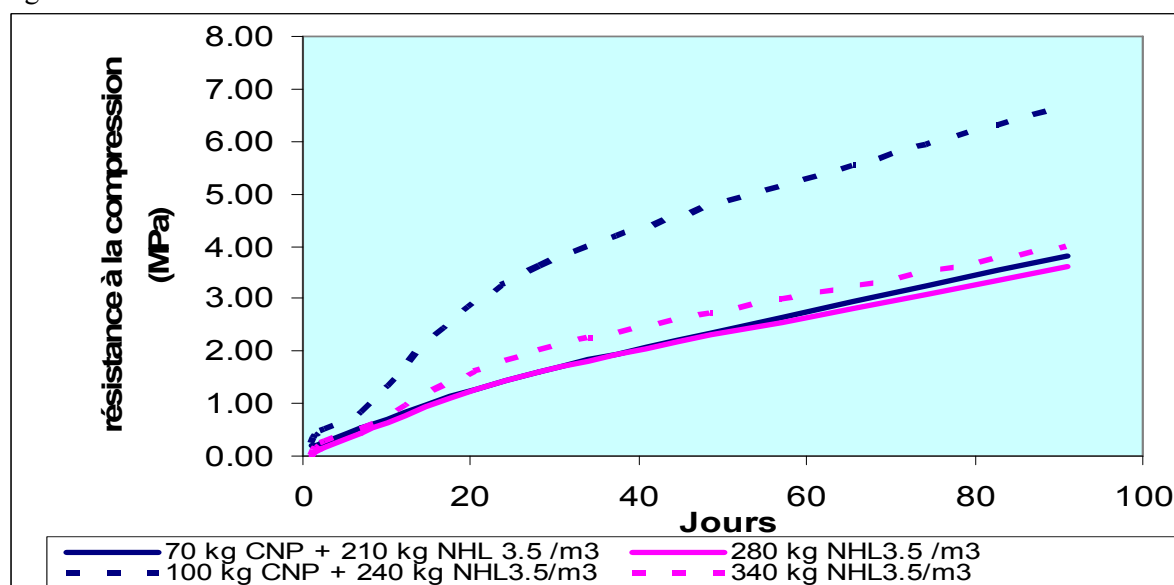


Figure 15 MODULE D'ELASTICITE DES MORTIERS MAIGRES ET MOYENS

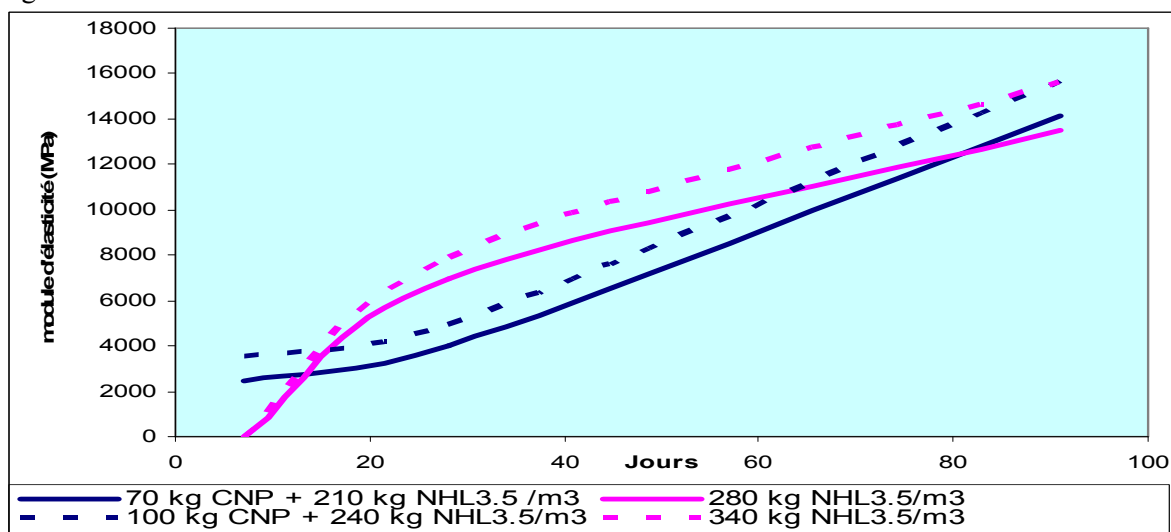
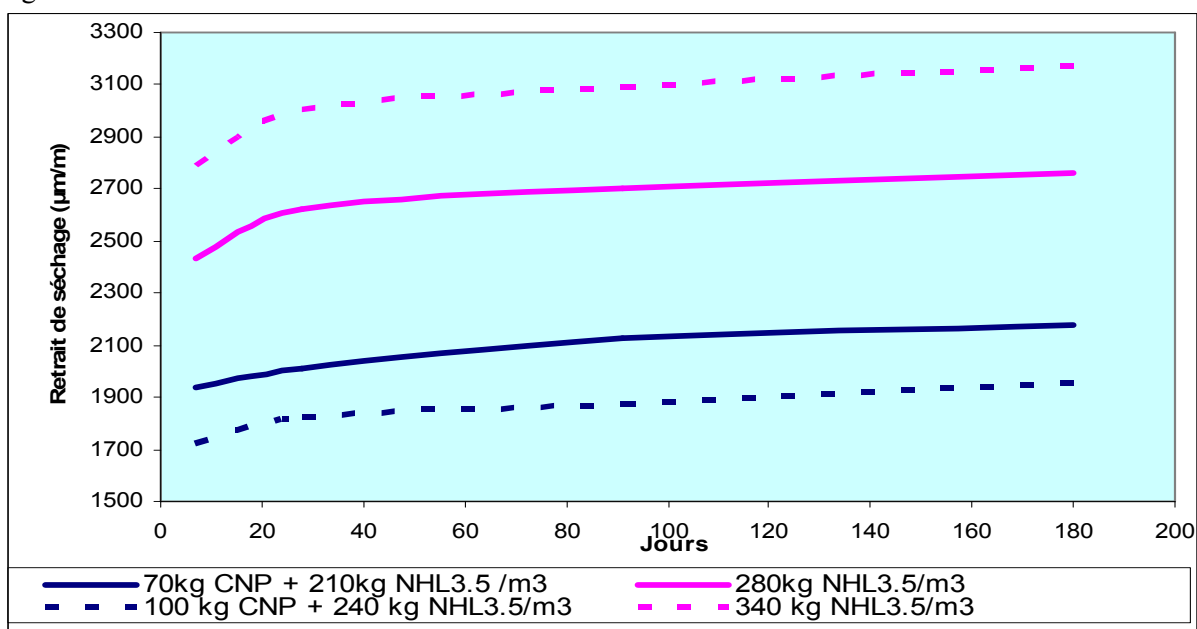


Figure 16 RETRAIT DE SECHAGE DES MORTIERS MAIGRES ET MOYENS



### 3.1.3 La couche de finition

Cette couche a uniquement un rôle décoratif.

Le temps de tenue de maniabilité de ces mélanges n'est pas suffisant pour enduire de grandes surfaces sans rendre visible les raccords. Par contre, en soubassement de mur, cette technique permet de sécuriser rapidement le bas des murs contre le rejaillissement d'eau de pluie tout en laissant la possibilité au mur de respirer et d'avoir un minimum de résistance mécanique pour résister aux chocs et agressions diverses.

### 3.2 LES MELANGES CNP – NHL EN APPLICATION DE HOURDAGE

Le mortier de hourdage est celui mis en œuvre pour l'assemblage des briques ou des moellons de pierre qui constituent le mur. Le choix des mortiers employés doit tenir compte de la résistance mécanique des briques ou des moellons et de la nécessité de maintenir une certaine perméance de l'ouvrage.

Ces ouvrages comprennent les murs en élévation, mais aussi les voûtes en maçonnerie et en général tous les ouvrages constitués de moellons pierres.

L'adjonction de CNP à un mortier de hourdage à la chaux, présente plusieurs intérêts :

1. Il améliore l'adhérence du mortier à l'élément de construction, notamment par la limitation du retrait lors du durcissement ;
2. Il permet un avancement rapide des travaux de hourdage de petits moellons ou galets, en limitant le fluage des assises par un début de prise rapide ;
3. Il rend possible la mise en charge partielle des murs de soubassement ou de soutènement, facilitant ainsi les interventions en sous-œuvre ;
4. Il raccourcit le délai d'attente avant le décoffrage d'une voûte ou d'un cintre ;
5. Il permet d'envisager le travail par temps froid.

Les dosages conseillés pour cette application sont des adaptations des dosages courants des mortiers de chaux suivant le DTU 20-1 tel le mortier maigre définit précédemment :

	CNP	NHL 3.5	Sable 0-4R	Eau
Mortier maigre en poids	70 kg	210 kg	1 m <sup>3</sup>	-
Mortier maigre en volume	2 litres	8 litres	30 litres	9.5 litres

Les techniques de préparation et de mise en œuvre sur chantier et les caractéristiques de ces mélanges ont été définies dans le paragraphe sur les applications en enduits.

Pour les travaux exécutés en urgence, des mortiers plus dosés peuvent être employés.



### 3.3 LES MELANGES CNP – NHL EN APPLICATION D'INJECTION

Certains ouvrages existant en maçonnerie présentent des désordres structurels, mais doivent absolument être maintenus en place (murs mitoyens, éléments de grande valeur archéologique, parties d'ouvrages très coûteuses ou très complexes à remplacer). Lorsque ces désordres consistent en des fissurations ou à une désagrégation des mortiers de hourdage, un remplissage des vides par des coulis peut apporter des consolidations efficaces.

Cette technique consiste à injecter sous pression gravitaire dans les massifs des mélanges de liants, eau et quelque fois d'un sable fin. La confortation des ouvrages par cette technique nécessite un rejointoiement préalable ou l'existence d'enduits pouvant assurer ce rôle. Cette technologie doit impérativement tenir compte des liants existants.

La solution que nous proposons ci-dessous est incompatible avec les liants de type plâtre. La mise en place d'éléments fluides à l'intérieur d'éléments déjà fragiles nécessite un savoir-faire et des précautions particulières sur la mise en charge par pression hydraulique.

L'adjonction de CNP à un coulis d'injection à la chaux présente plusieurs avantages liés à la prise plus rapide du coulis :

- Possibilité d'injecter des zones en limites d'ouvrages à ne pas injecter,
- Possibilité de réaliser des injections d'un jour à l'autre, voire plus rapidement, par raccourcissement du délai de consolidation pour mise en charge,
- Diminution des fuites, le coulis se figeant plus rapidement,
- Possibilité de travailler par temps froid,
- Réglage de la prise pour une meilleure maîtrise du volume à injecter.

Le dosage conseillé est :

CNP	NHL 3.5	Eau	Retardateur
3 litres	6 litres	8 litres	3 bouchons arasés de Tempo

#### Techniques de préparation et de mise en œuvre sur chantier

Malaxage à la bétonnière dans l'ordre suivant :

10. La moitié de l'eau de gâchage puis,
11. Eventuellement le sable,
12. La chaux,
13. L'autre moitié de l'eau de gâchage avec le Tempo,
14. Le Ciment Prompt Naturel.,
15. Un temps de malaxage de moins de 5 minutes,
16. Le coulis est stocké en petites quantités en cours d'utilisation pour éviter une prise trop rapide par effet de masse,
17. Le coulis ne doit pas être rebattu, lorsque sa maniabilité n'est plus suffisante pour le mettre en œuvre normalement, il doit être éliminé,
18. L'injection se fera par écoulement gravitaire.

#### Les caractéristiques de ce mélange

L'utilisation de retardateur est indispensable pour cette application en contrôlant le temps de tenue de maniabilité, il contrôlera le volume de coulis à injecter.

A la température de 20°C, suivant la formule ci-dessus, la tenue de maniabilité est estimée à 30 minutes. La prise dans le mur sera fonction de l'absorption de l'eau du coulis par les granulats du support et la température. A cette formulation, il est possible d'ajouter un sable plus ou moins fins en fonction de la porosité à combler.

Les niveaux de résistance sont difficiles à appréhender car il faudrait tester le mur injecté dans sa totalité.

### 3.4 LE TRAVAIL PAR TEMPS FROID

La faible nervosité des mortiers de chaux les rend particulièrement sensibles pour les travaux par temps froid. Cette sensibilité sera fonction du niveau de température :

- En dessous de 10°C, la prise se fera très lentement et le mortier sera particulièrement vulnérable aux phénomènes d'efflorescence par temps humide.
- En dessous de 5°C, la prise du mortier de chaux ne se fait pas, par temps sec et venteux les mortiers vont se déshydrater provoquant un risque de farinage, de fissuration et de décollement. Le durcissement qui doit se faire par la suite sera altéré.
- En dessous de 0°C, le gel affecte le mortier avant sa prise, ce phénomène le déstructure totalement pouvant amener sa destruction.

Tous les mélanges NHL – CNP énoncés précédemment ont été testés aussi bien sur chantier qu'en laboratoire à des températures de 0 à 5°C. Les constatations sont :

- La prise est ralentie mais se fait dans les heures qui suivent.
- La tenue de maniabilité est plus longue.
- La montée en résistance se fait plus lentement mais dès que les températures sont plus clémentes, elles rejoignent le niveau classique des NHL.

Ces mélanges donnent donc la possibilité de continuer à travailler les solutions à base de chaux par temps froid en sécurisant ; ce que l'emploi de la chaux seule ne permet pas.

L'utilisation de ces mélanges n'empêche pas de respecter les règles de l'art :

- L'excès d'eau et l'utilisation de rétenteurs d'eau sont à éviter.
- La pose de mortier sur supports gelés est exclue.
- Une protection thermique des ouvrages en cours est indispensable.
- Les mises en couleurs, soit dans la masse des mortiers soit superficielles sont déconseillées.

### 3.5 LES MELANGES CNP – NHL5 VARIATIONS DES RESISTANCES DE LA NHL5 au CNP

Il est intéressant d'étudier les mélanges CNP – NHL5 dans le but de trouver des solutions de chaux hydraulique naturelle et de ciment naturel pour des utilisations en mortier ou béton à l'instar des ciments dits « romains » du 19<sup>e</sup> siècle.

Ce type de mélange permet d'avoir toutes les résistances intermédiaires entre la NHL5 et le CNP. Cette solution a une montée en résistance dans le temps s'étalant sur plusieurs mois grâce à une minéralogie à prédominance bélitique similaire à celle de ces ciments romains et des chaux de cette époque.

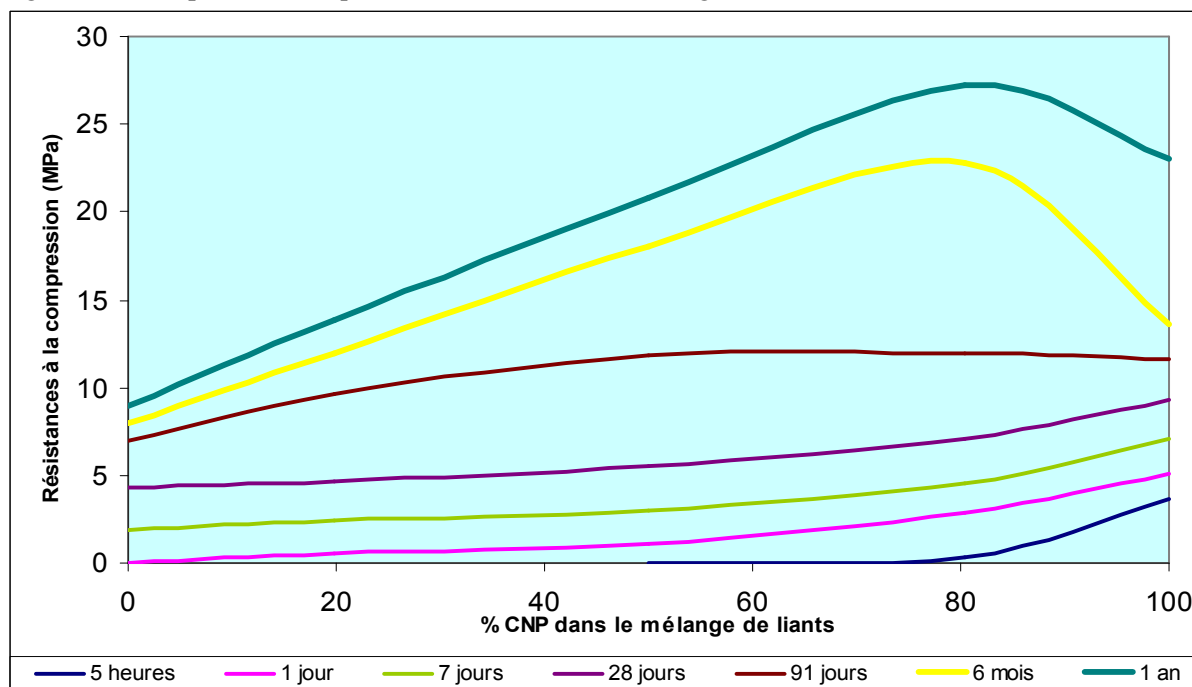
A terme, il est aussi possible d'avoir les résistances des mélanges bâtard NHL – CEM ou des NHL(Z) tout en restant naturel sans apport de minéraux de type alite (C3S) caractéristique des clinkers portland.

Les applications envisagées avec ce type de mélange sont :

- La restauration des mortiers et bétons à base de liants naturels (chaux ou ciments « romains » et ciment Prompt naturel) datant du 19 et 20<sup>e</sup> siècle.
- Des bétons « respirant » laissant passer l'humidité sous forme de vapeur pour des sols polis (terrazzo) ou non poli dans les bâtiments anciens.
- Des mortiers pour des ornements de façade, des corniches, toute forme de corroyage.
- Des mortiers d'enduit de façade sur support rigide ou soumis à des agressions (soubassements de mur).

Un exemple de mélange avec de la NHL5 en mortier est indiqué dans la figure 17. Le dosage utilisé est de 300 à 350 kg/m<sup>3</sup>, soit un rapport sable/liants de 4 en poids. La prise a été réglée à une heure. Il est important d'utiliser dans ces mélanges un retardateur pour éviter toute perte de maniabilité avant la prise.

Figure 17 Exemple de cinétique de durcissement des mélanges CNP – NHL5



### 3.6 A PROPOS DU REBATTAGE

La pratique traditionnelle du rebattage consiste à regâcher le mortier qui a perdu sa maniabilité afin de lui redonner une ouvrabilité et une consistance plus onctueuse. Cette dernière est particulièrement appréciée lors de la mise en œuvre des enduits de finition.

Cette perte de maniabilité peut s'assimiler à une fausse prise. Celle-ci est due à l'hydratation des aluminates de calcium (C3A et C4AF) et du silicate tricalcique (C3S). Ces minéraux ne sont pas présents en assez grande quantité dans les NHL pour provoquer une véritable prise comme avec le CNP seul. N'oublions pas que la mesure du temps de prise est avant tout une mesure rhéologique.

Le fait de rebattre le mortier provoque aussi une défloculation de la chaux rendant cette dernière plus dispersée et donc plus fine ; ce phénomène donne une ouvrabilité plus onctueuse très appréciée des applicateurs.

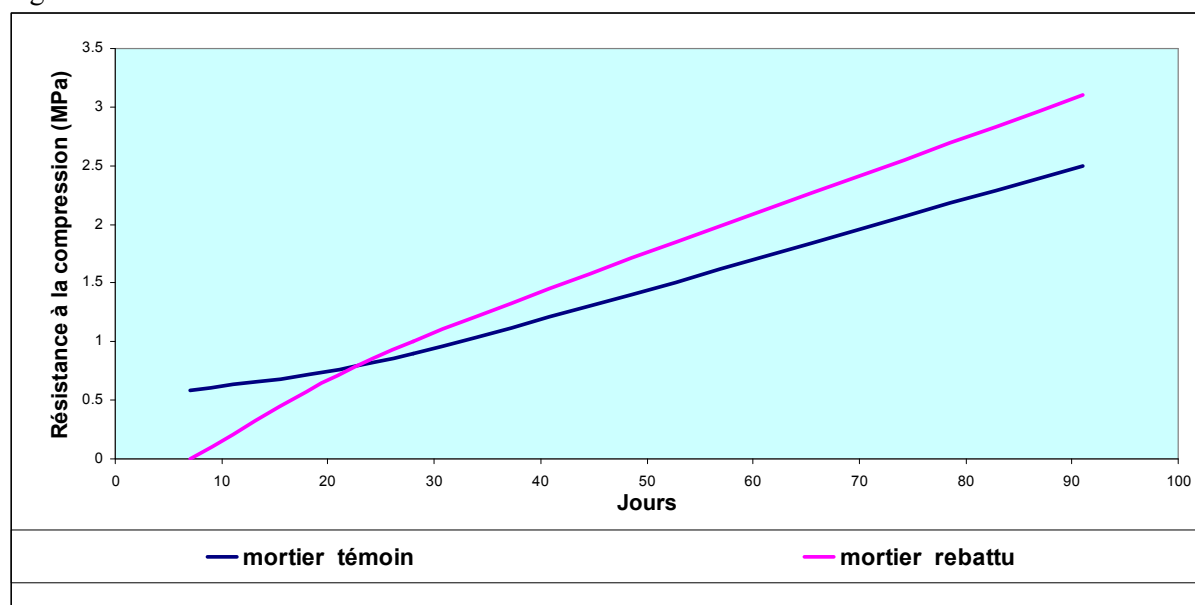
Ce rebattage n'affecte pas les résistances finales de la chaux NHL puisque celles-ci sont dues essentiellement à l'hydratation de la bélite (C2S) et à la carbonatation de l'hydroxyde de chaux. A contrario, le rebattage des mortiers de mélanges bâtards NHL – CEM et les NHL(Z) plus riches en aluminates de calcium et en silicate tricalcique apportés par l'ajout de ciment Portland et moins riches en bélite verront leurs performances finales altérées.

Nous avons rebattu après sa perte de maniabilité et avant sa prise un mortier en mélange de composition initiale : 1.5 volume de CNP, 4.5 volumes de NHL 3.5, 15 volumes de sable 0/3R, retardateur (Tempo) et 5.75 volumes d'eau. Lors de son regâchage, il a été nécessaire de rajouter 0.66 volume d'eau.

La montée en résistance par rapport à un mortier témoin non rebattu est indiquée dans la figure 18 ci-après. Contrairement au mortier témoin le mortier rebattu ne présente pas de résistance mesurable à l'échéance de 7 jours. Par contre à 28 et 91 jours, la résistance à la compression est très légèrement supérieure au témoin malgré le faible rajout d'eau.

Un mortier de mélange CNP – NHL rebattu ne présente pas de désordres à long terme, la montée en résistance se fait correctement. La présence en grande quantité de bélite dans ces deux liants permet d'assurer une excellente durabilité. Par contre le rebattage supprime la propriété de « nervosité » apportée par le CNP à la NHL. Celle-ci est le principal intérêt de ces mélanges.

Figure 18 MONTEE EN RESISTANCE D'UN MORTIER REBATTU



## 4 CONCLUSIONS

Les chaux hydrauliques, les ciments naturels, les chaux ou ciments dits « romains » sont apparus en grande partie au début du 19<sup>e</sup> siècle. Ils présentent de nombreuses similitudes : une seule et même matière première, un calcaire argileux ou siliceux, une cuisson identique en four droit à même température, les mêmes constituants minéralogiques, une montée en résistance de type bélitique.

De cette époque ont perduré les chaux hydrauliques naturelles à faible teneur en argile à prise lente (les NHL) et le ciment prompt naturel qui pourrait être aussi classé comme chaux hydraulique naturelle rapide à teneur en argile plus importante. Le CNP a traversé les siècles grâce à la qualité exceptionnelle de son gisement et reste le seul ciment naturel à être fabriqué en quantité industrielle dans le monde.

Le CNP est plus proche des NHL que des ciments Portland (CEM). Seule l'extinction de la chaux et sa prise rapide le distinguent des NHL. Le CNP et les NHL ont en commun les mêmes minéraux mais en proportions différentes. Leurs mélanges en respectant une même dynamique d'hydratation à long terme sont donc plus cohérents que les mélanges bâtards NHL – CEM et que l'emploi de la NHL (Z) dans lesquels l'ajout de Portland provoque une rapide montée en résistance.

Différents mélanges CNP – NHL ont été développés sur chantier et caractérisés au L.M.M. pour 4 applications : mortier d'enduit, mortier de hourdage, coulis d'injection et travail par temps froid.

Les fonctions premières de perméabilité à la vapeur d'eau et de protection du support sont respectées. Ces mélanges présentent tous un retrait plus faible que les mortiers de chaux hydraulique naturelle.

Le CNP apporte la nervosité manquante à la chaux pour permettre : de raccourcir le délai entre les différentes couches d'enduit et de pouvoir appliquer une épaisseur plus importante, de diminuer les délais de décoffrages, de travailler par temps froid. L'avancement des travaux se fait plus rapidement et les enduits sont sécurisés aux jeunes âges.

Par ce gain de temps et la sécurité apportée aux jeunes âges, l'apport du CIMENT PROMPT NATUREL aux mortiers de CHAUX HYDRAULIQUE NATURELLE a toute sa modernité par rapport aux contraintes actuelles des chantiers; en même temps, il reste une solution traditionnelle qui a fait ses preuves depuis plus de 150 ans.