POLITECNICO DI TORINO

COLLEGIO DI ARCHITETTURA

*CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN*
*ARCHITETTURA PER IL PROGETTO SOSTENIBILE*

# RECYCLAGE D'UN SOUS-PRODUIT VEGETAL DANS LA CONSTRUCTION DE BATIMENTS

## Réalisation du bloc «FUTURIZ»

## Étude expérimentale sur la réalisation d'un bloc en ciment naturel avec agrégat végétal de balles de riz et additif d'amidon de riz. (Utilisation de produits Biosourcés)

Directeur de thèse :
Roberto GIORDANO

Candidat :
Romain CINTI

En collaboration avec :
VICAT Groupe (Lyon, Grenoble, FR)
Marco CAPPELLARI

Remerciements :
Jacopo ANDREOTTI
DENIS FARUKU

POLITECNICO DI TORINO

COLLEGIO DI ARCHITETTURA

*CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN*
*ARCHITETTURA PER IL PROGETTO SOSTENIBILE*

# RICICLAGGIO DI UN SOTTOPRODOTTO VEGETALE NELLA COSTRUZIONE DI EDIFICI

## Realisazione del blocco «FUTURIZ»

### Studio sperimentale sulla realisazione di un blocco di cemento naturale con aggregato vegetale di lolla di riso e additivo di amido di riso. (Uso di prodotti a base biologica)

Relatore :
Roberto GIORDANO

Candidato :
Romain CINTI

In collaborazione con :
VICAT Groupe (Lyon, Grenoble, FR)
Marco CAPPELLARI

RIngraziamenti :
Jacopo ANDREOTTI
Denis FARUKU

# SOMMAIRE


**PREMISSE** 9

**PARTIE I. ANALYSE D'ANTÉRIORITÉ ET LÉGISLATIONS** 16

**1. ÉTAT DE L'ART** 18

1.1 Analyse du béton avec balle de riz de chez VICAT et du bloc en chanvre « Biosys » 20

1.1.1 Compositions et matériaux 20

1.1.2 Origine des matières premières 21

1.1.3 Ciment Prompt (CNP) 22

1.1.4 Performances du produit « Biosys » et Béton balle de riz 24

1.1.5 Utilisation «In Situ» 26

1.2 Définitions et exigences générales pour un futur bloc à base d'agrégat végétal 27

1.3 Analyse d'antériorité 30

1.3.1 Intégration de la balle de riz et ses dérivés avec le ciment pour la réalisation d'un agro-bétons 30

1.3.2 Expérimentations et études sur l'incorporation de l'amidon dans les mortiers et ciments 38

1.3.3 Analyse sur l'utilisation des sous-produits du riz et la réalisation d'agrobétons 47

1.3.4 Autres sources d'analyse 56

1.4 Recherche sur les cultures Européennes et sélection des filières de proximité 60

**2. NORMES SUR LES SOUS-PRODUITS AGRICOLES** 68

2.1 Directive-cadre Européenne du 15 juillet 1975 71

2.2 Directive 2008/98/CE et Décret législatif 205/2010 72

2.3 Décret Ministériel Français du 6 juillet 2012 79

2.4 Décret Italien du 13 octobre 2016, n. 264 80

**3. NORMES SUR LE CIMENT ET LES BLOCS EN CIMENT** 82

**PARTIE II : LA PRODUCTION DE RIZ : D'UN MODÈLE LINEAIRE À UN MODÈLE CIRCULAIRE** 94

**4. LE RIZ** 96

4.1 Histoire et morphologie de la plante 98

4.2 Cycle végétatif et environnemental 104

4.3 Modèle circulaire : Sous-produits du riz, de déchet à matière première 111

4.3.1 La balle de riz 114

4.3.2 L'amidon de riz 120

4.4 Récolte de la balle de riz et de l'amidon 125

4.5 Chaîne de stockage 133

4.6 Mise en œuvre de la chaîne d'approvisionnement et commercialisation 137

**PARTIE III. VERS UN NOUVEAU PRODUIT INDUSTRIEL « FUTURIZ »** 140

**5. ACTIVITÉ EXPERIMENTALE** 142
5.1 Sélection des matières premières 144
5.1.1 Ciment Prompt + retardateur de prise 146
5.1.2 Les agrégats 147
5.1.3 Les additifs 150
5.2 L'impact environnemental et l'utilisation 154
5.3 Le mix design 156
5.4 Première série d'activités expérimentales : balle de riz naturelle 159
5.4.1 Résultats et discussions 161
5.5 Deuxième série d'activités expérimentales : concentration en liant 163
5.5.1 Résultats et discussions 164
5.6 Troisième série d'activités expérimentales : ajout d'amidon de riz 167
5.6.1 Résultats et discussions 168
5.7 Quatrième série d'activités expérimentales : Consistance, résistance au feu et aux intempéries 169
5.7.1 Résultats et discussions 169
**6. CONTRÔLE DES PERFORMANCES** 182
6.1 Résistance à compression : liant – Balle de riz naturelle et lavée 185
6.2 Résistance à compression : liant – Balle de riz lavée avec ajout d'amidon 188
6.3 Réalisation du produit fini « FUTURIZ » 194

**CONCLUSIONS** 202

**BIBLIOGRAPHIE** 208

# INDICE


**PREMESSA** 9

**PARTE I. STATO DELL'ARTE E LEGISLAZIONE** 16

1. STATO DELL'ARTE 18
- 1.1 Analisi del calcestruzzo con lolla di riso di VICAT e dei blocchi di canapa «Biosys» 20
  - 1.1.1 Composizioni e materiali 20
  - 1.1.2 Origine delle materie prime 21
  - 1.1.3 Cemento Prompt 22
  - 1.1.4 Prestazioni del sistema «Biosys» e del calcestruzzo con lolla di riso 24
  - 1.1.5 Uso «in situ» 26
- 1.2 Definizioni e requisiti generali per un futuro blocco a base di origine vegetali 27
- 1.3 Analisi di anteriorità 30
  - 1.3.1 Integrazione della lolla di riso e dei suoi derivati con il cemento per la realisazione di un bio-calcestruzzo 30
  - 1.3.2 Esperimenti e studi sull'incorporazione di amido in malte e cementi 38
  - 1.3.3 Analisi sull'uso dei sottoprodotti del riso e la realisazione di agro-cemento 47
  - 1.3.4 Altre fonti di analisi 56
- 1.4Ricerca sulle colture europee e selezione dei settori di prossimità 60

2. NORME PER I SOTTOPRODOTTI AGRICOLI 68
- 2.1 Direttiva quadro europea del 15 luglio 1975 71
- 2.2 Direttiva 2008/98/CE e decreto legislativo 205/2010 72
- 2.3 Decreto ministeriale Francese del 6 luglio 2012 79
- 2.4 Decreto Italiano del 13 ottobre 2016, n. 264 80

3. NORME SU CEMENTO E BLOCCHI DI CEMENTO 82

**PARTE II: LA PRODUZIONE DI RISO: DA UN MODELLO LINEARE A UN MODELLO CIRCOLARE** 94

4. IL RISO 96
- 4.1 Storia e morfologia della pianta 98
- 4.2 Ciclo vegetativo e ambiente 104
- 4.3 Modello circolare : Sottoprodotti del riso, da rifiuti a materie prime 111
  - 4.3.1 Lolla di riso 114
  - 4.3.2 Amido di riso 120
- 4.4 Raccolta della lolla di riso e dell'amido 125
- 4.5 Filiera di stoccaggio 133
- 4.6 Attuazione della filiera di approvvigionamento e commercialisazione 137

**PARTE III. VERSO UN NUOVO PRODOTTO INDUSTRIALE « FUTURIZ »** 140

**5. ATTIVITÀ SPERIMENTALE** 142
5.1 Selezione delle materie prime 144
5.1.1 Cemento Prompt + ritardante di presa 146
5.1.2 Aggregati 147
5.1.3 Additivi 150
5.2 Impatto ambientale e uso 154
5.3 Mix design 156
5.4 Prima serie di attività sperimentale e controllo: lolla di riso naturale 159
5.4.1 Risultati e discussione 161
5.5 Seconda serie di attività sperimentale e controllo: concentrazione in legante 163
5.5.1 Risultati e discussione 164
5.6 Terza serie di attività sperimentale e controllo: aggiunta di amido di riso puro 167
5.6.1 Risultati e discussione 168
5.7 Quarta serie di attività sperimentale e controllo : Cosistenza, resistenza al fuoco e alle intemperie 169
5.7.1 Risultati e discussione 169
**6. VERIFICA DELLE PRESTAZIONI** 182
6.1 Resistenza alla compressione: legante - Lolla di riso naturale e lavata 185
6.2 Resistenza alla compressione: legante - Lolla di riso lavata e aggiunta di amido 188
6.3 Realisazione del prodotto finito « FUTURIZ » 194

**CONCLUSIONI** 202

**BIBLIOGRAFIA** 208

« ÊTRE INSPIRÉ EST NOBLE,
MAIS INSPIRER LES AUTRES EST
INCROYABLE »

# PREMISSE

Dans un monde où l'ensemble des comportements anthropiques ont permis de s'approprier les processus naturels à l'échelle planétaire, la transition écologique exige l'utilisation de toutes les connaissances humaines pour réparer les dégâts engendrés à la nature, plutôt que de les aggraver.

Après les combustibles fossiles et le changement d'affectation des terres dû à la déforestation, la production de ciment est la troisième plus grande source d'émissions anthropiques de dioxyde de carbone. En 2016, les émissions mondiales de cette production étaient de 1,45 ± 0,20 $GtCO_2$[1]. Les émissions de $CO_2$ vont de 0,8 à 1,3 tonne par tonne de ciment produit et la consommation d'énergie avoisine les 100-150 kWh pour chaque tonne de ciment produit[2] .
L'équilibre environnemental et écologique est également entravé à cause de l'excavation et l'extraction des matières premières requises pour la production de ciment.

Selon le GABC (Global Alliance for Building and Construction), en 2020 le secteur du bâtiment et de la construction sont responsables au niveau mondial de 35% de l'ensemble des énergies consommées et 38% des émissions (1% de moins qu'en 2017). Malgré tout, les quantités ont considérablement augmentées (10 Gt d'émission de $CO_2$ liées à l'utilisation des bâtiments), à un point tel que le secteur des bâtiments et de la construction ne s'est pas rapproché, mais s'est éloigné de l'objectif de l'Accord de Paris visant à contenir l'élévation de la température moyenne de la planète nettement en dessous de 1,5°C. (fig.0)
Selon le Rapport sur l'état mondiale des édifices et les constructions en 2020 réalisées par le GABC « Pour être en mesure de parvenir à un parc immobilier zéro carbone d'ici à 2050, l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) préconise une diminution de 50 % des émissions directes de $CO_2$ des bâtiments et une baisse des émissions indirectes du secteur des bâtiments grâce à une réduction de 60% des émissions liées à la production d'électricité d'ici à 2030 ».

Pour ce qui concerne les déchets, les chiffres sont tout aussi alarmants. Pour la production d'un seul pays comme la France, la production totale de déchet annuel atteint les 800 millions de tonnes chaque année et rien qu'en 2017 pas moins de 350 millions de tonnes de déchets organiques ont été produits dont font partie :

1 R.M. Andrew, Global CO2 emissions from cement production, Earth Syst. Sci. Data 105194 (2018) 195–217.

2 S. Chandra, Waste Materials Used in Concrete Manufacturing, Noyes Publications, 1997.

- les biodéchets des gros producteurs (restauration collective, supermarchés…)
- les déchets municipaux (déchets ménagers, boues de stations d'épuration)
- déchets des industries agroalimentaires
- déchets agricoles (effluents d'élevages, résidus des cultures)

Loin de diminuer, ces chiffres sont en constante augmentation chaque année. En partant du principe que 25,6 kilos de déchets sont produits chaque seconde, un total de 100000 tonnes sera produit le temps de lire cette thèse.
Ainsi, en s'appuyant sur les résultats et les analyses précédentes, il est crucial de remettre en question notre système économique, notre mode de fabrication, ainsi que le tri et le recyclage des déchets.
À la lumière de ces considérations, la thèse propose la transformation de certains sous-produits agricoles qui tend à rompre le système classique de production linéaire pour s'orienter vers un système circulaire grâce à la réutilisation de la balle de riz et de l'amidon de riz.
Ces vingt dernières années ont vu naître un nouveau modèle d'économie circulaire basé sur le principe des trois « R » (Recycler, Réduire, Réutiliser). Dans le secteur de la construction, l'utilisation de matériaux recyclés alliés à l'utilisation de nouvelles technologies, devient fondamental pour réduire l'impact environnemental et les besoins énergétiques.
Avec la collaboration de la société VICAT et du support du Polytechnique de Turin, la thèse s'est concentrée sur la réalisation d'un système biosourcé composé de balle de riz et de ciment naturel, le système « FUTURIZ » tout en étudiant l'effet de l'amidon de riz sur les performances globales de ce système. Afin de rester en accord avec le principe de réduction de l'empreinte carbone, une chaîne d'approvisionnement en « circuits courts » a été privilégiée pour l'obtention des matières premières (se limitant essentiellement à la France et à l'Italie).

De façon cohérente avec les principes vu précédemment, notre thèse s'organise selon trois grands axes. La première partie de la thèse s'attarde sur la présence de produits liés au monde de la construction déjà commercialisés faisant l'emploi de matières biosourcées utilisées sur le territoire européen. On y trouvera l'exemple du système « Biosys » développé par la société Vicat dont nous analyserons la composition, la provenance des matières premières, les caractéristiques du ciment utilisé, les performances du système et son utilisation sur chantier. Nous essayerons par la même occasion de définir les performances et les caractéristiques générales que doit offrir un bloc à base de produits biosourcés. Toujours dans cette première partie nous présenterons les lois et les normes en vigueur qui encadrent la réalisation et l'utilisation d'un bloc en béton ainsi que celles encadrant la réutilisation de sous-produits agricoles au sein de la communauté Européenne. Enfin nous

dresserons la liste des recherches antérieures à notre thèse qui nous ont permis de mener à bien notre travail, à travers l'analyse d'antériorité.

Dans la deuxième partie de cette thèse nous analysons le processus de la production du riz à travers l'étude de la plante « Oryza sativa », les sous-produits qui en dérivent ainsi que la chaîne d'approvisionnement et sa commercialisation. Nous éclaircirons les moyens utilisés pour passer d'un modèle linéaire de la production du riz à un modèle circulaire à travers la réutilisation de la balle de riz et de l'amidon de riz.  Il est évident qu'aujourd'hui, même si les mentalités ont tendance à évoluer, les sous-produits agricoles sont encore en grande majorité considérés comme des déchets.

La dernière partie de cette thèse de recherche fait la synthèse de l'activité expérimentale et analyse de façon concrète la faisabilité de produire un bloc avec des matériaux biosourcés à travers la réalisation de différents échantillons analysés en laboratoire. Ces derniers nous permettent de contrôler les différentes concentrations de chacun des éléments composant les différents mix-design. Il nous sera par la suite nécessaire de calculer les performances des échantillons réalisés (résistance à compression, résistance au feu, consistance et résistance aux intempéries) pour pouvoir vérifier qu'il soit possible de réaliser un produit fini utilisant des matériaux biosourcés qui puissent avoir des performances similaires au blocs en agro-béton déjà commercialisés.

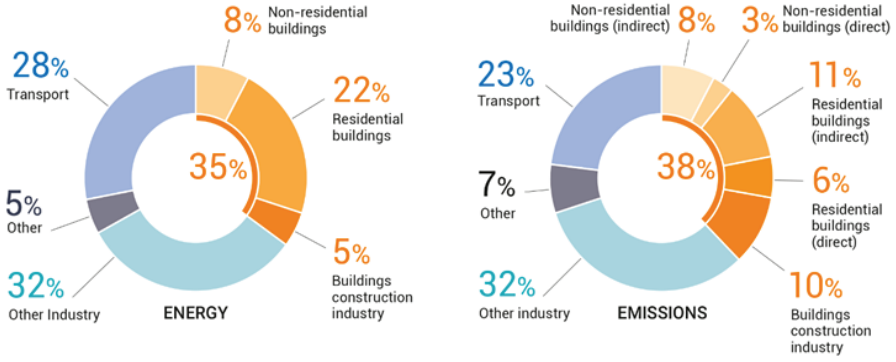



Fig.0 : Part mondiale des bâtiments et de la construction dans la consommation finale d'énergie et les émissions (2019)
Note : Le secteur des bâtiments et la construction représente la part (estimée) de l'ensemble des entreprises qui se consacrent à la fabrication de matériaux de construction tels que l'acier, le ciment et le verre. Les émissions indirectes correspondent aux émissions liées à la production d'électricité et de chaleur commercialisée.
Sources : (AIE 2020d ; AIE 2020b). Tous les droits sont réservés. Adapté de "IEA World Energy Statistics and Balances" and "Energy Technology Perspectives".

# PREMESSA

In un mondo in cui l'essere umano si è appropriato dei processi naturali fino a poterli controllare in ogni sua parte, la transizione ecologica esige un impiego di queste conoscenze per recuperare ai danni fatti finora, anziché acuirli ulteriormente.
Dopo i combustibili fossili e il cambiamento di destinazione d'uso dei terreni dovuto alla deforestazione, la produzione di cemento è la terza causa di emissioni antropiche di anidride carbonica. Nel 2016, le emissioni globali causate da quest'ultima sono state di 1,45 ± 0,20 $GtCO_2$[1]. Le emissioni di $CO_2$ vanno da 0,8 a 1,3 tonnellate e il consumo di energia per la sua produzione varia da 100-150 kWt per ogni tonnellata di cemento prodotto[2].
L'equilibrio ambientale ed ecologico è inoltre ostacolato dallo scavo e dall'estrazione delle materie prime necessarie per la produzione del cemento.

Secondo la Global Alliance for Building and Construction (GABC), nel 2020 il settore dell'edilizia e delle costruzioni è stato responsabile del 35% dell'energia consumata a livello mondiale e del 38% delle emissioni globali (1% in meno rispetto al 2017). Così, anche se le percentuali relative di energia e di emissioni sono diminuite, le quantità effettive sono aumentate considerevolmente (10 Gt di emissioni di $CO_2$ legate all'utilizzo degli edifici). Infatti, nel 2019 il settore dell'edilizia e delle costruzioni non si è avvicinato, ma anzi si è allontanato dall'obiettivo stabilito dall'Accordo di Parigi di mantenere l'aumento della temperatura media del pianeta al di sotto dei 1,5°C. (fig.0)

Secondo il Rapporto sullo stato mondiale degli edifici e le costruzioni nel 2020 condotto dalla GABC, «per essere in grado di raggiungere un patrimonio edilizio a carbonio zero entro il 2050, l'Agenzia Internazionale dell'Energia (IEA) chiede una riduzione del 50% delle emissioni dirette di $CO_2$ dagli edifici e una riduzione delle emissioni indirette dal settore degli edifici attraverso una riduzione del 60% delle emissioni date dalla produzione di elettricità entro il 2030».

Per quanto riguarda i rifiuti, le cifre sono altrettanto allarmanti. Per un solo paese come la Francia, la produzione totale annuale di rifiuti raggiunge gli 800 milioni di tonnellate ogni anno. Soltanto nel 2017 sono stati prodotti non meno di 350 milioni di tonnellate di rifiuti organici, tra cui:

---

1 R.M. Andrew, Global CO2 emissions from cement production, Earth Syst. Sci. Data 105194 (2018) 195–217.

2 S. Chandra, Waste Materials Used in Concrete Manufacturing, Noyes Publications, 1997.

- rifiuti organici dei grandi produttori (catering, supermercati, ecc.)
- rifiuti urbani (rifiuti domestici, fanghi da impianti di trattamento delle acque reflue)
- rifiuti dell'industria agroalimentare
- rifiuti agricoli (effluenti di allevamento, residui di colture)

Lungi dal diminuire, queste cifre sono in costante aumento ogni anno. Supponendo che si producano 25,6 chili di rifiuti ogni secondo, un totale di 100000 tonnellate sarà creato entro la lettura di questa tesi.
Quindi, sulla base dei numeri emersi dall'analisi sopra condotta, diventa fondamentale mettere in discussione il nostro attuale sistema economico, il nostro processo di produzione, la separazione e il riciclaggio dei rifiuti.
Alla luce di queste considerazioni, questo lavoro di tesi propone la lavorazione e la conseguente trasformazione di alcuni sottoprodotti agricoli. L'intento che smuove questa ricerca è quello di rompere il classico sistema di produzione lineare per andare verso un sistema circolare, attuato in questa sede attraverso il riutilizzo della lolla di riso e dell'amido di riso.

Nel corso dell'ultimo ventennio è emerso un nuovo modello di economia circolare basato sulle tre R (Recycle, Reduce, Reuse). Nel settore delle costruzioni, l'uso di materiali riciclati combinato con l'uso di nuove tecnologie si sta rivelando fondamentale per ridurre l'impatto ambientale e per sopperire alle necessità energetiche.

Grazie alla collaborazione della società VICAT e del Politecnico di Torino, questa tesi si concentra sulla realizzazione di un sistema costruttivo biosourced composto da lolla di riso e cemento naturale, il sistema «FUTURIZ», studiando l'effetto dell'amido di riso sulle prestazioni complessive di questo sistema. Per rimanere coerenti con il principio della riduzione dell'impronta di carbonio, è stata privilegiata una filiera «a corto circuito» per l'ottenimento delle materie prime (essenzialmente limitata a Francia e Italia).

Specularmente ai principi visti sopra, la tesi è organizzata seguendo tre linee principali. La prima parte della tesi si concentra sullo studio e sull'analisi di prodotti edilizi realizzati con materiali biobased già presenti in commercio sul territorio europeo. Sarà presentato l'esempio del sistema «Biosys» sviluppato dalla società Vicat, di cui verrà analizzata la composizione, l'origine delle materie prime, le caratteristiche del cemento utilizzato, le prestazioni del sistema e le sue applicazioni. Allo stesso tempo, si è cercato di definire le prestazioni e le caratteristiche generali che un blocco basato su prodotti di origine biologica dovrebbe offrire. In questa prima parte, verranno presentate anche le leggi e le norme in vigore che regolano la produzione e l'uso di un blocco di cemento, nonché quelle

che regolano il riutilizzo dei sottoprodotti agricoli all'interno della comunità europea. Infine, verranno elencate le ricerche che hanno preceduto questa tesi e che hanno permesso di realizzare questo lavoro, attraverso un'analisi e uno studio dello stato dell'arte in materia.

Nella seconda parte, è stato analizzato il processo di produzione del riso attraverso lo studio della pianta «oryza sativa», i sottoprodotti che ne derivano e la filiera con la sua relativa commercializzazione. Verrà fatta luce sui mezzi utilizzati per passare da un modello lineare di produzione del riso a un modello circolare attraverso il riutilizzo della lolla di riso e dell'amido di riso.  È tuttavia chiaro che oggi, anche se gli atteggiamenti stanno cambiando, la gran parte dei sottoprodotti agricoli vengono ancora visti come rifiuti.

L'ultima parte di questa tesi di ricerca riassume l'attività sperimentale e analizza in modo concreto la possibilità di produrre un blocco con materiali biobased attraverso la realizzazione di diversi campioni da analizzare in laboratorio. Questi campioni hanno permesso di controllare le diverse concentrazioni di ciascuno degli elementi che compongono i diversi mix-design. Sarà poi necessario calcolare le prestazioni dei campioni prodotti (resistenza alla compressione, resistenza al fuoco, consistenza e resistenza agli agenti atmosferici) per verificare che sia possibile creare un prodotto finito e pronto all'uso con materiali biobased che possa fornire le stesse prestazioni di quelle di un blocco in agro-cemento già commercializzato.

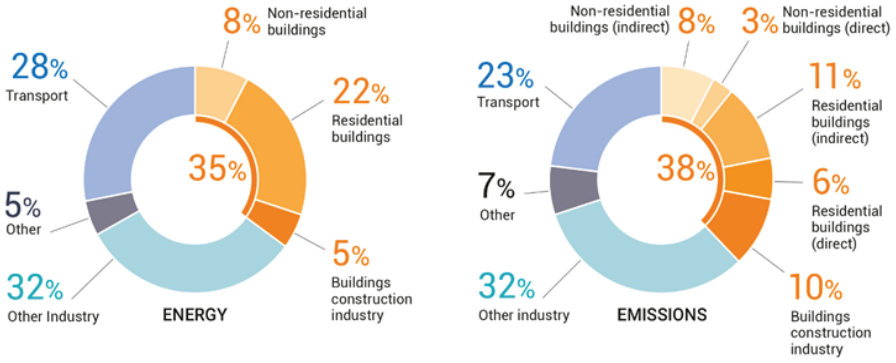



Fig.0 : Part mondiale des bâtiments et de la construction dans la consommation finale d'énergie et les émissions (2019)
Note : Le secteur des bâtiments et la construction représente la part (estimée) de l'ensemble des entreprises qui se consacrent à la fabrication de matériaux de construction tels que l'acier, le ciment et le verre. Les émissions indirectes correspondent aux émissions liées à la production d'électricité et de chaleur commercialisée.
Sources : (AIE 2020d ; AIE 2020b). Tous les droits sont réservés. Adapté de "IEA World Energy Statistics and Balances" and "Energy Technology Perspectives".

# ANALYSE D'ANTÉRIORITÉ ET LÉGISTLATIONS

01

# 1. ÉTAT DE L'ART

## Résumé

Dans la phase préliminaire de notre thèse, il est nécessaire de s'intéresser à l'état de l'art des recherches effectuées sur le thème des bétons incorporant des matériaux biosourcés ainsi que des produits déjà commercialisés similaires au système « FUTURIZ ».

Parmi l'ensemble des blocs commercialisés incorporant des matériaux d'origine végétale nous pouvons mettre en lumière le système « Biosys » de la société Vicat. Ce dernier, qui est un bloc en béton chanvre, est de loin celui se rapprochant le plus de l'objectif fixé pour la réalisation du bloc « FUTURIZ » en termes de dimensions, de résistance à compression et de facilité d'utilisation. Nous avons analysé par la même occasion le prototype de béton avec balle de riz que la société Vicat a étudié. Ces deux exemples nous ont permis de comprendre partiellement le comportement des agrégats végétaux avec le ciment et de définir de façon approximative les caractéristiques techniques que peut atteindre notre bloc. Nous nous sommes intéressés tout particulièrement aux éléments composants le système Biosys. La chènevotte, qui provient de « circuits courts » et le ciment Prompt de chez Vicat, qui est un ciment naturel produit à Grenoble en France, correspondent parfaitement aux attentes que nous nous sommes fixées pour un bloc à faible empreinte environnementale.

Les performances techniques de ce bloc en chanvre permettent de comprendre que les limites de résistances à compression d'un bloc avec agrégat végétal sont bien inférieures à celle d'un bloc en béton traditionnel mais permettent par la même occasion de pallier les problèmes d'isolation thermique que peuvent rencontrer ces derniers. De plus, l'application de ces blocs par emboîtement permet de limiter l'utilisation de colle ou béton supplémentaire. Grâce à cette analyse préliminaire il a été possible de définir des principes simples que doit respecter le bloc « FUTURIZ » : L'utilisation de ciment naturel, l'incorporation de balle de riz de « proximité », un système d'emboîtement à sec et des dimensions adaptées pour limiter son poids et faciliter son utilisation.

Dans un second temps nous avons réalisé l'analyse d'antériorité sur l'utilisation de la balle de riz et de l'amidon de riz. Plusieurs recherches ont déjà abordé l'incorporation de la balle de riz dans le béton, seulement il s'agit la plupart du temps de cendre de balle de riz utilisé sous forme de poudre. Malgré tout, ces études nous ont permis de comprendre les modalités d'incorporation de divers éléments au sein du béton. Les recherches ont mis à jour un autre aspect important de cette thèse qui est l'incorporation de l'amidon dans le béton comme adjuvant. En dépit que ces recherches aient utilisé de l'amidon de maïs, nous avons pu voir que son utilisation permet d'obtenir un gain en résistance à compression pour les bétons traités. Malgré tout, la concentration en amidon doit rester relativement faible (environ 2%) pour avoir un effet positif, au-delà le processus s'inverse et une diminution de résistance à compression est à déplorer.

Enfin dans un dernier temps vient l'analyse des cultures européennes de « proximité » pour les plantations de riz. Partant du principe que le transport peut représenter un coût financier et une source de pollution non négligeable, il est important d'en comprendre le fonctionnement et de choisir des lieux d'approvisionnement les plus proches possibles du lieu de transformation. Heureusement nous pouvons compter sur la proximité de rizières françaises situées en Camargue ainsi que sur le premier producteur européen de riz qui est l'Italie dont la grande majorité des rizières se trouvent aux confins de la France.

# 1. STATO DELL'ARTE

## Sintesi

Nella fase iniziale della tesi si è reso necessario esaminare lo stato dell'arte della ricerca sul tema del calcestruzzo che incorpora materiali *biobased*, nonché sui prodotti già presenti sul mercato simili al sistema «FUTURIZ».
Tra tutti i blocchi commercializzati che incorporano materiali di origine vegetale, possiamo evidenziare il sistema «Biosys» della società Vicat. Quest'ultimo, composto da cemento e canapa, risulta essere il più simile al blocco sperimentale «FUTURIZ» in termini di dimensioni, resistenza alla compressione e di facilità d'utilizzo. Allo stesso tempo, si è analizzato il prototipo di blocco con calcestruzzo e con lolla di riso sperimentale della società Vicat.
Questi due esempi ci hanno permesso di capire parzialmente il comportamento degli aggregati vegetali all'interno di un blocco in cemento, nonché di definire approssimativamente le caratteristiche tecniche raggiungibili con il nuovo blocco. Ciò che ha destato più interesse all'interno della ricerca sono stati i componenti del sistema Biosys. Sia la canapa, proveniente da «circuiti brevi» che il cemento Prompt di Vicat, naturale e prodotto a Grenoble in Francia, corrispondono perfettamente alle aspettative che abbiamo fissato per un blocco a basso impatto ambientale.
Il rendimento tecnico di questo blocco di canapa ci permette di capire che i limiti di resistenza alla compressione di un blocco con aggregato vegetale sono molto più bassi di quelli di un blocco di cemento tradizionale, ma allo stesso tempo ci permette di superare i problemi di isolamento termico che quest'ultimo può incontrare. Inoltre, l'applicazione a incastro di questi elementi evita l'utilizzo di ulteriori leganti. Grazie a quest'analisi preliminare, abbiamo potuto definire i semplici principi a cui il blocco «FUTURIZ» si deve attenere: l'utilizzo di cemento naturale, l'incorporazione di lolla di riso di «prossimità», un sistema ad incastro a secco e dimensioni adatte a limitare il suo peso e facilitare il suo utilizzo.
Nella seconda parte, è stata condotta un'analisi sullo stato dell'arte relativo all'uso della lolla e dell'amido di riso. Diverse ricerche si sono già occupate dell'incorporazione della lolla di riso nel calcestruzzo, ma il più delle volte si tratta di cenere di lolla di riso, quindi utilizzata sotto forma di polvere. Nonostante non sia stata questa la tecnica da noi utilizzata, lo studio di essa si è rivelata fondamentale per comprendere in che maniera i vari elementi sono incorporati nel calcestruzzo. Tuttavia, questi studi ci hanno permesso di capire come vari elementi sono incorporati nel calcestruzzo. Un altro aspetto importante della ricerca riguarda l'incorporazione dell'amido nel calcestruzzo, usato come additivo: le analisi hanno evidenziato come il suo utilizzo possa portare ad un guadagno in termini di resistenza alla compressione. Tuttavia, la concentrazione di amido deve rimanere relativamente bassa (intorno al 2%) per avere l'effetto desiderato; oltre a questa percentuale, il processo si inverte e si verifica una diminuzione della resistenza a compressione.
Infine, è stato effettuato uno studio sulle colture europee di «prossimità» per quanto riguarda le piantagioni di riso. Considerato che il trasporto può essere un onere finanziario e una fonte significativa di inquinamento, è importante capire come aggirare il problema, ad esempio scegliendo i luoghi di approvvigionamento il più vicino possibile al sito di lavorazione. Fortunatamente possiamo contare sulla vicinanza delle risaie francesi situate in Camargue, oltre che sul primo produttore europeo di riso che è l'Italia, la cui grande maggioranza delle risaie si trova ai confini con la Francia.

## 1.1 Analyse du béton avec balle de riz de chez VICAT et du bloc en chanvre «BIOSYS»

Comme vu précédemment, le projet « **Futuriz** », est un système constructif biosourcé qui a pour objectif la réalisation de blocs en béton composés[2] de balles de riz, de ciment naturel avec ajout d'amidon de riz pur, à assemblage à sec permettant le remplissage des parois périmétrales d'un édifice sur une structure de type poteaux-poutres. La réalisation de ce bloc tend à avoir un bon niveau de résistance mécanique, thermique et respect environnemental. La participation de la société multinationale française VICAT a été fondamentale pour la création de ce projet, de façon directe à travers la fourniture du ciment naturel «**Prompt**» et de la balle de riz ainsi que de façon indirect à travers la création du bloc en ciment naturel avec agrégats biosourcé en chanvre «**Biosys**», Blocs à emboîtement (BCE). Ce dernier, système breveté, a été le produit de référence sur lequel s'est basé ce projet de thèse pour définir des niveaux de résistance mécanique et à compression, qualité d'encastrement à sec, quantité minimale d'agrégat végétale à insérer au sein du bloc en béton, modalité de création et fabrication des blocs, temps moyen d'application sur chantier… En outre du bloc « Biosys » la société VICAT est en train de travailler en parallèle du projet de thèse proposer sur la création d'un béton biosourcé alliant ciment Prompt avec de la balle de riz non lavé. Des expérimentations ont déjà été menées en laboratoire et ont permis d'obtenir des courbes de résistance à compression de divers mix-design avec plusieurs concentrations d'agrégats naturels. Ainsi Les thèmes principaux de ce projet de thèse est de confirmer que le lavage de la balle de riz et/ou l'insertion d'amidon pur dans le mix -design permet de renforcer les propriétés mécaniques du béton biosourcé et de trouver une forme et un système commercialisable pour ce dernier. La protection de l'environnement et le bien-être des habitants sont autant de nouveaux défis à relever au quotidien.

### 1.1.1 Compositions et matériaux

Le système breveté « Biosys » est un système constitué de blocs de béton de chanvre installables par simple emboîtement à sec (rainure-languette) qui servent de coffrage et de remplissage à une structure porteuse en béton armé ou en acier de type poteaux-poutres conforme aux règles des Eurocodes.
L'association du ciment naturel « Prompt » et d'un matériel biosourcé permet de répondre aux nouvelles exigences environnementales d'éco-construction et de limiter les impacts négatifs du béton sur l'environnement (baisse de l'Embodied Energy). Ce système est une solution innovante à base de chènevotte, matière agricole issue du chanvre. La construction en chanvre participe activement à la réduction des émissions de $CO_2$, à la diminution des impacts sur l'environnement et, grâce à ses nombreuses propriétés physiques

et chimiques, au bien-être des habitants. Les qualités naturelles des matériaux biosourcés en font des systèmes constructifs parfait pour bâtir et rénover des bâtiments durables privilégiant un haut niveau de qualité de vie.
La réduction de l'empreinte carbone, le confort de vie optimal en hiver comme en été, la simplicité de mise en œuvre et enfin la durabilité des matériaux sont tout autant de nouvelles contraintes auxquelles ses nouveaux projets, tels que «Byosis» et le béton avec balle de riz essayent de faire face. Le couple ciment Naturel Prompt et chènevotte s'unit parfaitement avec une prise rapide permettant un matériau sain et durable pour réguler l'humidité et isoler. 1er producteur de chanvre en Europe, la France dispose d'une grande quantité de produit et de matière première. La culture de cette plante contribue au développement des filières locales et favorise l'emploi sur le territoire national. Son utilisation dans les matériaux biosourcés valorise la richesse des agriculteurs français, dépollue les sols des métaux lourds et met en place des relations durables et de proximité. En plus d'avoir été inventé par des ingénieurs de la société VICAT, la conception et la réalisation du bloc «Byosis» est effectuée par une société experte, VIEILLE Matériaux, situé à côté de Besançon.

### 1.1.2 Origines des matières premières

À travers la création de ses nouveaux produits biosourcés, la société VICAT affirme sa volonté de respecter davantage l'environnement en valorisant des ressources locales issues de filières agricoles du territoire. Composés d'un liant minéral et d'un granulat végétal, les bétons biosourcés sont de plus en plus convoités dans la construction. Même si de nombreuses solutions de béton biosourcés sont en phase de tests, tel que le béton avec agrégat de balle de riz, la solution de construction la plus répandue actuellement reste le béton de chanvre.
La France est le 2ème producteur mondial de chanvre avec 17 000 ha cultivés en 2017, soit près de 50% de la production mondiale. Il s'agit d'une culture appréciée par les agriculteurs car elle ne nécessite pas de traitement phytosanitaire, sans irrigation, elle améliore la structure du sol et possède un cycle de production court (120 à 150 jours).

Pour la réalisation du béton de chanvre, seulement une partie du végétal est utilisée. Il s'agit de la chènevotte, partie centrale de la tige du chanvre. Étant donné sa grande disponibilité en France et ses caractéristiques (techniques, acoustiques, thermiques...)

le chanvre est un granulat végétal très intéressant pour la fabrication de systèmes constructifs biosourcés.
Dans la même idée, le béton biosourcé à partir de balle de riz est exclusivement produit à

partir de matériaux provenant du territoire français.
Ce chanvre est produit et commercialisé par la société KANABAT, présent dans le département de l'Aube à 350 km du siège de la société VICAT et à 200 km de l'usine de fabrication du produit « Byosis ».
Le ciment Prompt quant à lui est fabriqué sur deux sites, l'usine de la Pérelle et Saint-Égrève, toutes les deux en Isère à environ 280 km au sud de l'usine de fabrication Vieille Matériaux.

### 1.1.3 Ciment Prompt (CNP)

Vicat développe depuis plusieurs années son expertise dans le domaine du biosourcé. Le ciment naturel Prompt s'est imposé comme le liant à utiliser avec le chanvre (chènevotte) afin d'obtenir un système constructif à faible impact environnemental. Le ciment naturel Prompt Vicat réunit toutes les qualités requises à l'élaboration, l'identité et la pérennité du bloc de chanvre à emboîtement Biosys. La cuisson basse température de ce ciment naturel, sa composition minéralogique unique (mélange marno-calcaire, mélange très intime de calcaire et de 20 à 35% d'argile) et ses qualités de durabilité, de rapidité, de perméabilité à la vapeur d'eau en font le liant idéal pour réaliser des bétons biosourcés.
Ce drôle de ciment qu'on appelait, de façon erronée, « ciment romain » au début du 19ème siècle résulte de la cuisson à basse température (entre 600°C et 1200°C) comme les chaux, d'un mix calcaire/argile de composition régulière, suivi d'un broyage très fin. C'est un liant à prise et durcissement rapide (2 à 3 minutes à 20°C). Il est fabriqué selon le même procédé depuis plus de 160 ans (créé en 1796) et la société VICAT est le seul à le produire et à le commercialiser. L'utilisation de ce liant naturel permet de baisser l'impact environnemental des matériaux de construction car il est produit à température plus basse par rapport aux ciments normaux (1300°C-1450°C).
Lors de l'hydratation du ciment Prompt, les aluminates formés à basse température permettent la prise rapide et provoquent la

première phase de montée en résistance durant les premières heures. L'hydratation progressive de la bélite provoquera la seconde phase durcissement qui s'exprimera sur de nombreux mois voir années après application.

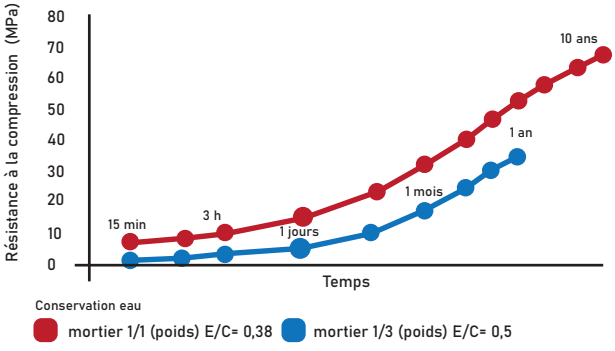



Fig. 1 : cinétique de durcissement sur 10 ans (source: VICAT)

Le ciment Prompt possède la particularité de pouvoir être utilisé sur une très large plage de dosage (entre 10% à 50% en poids du
mortier sec et parfois pur lors de la création de coulis et slurry).
L'originalité de ce ciment provient d'une cuisson à température basse et d'un mélange calcaire-argile. Ce mélange et se large spectre thermique est nécessaire pour la formation de minéraux lors de la cuisson. Il en résulte la formation d'une vaste gamme de minéraux très différents de ceux des ciments Portlands modernes mais identiques, même si en quantité différente, à ceux présents dans les chaux hydrauliques naturelles. La présence des silicates contribue à hydrater le ciment, régénérer le mortier de ses fissures dans la phase initiale et enfin à augmenter lentement la résistance mécanique dans le temps.

| | |
|---|---|
| $C_3S$ (Alite) | 5-15% |
| $C_2S$ (Bélite) | 40-60% |
| $C_3A$ (Célite) | 6 ± 2% |
| $C_4AF$ (Ferrite) | 9 ± 2% |
| $C_{12}A_7$ (Mayenite) | 3 ± 1% |
| $C_4A_3S$ (Ye'elemite) | 3 ± 1% |
| Periclase | 4 ± 1% |
| Chaux libre | 2 ± 2% |
| Calcite | 10-15% |
| Sulfates | 3 ± 1% |
| Autres (dont phases amorphes) | 10-15% |

Tab. 1 : Composition chimique et minéralogique type du CNP (source: VICAT)

- Une partie de la pierre n'a pas subi une température suffisante pour se transformer, elle est simplement déshydratée, c'est la grume appelée incuite.
- Une autre partie de la pierre s'est transformée pour donner des phases amorphes ou mal cristallisées dont toute une famille d'aluminates ($C_4AF$, $C_3A$, $C_{12}A_7$, $C_4A_3S$ et $C_2AS$) responsables de la prise et du durcissement rapide au cours des premières heures d'hydratation ainsi que des silicates sous forme de bélite ($C_2S$) donnant une montée en résistance sur plusieurs mois. Un peu d'alite ($C_3S$) est présent en faible quantité car ce minéral commence à se former vers
1 200°C. Il s'agit de la grume appelée cuite.

- Il y a une fusion (clinkérisation) très partielle dans des zones très locales formant une faible quantité d'alite. Le fait que la composition chimique de la pierre servant de matière première soit proche de celle d'un cru de clinker Portland permet la formation de ce silicate de calcium bien connu. Très hydraulique, il apporte un complément de résistance à partir de quelques semaines. C'est la grume appelée surcuite.

Ce dernier point est très important car les fusions locales de matières sont inévitables avec le process de cuisson en four droit. Les minéraux formés dans cette phase liquide ne doivent pas altérer le ciment naturel lors de leur hydratation. Par exemple, une matière première plus riche en argile formera dans cette phase liquide plus de minéraux alumineux dont l'hydratation est plus mal connue, pouvant entraîner des problèmes sérieux de durabilité. C'est le mélange de ces pierres cuites à différentes températures qui donne les caractéristiques du traditionnel ciment naturel. On peut voir enfin que la teneur en eau dans le rapport eau/ciment (E/C) est très importante. Dans le cas de valeur E/C inférieurs à 0,5 une forte résistance initiale et une porosité basse est obtenue, similaire au ciment Portland. En revanche, lors d'une valeur E/C supérieur à 0,5 on obtient une diminution de la résistance mécanique et une augmentation de la porosité ce qui le rapproche des chaux hydrauliques naturelles.

### 1.1.4 Performances du produit « Biosys » et Béton balle de riz

La solution BCE (Blocs à emboitement) est le premier système constructif biosourcé Byosis. Innovant et breveté il est composé de blocs de béton de chanvre qui se montent par emboitement à sec.
Cette solution d'éco-construction exclusive, facile à mettre en œuvre, a fait l'objet d'un brevet. Elle permet la réalisation de bâtiment R+1, de plus les murs ne rejettent pas de COV (composants organiques volatiles) et possèdent une très bonne régulation hygrométrique et un excellent déphasage thermique. De part ses qualités le mur est respirant. Les performances acoustiques du bloc (affaiblissement et absorption) contribuent également au confort de vie.
La résistance thermique des murs (épaisseur de 30 cm) répond aux exigences de la RT 2012 sans isolation complémentaire. Il peut être considéré comme un monomur.
Son montage à sec et ses dimensions (L :60 cm, l :30 cm, h :30,8 cm) permettent des gains de productivité et une vitesse d'installation élevée (environ 30 m² par jour pour 2 compagnons structure comprise). Avec un poids équivalent à celui dans bloc béton traditionnel il permet de réduire la pénibilité sur chantier. (5,4 blocs / m²).
Malgré une résistance mécanique légèrement inférieure aux blocs traditionnels, sa conductivité thermique et son inertie sont accrues, permettant d'isoler de manière performante et pérenne.
La véritable force du système Byosis trouve son origine dans sa porosité intrinsèque. Le mélange de matériaux minéraux et biosourcés confère une capacité de régulation

hygrothermique dû à un mécanisme combinant transferts de vapeur d'eau et changements de phase à une échelle microscopique. Agissant comme un régulateur de température et d'humidité, le béton biosourcé offre un confort en toutes saisons. Les retours d'expériences démontrent un excellent sentiment de bien être à l'intérieur des ouvrages.
En fin de compte le système Byosis possède de nombreux avantages énergétiques et environnementaux.

| | |
|---|---|
| **Résistance thermique**<br>**Valeur utile :** | **R= 4,6m².k/W***<br>**R=4,21 m².k/W** |
| **Conductivié thermique** | **λ=0,071 W/mk** |
| **Déphasage de température :** | **8 à 10 heures** |
| **Résistance au feu:** | **REI 30** |
| **Affaiblissement acoustique:**<br>**coeff. absorption acoustique :** | **43 (-1 ; -2) dB**<br>**α = 0,4** |

Tab. 2 : Caractéristiques techniques du système Biosys (source: VICAT)

Utilisable en zones sismiques 1 à 3
Résistance à compression fm >0,3 N/mm²
Régulation hygrométrique Réaction au feu: B-s1, d0 (M1)
Validé par une FDES[1] valeur 0.889 kg $CO_2$ /m²
Fabrication des matières premières 100% françaises : circuit court
Matériau renouvelable et recyclable
Pas d'étuvage : séchage naturel
Une solution certifiée par le CSTB[2]
Qualité de l'air intérieur : classification A+

Concernant l'utilisation de la balle de riz pour les bétons biosourcés[3], les données analysées se limitent pour l'instant à la résistance mécanique et la conductivité thermique du béton réalisé.
Plusieurs niveaux de concentration de CNP (ciment naturel Prompt) ont été testés pour 1m³ de balle de riz, allant de 200 à 550 kg.
En se référant aux tests effectués on peut voir que la résistance à compression peut aller de 0,13MPa pour 200kg de CNP contre une valeur de plus de 12 fois supérieures, 1,6 MPa, lors d l'utilisation de 550kg de CNP. Dans un même temps la conductivité thermique du matériel est inversement proportionnel à la concentration de CNP, passant d'une valeur inférieure à 0,08W/m.K à 200kg, jusqu'à 0,15 W/m.k pour 550kg. La réglementation thermique en vigueur sur les matériaux isolant (RT 2012) considère un matériel ou un système comme isolant si sa conductivité thermique est inférieure ou égale à 0,065 W/m.k. Ainsi, nous pouvons aisément nous rendre compte que même si dans ce cas précis le béton avec balle de riz ne peut pas être considéré comme un matériel isolant à proprement parlé, il possède une résistance à la conductivité thermique relativement élevé.

1 Une FDES est une **fiche de déclaration environnementale et sanitaire** qui présente les résultats de l'Analyse de Cycle de Vie d'un produit ainsi que des informations sanitaires dans la perspective du calcul de la performance environnementale et sanitaire du bâtiment pour son éco-conception. Les FDES ont dans un premier temps été encadrées de 2004 à 2014 par la norme AFNOR NF P 01-010 et depuis 2014 elle est encadrée par la norme NF EN 15804+A1 et son complément national NF EN 15804/CN. Elles prennent en compte l'ensemble du cycle de vie du produit, de l'extraction des matières premières à sa fin de vie, sans oublier les transports, la mise en œuvre et l'usage même du produit (cradle to grave). Les FDES constituent ainsi un outil multicritère majeur permettant d'aider les professionnels dans leurs choix pour rendre un bâtiment plus durable, avec des impacts limités sur l'environnement tout en créant une ambiance saine pour les futurs utilisateurs (https://www.inies.fr/produits-de-construction/)

2 **C**entre **S**cientifique et **T**echnique du **B**âtiment (http://www.cstb.fr/fr/)

3 **Présentation VICAT, CAPPELLARI Marco,** ***«La balle de Riz pour les bétons Biosourcés», Ciment & Architecture, Novembre 2018***

### 1.1.5 Utilisation «In Situ»

Dans cette phase d'analyse nous nous concentrerons essentiellement sur le système « Byosis », le béton avec balle de riz n'ayant pas encore été commercialisé ou utilisé en chantier.
Le système Byosis est une solution d'éco-construction facile et rapide à mettre en œuvre par des maçons. À travers un système constitué de blocs de béton de chanvre installables par simple emboîtement à sec (rainure-languette) qui servent de coffrage et de remplissage à une structure porteuse en béton armé ou en acier de type poteaux-poutres conforme aux règles des Eurocodes  ainsi qu'une isolation répartie sur toute la surface de montage, il réduit la pénibilité d'installation et octroi un rendement élevé. »

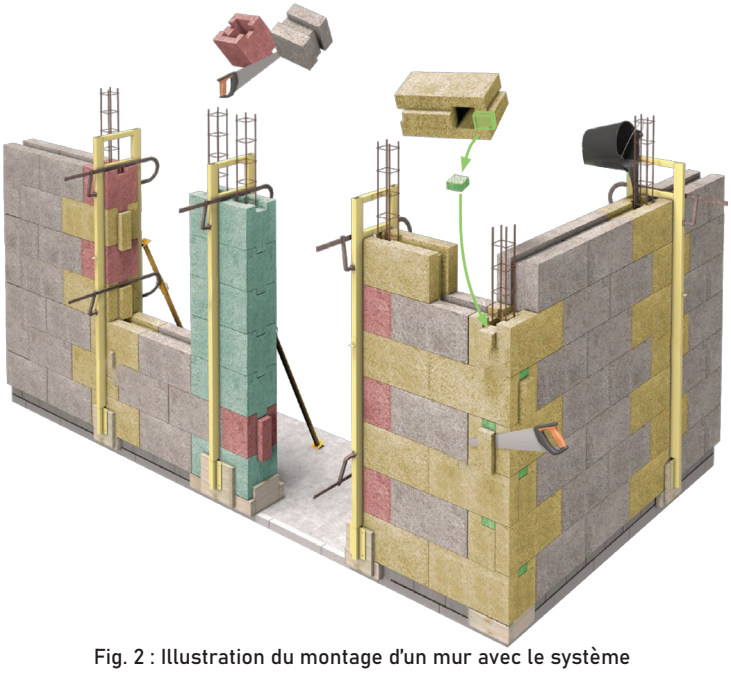


Fig. 2 : Illustration du montage d'un mur avec le système «Biosys»
Source: https://www.solution-biosys.fr/

Le système Biosys est le premier Bloc de béton de chanvre à obtenir un ATEx de type A (Appréciation Technique d'Expérimentation). L'ATEx est mise à disposition des innovateurs pour les aider à promouvoir des procédés nouveaux ou des concepts architecturaux originaux. Elle est la garantie de la pertinence technique, de la durabilité et de l'assurabilité de ce système constructif innovant.

Aménageurs, maîtres d'ouvrage ou maîtres d'œuvre peuvent engager des ATEx en phase de conception pour déployer en toute sécurité l'innovation dans un projet.
Ainsi, l'ATEx :

- Apporte une réponse sur la faisabilité du projet innovant et sur les choix techniques en conception
- Spécifie les justifications à apporter en amont du chantier en optimisant leur réalisation
- Sécurise le choix et l'intervention des entreprises de construction

Les matériaux biosourcés répondent aux enjeux du développement durable, bénéficiant d'un bilan carbone réduit idéal pour diminuer l'impact environnement du parc immobilier.

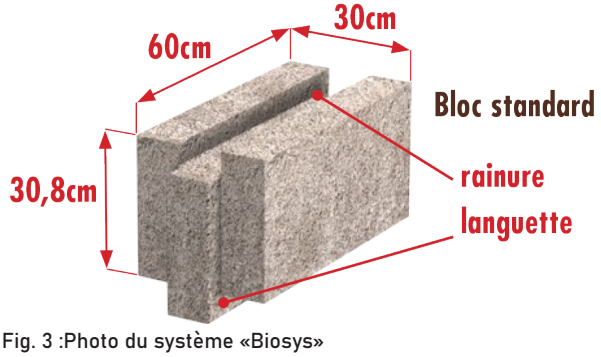



Fig. 3 :Photo du système «Biosys»
https://www.solution-biosys.fr/

## 1.2 Définitions et exigences générales pour un futur bloc à base d'agrégat végétal

Dans la première phase du travail et de l'analyse précédente nous avons vérifié et définie les performances nécessaires et minimales que le bloc Futuriz doit admettre en nous basant sur des recherches et produits commercialisés les plus similaires possibles. Même si l'idée initiale était la création d'un bloc entièrement biosourcé et structurel, il a fallu admettre la complexité de production ainsi que les limites techniques et physiques à la réalisation d'un tel produit. Les différentes phases d'approche avec les différentes sociétés et experts ont conforté la décision de remplacer en partie les matériaux existant par du biosourcé et de limiter l'utilisation de ces blocs à un système de coffrage et remplissage d'une structure portante. Ces derniers ont aussi permis de s'interroger sur le possible intérêt d'utiliser l'ensemble des sous-produits de la plante de riz. Le béton reste le principal matériau de construction dans le monde entier et pour faire face aux défis de la dégradation structurelle prématurée, la durabilité du béton doit être assurée. Par conséquent, à côté de l'ouvrabilité et de la résistance, qui sont toujours l'objectif principal du contrôle de la qualité du béton et de la conception des mélanges de béton, la propriété de durabilité du béton devrait être sérieusement prise en considération. Comme mesure corrective pour ce défi émerge l'utilisation de certains additifs. Malheureusement ces derniers ont un impact néfaste sur l'environnement, car souvent d'origine plastique (hydrocarbures) et empêche la recyclabilité du béton. Ainsi intégrer l'amidon de riz dans le mix design pour en augmenter la résistance mécanique de façon écologique est une idée qui s'est développé de façon naturelle et en grande partie grâce à l'intérêt tout particulier porté à l'observation de la structure des Grandes Murailles de Chine. De ce fait l'objectif final de cette thèse est de créer un système de blocs de ciments préfabriqués non structurels à assemblage à sec, pouvant être utilisé comme monomur et servant d'isolant. La cendre issue de la calcination de la balle de riz est souvent utilisée comme filler pouzzolanique et a fait l'objet de nombreux travaux de recherche. L'utilisation de la balle de riz directement après le processus de décorticage pour la valoriser comme granulat végétal dans un agro-béton isolant n'a fait que peu l'objet d'étude approfondie. La démarche de cette étude consistera alors à élaborer un agro-matériau innovant et local dont l'application est semblable à celle du bloc « Biosys ».

Afin d'obtenir la certification CE les blocs doivent être conformes aux spécifications de la norme européenne **NF EN 771-3** et de son complément national **NF EN 771-3/CN** pour pouvoir garantir que les blocs sont aptes à réaliser des ouvrages de maçonnerie respectant les règles de l'art, notamment les prescriptions de la norme **NF DTU 20.1**. De plus pour obtenir la certification NF le bloc doit être conforme au référentiel de certification «

**NF 025A** Bloc en béton de granulats courants et légers ». Ainsi pour obtenir la conformité du bloc, différents éléments doivent être respectés :
- Les dimensions de coordination modulaire et de fabrication (planéité des faces base, parallélisme dans le plan des faces base)
- La classe de résistance mécanique en compression Rc, résistance à la compression longitudinale des blocs pour une utilisation en zone sismique
- La stabilité dimensionnelle
- Les masses volumiques du béton et du produit
- l'absorption d'eau par capillarité et résistance au gel-dégel
- conductivité thermique λ utile du béton et résistance thermique R du mur
- perméabilité à la vapeur

Les produits portant le marquage CE peuvent bénéficier de la marque NF si cette dernière concerne des exigences différentes de celles du marquage CE et apporte une valeur ajoutée.

Le présent référentiel de certification vise les blocs de granulats courants ou légers minéraux – à enduire ou de parement et montés à joints horizontaux et verticaux maçonnés, collés, ou sans joint vertical (bloc à emboîtement) – couverts par la norme NF EN 771-3 et le complément national NF EN 771-3/CN.
Ces blocs sont destinés à la réalisation d'ouvrages de maçonnerie porteurs ou non porteurs dans toutes les formes de murs y compris les murs simples, doubles, les cloisons, les refends, les soubassements et l'utilisation générale au-dessous du niveau du sol y compris les murs de protection contre l'incendie, l'isolation thermique et acoustique.

Il ne s'applique pas aux blocs à bancher (blocs de coffrage entrant dans le champ d'application de la norme NF EN 15435 et du complément national NF EN 15435/CN).

Fig. 3.1 : Illustration des marquages CE et NF

| | | NF EN 771-3 ÉDITION EN VIGUEUR | | NF EN 771-3/CN ÉDITION EN VIGUEUR | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Spécifications | Modalités d'essais | Spécifications | Modalités d'essais |
| MATIERES PREMIERES | Teneur en chlorures | | | §4.1 | |
| DIMENSIONS ET TOLÉRANCES | Dimensions | | | §5.2.1 | |
| | Tolérances dimensionnelles | §5.2.2 | NF EN 772-16 | | |
| | Planéité et parallélisme des faces d'appui des blocs D3 et D4 | §5.2.2.2 et 5.2.2.3 | NF EN 772-16 et 772-20 | | |
| | Épaisseur de paroi | | | §5.3.2 | NF EN 772-16 |
| | Alvéoles | | | §5.3.3 | NF EN 772-2 et 772-16 |
| CONFIGURATION (géométrie) | Planéité de surface des blocs en parment | §5.3.2.1 | NF EN 772-20 | Voire NF EN 771-3 | |
| | Aspect de surface | | | §5.3.1 | |
| | Faces latérales d'extrémités | | | §5.3.4 | NF EN 772-16 |
| | Intersection des joints horizontaux et verticaux des blocs de parements | | | §5.3.5 | |
| | Blocs accesoires | | | §5.3.6 | |
| MASSE VOLUMIQUE | Masse volumique apparente du bloc | §5.4.1 | NF EN 772-13 | NF EN 771-3 | |
| | Masse volumique absolue du béton constructif | §5.4.2 | NF EN 772-13 | NF EN 771-3 | |
| RESISTANCE MECANIQUE | Résistance à la compression | | | §5.5.1 | NF EN 772-2 |
| PROPRIÉTÉS THERMIQUES | | | | §5.6 | NF EN 1745 |
| DURABILITÉ | | | | §5.7 | NF EN 491 |
| ABSORPTION D'EAU PAR CAPILLARITÉ | | | | §5.8 | NF EN 772-11 |
| VARIATIONS DIMENSIONNELLES | | | | §5.9 | NF EN 772-14 |
| PERMÉABILITÉ À LA VAPEUR D'EAU | | §5.10 | NF EN 1745 ou EN ISO 12572 | NF EN 771-3 | |
| RÉACTION AU FEU | | §5.11 | NF EN 13501-1 | NF EN 771-3 | |
| RÉSITSTANCE DE L'ADHÉRENCE AU CISAILLEMENT | | §5.12 | NF EN 1052-3 | NF EN 771-3 | |
| DESCRIPTION ET DESIGNATION | | | | §6.1 | |
| CLASSIFICATION | | | | §6.2 | |
| MARQUAGE | | | | §7 | |
| ÉVALUATION ET VÉRIFICATION DE LA CONSTANCE DES PERFORMANCES | | | | §8 | |

Tab. 3 : Référentiel NF - Partie 2 : Règles de certification NF blocs en béton de granulats courants et légers (Janvier 2020)

## 1.3 Analyse d'antériorité

Avant même d'effectuer les recherches approfondies sur la création du bloc Futuriz il a été nécessaire de s'interroger et de rechercher les éléments similaires ayant déjà été analysés et les brevets ayant déjà été déposés.
De nombreuses recherches ont été effectués en bibliothèques, auprès des professionnels du secteur et sur divers sites internet. De nombreux résultats ont été obtenu lors de recherches sur l'utilisation de la balle de riz et de l'amidon de riz dans le secteur de la construction ainsi que la création de blocs en béton biosourcés avec leurs divers stratégies de production et impacts environnementaux .
Les sites où les recherches ont été effectués sont « Orbit » (www.orbit.com) pour des recherches de dépôt de brevet qui n'a produit aucun résultat concret, « Science Direct » (www.sciencedirect.com) pour l'analyse des expérimentations ou publications au niveau mondial grâce à certains mots clefs comme : « concrete rice starch », « rice concrete », concrete rice husk », « rice starch », « rice husk », « cement », « concrete », Google patent (www.google.com) qui se réfère plus aux expériences, brevets et recherches outre-Atlantique, L'HAL (www.archives-ouvertes.fr) et enfin la World Intellectual Property Organization (WPO) (https://www.wipo.int/portal/en/index.html).

### 1.3.1 Intégration de la balle de riz et ses dérivés avec le ciment pour la création d'agro-bétons

Plusieurs recherches ont été mises en avant grâce aux sites internet cités précédemment, en particulier 5 recherches sur l'utilisation de la cendre de balle de riz à l'intérieur de différents bétons, l'utilisation de balle de riz non traitée ainsi que la création d'agrobétons légers isolants à base de balle de riz pour l'éco-construction :

- *A Durable Concrete Mix Design Approach using Combined Aggregate Gradation Bands and Rice Husk Ash Based Blended Cement,* R. Rumman, M.S. Bari, T. Manzur, M.R. Kamal, M.A. Noor, et al., Department of Civil Engineering, BUET, Dhaka, Bangladesh, 2020.

- *An experimental investigation on strength characteristics by partial replacement of rice husk ash and Robo sand in concrete,* D. Chetan, A. Aravindan, et al., Department of Civil Engineering, Koneru Lakshmaiah Education Foundation, Andhra Pradesh, India, April 2020.

- *Replacement of silica fume with thermally treated rice husk ash in Reactive Powder Concrete,* M. Vigneshwari, K. Arunachalam, A. Angayarkanni, et al., Department of Civil Engineering, Thiagarajar College of Engineering, Madurai, Tamilnadu, 625015, India, 2018.

- *Mortar composition and method,* L.Devlin, E. Grujic, S. Moses, et al. Davco Construction Materials pty limited, Wetherill park, NSW 2164, Australia, January 2002.

- *« Formulation et étude des propriétés mécaniques d'agrobétons légers isolants à base de balles de riz et de chènevotte pour l'éco-construction » M. Chabannes, Université de Montpellier, Faculté des Sciences, Ecole des Mines d'Alès (EMA) Novembre 2015.*

La première étude propose une nouvelle procédure de conception des mélanges de béton qui incorpore la durabilité comme un paramètre de conception intégré. La cendre de balle de riz (Rice Husk Ash = RHA) a été utilisée comme matériau cimentaire supplémentaire avec des caractéristiques pouzzolaniques pour améliorer la durabilité. Il a été constaté que l'incorporation de RHA dans le ciment réduit significativement la perméabilité du béton obtenu.
Par conséquent, l'augmentation de durabilité du béton peut être obtenu par l'ajout de RHA. Les auteurs sont convaincus que la facilité de la procédure de conception des mélanges proposés et l'amélioration des performances de durabilité inciteront les ingénieurs praticiens à utiliser et à promouvoir le ciment composite à base de RHA. Du ciment Portland ordinaire (OPC) d'un poids unitaire de 3,15 kg/m³ a été utilisé dans ce travail. L'analyse du ciment par fluorescence X (XRF) a été réalisée à l'aide du LAB-CENTER XRF-1800 (Shimadzu) en utilisant la méthode des paramètres fondamentaux (FP) avec le standard CRM du ciment. La perte au feu de ce ciment est de 2.13% selon la norme ASTM C114 ; il avait une finesse de 442 m²/kg selon la norme ASTM C204 et la solidité par la méthode Le Chatelier[1] a été obtenue à 2,50 mm. La température de combustion de l'RHA est extrêmement importante pour garantir le comportement pouzzolanique.
Il est recommandé de brûler la cendre de balle de riz en dessous de 1440°C, qui est son point de fusion. Certains chercheurs ont observé qu'en brûlant la balle de riz à des températures inférieures à 700°C, la nature de la silice de l'ARS est principalement amorphe, donc réactive dans des conditions alcalines comme celles créées dans l'industrie de la construction[2].
Dans cette recherche, la balle de riz a été brûlée à 600°C pendant 48 heures, puis laissée à refroidir pendant 24 heures. Cette cendre finement broyée a ensuite été incorporées directement en remplacement partiel du ciment à des pourcentages divers dans différents mélanges de béton. Tous les mélanges ont été préparés en utilisant deux bandes combinées de granulats (5-10-14-18 et 5-10-18-22) parce qu'il a été observé que les bétons fabriqués avec ces bandes avaient une meilleure performance que les autres granulats.
L'ajout de RHA aux mélanges de béton a entraîné des valeurs d'affaissement plus faibles en raison de la nature hydrophile de la RHA qui provoque une absorption élevée de l'eau du mélange. L'ajout de RHA jusqu'à un niveau de remplacement de 20 % n'a pas eu d'impact négatif sur la résistance du béton. En effet, une augmentation de la résistance à la compression du béton (4%-14%) a été observée.

1 IS:4031 (Part 3), Methods of Physical Tests for Hydraulic Cement, Determination of soundness, 1998.

2 C. Fapohunda, B. Akinbile, A. Shittu, Structure and properties of mortar and concrete with rice husk ash as partial replacement of ordinary Portland cement – a review, Int. J. Sustain. Built Environ. (2017).

Les performances de durabilité des mélanges ont été améliorées de manière significative lorsque la RHA a été ajoutée la matrice du béton. L'ajout de 20 % de RHA a entraîné une diminution d'environ 63 % de la perméabilité aux chlorures par rapport à la matrice de béton.

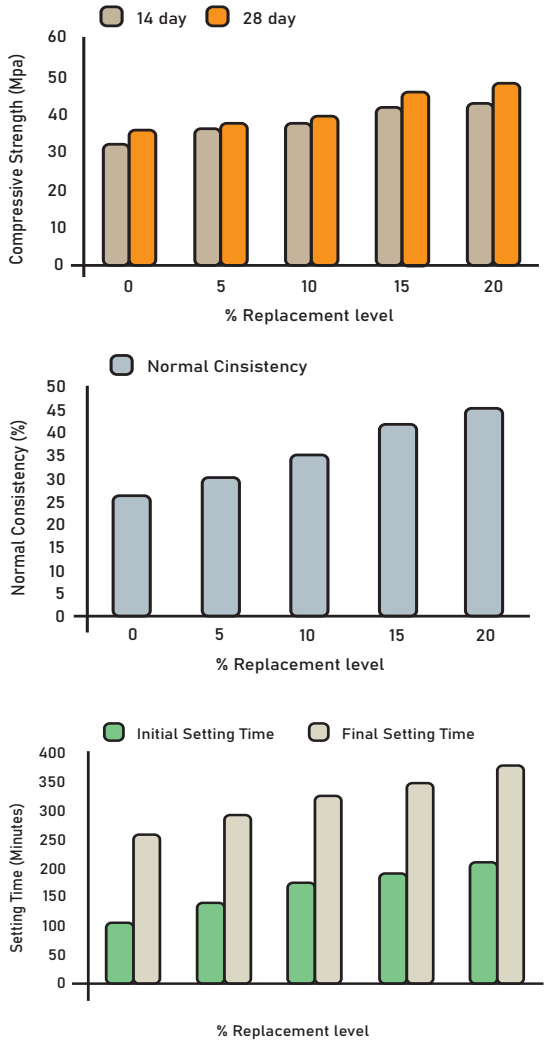



Fig. 4 : Caractéristiques techniques du béton avec cendres de balles de riz (source: *« A Durable Concrete Mix Design Approach using Combined Aggregate Gradation Bands and Rice Husk Ash Based Blended Cement » R. Rumman, M.S. Bari, T. Manzur, M.R. Kamal, M.A. Noor)*

La seconde étude s'attarde sur l'utilisation de sable de rivière qui est un matériau de construction couramment utilisé dans la construction. L'altération naturelle des roches aboutit à la formation de ce sable sur des millions d'années. Robo Sand (R.S), qui est respectueux de l'environnement, sert de matériau de substitution partiel pour le sable de rivière qui s'épuise. L'ajout de sable Robo peut réduire les coûts de construction et augmenter la résistance du béton. Dans cette étude, le R.H.A est aussi utilisé comme matériau de substitution partielle du ciment dans différentes proportions comme 0%, 5%, 10%, 15%, et 20%. Les propriétés mécaniques de ce dernier son ainsi analysées. Les proportions de remplacement du R.S. vont de 10% à 100% et l'analyse effectué se fait sur un béton de qualité M30.

Hardened properties of concrete as partial substitute with R.H.A in cement for M30 grade of concrete

| % of R.H.A | Compression strength (N/mm²) | | | Split tensile strength (N/mm²) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 3 Days | 7 DAys | 28 Days | 3 Days | 7 DAys | 28 Days |
| 5% | 32,4 | 32,9 | 42,4 | 2,1 | 2,54 | 3,16 |
| 10% | 33,1 | 33,4 | 43,6 | 2,18 | 2,91 | 3,94 |
| 15% | 29,3 | 29,8 | 38,3 | 1,6 | 1,9 | 2,63 |
| 20% | 25,9 | 26,3 | 35,7 | 1,4 | 1,7 | 2,4 |

Tab. 4 : Résistance à compression des échantillons en fonction de la concentration en R.H.A. (Source: *An experimental investigation on strength characteristics by partial replacement of rice husk ash and Robo sand in concrete. » D. Chetan, A. Aravindan,*

Le pourcentage optimal de remplacement du R.H.A. dans le ciment Portland ordinaire est de 10%. L'ajout de R.H.A. permet d'obtenir des résistances élevées (compression et fissuration) par rapport au béton ordinaire. Le ciment remplacé par 10% de R.H.A dans le béton augmente jusqu'à 3,12% la résistance à la compression et pour la résistance à la traction fendue, elle augmente jusqu'à 5,63% après 28 jours. On peut facilement se rendre compte que la capacité de la cendre de la balle de riz à augmenter la résistance mécanique du mix, dépend en partie des agrégats présent dans le béton.

Dans la troisième étude, la cendre de balle de riz est utilisée pour remplacer la fumée de silice. Le béton de poudre réactive (RPC) est un type de béton à ultra-hautes performances (UHPC) possédant des propriétés mécaniques et de durabilité avancée. La fumée de silice (SF) est un constituant principal du RPC pour la réaction pouzzolanique et pour améliorer la densité de tassement des matériaux granulaires. Cependant, le coût élevé et la disponibilité limitée du SF limitent l'application du RPC dans l'industrie de la construction moderne, en particulier dans les pays en développement comme l'Inde. C'est pourquoi, dans ce travail de recherche, la cendre de balle de riz (RHA), a été utilisée comme substitut partiel du SF, avec un taux d'humidité plus élevé à hauteur de 10%, 20%, 30%, 40% et 50% afin de déterminer son effet sur les propriétés mécaniques et de durabilité des RPC.

| Mix Designation | Compression strength in MPa | | Steam curing | |
|---|---|---|---|---|
| | 7 Days | 28 DAys | 7 DAys | 28 Days |
| R0 | 114,3 | 136,9 | 122,3 | 146,9 |
| R10 | 118,2 | 164,8 | 155,3 | 190,3 |
| R20 | 120,6 | 168,6 | 165,7 | 205,4 |
| R30 | 124,6 | 174,9 | 185,6 | 229,8 |
| R40 | 114,5 | 152,4 | 152,6 | 180,7 |
| R50 | 108,6 | 141,2 | 138,1 | 165,7 |

Tab. 5 : Résistance à compression des échantillons en fonction de la concentration en R.H.A.

Les résultats des tests ont montré que les RPC contenant des RHA ont des performances mécaniques et de durabilité satisfaisante à la fois dans le cadre d'un durcissement normal et d'un durcissement à la vapeur. Par conséquent, l'RHA peut être utilisé comme matériau alternatif au SF pour produire des RPC sans compromettre les qualités requises.

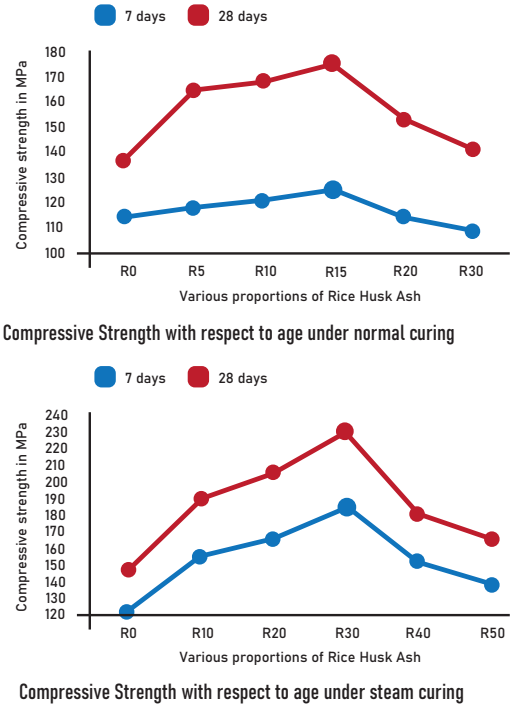



Fig. 5 : Résistance à compression des échantillons en fonction de la concentration en R.H.A. en fonction du temps

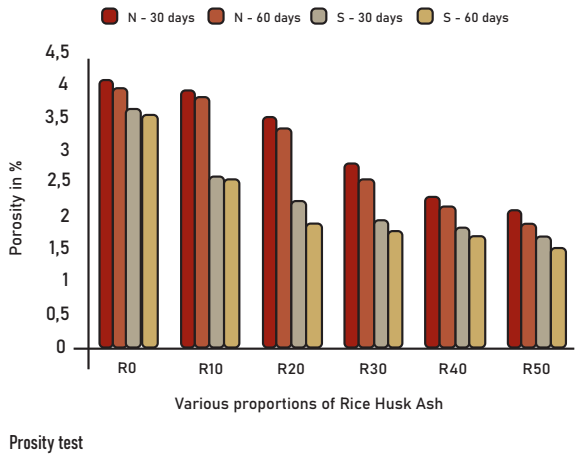



Fig. 6 : Niveaux de porosité du béton en fonction de la concentration en R.H.A. et du temps

L'objectif de la quatrième étude est de fournir une composition de mortier améliorée comprenant 100 parties en poids de ciment ; 1 à 80 parties en poids de balles de riz non traitées ; 30 à 200 parties en poids d'une ou plusieurs charges et additifs ; et 0,2 à 10 parties en poids d'un accélérateur. La présente invention concerne également un procédé de préparation de ladite composition de mortier possédant une densité plus faible que les compositions de mortier standard. Ce dernier a été analysé dans une utilisation particulière qui est la pose de céramique au sol. Les présents inventeurs ont découvert que les compositions de cernent hydraulique peuvent être préparées avec un matériau cellulosique tel que des particules à base de bois (dans ce cas particulier la balle de riz), ces compositions conservant un niveau acceptable de résistance à la traction, à l'adhérence et au cisaillement, de durabilité, de flexibilité, de résilience et de résistance à la fissuration et à la rupture de l'adhérence ou du substrat, tout en obtenant des avantages substantiels. Les balles de riz peuvent être utilisées telles quelles ou dimensionnées en fonction de l'application à laquelle elles seront destinées. Par exemple, lorsque la composition de mortier est destinée à être utilisée comme chape, stuc, composition d'enduit ou autre, les balles peuvent être utilisées telles quelles. En revanche, il peut être souhaitable de réduire la taille des balles, par exemple en les broyant avec du sable ou d'autres techniques abrasives bien connues dans l'art. Le broyage des balles de riz produit une gamme de particules de plus petite taille qui, là encore, peuvent être utilisées telles quelles ou tamisées pour obtenir des gammes de tailles particulières. Les présents inventeurs ont découvert que le choix judicieux de l'accélérateur ou de l'aide à la prise peut surmonter le problème selon lequel les matières cellulosiques particulaires telles que les balles de riz non traitées ne se lient pas bien avec les compositions de ciment mouillé et les matières cellulosiques retardent la résistance de la composition de cernant une fois prise. De nombreux tests ont été effectués pour déterminer les meilleurs conditions et compositions pour une résistance optimale. Les compositions de mortier humide ont été laissées reposer pendant 10 minutes avant d'être utilisées pour assembler deux carreaux de céramique avec un décalage de 13 mm, conformément à la norme Australienne 2358. Les résultats présentés indiquent les résistances au cisaillement (MPa) pour des

carreaux laissés à sécher pendant 7 jours (7d), 14 jours (14d) et séchés pendant 7 jours et immergés dans l'eau pendant 7 jours (7/7d) conformément à la norme australienne AS 2358, sections 3.2-3.4.[1]

Ainsi on peut facilement voir que malgré l'utilisation d'un agrégat biosourcé la résistance au cisaillement reste bonne pour l'utilisation fait lors de ces tests et qu'elle est maximum dans le cas Av7 (correspondant à 100% de ciment blanc, 16% de omyacarb 40, 0,9% de methocel 228, 0,7% PV A BP 20S, 1% de vinnapas LL 5100, 4% de calcium formate, 2 % de chaud hydratée, 34,5% de balle de riz et 37% de sable de la baie de Anna) après 14 jours de séchage.

| CEMENT COMPOSITION CODE | Stenchth MPa | | |
|---|---|---|---|
| | 7d | 14d | 7/7d |
| AS 2358, Sections 3.2-3.4 | 1,00 | 1,50 | 1,00 |
| A | 1,33 | 1,62 | 1,27 |
| Aa1 | 1,29 | 1,37 | 1,58 |
| Av1 | 0,85 | 1,04 | 1,10 |
| Av2 | 1,34 | 1,30 | 1,64 |
| Av3 | 1,04 | 1,20 | 1,19 |
| Av4 | 1,31 | 1,29 | 1,29 |
| Av5 | 1,08 | 1,10 | 1,14 |
| Av6 | 1,14 | 1,27 | 1,17 |
| Av7 | 1,68<br>1,40 | 2,11<br>1,80 | 1,97<br>1,52 |
| Av8 | 1,37 | 1,65 | 1,34 |
| B | 1,39 | 1,64 | 1,23 |
| Bv1 | 1,26 | 1,42 | 1,33 |
| Bv2 | 1,55<br>1,61 | 1,31<br>1,68 | 1,50<br>1,70 |
| Bv3 | 1,37 | 1,38 | 1,27 |
| Bv4 | 1,37<br>1,08 | 1,58<br>1,38 | 1,53<br>1,11 |
| Bv5 | 1,51 | 1,43 | 1,38 |
| Bv6 | 1,24 | 1,43 | 1,38 |
| C | 1,75 | 1,80 | 1,70 |

Tab. 6 : Liste des échantillons et de leur résistance à compression en fonction du temps

1 Les compositions de mortier de la série Av et de la série Bv ont été mélangées avec de l'eau dans un rapport de 2:1 (composition: eau), sauf indication contraire, tandis que la composition de mortier de la série C a été mélangée avec de l'eau dans un rapport de 2,9:1. Les compositions ont été mélangées par agitation mécanique jusqu'à la formation d'une pâte molle.

Enfin dans le dernier rapport sur l'étude des propriétés mécaniques d'agrobétons légers et isolants à base de balle de riz provenant directement d'un bassin rizicole local (Camargue), le travail de thèse a permis de mettre en avant une démarche générale de travail consistant à valoriser la balle de riz à l'état brut. L'association de ce granulat végétal avec un liant minéral a comme objectif l'élaboration d'un agro-béton pour l'écoconstruction. Le béton obtenu a été comparé au béton de chanvre qui a fait figure de référence.

Les granulats végétaux ont été préalablement mouillés à l'ajout du liant de gâchage de façon à limiter le problème du déficit d'eau lorsque celle-ci est absorbée par les granulats. Le béton à base de balles de riz a ainsi pu bénéficier d'un ratio massique eau/liant (E/L) plus faible que celui du béton de chanvre car son niveau d'absorption est inférieur.
Les mesures de conductivité thermique des agrobétons ont été menées pour un ratio massique L/G (liant/granulat) variant de 1,5 à 2,5, correspondant à une densité apparente variant de 500 à 730 kg.m³ pour le béton à base de balles de riz et de 360 à 600 kg.m³ pour le béton de chanvre. La conductivité thermique du béton à base de balles de riz est comparable à celle du béton de chanvre pour un même ratio L/G. Elle varie entre 0,10 à 0,14 W.m¹.K¹ selon les dosages utilisés lorsqu'elle a été mesurée à l'état sec. La granulométrie très homogène de la balle de riz, sa morphologie en demi-coque et sa masse volumique apparente élevée ont favorisé le niveau de macroporosité intergranulaire qui s'est montré en définitif équivalent à celui du béton de chanvre pour un ratio L/G donné. Cette porosité intergranulaire jouerait donc un rôle très important sur le pouvoir isolant de ces formulations à fort dosage volumique en granulats.

Les caractéristiques mécaniques en compression des agrobétons ont été évaluées en 2 temps, après 28 jours et après 2 mois de conservation à 20°C et 50%HR pour un ratio massique L/G égal à 2. Les résultats ont été plus faibles pour le béton à base de balles de riz mais satisfaisantes du point de vue des règles professionnelles de la construction en chanvre pour une application en remplissage de structure porteuse.

Le travail s'est ensuite focalisé sur l'étude des performances mécaniques des agro-bétons durant 10 mois de conservation soit à 20°C et 50%HR, soit en exposition extérieure sous abris. Le gain de résistance mécanique entre 28 jours et 10 mois a été deux fois plus élevé pour le béton de chanvre en conservation extérieure, il s'est élevé a 135% tandis qu'il n'était que de 70% pour le béton à base de balles de riz.
Les résultats ont mis en évidence que les performances mécaniques du béton de balles de riz sont limitées par la liaison mécanique liant/particule.

Par ailleurs, la conservation extérieure a été favorable à la cinétique de carbonatation. Le suivi des conditions climatiques durant les 10 mois de conservation extérieure a montré que l'humidité relative a varié entre 45% et 75% permettant un gain de résistance mécanique des agro-bétons entre 28 jours et 10 mois deux fois plus élevé qu'en intérieur.

Dans l'objectif d'accélérer le développement de résistance mécanique pour obtenir de meilleures performances à court terme, une cure en carbonatation accélérée a été proposée. Cette dernière a permis d'obtenir une résistance à compression après 2 mois équivalente à celle obtenue après 10 mois de conservation extérieure soit 1 MPa pour le béton de chanvre et 0,6 MPa pour le béton de balles de riz (taux de carbonatation moyen d'environ 74%). Cette corrélation montre que l'émission locale d'eau lors de la réaction de carbonatation vient favoriser l'hydratation des grains de C2S qui n'ont pas eu le temps de réagir convenablement en raison du taux d'humidité relatif trop faible lors de la conservation (HR<75%).

Malgré un taux de carbonatation croissant, l'évolution de la résistance mécanique du béton à base de balles de riz est assez limitée dans le temps. Le travail de thèse s'est donc porté sur un traitement des particules végétales dans une eau de chaux saturée préalablement à leur association avec le liant à base de chaux. L'objectif étant d'améliorer le niveau d'adhésion de la balle avec le liant. Le traitement consistait à immerger les particules végétales dans une eau de chaux (2g/L à 20°C) durant 24 heures.
Les essais de compression à 28 jours ont montré que ce traitement eu un impact négatif sur le béton de chanvre mais il permit d'augmenter de façon peu significative la résistance à compression du béton de balles de riz ainsi que son comportement mécanique a déformation élevée. En ce qui concerne la balle de riz, les résultats ont mis en évidence une dissolution assez conséquente de la membrane silicocellulosique pouvant être responsable d'une hydrophilie importante de ces dernières et ainsi améliorer leur affinité avec la chaux. Il a également été constaté une plus grande rugosité de surface résultant de la suppression de polysaccharides solubles et amorphes.

Le traitement à l'eau de chaux a montré une efficacité assez relative pour améliorer la résistance à compression à 28 jours du béton de balles de riz. Cette résistance est passée de 0,28 MPa à 0,42 MPa, correspondant environ à la résistance en compression du béton de chanvre sans traitement. Par ailleurs, la cure en carbonatation accélérée a permis un gain de résistance en compression permettant au béton à base de balles de riz d'atteindre environ
0,6 MPa après 2 mois. Ce gain est certainement limité par la liaison mécanique liant/particule. Cependant, on peut imaginer que le cumul d'une cure en carbonatation accélérée sur un béton à base de balles de riz ayant été traitées à l'eau de chaux puisse finalement mener à une résistance en compression avoisinant 1 MPa.

### 1.3.2 Expérimentations et études sur l'incorporation de l'amidon dans les mortiers et ciments

En plus des recherches sur les sites internet cités précédemment de nombreuses autres sources ont été fondamentales. Parmi ces dernières nous pouvons citer **3 études sur l'utilisation de l'amidon dans les mortiers et ciments** ainsi que 3 thèses qui ont été fondamentales pour créer, organiser et orienter notre propre thèse de recherches. Enfin dans un dernier temps nous mettrons en avant sous forme de tableau les **différents produits déjà commercialisés** qui ont permis de définir un cadre bien spécifique de comparaison direct pour la réalisation des blocs en balle de riz.

Les deux études sur l'utilisation de l'amidon dans le mortier et différents stucs nous ont permis d'anticiper les recherches nécessaires à la deuxième phase de cette thèse qui s'attardera sur la capacité à augmenter les propriétés mécaniques du mix-design pour une utilisation nécessitant une meilleure résistance à compression et fractures. Ces recherches sont :

- *Behaviour of a starch as a viscosity modifier for aerial lime-based mortars,* A. Izaguirre, J. Lanas, I. Alvarez, DDepartment of Chemistry and Soil Sciences, School of Sciences, University of Navarra, 1, 31008 Pamplona, Spain, 2009.

- *Effect of sticky rice on compressive strenght of cement stucco containing lime and slag,* Zhang, Zhe, Miao, Buquan, Poitras, Gérard J. and Xun, Yong, Département de génie civil, Université de Moncton, Moncton, NB, Canada, School of Civil Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng, Jiangsu, China, 2018.

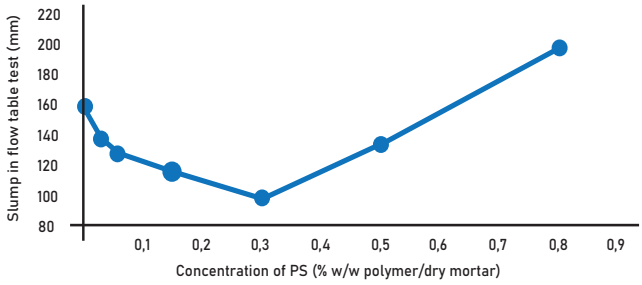
- *Effect of using corn starch as concrete admixture,* Suhad M. Abd, Alaa Sameer, Zainab Hasan Ali, et al. International Journal of Engineering Research and Science & Technology , 2016. (https://www.researchgate.net/publication/325557575)

Avant de partir sur l'analyse de ces différentes recherches, il faut comprendre qu'aujourd'hui dans certain mortiers, stucs et bétons, l'amidon est utilisé. Malheureusement son utilisation n'est souvent pas à l'état pur à cause d'une faible capacité de ce dernier à se mélanger avec des produits aqueux. Ainsi l'éther d'amidon est utilisé à sa place car il possède une meilleure solubilité dans l'eau. Il permet ainsi d'être incorporé dans certain mix-design sans que des grumeaux, dû à une mauvaise hydratation, se forme. Malheureusement le coût de cet éther est nettement supérieur à celui de l'amidon pur, ce qui peut malheureusement freiner certain à passer à des additifs plus naturels et écologiques au lieu de ceux d'origine pétrochimiques normalement utilisés dans la construction. Un des objectifs de cette thèse est de s'intéresser à l'utilisation de l'amidon non traité et de comprendre comment améliorer sa capacité à être intégrer dans le béton en limitant les risques de problèmes au moment du mélange.

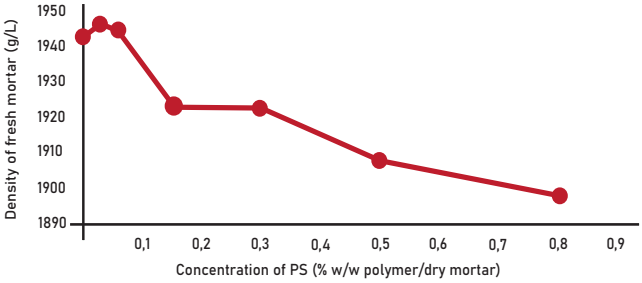
La première étude se penche sur l'utilisation de l'amidon de pomme de terre dans un mortier à base de chaux aérienne et analyse la modification de viscosité apporté à ce dernier. Il est à préciser que dans notre recherche de thèse nous analyserons l'utilisation de l'amidon de riz. Ce dernier est légèrement différent de l'amidon provenant de tubercules, mais mis à part la proportion d'amylose et amylopectine (« Selon l'origine botanique, les teneurs en amylose et en amylopectine varient respectivement de 20 à 30% et de 70 à 80% pour les amidons standards »[1]) ainsi qu'une variation dans le diamètre des grains d'amidon (« Les granules d'amidon sont des particules blanches semi-cristallines, insolubles dans l'eau à température ambiante et dont la taille varie entre 2 et 100 µm. La taille et la forme des granules sont spécifiques de chaque espèce végétale. De façon très simplifiée, l'organisation du grain d'amidon résulte de l'agencement de l'amylose et de l'amylopectine en zones amorphes et cristallines disposées de manière concentrique à partir du hile »[2]). En d'autres thermes l'analyse de cette recherche va nous permettre d'anticiper en partie la réaction de l'amidon de riz avec les autres éléments composants le mix design une fois inséré au sein du mix.
Différents dosages d'amidon de pomme de terre commercialisé ont été ajoutés au mortier de chaux aérienne afin de vérifier son efficacité en tant que modificateur rhéologique. Plusieurs propriétés des mortiers à l'état frais ont été étudiées : consistance, densité, teneur en air, capacité de rétention d'eau, temps de prise et évolution lors de l'application sur support. L'effet de l'amidon sur le potentiel des pâtes de chaux a également été évalué afin d'élucider le mécanisme d'action du polymère. Le comportement de l'amidon s'est avéré fortement dépendant du dosage : il a agi comme un épaississant lorsque le dosage incorporé était inférieur ou égal à 0,30% du poids de la chaux, et inversement, au-delà de ce dosage, il s'est comporté comme un plastifiant. L'effet épaississant s'est produit parce que les molécules de polymère ont été absorbées par les particules de chaux, agissant comme un floculant, comme le confirment les résultats du potentiel et de la distribution de la taille des particules. Pour de grandes quantités de polymère, un encombrement stérique et des forces électrostatiques répulsives sont apparus, conduisant à un mécanisme de dispersion qui explique l'effet plastifiant ainsi que le comportement du mortier frais. En outre, leur capacité de rétention d'eau est devenue plus grande, ce qui pourrait être lié à la dispersion de la chaux et à la rupture des liens entre les chaînes d'additifs et les particules de chaux, ce qui pourrait générer de nombreux sites libres où l'eau pourrait être fixée.

L'effet dépendant du dosage de polymère testé, cela peut être très utile pour de nombreuses applications pratiques (telles que les enduits, les coulis et le béton projeté), dans lesquelles la pseudo-plasticité, l'adhérence et parfois les capacités d'épaississement ou de plastification des mortiers (selon l'application) sont critiques.

1 - 2 Seyed Amir Bahrani. Modification des propriétés physico-chimiques de l'amidon par procédés hydrothermiques : Contribution à l'étude des transferts couplés chaleur-masse. Autre. Université de La Rochelle, 2012. Français. NNT : 2012LAROS366. tel-00823904




Slump results in flow table test vs. concentration of potato starch




Density of the fresh mixtures vs. concentration of potato starch

Fig. 7 : Courbes d'affaissement et de densité du béton en fonction de la concentration en amidon de pomme de terre

Dans la seconde étude nous nous intéressons à l'avantage de trouver un stuc écologique ayant de meilleures propriétés mécaniques et une meilleure durabilité que les produits actuellement sur le marché.

En tant qu'adjuvant organique traditionnel, le riz gluant a été largement utilisé dans la construction d'anciennes architectures chinoises. Il est donc naturel de se demander en quel quantité la concentration de riz gluant peut-elle influencer la résistance mécanique de la chaux.

Il a été démontré que l'ajout d'une petite quantité (jusqu'à 1%) de riz gluant peut améliorer de manière significative la résistance à la compression du mortier de chaux. Cet article étudie la résistance à la compression à 56 jours d'un stuc à base de ciment en fonction de la modification des facteurs suivants : bouillie de riz gluant, chaux et scories. Les résultats montrent que la résistance à la compression à 56 jours des stucs diminue avec la chaux et le riz gluant (supérieur à 1%). La résistance la plus élevée a été obtenue avec 1% de riz gluant, 10 % de chaux et 30 % de scories.

Les matériaux utilisés pour le mélange de stuc sont les suivants :

- Chaux : Chaux hydratée à haute teneur en calcium, avec une teneur en calcium de 48 % et une valeur de neutralisation ($CaCO_2$) de 130% ;
- Scories : Laitier de haut fourneau granulé moulu qui répond aux exigences de la norme CSA A3001[1] ;
- Ciment : Ciment Portland d'usage général qui répond aux exigences de la norme CSA A3001 ;
- Bouillie de riz collant : La farine de riz gluant provient de Golden Panda Inc. Pour fabriquer le coulis de riz collant,la farine de riz collant et l'eau ont été mélangées ensemble avec un rapport riz collant/eau de 0,1. Le mélange a été remué et versé dans un cuiseur à riz et a bouilli pendant une heure. De l'eau a été ajoutée régulièrement pendant ce processus afin de maintenir le niveau d'eau inchangé.
- Plastifiant : superplastifiant répondant aux exigences de la norme ASTM C494[2] ;
- Eau : Eau du robinet.

1 CAN/CSA-A3001-03 Extrait de lois Canadienne normalisant les liants utilisés dans le béton

2 ASTM C494/C494M, édition 2019, 15 décembre 2019 - Spécification standard pour les adjuvants chimiques pour béton. Cette spécification

Dans cette étude, le rapport eau/matériau cimentaire a été fixé à 0,47, et le rapport matériau cimentaire/sable à 0,5. Sur la base de la masse totale des matériaux cimentaires, trois différents ratios de riz collant (1%, 2% et 3%), de laitier (15%, 30% et 50%) et de chaux (10%, 20% et 30%) ont été choisis pour cette étude. Le reste du matériau cimentaire était du ciment Portland de type GU[3].

La maniabilité est un paramètre important dans les applications de stuc. Si le mélange est trop sec et dur, il sera difficile à placer, si le mélange est trop fluide, une ségrégation peut se produire. Le diamètre d'écoulement, tel que mesuré selon la procédure de la norme ASTM C1437, a été contrôlé à 260 ± 10 mm en ajoutant des quantités appropriées de superplastifiant pour tous les mélanges de cette étude.

Pour chaque mélange, trois cubes de 50x50x50 mm ont été préparés selon la procédure de la norme ASTM C109[4] . Après 24 heures, les moules ont été retirés et les spécimens ont été enveloppés dans une feuille de plastique et placés dans une chambre de durcissement à 23 ± 1°C.

La date de l'essai a été fixé à 56 jours car les mélanges contiennent une grande quantité de matériaux cimentaires. La procédure de la norme ASTM C109 a été suivie pour réaliser les essais de compression à l'aide d'une machine de compression ELE d'une capacité de 2000 ±0,05 kN. La charge a ensuite été appliquée à un taux de 0,02 MPa/s.

Pour commenter les effets de la chaux, les résistances à la compression à 56 jours du stuc contenant 1% de riz gluant nous ont permis d'observer que la résistance diminue lorsque la proportion de chaux augmente pour les trois groupes (S15, S30 et S50). Les stucs ont atteint la résistance la plus élevée avec 10% de chaux. Les mêmes tendances ont été observées pour presque tous les groupes avec d'autres proportions de riz collant (2% et 3%). Des résultats similaires ont été rapportés par Pandey et Sharma (2000) pour les mortiers. On peut conclure que l'augmentation de la proportion de chaux n'est pas bénéfique pour la résistance à la compression du stuc à 56 jours.

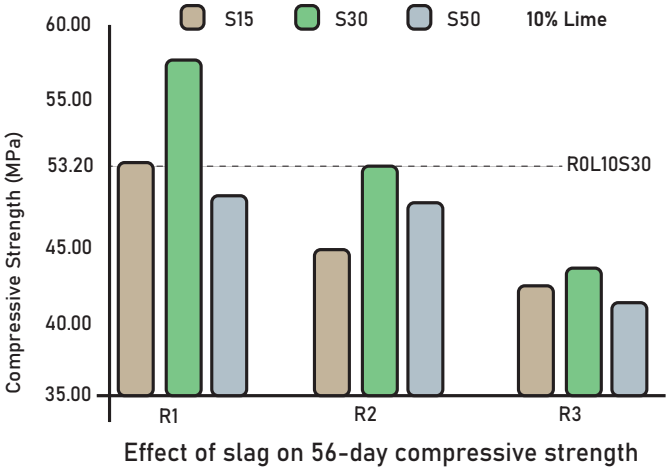



**Fig. 7.1 : Effet des scories sur la résistance à compression de trois différents mix design à 56 jours avec 10% de chaux**

couvre les matériaux à utiliser comme adjuvants chimiques à ajouter aux mélanges de béton de ciment hydraulique aux fins indiquées pour huit types de bétons différents.

3 **Ciment Portland de type GU - Ciment à usage général qui convient à tous les projets qui ne requièrent pas de ciments Portland spéciaux**

4 La norme ASTM C109 spécifie le test des mortiers de ciment hydraulique, qui implique la compression d'échantillons cubiques de 2 pouces (50 mm) jusqu'à la rupture.

La figure 7.1 montre la résistance à la compression à 56 jours du stuc des mélanges contenant 10 % de chaux. Dans chacun des trois groupes (R1, R2 et R3), la résistance à la compression du stuc a augmenté lorsque la proportion de laitier a augmenté de 15 à 30 %, mais a diminué lorsque la proportion de laitier a augmenté de 30 à 50 %. La résistance à la compression la plus élevée a été obtenue avec 30 % de laitier. Ce résultat est cohérent avec les conclusions de Liu (2015), où il a signalé que lorsque l'on remplace 30 % du matériau cimentaire par du laitier, la résistance à la compression augmente d'abord, puis diminue. La résistance à la compression a d'abord augmenté, puis a diminué lorsque le taux de remplacement a atteint 45 %. En outre, la résistance à la compression la plus élevée de chaque groupe a chuté avec des proportions plus élevées de riz gluant.

Dans un troisième temps la résistance à la compression des éprouvettes de stuc à 56 jours, en fonction de la proportion de riz collant, pour les mélanges contenant 10% de chaux a été testé. Nous pouvons voir que la résistance à la compression diminue progressivement lorsque la proportion de riz collant augmente de 1% à 3%, pour les trois groupes (S15, S30 et S50). Le stuc a atteint la résistance à la compression la plus élevée avec 1% de riz collant. Des résultats similaires ont également été observés pour les autres groupes contenant 20% et 30% de chaux.

Cela est conforme aux résultats précédents rapportés par Peng et Jackson (2015) qui ont conclu que le mortier avec 1% de riz avait la plus grande résistance à la compression à 28 jours, et ils ont également conclu que le riz collant a contribué à affiner la taille des grains de calcite et les microstructures. Pour confirmer cette découverte, un autre mélange (R0L10S30) a été testé. Par rapport au mélange R1L10S30, l'ajout de 1 % de riz gluant a amélioré la résistance à la compression à 56 jours d'environ 8 %. On peut également constater que les mélanges contenant 30 % de scories ont atteint la résistance la plus élevée parmi les trois groupes.

Les résultats de cette étude permettent de tirer les conclusions suivantes :

1. Des mélanges de stucs à base de ciment avec une maniabilité raisonnable peuvent être formulés avec de la chaux, du laitier et de la boue de riz gluant.

2. La résistance à la compression à 56 jours diminue lorsque la proportion de chaux augmente.

3. La résistance à la compression à 56 jours a augmenté lorsque la proportion de laitier est passée de 15 à 30 %, mais elle a diminué lorsque la proportion de laitier est passée de 15 à 30 %. La résistance à la compression la plus élevée a été obtenue avec 30 % de laitier.

4. La résistance à la compression à 56 jours a progressivement diminué lorsque la proportion de riz collant a augmenté de 1 % à 3 %. Il est donc recommandé de ne pas utiliser de riz collant avec un dosage supérieur à 1%.

5. La résistance à la compression à 56 jours la plus élevée a été obtenue avec le mélange contenant 1 % de riz collant, 10 % de chaux et 30 % de laitier.

Des recherches supplémentaires doivent être effectuées pour la durabilité à long terme de ces mélanges.

| Mix | Compressive strength | | | Average | S. dev. | CV = S/X |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | X1 | X2 | X3 | X | S | % |
| R1L10S15 | 50.1 | 50.8 | 51.4 | 50.7 | 0.62 | 1.2 |
| R1L10S30 | 58.3 | 57.2 | 57.6 | 57.7 | 0.57 | 1.0 |
| R1L10S50 | 48.9 | 48.1 | 48.6 | 48.5 | 0.42 | 0.9 |
| R1L20S15 | 44.3 | 45.4 | 45.2 | 45.0 | 0.61 | 1.3 |
| R1L20S30 | 44.3 | 44.7 | 45.1 | 44.7 | 0.45 | 1.0 |
| R1L20S50 | 43.6 | 43.1 | 44.3 | 43.7 | 0.56 | 1.3 |
| R1L30S15 | 42.1 | 42.9 | 42.0 | 42.3 | 0.48 | 1.1 |
| R1L30S30 | 42.1 | 41.5 | 40.6 | 41.4 | 0.75 | 1.8 |
| R1L30S50 | 33.3 | 33.6 | 32.9 | 33.2 | 0.34 | 1.0 |
| R2L10S15 | 44.3 | 44.9 | 45.4 | 44.9 | 0.57 | 1.3 |
| R2L10S30 | 49.3 | 50.2 | 51.4 | 50.5 | 0.80 | 1.6 |
| R2L10S50 | 47.6 | 47.7 | 48.8 | 48.0 | 0.65 | 1.4 |
| R2L20S15 | 41.7 | 42.0 | 43.4 | 42.4 | 0.94 | 2.2 |
| R2L20S30 | 40.7 | 39.7 | 40.2 | 40.2 | 0.48 | 1.2 |
| R2L20S50 | 43.9 | 43.9 | 42.1 | 43.3 | 1.06 | 2.4 |
| R2L30S15 | 42.4 | 42.8 | 42.2 | 42.2 | 0.32 | 0.8 |
| R2L30S30 | 39.9 | 40.1 | 39.4 | 39.8 | 0.36 | 0.9 |
| R2L30S50 | 34.4 | 35.2 | 34.2 | 34.6 | 0.52 | 1.5 |
| R3L10S15 | 43.1 | 42.6 | 41.8 | 42.5 | 0.63 | 1.5 |
| R3L10S30 | 44.7 | 42.9 | 43.3 | 43.6 | 0.99 | 2.3 |
| R3L10S50 | 41.9 | 40.9 | 41.1 | 41.3 | 0.56 | 1.3 |
| R3L20S15 | 42.4 | 41.8 | 42.3 | 42.2 | 0.36 | 0.9 |
| R3L20S30 | 45.3 | 47.2 | 46.2 | 46.2 | 0.96 | 2.1 |
| R3L20S50 | 47.7 | 45.8 | 46.2 | 46.6 | 0.99 | 2.1 |
| R3L30S15 | 44.1 | 43.9 | 43.8 | 43.9 | 0.19 | 0.4 |
| R3L30S30 | 43.5 | 44.6 | 41.6 | 43.2 | 1.51 | 3.5 |
| R3L30S50 | 37.2 | 39.8 | 39.3 | 38.7 | 1.36 | 3.5 |
| R0L10S30 | 52.7 | 53.8 | 53.1 | 53.2 | 0.54 | 1.4 |

R1L10S30

Rice 1% | Lime 10% | Slag 30%

Nomencalture used : letters R, L and S are short for sticky rice, lime and stag respectively. The number following each letter reperesents the ratio in percentage

Tab. 7 : Résistance à la compression (MPA) à 56 jours

Cette recherche nous permet de comprendre que l'apport en riz gluant, ou indirectement d'amidon de riz (environ 90% de la valeur du grain de riz) est important pour augmenter les propriétés mécaniques d'un mélange. A partir d'un seuil de saturation relativement bas, l'apport positif que peut apporter le riz gluant tend à être annulé. Ce dernier redonne une forte plasticité au mélange qui est contre favorable à une bonne résistance mécanique.

Enfin la dernière recherche sur l'amidon est une étude sur l'utilisation de l'amidon de maîs au sein du béton en remplacement partiel du ciment minéral.
Encore une fois cet amidon ne provient pas de la même source végétale mais sa similarité chimique et structurelle en fait une bonne base de comparaison pour la phase de test. Les adjuvants sont utilisés pour modifier les propriétés du béton.

Ces derniers sont des substances introduites dans un lot de béton pendant ou immédiatement avant son mélange. Il existe de nombreux avantages L'utilisation d'adjuvants offre de nombreux avantages, notamment une qualité et une résistance du béton, une plus grande fluidité pour le même rapport eau-ciment, une meilleure résistance au gel et aux sulfates, une meilleure résistance au feu, une meilleure fissuration. résistance au gel et aux sulfates, résistance au feu améliorée, contrôle de la fissuration, accélération ou retardement du temps de prise, une densité plus faible et une meilleure maniabilité.

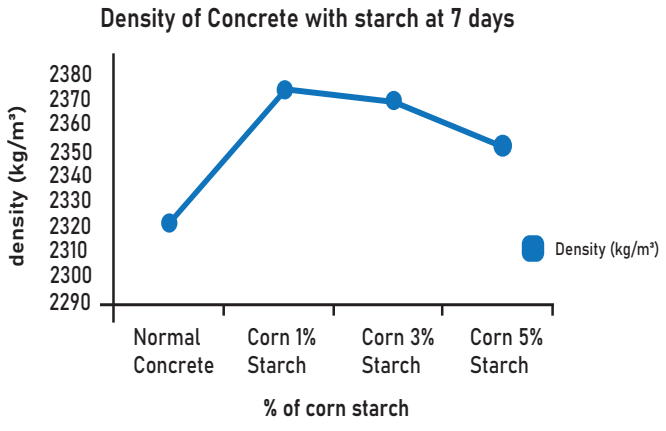
Les effets spécifiques d'un adjuvant varient généralement avec le type de ciment, la proportion du mélange et le dosage. L'amidon peut être utilisé dans le béton comme adjuvant. Dans cette étude particulière, on a utilisé de l'amidon de maïs. L'ouvrabilité du béton est testée en utilisant l'essai d'affaissement (cône d'Abrams). L'amidon est ajouté pour les essais avec différents pourcentages de ciment.

La maniabilité du béton augmente avec l'ajout d'additifs à base d'amidon. La densité du béton augmente avec l'ajout de 1 % d'amidon de maïs ; une augmentation supplémentaire de l'ajout d'additifs réduit la densité.
La résistance à la compression du béton augmente avec l'ajout de 1 % d'amidon ; une augmentation supplémentaire de l'ajout d'additifs d'amidon réduit la résistance à la compression. Les adjuvants d'amidon tels que l'amidon de maïs peuvent remplacer l'utilisation d'adjuvants chimiques.

Ils réduisent également le coût supplémentaire lié à l'utilisation d'adjuvants chimiques. Les agrégats grossiers utilisés pour les travaux ont une taille maximale de 12,5 mm, d'autres agrégats fins de dimensions variables ont aussi été utilisés. Le ciment Portland ordinaire fabriqué en Irak a été utilisé tout au long de cette étude, et les ratios utilisés sont de 1:2:3 pour le ciment, les agrégats fins et les agrégats grossiers.
Le rapport eau/ciment est de 0,47, de l'eau potable a été utilisée pour le mélange du béton et la quantité d'amidon de maïs est de même proportion que celle du ciment. Le mélange des matériaux : sable, ciment, pierre et eau. Le dosage de l'amidon de maïs ajouté aux lots de mélanges préparés était de [0-1,0- 3,0 et 5,0%] en poids de ciment respectivement. Le mélange de béton à 0 % représentait la normale.
Les matériaux secs ont été mélangés en quatre étape ; au cours de ce processus, le mélange a été effectué pendant une minute, après quoi de l'eau a été ajoutée pendant une minute et le béton frais a été correctement mélangé pendant une autre minute. Des moules de 100 x 100 x 100 mm ont été remplis de béton frais et vibrés sur une table vibrante mécanique pendant vingt secondes. Les cubes de béton ont été laissés vingt-quatre heures, après quoi ils ont été démoulés et placés dans des cuves de durcissement à température constante de 23 ± 2 C. Ils ont été durcis sous humidité pendant 7, 28 jours, à la fin de chaque durcissement.

La résistance à la compression du béton avec différents pourcentages d'adjuvants à base d'amidon est déterminée à l'aide d'une machine d'essai de compression.
Pour trouver la densité, nous utilisons la loi suivante :
Densité = Poids/Volume
Poids = Le poids du cube de béton
Volume = Taille du moule de béton
(100 mm * 100 mm * 100 mm)

La densité du béton ajouté avec différentes combinaisons d'adjuvants d'amidon à 7 jours est tabulée ci-dessous. La figure montre que lorsque le ratio d'amidon est de 1%, la densité augmente par rapport à la densité normale et lorsque le ratio est de 3%, 5% il conduit à une diminution du ratio de densité de 1%, mais plus élevé que la densité normale du mélange et la raison de cette baisse est la nature gélatineuse de l'amidon.



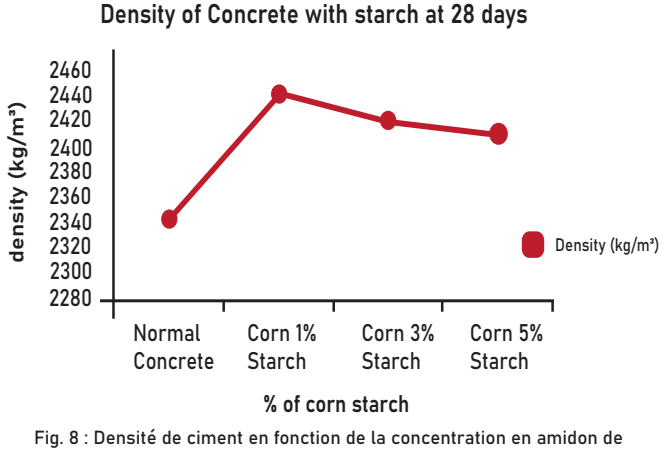
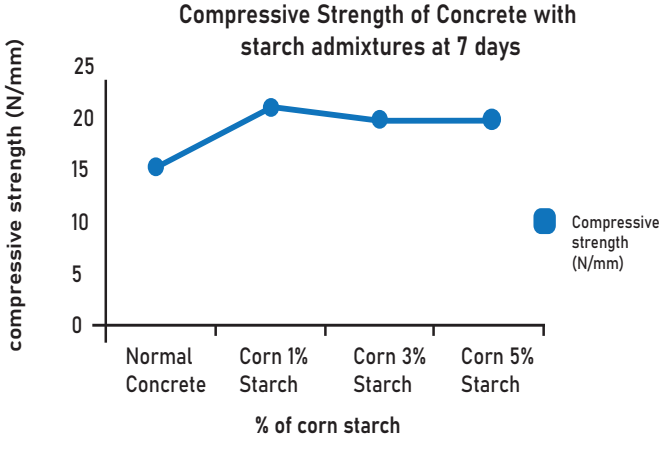




Fig. 8 : Densité de ciment en fonction de la concentration en amidon de maïs, analysé à 7 et 28 jours

La densité du béton ajouté avec différentes combinaisons d'adjuvants d'amidon à 28 jours est présentée dans le tableau ci-dessus. La figure montre que lorsque les résultats sont sensiblement les mêmes que ceux présenté après 7 jours avec une perte d'environ 1% sur la densité du matériau.

La résistance à la compression à 7 jours du béton ajouté avec différentes combinaisons d'adjuvants à base d'amidon est présentée dans le tableau suivant. La figure montre que lorsque le ratio d'amidon est de 1%, la résistance à la compression augmente par rapport au béton normal et lorsque le ratio est de 3%, 5%, la résistance à la compression diminue de 1%, mais elle reste supérieure à celle du béton normal. Le même résultat est a constater après 28 jours de maturation, confère tableau.



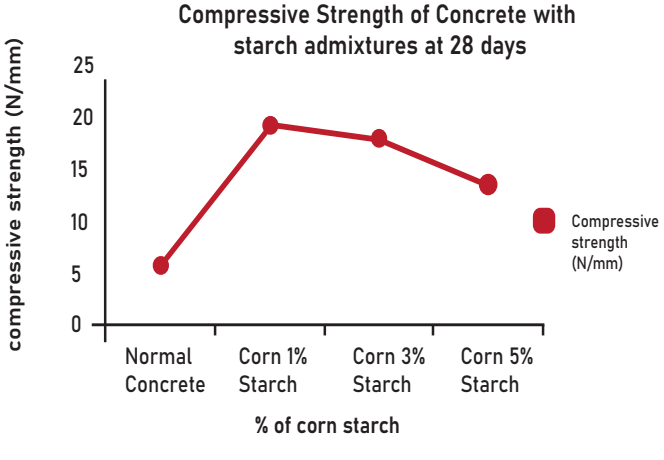




Fig. 9 : Résistance à compression du béton en fonction de la concentration en amidon de maïs, analysé à 7 et 28 jours

En résumé, il ressort que :

1. La maniabilité du béton est augmentée par l'ajout d'adjuvants à base d'amidon de maïs.

2. La densité du béton augmente avec l'ajout de 1% d'amidon de maïs.

3. La résistance à la compression du béton augmente avec l'ajout de 1% d'amidon de maïs et l'ajout supplémentaire d'amidon de maïs réduit la résistance à la compression.

4. Comme le maïs est disponible localement et qu'il est moins cher que les adjuvants chimiques, nous pouvons les remplacer par ces adjuvants à base d'amidon.

### 1.3.3 Analyse des thèses de recherches sur l'utilisation des sous-produits du riz et la création d'agrobétons

Dans une seconde phase d'analyse nous nous attarderons sur les recherches de thèses qui nous ont permis de structurer et orienter correctement nos propres résultats de recherche. Nous pouvons citer 3 thèses qui nous ont particulièrement aidé au cours de nos démarches :

- *Unprocessed rice husk ash as a partial replacement of cement for Low-cost Concrete,* Dorothy Kamilah Brown, B.S., Massachusetts Institute of Technology, 2012.

- *CONCRICE - RICICLO DI UN SOTTOPRODOTTO VEGETALE IN EDILIZIA - Uso della lolla di riso per la realizzazione di un calcestruzzo dalle alte prestazioni termiche,* Roberta Gariano, Politecnico di Torino, 2016.

- *ECOFFI - Ecological Concrete Filled Fibers - Progetto, sviluppo e monitoraggio di un sistema di involucro a base di cemento naturale e fibre vegetali riciclate,* Denis Faruku, Jacopo Andreotti, Politecnico di Torino, 2018.

Dans **la première étude** nous pouvons voir que la recherche de thèse s'attarde sur l'intérêt économique d'un remplacement partiel du ciment pour créer un béton avec de bonne capacités physiques et mécaniques qui puisse être rentable au niveau de la production mais aussi et surtout au niveau de la commercialisation. Dans cette thèse du MIT, le remplacement partiel du ciment se fait par de la cendre de balle de riz, matériel à haut teneur naturel en silice.

Cette étude porte sur l'utilisation de cendres de balles de riz cambodgiennes en remplacement de 10, 20 et 30% du ciment portland en masse dans un mortier, sans optimisation de la cendre par combustion contrôlée.
Cinq cendres collectées à partir de différentes sources au Cambodge ont été évaluées pour leur aptitude à être utilisées dans la construction rurale au Cambodge via des tests de résistance à la compression de cubes de mortier (50mm). Un remplacement de 20 % de cendres de balle de riz cambodgienne non transformées a été jugé approprié pour une utilisation dans une application structurelle rurale à petite échelle. Des méthodes peu sophistiquées de broyage de la cendre ont également été étudiées et ont permis d'augmenter considérablement la résistance à la compression des mortiers de ciment RHA par rapport aux mortiers fabriqués avec de la RHA non broyée.

Ce texte fournit une introduction à la cendre de balle de riz comme matériau cimentaire et discute du potentiel d'utilisation de cet abondant déchet agricole comme remplacement partiel du ciment pour la construction rurale à petite échelle au Cambodge, ce qui n'a pas encore été examiné dans d'autres études. Il affirme que l'objectif principal de la présente étude est d'examiner l'adéquation des RHA qui n'ont pas été produits à partir de divers processus de

combustion pour une utilisation dans le béton ; il se concentre sur le Cambodge, un pays qui n'a pas encore été abordé dans les divers études ; et évalue l'applicabilité des résultats des essais de matériaux à la construction rurale en effectuant des essais sur le terrain qui fournissent un environnement pour lequel le béton RHA devrait être utilisé. On peut voir que les tests effectués avec de fortes doses de cendre de balles de riz permettent d'obtenir un béton avec une meilleure résistance qu'un béton traditionnel mais reste quand même inférieur à la résistance mécanique d'un béton RHA entièrement minéral produit en laboratoire.

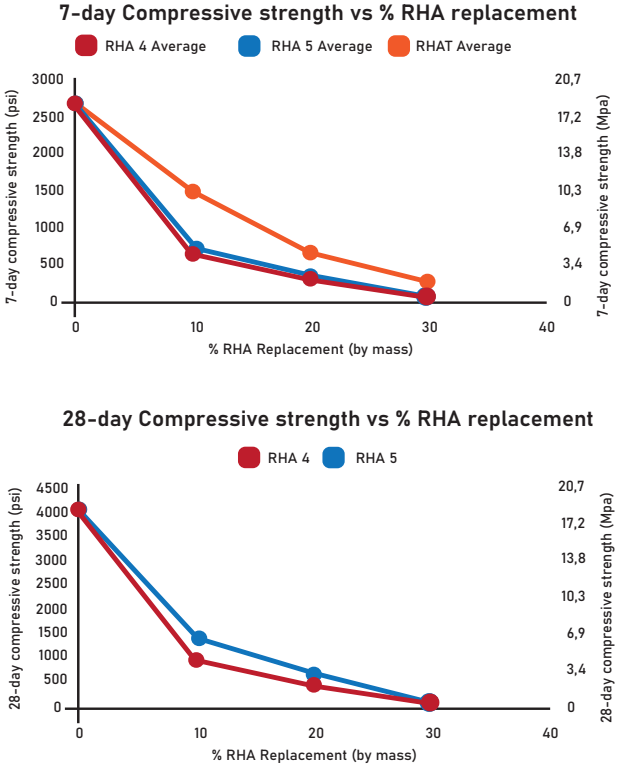



Fig. 10 : Résistance à compression du béton en fonction de la concentration en cendre de balle de riz, analysé à 7 et 28 jours

| Test Mix | % RHA (by mass) | Water-to-binder ratio | Flow % | Water (kg/m³) | Cement (kg/m³) | Rice Husk Ash (kg/m³) | Fine Aggregate (kg/m³) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0RHA | 0 | 0,48 | N/A | 260,23 | 537,67 | 0 | 1478,60 |
| 10RHA1N | 10 | 0,78 | 125,30 | 359,81 | 413,04 | 45,89 | 1250,51 |
| 10RHA1G | 10 | 0,82 | 110,30 | 371,35 | 405,60 | 45,07 | 1227,96 |
| 10RHA2N | 10 | 0,78 | 123,30 | 361,79 | 415,32 | 46,15 | 1263,67 |
| 10RHA2G | 10 | 0,72 | 110,6 | 343,61 | 427,14 | 47,46 | 1299,66 |
| 10RHA3N | 10 | 0,88 | 122,10 | 388,66 | 395,69 | 43,97 | 1200,26 |
| 10RHA3G | 10 | 0,76 | 114,20 | 354,61 | 417,73 | 46,41 | 1267,11 |
| 10RHA4N | 10 | 0,98 | 110,50 | 415,39 | 379,85 | 42,21 | 1154,75 |
| 10RHA4G* | 10 | 0,66 | 127,3 | 324,01 | 439,17 | 48,99 | 1335,07 |
| 20RHA4 | 20 | 1,23 | 109,10 | 469,47, | 304,43 | 76,09 | 1035,58 |
| 30RHA4 | 30 | 2,28 | 53,40 | 619,35 | 189,87 | 81,35 | 734,32 |
| 10RHA5 | 10 | 0,98 | 107,50 | 406,20 | 371,45 | 41,27 | 1103,86 |
| 20RHA5 | 20 | 1,58 | 80,10 | 513,39 | 259,22 | 64,81 | 842,28 |
| 10RHAT | 10 | 0,84 | 122,70 | 373,20 | 398,69 | 46,41 | 1213,77 |
| 20RHAT | 20 | 0,98 | 118,30 | 405,65 | 329,80 | 82,45 | 1119,66 |
| 30RHAT | 30 | 1,18 | 102,50 | 102,50 | 263,55 | 112,95 | 1013,53 |

*Note: RHA4 RHAS5 are ashes from Cambodia while RHAT si the 100-700 micron ash made in USA.*
** 10RHA4G uses RHA4 that was ground by mixing with gravel for 10 minutes, while 10RHA1G, 10RHA2G and 10RHA3G uses RHA1, RHA2 and RHA3 that were ground by mixing wirth sand for 10 minutes*

| Test Sample | % RHA | Compressive strength, Mpa (psi) | |
|---|---|---|---|
| | | 7 day | 28 day |
| 0RHA | 0 | 14,42 (2091) | 26,31 (3815,61) |
| 10RHA1N | 10 | 9,03 (1310) | - |
| 10RHA1G | 10 | 10,42 (1511) | - |
| 10RHA2N | 10 | 9,76 (1416) | - |
| 10RHA2G | 10 | 13,26 (1923) | - |
| 10RHA3N | 10 | 9,80 (1422) | - |
| 10RHA3G | 10 | 11,4 (1655) | - |
| 10RHA4N | 10 | 4,51 (654) | 8,18 (1186) |
| 10RHA4 | 10 | 19,2 (2786) | - |
| 20RHA4 | 20 | 2,23 (323) | 4,35 (631) |
| 30RHA4 | 30 | 0,63 (91,2) | 1,31 (190) |
| 10RHA5 | 10 | 5,12 (742) | 9,51 (1379) |
| 20RHA5 | 20 | 2,22 (322) | 3,78 (549) |
| 10RHAT | 10 | 10,1 (1461) | 14,3 (2076) |
| 20RHAT | 20 | 4,51 (654) | 7,48 (1084) |
| 30RHAT | 30 | 1,90 (275) | 3,62 (525) |

Tab. 8 : Résistance à la compression (MPA) des mix de béton et cendre de balle de riz à 7 et 28 jours

**La deuxième thèse de recherche** quant à elle s'intéresse à l'utilisation de la balle de riz non modifié et à son intégration à l'intérieur du mortier pour créer un béton qui possède de fortes propriétés isolantes.
Un des thèmes principaux sur lequel se base cette thèse est la philosophie de recyclage, au même titre que la nôtre. Dans le cas de ces recherches la balle de riz utilisée provient de la rizière Acquerello, productrice de riz Carnaroli et ayant le centre de production dans la plaine Vercelloise à une distance d'environ de 20km de Turin.
Le poids apparent spécifique de cette dernière est de 126g/L ou 632 kg/m³. Les dimensions sont d'environ 1 à 4 mm de largeur et de 8 à 10 mm de longueur. Le ciment utilisé est un ciment CEM II/A-LL 42,5 R produit par la société Buzzi Unicem à Torino Vercellese, dans le Piémont et est un ciment Portland composite avec un pourcentage en masse de clinker entre 80-94% et un pourcentage de calcaire entre 6-20%, avec une classe de résistance de 42,5 N et une forte résistance initiale.

4 différents agrégats ont été utilisé durant la préparation du mix et au fin d'analyse du produit fini. On peut retrouver la silice sous forme de sable, le sable fin, le sable granitique et enfin de petites pierres de type gravier. Les différents niveaux d'humidité relative, d'absorption, de dimensions ont été défini ainsi que l'air dans la malte et l'utilisation des additifs. Par la suite différents taux de balle de riz ont été insérés dans la malte de façon à définir la meilleure concentration en pourcentage, les pourcentages analysés allant de 10 en 10 de 0 à 100%.

| Dénomination de la Malte | Subsitution de la Balle de riz [%] |
|---|---|
| LA | 0 |
| LB | 10 |
| LC | 20 |
| LD | 30 |
| LE | 40 |
| LF | 50 |
| LG | 60 |
| LH | 70 |
| LI | 80 |
| LL | 90 |
| LM | 100 |

Tab. 9 : Nomenclature des échantillons de béton en fonction de leur concentration en balle de riz

Une substitution de volume a été effectuée, c'est-à-dire que dans les mélanges préparés, le volume occupé par le sable a été remplacé par un volume égal de balle de riz. En partant de la correspondance que 10% de 1350 g de sable est égal à 135 g de sable, que le volume occupé par cette quantité est d'environ 74 cm³, on en a déduit que : un 74 cm³ correspondant de balle de riz pèse 10 g. Ainsi il est évident de se rendre compte qu'en plus de la volonté d'améliorer les propriétés thermiques du béton le poids spécifique de ce dernier sera tout autant allégé. Lors de l'analyse 11 différents échantillons ont été préparés, cela a commencé par la préparation de l'échantillon de référence, pour lequel ont été utilisé :

- 450 g de ciment CEM II/A-LL 42,5 R ;
- 1350 g de sable de silice ;
- 225 g d'eau (rapport W/C = 0,5).

On a donc procédé à une substitution progressive de la balle de riz, ce qui a permis

d'obtenir les mélanges suivants, présentés dans le tableau ci-dessous.

| Composants | Ciment [g] | Sable [g] | Balle de riz [g] | Eau [g] |
|---|---|---|---|---|
| LA | 450 | 1350 | 0 | 225 |
| LB | 450 | 1200 | 10 | 225 |
| LC | 450 | 1065 | 20 | 225 |
| LD | 450 | 945 | 30 | 225 |
| LE | 450 | 810 | 40 | 225 |
| LF | 450 | 675 | 50 | 225 |
| LG | 450 | 540 | 60 | 225 |
| LH | 450 | 405 | 70 | 225 |
| LI | 450 | 270 | 80 | 225 |
| LL | 450 | 135 | 90 | 225 |
| LM | 450 | 0 | 100 | 225 |

Tab. 10 : Compositions des différents échantillons de béton

Différents échantillons ont été réalisé à l'aide de moules identiques afin de mesurer la masse volumique une fois durcis ainsi que la résistance à compression. Les dimensions sont de L = 160mm ; l = 40mm ; h = 40mm. Les échantillons seront par la suite laissés pendant 24h à une température de 20°C avec une humidité relative supérieur à 90%. Ainsi leur masse une fois durcis a été calculé :

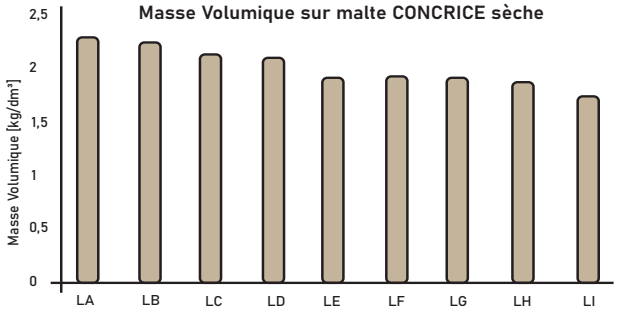



Fig. 10 : Densité des échantillons de malte CONCRICE

À partir de ces résultats, il est possible de confirmer une thèse déjà corroborée précédemment, c'est-à-dire qu'il est possible de maintenir une bonne maniabilité du mélange tant que le pourcentage de balle de riz ajoutée et substituée au sable ne dépasse pas 50%-60%. Enfin en dernier lieu la résistance à compression a été étudié en 4 différentes périodes, 24h,48 h, 7jours et 28 jours représenté dans le tableau ci-dessous :

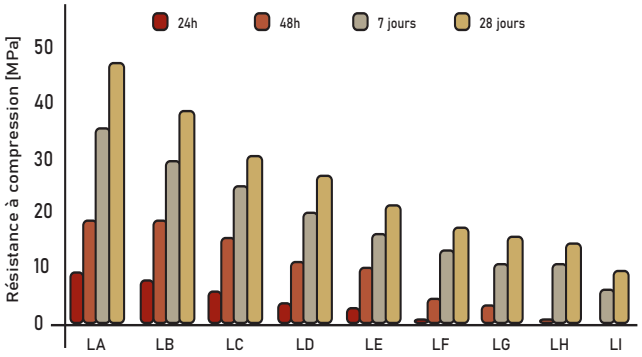



Fig. 11 : Résistance à compression des échantillons CONCRICE à 24h/48/7j et 28j

En analysant les données obtenues à partir des essais de mortier, il a été décidé de procéder à l'expérimentation avec la réalisation et l'analyse des bétons suivants :

- CLS 1 : contenant 30 % de balle de riz à la place de l'agrégat fin.
- CLS 2 : contenant 60 % de balle de riz à la place de l'agrégat fin.
- CLS 3 : béton de référence standard

Le choix de réaliser et de tester les deux premiers mélanges découle des bons résultats obtenus lors des analyses réalisées précédemment sur des mortiers de ciment avec une substitution égale de

balles de riz. Le dernier, en revanche, a été réalisé afin d'avoir une comparaison immédiate et facile avec les caractéristiques et les performances que tout béton standard actuel est en mesure d'offrir. Pour la préparation des trois différents mélanges supposés[1] :

**Componenti de CLS 1 (30% di lolla di riso)**

| | Dosaggio | M.V. s.s.a | Assorbimento | Umidità |
|---|---|---|---|---|
| | % | kg/m³ | % | % |
| Sabbia fine (SF) | 35 | 2,690 | 1 | 4,3 |
| Sabbia Granitica (SG) | 35 | 2,680 | 1 | 4,6 |
| Lolla di riso | 30 | 0,632 | 46 | 1 |
| CEM II/A-LL 42,5R | 500 (kg/m³) | 2,920 | - | - |
| cc39-T75 | 0,85 (l x 100kg/cem | 1,100 | - | - |

**Componenti de CLS 2 (60% di lolla di riso)**

| | Dosaggio | M.V. s.s.a | Assorbimento | Umidità |
|---|---|---|---|---|
| | % | kg/m³ | % | % |
| Sabbia fine (SF) | 20 | 2,690 | 1 | 4,3 |
| Sabbia Granitica (SG) | 20 | 2,680 | 1 | 4,6 |
| Lolla di riso | 60 | 0,632 | 46 | 1 |
| CEM II/A-LL 42,5R | 500 (kg/m³) | 2,920 | - | - |
| cc39-T75 | 0,85 (l x 100kg/cem | 1,100 | - | - |

**Componenti de CLS 3 (cemento standard)**

| | Dosaggio | M.V. s.s.a | Assorbimento | Umidità |
|---|---|---|---|---|
| | % | kg/m³ | % | % |
| Sabbia fine (SF) | 27 | 2,690 | 1 | 4,3 |
| Sabbia Granitica (SG) | 33 | 2,680 | 1 | 4,6 |
| Lolla di riso | 40 | 2,740 | 46 | 1 |
| CEM II/A-LL 42,5R | 500 (kg/m³) | 2,920 | - | - |
| cc39-T75 | 0,85 (l x 100kg/cem | 1,100 | - | - |

Tab. 11 : Compositions de 3 différents échantillons de béton dont 2 avec 30% et 60% de balle de riz et un autre standard

Par la suite La résistance à compression a été mesuré après 7 et 28 jours :

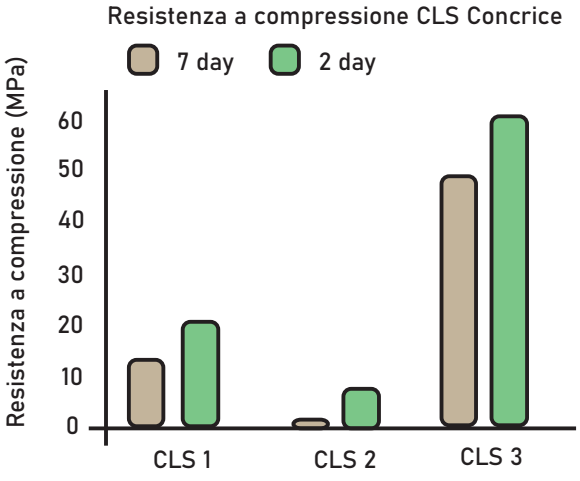



Fig. 12 : Résistance à compression des échantillons CONCRICE 1, 2 et 3 à 7 et 28 jours

En dernier lieu, la conductibilité thermique a été mesuré pour les trois différents échantillons:

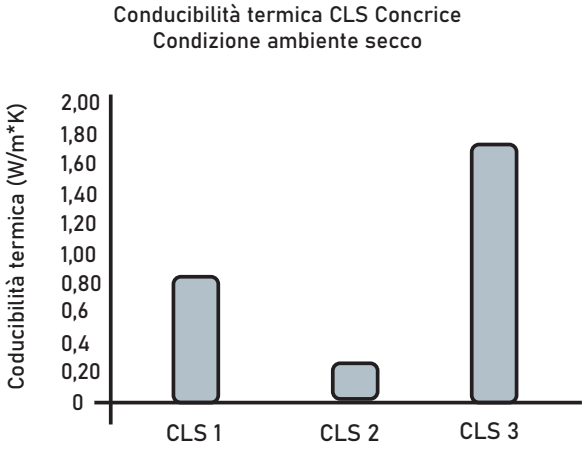



Fig. 13 : Conductibilité thermique des échantillons COCNCRICE

1 - Agrégats : Sable fin [SF] - Sable granitique [SG] - Pietrischetto [P.TTO] - Balle de riz / Ciment : CEM II/A-LL 42.5 R / Additifs : Additif super-plastifiant CC39-T75 / l'eau

En plus de la conductivité thermique, il a été possible de déterminer la diffusivité thermique (a), le rapport entre la conductivité thermique et le produit entre la densité et la chaleur spécifique du matériau analysé et la capacité thermique de chaque échantillon testé.

Le tableau ci-dessous montre les résultats obtenus concernant la diffusivité et la capacité thermique des bétons examinés.

| | α (m²/s) |
|---|---|
| CLS 1 | 1,82 |
| CLS 2 | 1,52 |
| CLS 3 | 1,98 |

Tab. 12 : Diffusivité thermique des échantillons CONCRICE 1, 2 et 3

Ces résultats soutiennent la thèse selon laquelle les propriétés thermiques d'un béton peuvent être améliorées par l'utilisation de la balle de riz comme agrégat.

En particulier, on constate une amélioration assez significative des valeurs de la conductivité thermique et de la diffusivité.

**Dans la troisième thèse,** l'analyse du riz, ses composants ou ses sous-produits ne sont pas au centre de la recherche et ne font, de ce fait, pas partie des raisons qui nous ont poussé à nous intéresser à cette dernière. L'intérêt tout particulier apporté à cette thèse est l'organisation du travail de recherche aussi bien en phase préliminaire que dans la phase expérimentale.
Dans cette optique, l'objectif général de la thèse est de développer, en collaboration avec la société italienne Sarotto s.r.l et le groupe français Vicat, un système de fermeture verticale en conglomérat léger, par l'utilisation d'un liant naturel et d'un agrégat 100% organique. La valorisation des résidus agricoles, liée à l'optimisation des processus de transport, permet de créer une «chaîne d'approvisionnement courte» dans laquelle les granulats sont disponibles dans des zones proches des sites de production.

La recherche s'est effectuée sur des granulats biosourcés, originellement des déchets agricoles, transformé pour une utilisation comme composants à part entière dans l'industrie de la construction. Ces granulats sont des rafles de maïs concassés, séchés et mixés dans du béton pour remplacer les granulats d'origine minérale naturellement utilisées.

La première partie analyse les antériorités des éléments de construction brevetés présents sur le marché, tant national qu'européen, qui caractérisent : les murs

périmétriques verticaux, les cloisons internes et les isolants, réalisés avec des matières premières, secondaires ou des sous-produits d'origine végétale. Ensuite, la recherche s'est concentrée sur l'investigation des cultures présentes sur le territoire afin de sélectionner celles qui produisent plus de résidus, utiles pour la réalisation du bloc.

Bien que la législation classe les excédents de champs des exploitations agricoles parmi les sous-produits, dans la pratique courante, ils sont considérés comme des déchets, car les chaînes d'approvisionnement actuelles ne sont pas incitées à collecter et à stocker ces ressources. Seuls 20-30% de la paille de riz et 10-20% des rafles de maïs (données ENAMA, 2011), présents sur le territoire italien, entrent dans les processus de récupération et de valorisation.

Dans la partie suivante, les chaînes d'approvisionnement des trois principales cultures du Piémont sont analysées : maïs, riz et blé ; leur tendance linéaire est mise en évidence et un scénario circulaire est émis en collaboration avec des experts du domaine. La phase expérimentale ultérieure prévoit la création d'échantillons sur lesquels élaborer une série d'analyses et d'évaluations sur les caractéristiques de performance (résistance mécanique et thermique), conformément à la réglementation en vigueur. Enfin, le suivi vise à évaluer un éventuel marquage du produit pour une utilisation sur le marché du bâtiment.

Dans un troisième temps, la thèse s'arrête sur l'analyse des normatives liés à l'utilisation de sous-produits agricoles. Elément essentiel de la procédure d'identification du projet et de son évaluation elle permet de définir quels sont les limites fondamentales à la réalisation du produit fini et sa commercialisation.

Après ces différentes analyses préliminaires, la phase finale se divise entre activité expérimentale et audits de performance. L'expérimentation se déroulera sur trois séries d'activités expérimentales avec analyse des résultats. Lors de ces séries, 90 kg d'épi de maïs avec des résidus d'élagage ont été déchiquetés et récupérés 7 jours maximum après la coupe aux champs pour éviter toute forme de détérioration et garder les mêmes caractéristiques qu'au moment de la récolte
Une fois produit il vient stocker, conserver et sécher de façon traditionnel pour la création d'un mortier contenant du ciment Prompt, de l'acide citrique pour diminuer la vitesse de prise initiale, les agrégats naturels précédemment cités et de l'eau, le tout en proportion variable pour étudier la cohésion du mix design. Il est ressorti que les meilleurs résultats pour les blocs ont été obtenu avec les plus grandes proportions de fibres (paille de riz) aux environ de 50 à 60%, évitant ainsi les fissures après sortie des moules, sans qui la seule présence des rafles de maïs ne suffirait pas à assurer une bonne cohésion du bloc.

Enfin en dernier lieu, grâce à l'aide de la société VICAT, des tests à compression ont été réalisé

sur 6 différents échantillons cylindriques (30x15 cm).

Il convient de noter qu'il n'existe pas de législation spécifique sur la méthodologie d'essai des mélanges de béton utilisant des granulats végétaux. Cependant, dans le contexte français, il existe des «protocoles d'essai», qui sont des règles professionnelles sur les produits à base de ciment naturel et de chanvre, qui ont fourni les critères de performance à contrôler du mélange de ciment de chanvre naturel Prompt et agrégats naturels.

Sur la base de ces procédures, des tests ont été effectués sur dix-huit échantillons avec des dosages de liant de 250 kg/m³ et 350 kg/m³ dans un délai de 30, 60 et 90 jours, car s'agissant de granulats végétaux, la période de séchage est plus longue que pour les conglomérats ordinaires. Initialement, le poids et la densité. Il est à noter que la masse d'eau perdue est moindre dans les échantillons dont le dosage en ciment est de 250 kg/m³, puisque le rapport eau/ciment est plus élevé pour les échantillons de 350 kg/m³.

Le travail de thèse a analysé la possibilité de réutiliser des résidus agricoles pour la réalisation de conglomérats de béton allégé et a permis de réaliser le prototype ECOFFI. En vertu du travail sur la conception du mélange, des tests sur la résistance mécanique, des performances thermiques et du calcul de l'énergie intrinsèque, ce produit peut être utilisé comme un mur périmétrique vertical (non porteur) avec la fonction de l'isolation thermique (sans utilisation de matériaux isolants qui en améliorent les performances) dans les zones climatiques A, B, C et D.

En outre, en comparant avec les produits de référence (fig.1), présents sur le marché (Biosys et Prespaglia), ECOFFI a une résistance mécanique similaire au produit de Vicat (dosage du liant 250 kg/m³), cependant la densité plus élevée entraîne une dégradation des performances thermiques, qui restent en ligne avec le bloc Prespaglia.
En ce qui concerne l'approvisionnement en matières premières (calculé à l'échelle nationale Italienne), il a été démontré que les agrégats présents dans la région du Piémont garantissent l'approvisionnement du secteur du bâtiment. Enfin, le calcul de l'énergie intrinsèque a révélé que l'utilisation de sous-produits des cultures de maïs et de riz, permet de contenir le besoin en énergie primaire par rapport aux autres blocs.

De plus, en utilisant les mêmes pourcentages de granulats et de liant pour le conditionnement de 1 kg de produit, la rentabilité du prototype a été calculée. Il convient de noter que les prix des matières premières se réfèrent à des catalogues disponibles en ligne, et qu'il s'avère que la valeur de marché d'ECOFFI est inférieure à celle de Biosys.

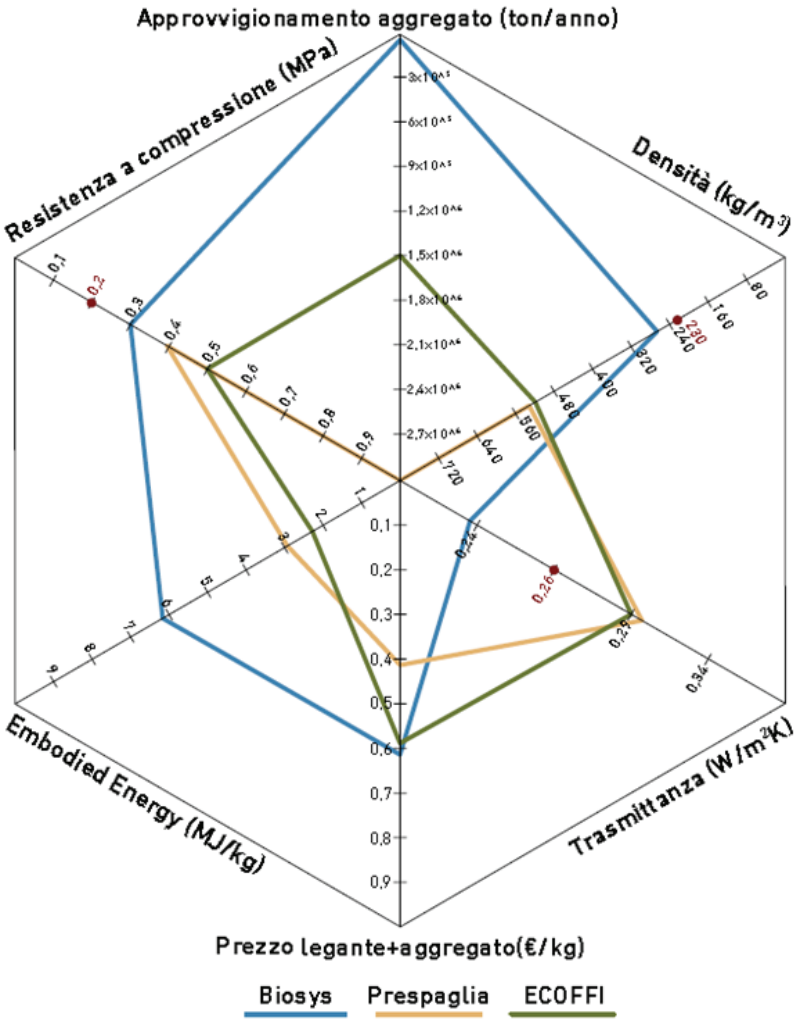



Fig. 14 : schéma de confrontation des caractéristiques techniques de 3 produits : Biosys / Prespaglia / ECOFFI

### 1.3.4 Autres sources d'analyse

Enfin dans un dernier temps et pour raison évidente de pragmatisme, Il nous faudra citer les deux exemples qui nous ont inspirés pour ce travail de thèse.

L'ensemble des recherches de la thèse se sont principalement inspiré de ses idées et on fait émerger la volonté de repenser le mode de construction actuelle qui est en décalage avec la diminution de l'empreinte carbone que l'Union Européenne s'efforce de mettre en place. Dans un premier temps les objectifs principaux que nous nous sommes fixés sont de respecter les exigences mises en place par le comité européen, de récupérer les déchets ou sous-produits non utilisés permettant de réduire l'impact carbone tout en donnant accès à une connaissance ancestrale perdu à ce jour. Même si à l'époque la nécessité en matière première de proximité fut certainement la raison principale à l'utilisation des matériaux tel que le riz gluant pour les Grandes murailles de Chine ou bien l'eau de mer et les roches volcaniques pour le ciment Romain, on peut voir que la récupération de ces matériaux fut moins invasive sur l'environnement que les méthodes utilisées aujourd'hui. Les connaissances actuelles devraient nous permettre de valoriser des produits issus de contextes environnementaux, à circuit court tout en abaissant les coups de production et la pénibilité au travail. Malheureusement ce besoin éffréné de consommation à pousser la société internationale à devenir dépendant de ressources non renouvelables.
Les deux exemples que sont **les Grandes murailles de Chine et L'utilisation du béton Romain** sont les pierres fondamentales à la construction de cette thèse.

**Dans un premier temps** dans l'étude sur l'analyse du mortier de riz :

*Vers un béton à liant d'amidon : Du riz dans le mortier, une technique ancestrale redécouverte, quelle place dans les démarches actuelles d'eco-conception ?*, Constance Meurice, 2014, https://seminairemateriaux.wordpress.com/2014/01/27/vers-un-beton-a-liant-damidon/

Une analyse est faite partant d'un article publié dans l'American Chemistry Society qui expose le travail d'un groupe de scientifiques chinois, dirigé par Bingjian Zhang, découvrant la présence de riz gluant dans le mortier utilisé dans la construction de certaines parties de la grande muraille de Chine. Il est important de préciser que l'usage du mortier de riz gluant ne se limite pas à la grande muraille, de nombreux autres édifices ont aussi utilisé ce procédé comme des tombeaux et bâtiments administratifs.
Malgré l'impossibilité d'accéder à des données précises, cette étude explique les résultats des tests effectués. En dépit d'un récent intérêt pour les mélanges organique/minéral en matière de construction, fort est de constater que leur utilisation est beaucoup plus ancienne et n'est donc pas une nouveauté.

Les expériences menées par le groupe de scientifique chinois démontreraient que la présence d'amidon de riz (et plus précisément de l'amylopectine, hydrate de carbone contenu dans le riz) sous forme de soupe de riz gluant mixé avec de la chaux permettrai une augmentation des propriétés mécanique du mortier.
L'amidon est déjà présent dans le secteur de la construction mais son utilisation en tant qu'ajout dans les mortiers a été peu testé.
La question « La découverte de cette technique ancestrale n'est-elle pas une piste vers un nouveau matériau durable qui s'inscrirait dans une démarche d'éco-conception ?? » fut la base du raisonnement croissant qui permis la construction de notre thèse.

Les résultats obtenus démontrent que le mortier avec l'amidon est moins résistant que le mortier avec de la chaux mais possède une bonne résistance au froid et est un bon isolant acoustique. Néanmoins dans l'analyse du béton de chanvre/amidon, ils constatent qu'il est nécessaire d'ajouter un plastifiant dans le liant pour éviter le phénomène de rétrogradation de l'amidon. Ce plastifiant permet donc d'assurer la rigidité ainsi que la durabilité du matériau.

De plus en analysant les bâtiments construits selon cette méthode, nous pouvons voir que les monuments sont pour la plupart aujourd'hui encore debout malgré les séismes et les siècles passés.
D'après les scientifiques chinois, le mortier complété de riz gluant pourrait être une technique remise au goût du jour afin d'être utilisé dans les restaurations de bâtiments anciens en maçonnerie.
Un béton à liant amidon pourrait trouver un usage similaire dans les restaurations et réhabilitations de bâtiment. Ainsi son usage serait contrôlé et limité.

**Le deuxième exemple** fut l'utilisation du béton Romain, mortier qui resta jusqu'à peu incompris et avec des propriétés mécaniques supérieures au béton actuel utilisant du ciment de style Portland, 2000 ans après leur édification.
Ce mystère quant aux propriétés de ce béton a provoqué un grand intérêt pour la création, la composition et la mise en œuvre des bétons actuels et a amené la question de savoir s'il était possible aujourd'hui d'obtenir un béton biosourcé avec les mêmes propriétés mécaniques.

Il faut savoir que 2000 ans après la réalisation des bâtiments en mortier Romain, ces derniers, même si affaiblies ne cèdent pas. Quel est donc le secret de ces constructions en béton qui semblent intouchables ? La qualité majeure de ce béton est de posséder une forte résistance aux agents marins, tel que des jetées ou des structure portuaires. En outre de cette bonne résistance ces derniers semblent même s'être renforcé avec le temps.

Un groupe de chercheurs américains auraient trouver la solution (2011), le secret du béton

romain réside en réalité dans sa composition : un mélange de chaux, de cendres et roches volcaniques mais également d'eau de mer.
Et contre toute attente, c'est l'eau salée qui constituerait l'élément fort du mélange même si la présence de sable fin constitué de « pouzzolannes » un granulat de scories volcaniques basaltiques, abondantes autour du Vésuve reste fondamentale.
Elle provoquerait une réaction chimique avec les matériaux volcaniques, amenant à la création de minéraux qui renforceraient le béton. Ils ont notamment observé des échantillons prélevés sur des vestiges romains lacustres, datant de 37 av-J.C., situés à Pozzuoli (Campanie), à l'extrémité nord du golfe de Naples, une zone à forte activité volcanique.
Une particularité qui conférerait à ce ciment antique d'excellentes propriétés, de loin supérieures à celles du Portland actuel, massivement utilisé de nos jours. Au cours d'une précédente étude il semblerait que deux minéraux assez rares seraient aussi responsables de la qualité du mortier. Les scientifiques auraient découvert la présence de minéraux très particuliers : de la tobermorite alumineuse et la phillipsite.

Après de nombreuses analyses, ces derniers ont découvert un processus de création de ses deux substances intrinsèques au mortier : «En revenant sur le béton, j'ai trouvé une grande quantité de tobermorite qui croissait à travers le tissu du béton, souvent en association avec phillipsite [un autre minéral]», s'est réjouie pour The Guardian, Marie Jackson, géologue à l'Université de l'Utah et principal auteur de l'étude publiée dans la revue American Mineralogist.
Plus concrètement, au fil du temps, l'eau de mer s'infiltre à travers le béton ce qui permet la dissolution des cristaux et des verres volcaniques (phénomène chimique de carbonatation), qui sont alors remplacés par de la tobermorite alumineuse et le phillipsite.
Ce serait donc l'augmentation de ces cristaux à forme plate qui a permis avec le temps de renforcer le matériau avec l'âge.
Nul aujourd'hui est capable de comprendre ni d'affirmer si ce processus était bien connu des Romains et s'il était un résultat volontaire (la recette ayant été complètement perdu).
Pour sûr le béton moderne lui, n'est pas supposé subir de tels changements et se dégrade donc lorsqu'il est en contact avec certains agents chimiques tel que l'embrun marin, la durée de vie estimée des édifices réalisés avec du Portland est de 50 ans.
De plus et pour finir il semblerait que là où les composants du ciment Portland doivent être élevés à 1450°C pour être produits, le ciment Romain se contentait d'une chaleur de 900°C, ce qui permettrait de réduire considérablement la consommation de combustible et donc, les émissions de gaz à effet de serre.

Pour conclure sur l'analyse d'antériorité, nombreuses sont les références et recherches qui ont permis d'étoffer les connaissances nécessaires à la réalisation de cette thèse. La liste de documents énumérés ci-dessus n'est pas exhaustive même si elle met en lumière les recherches scientifiques, les thèses et les documents annexes sur l'utilisation du béton, de la balle de riz, de l'amidon de riz et de la conception de différents blocs en béton et en matériaux biosourcés. « Pourquoi ne pas s'inspirer des expériences et réussites passés pour modifier nos méthodes de construction ? » est une question récurrente qui a servi de ligne guide tout au long de l'écriture de cette thèse.

Ces recherches ouvrent une perspective complètement nouvelle de la façon dont le béton peut être produit et modifié. Ce que nous considérons aujourd'hui comme des produits de construction avant gardiste, respectueux de l'environnement et à faible consommation seront probablement monnaie courante dans quelques années. De quoi envisager à l'avenir des constructions plus pérennes.

## 1.4 Recherche sur les cultures Européennes et sélection des filières de proximité

Dans le paragraphe précédent nous avons défini les enjeux des recherches similaires à la nôtre. Nous avons par la même occasion fourni un aperçu général sur les produits de construction déjà commercialisés utilisant des résidus provenant du secteur agro-forestier.
Le cautionnement de ses produits dépend de plusieurs éléments fondamentaux tel que :

- La période de production
- Un grand emplacement à disposition pour le stockage et/ou séchage
- La proximité des matières premières pour assurer une continuité dans la recherche de réduction de l'empreinte environnementale
- Un marché disposé à accueillir des produits promouvant l'utilisation de matières biosourcées

Le grand atout du riz est de pouvoir se cultiver presque partout. L'homme l'a adopté sur les cinq continents, de l'équateur jusqu'à plus de 50° de latitude Nord en Chine ; en plaine comme en montagne, du niveau de la mer à plus de 2700 mètres d'altitude en Inde ou au Népal.
La grande diversité des modes de culture du riz contribue à sculpter et diversifier les paysages de notre planète. L'image de la rizière où tous, hommes, femmes et enfants, repiquent le riz est celle de la riziculture irriguée. Ce type de riziculture couvre 55 % des surfaces cultivées et représente 75 % de la production mondiale c'est la forme de culture dominante en Asie, la seule pratiquée en Europe, en Amérique du Nord et en Australie. C'est généralement le type de riziculture le plus performant, avec des rendements moyens de 6 à 8 tonnes à l'hectare, mais qui exige des aménagements coûteux pour avoir la maîtrise de l'eau.
Pour repiquer le riz, la terre doit être préparée. Le labour permet d'enfouir les mauvaises herbes, d'ameublir la terre et de l'oxygéner. Ensuite, pour avoir une lame d'eau régulière sur toute la rizière, on doit la planer. Cette opération, effectuée en Asie à la main ou par traction animale, est réalisée en Camargue ou aux Etats-Unis à la lame niveleuse tirée par un tracteur et guidée par un faisceau laser.

Photographie de : Bùi Huy Trang

https://www.alamyimages.fr/la-culture-du-riz-les-semis-de-paddy-riz-tracteur-delta-de-l-ebre-province-de-tarragone-en-catalogne-espagne-30055514-legende-locale-image264309389.html

Le riz est d'abord semé, très serré, dans une pépinière à part, sur une petite parcelle ; 20 à 25 jours après, les plants sont soigneusement arrachés et repiqués en touffes de 3 à 5 brins dans la rizière. Chaque touffe doit avoir un espace suffisant pour bien se développer.
Avec le repiquage qui donne au riz une certaine avance végétative, le maintien d'une lame d'eau limite le développement des mauvaises herbes. Le cultivateur doit cependant veiller à maintenir la rizière propre, en désherbant régulièrement. Le repiquage des plants de riz en ligne facilite ce travail.
La moisson a lieu 30 jours environ après la floraison, et en général 100 jours après le repiquage. L'eau a été évacuée de la rizière une à deux semaines auparavant afin de favoriser la maturation et de faciliter la récolte.
Selon les régions ou les moyens du riziculteur, le riz est récolté en le fauchant avec sa paille ou en coupant seulement les panicules.

La prise de contact avec des scientifiques, producteurs et revendeurs a été une obligation pour s'assurer de l'exactitude des données récoltées, tant sur le cycle de vie des produits agricoles, leur besoin en eau, la nécessité en matière première ou bien les surfaces cultivées.

Notre zone de recherche se concentre à l'ensemble du bassin Rhône-Alpin et les zones à proximité tels que la Camargue ou bien la région du Piémont en Italie qui reste à une distance raisonnable de 300 km à vol d'oiseau.

L'Europe, consomme plus de riz qu'elle n'en produit, ce qui en fait le quatrième importateur mondial. L'Italie et l'Espagne en sont les principaux pays producteurs suivie par la Grèce, le Portugal et la France. En Italie, en Espagne et en France, on cultive diverses sortes de riz «Japonica», utilisées principalement pour la préparation du risotto.
L'Italie produit aujourd'hui 1 587 346 tonnes et L'Espagne 865 812 tonnes annuel (ISTAT 2019). Les régions italiennes de la Lombardie et du Piémont sont les principaux producteurs et fournisseurs d'Europe. La culture du riz débuta dès la première moitié du XVème siècle permettant la construction de canaux pour drainer les marécages dans ces territoires. Leonard De Vinci en construisît un dans la plaine du fleuve Pô. A la fin du XIXème siècle, Camille Benso, compte de Cavour se chargea d'établir le Canal Cavour qui emmènerait l'eau du fleuve Pô et du lac Maggiore vers d'autres rizières, comme celles du Vercelli-Alessandria, Pavia et Novara. Le riz « Japonica » (grain rond) est la variété qui, par tradition, se cultive le plus en Europe. Cependant, Le plus consommé reste le riz « Índica » (grain semi-long), surtout dans les pays nordiques. Mais cela est en train de changer progressivement, car des spécialités comme le riz long ou intégral viennent à occuper une meilleure position dans le classement des plus vendus. Dans le paysage piémontais, le maïs a été la culture principale en termes de surface investie (140 366 ha), suivi du riz avec 116 324 ha et enfin du blé avec 84 292 ha. Cependant, les surfaces plantées en riz ont diminué de 1,4 % par rapport

à 2016 (Confederazione italiana agricoltori Piemonte, 2019) en raison de l'augmentation des importations en provenance d'Asie du Sud-Est.

En Espagne le riz a été implanté dans la région de Valence depuis plus de dix siècles. Dans le Parc Naturel de l'Albufera, c'est dans une zone protégée offrant des conditions assez particulières, que le riz emblématique de la gastronomie espagnole est cultivé. La production de riz en Espagne est considérable, plus de 900.000 tonnes par an, il existe plusieurs grands bassins de production en plus de Valence. L'Aragon au nord, la région de Séville en Andalousie, la Catalogne et le delta de l'Ebre, ainsi que Murcia. Chaque région cultive les variétés qui sont les mieux adaptées au sol et au climat. Ancré dans la culture gastronomique locale, le riz n'est plus considéré comme un accompagnement, il sera élaboré avec tous les autres ingrédients que l'agriculture, la pêche et l'élevage fourniront. Les variétés cultivées les plus réputées sont le Bomba, le Bahia, le Senia, mais aussi le Gleva le Montsianell ou le Tebre. Preuve de la qualité cette expertise espagnole, plusieurs AOP et IGP identifient et protègent le riz hispanique.

Chaque étape - labourer, herser, niveler, semer, moissonner, battre et sécher le grain - nécessite de longues préparations et travaux préalables en plus de l'utilisation de machines appropriées.

La France produit également le riz camarguais rouge, célèbre pour sa couleur exceptionnelle. Les Français consomment près de six kilos de riz chaque année. Mais seul 13% du riz que nous consommons est cultivé en France, trois fois moins qu'il y a dix ans.

En Camargue, dans le delta du Rhône, inondé d'eau salée, le grenier à riz français s'applique à se perfectionner depuis maintenant 200 ans. Atteignant les 25 000 hectares de culture en 1994, les semis de riz en 2018 n'en couvraient plus que la moitié. Avec un rendement moyen d'environ 57 quintaux par hectare, la production de riz paddy français s'élève à 81075 tonnes (Syndicat des Riziculteurs de France et Filière, 2020). Les surfaces en agriculture biologique en France représentent 17% de l'ensemble rizicole.

Le riz est essentiellement cultivé en Camargue (2/3 dans les bouches du Rhône, 1/3 dans le Gard et d'autres petits riziculteurs dans l'Aude et en Guyane). Le riz de Camargue représente un chiffre d'affaires annuel de 80 millions d'euros et 2000 emplois stables tout en contribuant à la prospérité de la biodiversité en empêchant un désert salé de s'installer grâce aux marécages (SSP). L'endiguement du Rhône, qui avait été rendu nécessaire pour contrôler et contenir les crues, contraignait la Camargue à devenir un désert du fait de la salinisation des sols. La riziculture y a remédié car elle nécessite l'apport de grande quantité d'eau non salée (35 000 m³ d'eau à l'hectare soit 5 800 litres par kilo de riz produit). La quasi-totalité de l'eau prélevés annuellement dans le Rhône (quelque 500 millions de m³) irrigue les parcelles et les cultures. Cette eau est restituée au milieu naturel puisqu'elle repart dans le Rhône, dans les marais (lieux d'hébergement et d'alimentation de nombreux

oiseaux et poissons) ou dans la nappe phréatique.
La riziculture s'est intégré dans l'écosystème naturel de la Camargue, maintenant et préservant sa biodiversité. L'eau douce des irrigations limite l'impact du sel, participe au maintien des sols cultivables dans toute la région permettant, grâce aux rotations, les cultures de fourrage (herbes, luzernes, cannes...), de céréales, ou des oléagineux. Cette céréale qui pousse les pieds dans l'eau craint le froid, pas moins de 12 degrés autant qu'elle craint les chaleurs trop fortes et la sècheresse (pour cette raison que la culture par inondation et/ou irrigation est utilisée). Semé en avril, le riz est mature en septembre/octobre. En 2019, 160 exploitants cultivaient du riz en France, mais malheureusement depuis 2011, la production en Camargue a été divisée par deux, car cultiver du riz n'est plus rentable car La France et L'Europe ont arrêté de verser des subventions. Aujourd'hui, 85% du riz que nous consommons est importé d'Asie.

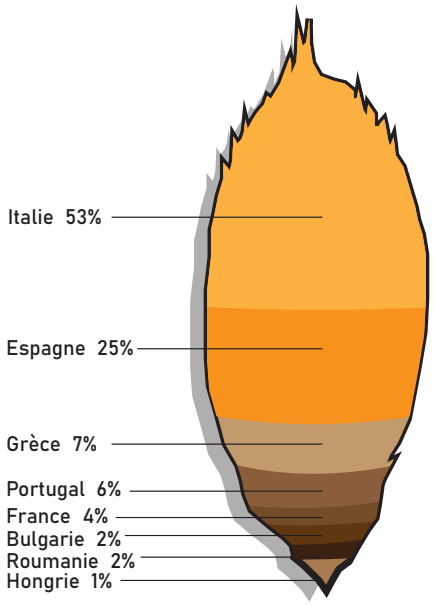



Fig. 15 : Répartition des surfaces de culture de riz en UE par état membre , 2018 (source : Eurostat)

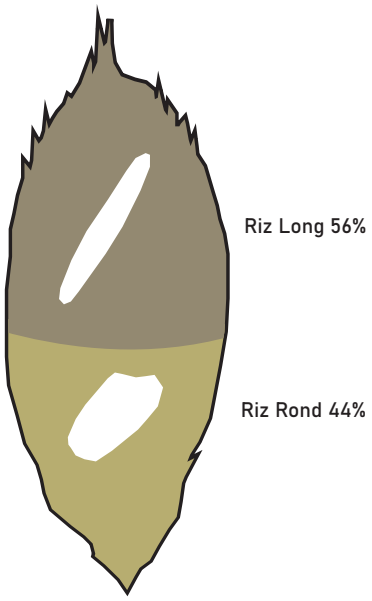


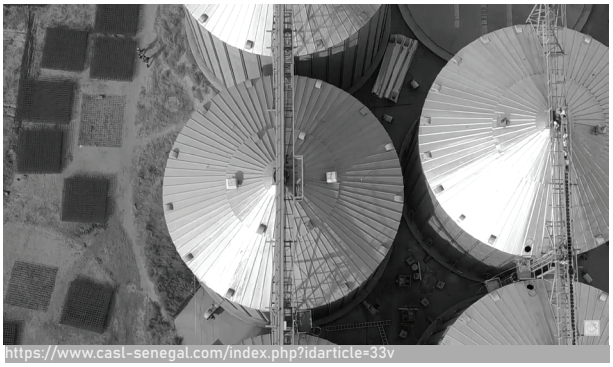

Fig. 16 : Variétés de types de riz cultivés en France, (source : Eurostat)

Après avoir passé en revue l'ensemble des principales rizières en Europe et à proximité du bassin Rhône-Alpin, nous pouvons nous rendre compte que la production du riz est une filière très importante qui possède de nombreux débouchés économiques. La commercialisation du riz évolue avec le temps et ne reste pas encré dans la seule vente de la céréale. Aujourd'hui, la présence sur le territoire français de grandes quantités de résidus et sous-produits organiques favorise la vente et la réutilisation de ses derniers sous forme par exemple de litière animale pour la balle et d'isolant ou combustible pour la paille de riz. Bien sur la culture du riz n'est pas la plus importante des cultures céréalières en métropole, mais la seule nous qu intéresse ici. L'ensemble de la culture se divise selon quatre grands acteurs :

- **Le Riziculteur**, personnage incontournable de la culture de la céréale, Il gère sa production, le nivellement du terrain pour semer les grains, la mise en eau, sont contrôle lors de la croissance jusqu'à la récolte finale.

https://lexpansion.lexpress.fr/actualites/1/actualite-economique/des-passionnes-du-japon-se-lancent-dans-la-production-de-sake-100-francais_1955633.html

- **L'Organisme Stockeur**, s'occupe du stockage et du séchage du grain. C'est une partie fondamentale qui nécessite une grande précaution, un contrôle constant et un brassage continue au risque de faire moisir le grain et de perdre une récolte entière.



https://www.casl-senegal.com/index.php?idarticle=33v

Fig. 17 : Silos-tour de stockage du grain de riz (2500 tonnes chacun)

- **Le Rizier** (transformateur), va décortiquer le riz pour le rendre commercialisable. Il va faire passer le grain dans des rouleaux pour séparer la balle, le germe et le son du grain, il va ensuite être poli, c'est le passage du grain paddy au grain blanc (dans le cas du grain complet, seul la balle est retirée).

https://fr.made-in-china.com/co_hncljx/product_Factory-Supply-Rice-Mill-Zhnmj-10t-Paddy-Huller-Rice-Milling-Machine_ehnogoiuy.html

Fig. 18 : Usine décortiqueuse de riz d'alimentation

- **Le Conditionneur**, s'occupe de mettre en sachet le riz pour le commercialiser à grande échelle.

https://lexpansion.lexpress.fr/actualites/1/actualite-economique/des-passionnes-du-japon-se-lancent-dans-la-production-de-sake-100-francais_1955633.html

Fig. 19 : Hangar de stockage des sacs de grain de riz

Chaque étape est très importante. Un défaut dans l'une d'entre elles pourrait jouer sur la qualité du produit fini, ce qui pourrait être résumé en fin de compte comme un manque à gagner direct pouvant mettre en péril l'ensemble de la chaine de production.

https://ec.europa.eu/info/index_fr

# 2. NORMES SUR LES SOUS-PRODUITS AGRICOLES

## Résumé

La valorisation des sous-produits agricoles est un passage indispensable pour permettre une diminution drastique des déchets tout en octroyant une valeur économique à un produit destiné à être jeté ou brûlé.
La Communauté Européenne a mis en place de nombreux décrets et normes pour limiter l'impact de l'homme sur l'environnement tout en favorisant son développement. Elle a pour cela défini les limites d'usage de certains produits et les a classés selon leur provenance et leur possible utilisation. On retrouve par exemple les définitions des mots : déchets, produits et sous-produits.
Selon La définition légale de déchet « Est un déchet toute substance ou tout objet, ou plus généralement tout bien meuble, dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire » (L541-1-1 CE). En se basant sur ce principe, la Directive-cadre européenne du 5 juillet 1975 oblige à prendre les mesures appropriées pour réduire et recycler les déchets et veiller à leur élimination. Ces mesures sont hiérarchisées selon cet ordre : le recyclage, la réutilisation, la valorisation énergétique et enfin l'élimination. Selon la loi, tout détenteur ou producteur de déchets est tenu d'en assurer la gestion. Ainsi les frais de traitement peuvent être rapidement onéreux.
Si une substance est produite intentionnellement, elle peut être catégorisée comme un produit. En revanche, si le résidu de production est utilisé selon des règles précises alors il peut être considéré comme un sous-produit. Afin de pouvoir faire correctement la distinction entre ces sous-produits et déchets, la Directive 2008/98 CE et le décret législatif EU 205/2010 définissent qu'un sous-produit : ne doit pas subir de traitement postérieur, doit faire partie d'un cycle de production d'une matière première et ne doit pas affecter l'environnement ni la santé humaine. À ce titre, il ressort que la balle de riz n'est pas considérée comme un composant dommageable et peut être considérée comme un sous-produit. Cela permet de pouvoir l'utiliser comme produit biosourcé dans la construction de bâtiments. La Directive 2008/98 CE ne fait pas mention de l'amidon de riz mais son utilisation n'est pas limitée au même titre que la balle de riz.
En France le Décret n°2012-518 du 19 avril 2012 met en place le label « Bâtiment Biosourcé » pour les bâtiments qui incorporent une part significative de biomatériaux. Il met en lumière la qualité environnementale de certains projets. On retrouve trois niveaux pour les bâtiments biosourcés, calculables grâce à la présence de tableaux pour définir la quantité de biomatériaux dans un édifice (kg/m²).
Pour accompagner la transition écologique et encourager la mise en place du label « Bâtiment Biosourcé » la France a appliqué le Décret Ministériel du 6 juillet 2012 qui prépare à l'après pétrole et instaure un modèle énergétique robuste et durable face aux enjeux d'approvisionnement en énergie, l'épuisement des ressources et aux impératifs de protection de l'environnement. Ce décret met aussi en application la diminution de 50% de la quantité de déchets d'ici à 2025.
Enfin en Italie, la définition de « produit » et « déchet » est bien plus tardive et vient s'appliquer grâce au Décret du 13 octobre 2016, ce dernier donne les mêmes spécifications que les décrets français précédents. En revanche la définition de « sous-produit » n'a pas évolué par rapport au Décret législatif 205/2010, stipulant que : les sous-produits doivent être documentés dans un dossier (valable trois ans), qui démontre la possession des exigences aux autorités de contrôle depuis la production du résidu jusqu'au moment de son utilisation. Les producteurs, les intermédiaires et les utilisateurs finaux devront préciser, dans un contrat en amont, l'activité ou les installations, où les résidus seront utilisés, y compris les modalités de stockage et de transport.
L'ensemble de ces textes de loi nous montrent que la réutilisation de la balle de riz et de l'amidon pour la réalisation du système « FUTURIZ » s'inscrit profondément en accord avec les nouvelles lois et normes en vigueur en Europe.

# 2. NORME PER I SOTTOPRODOTTI AGRICOLI

## Sintesi

Il recupero dei sottoprodotti agricoli è un processo essenziale per permettere una drastica riduzione dei rifiuti e dare un valore economico a prodotti destinati ad essere bruciati o conferiti in discarica.
La Comunità Europea ha messo in atto numerosi decreti e norme per limitare l'impatto dell'uomo sull'ambiente e promuovere lo sviluppo di processi in grado di riutilizzare gli scarti della produzione alimentare. A tal fine, sono stati definiti gli ambiti e limiti d'applicazione di alcuni prodotti e sono stati classificati secondo la loro origine e il loro possibile utilizzo. In questi documenti vengono spiegate dettagliatamente le differenze tra rifiuti, prodotti e sottoprodotti.
Secondo la definizione legale di rifiuto, «Qualsiasi sostanza o oggetto, o più in generale qualsiasi bene mobile, di cui il detentore si disfi o abbia l'intenzione o l'obbligo di disfarsi è un rifiuto» (L541-1-1 CE). Sulla base di questo principio, la direttiva quadro europea del 5 luglio 1975 richiede l'adozione di misure appropriate per ridurre e riciclare i rifiuti e assicurarne il corretto smaltimento. Queste misure sono ordinate gerarchicamente come segue: riciclaggio, riutilizzo, recupero di energia e infine smaltimento.
Per legge, ogni detentore o produttore di rifiuti è obbligato a gestirli: perciò, i costi del trattamento possono diventare facilmente un onere poco sostenibile dal punto vista economico ed ambientale. È qui che si manifesta la differenza tra «prodotto» e «sottoprodotto»: se una sostanza è prodotta intenzionalmente è classificata come prodotto, se invece il residuo di produzione viene considerato utilizzabile, allora questo può essere categorizzato come sottoprodotto. Per poter distinguere correttamente questi due termini, la direttiva 2008/98 CE e il decreto legislativo UE 205/2010 definiscono che un sottoprodotto "non deve subire ulteriori trasformazioni, deve far parte di un ciclo produttivo di una materia prima e non deve avere effetti sull'ambiente o sulla salute umana". Sulla base di questa definizione e dato che la lolla di riso non è un prodotto dannoso, può essere considerato come sottoprodotto. Tuttavia, questo non impedisce che venga utilizzato come prodotto a base organica nella costruzione di edifici. La direttiva 2008/98 CE non menziona l'amido di riso e il suo uso non è regolamentato allo stesso modo della lolla di riso.
In Francia, il decreto n°2012-518 del 19 aprile 2012 istituisce l'etichetta «Bâtiment Biosourcé» per gli edifici che incorporano una percentuale significativa di biomateriali. Successivamente, l'ordinanza applicativa del 19 dicembre 2012 ha completato il precedente decreto integrando tre livelli per gli edifici di origine biologica, che possono essere calcolati grazie alla presenza di tabelle per definire la quantità di biomateriali in un edificio (kg/m²).
Per sostenere la transizione ecologica e incoraggiare l'implementazione dell'etichetta «Bâtiment Biosourcé «, la Francia ha applicato il decreto ministeriale del 6 luglio 2012, che prepara l'era post-petrolifera e stabilisce un modello energetico solido e sostenibile di fronte alle sfide dell'approvvigionamento energetico, dell'esaurimento delle risorse e della protezione ambientale. Questo decreto incentiva inoltre una riduzione del 50% della quantità di rifiuti entro il 2025.
Infine, in Italia, la definizione di «prodotto» e «rifiuto» è molto più tardiva ed entra in vigore con il decreto del 13 ottobre 2016, fornendo le stesse specifiche dei precedenti decreti francesi. Tuttavia, la definizione di «sottoprodotto» non è cambiata rispetto al Decreto Legislativo 205/2010, che stabilisce che i sottoprodotti devono essere documentati in un file (valido per tre anni), che dimostra il possesso dei requisiti alle autorità di controllo dalla produzione del residuo al momento del suo utilizzo. I produttori, gli intermediari e gli utenti finali devono specificare, in un contratto a monte, l'attività o le strutture in cui i residui saranno utilizzati, comprese le modalità di stoccaggio e trasporto.
Tutti questi testi legali ci dimostrano che il riutilizzo della lolla di riso e dell'amido per la realizzazione del sistema «FUTURIZ» è profondamente in linea con le nuove leggi e norme in vigore in Europa.

Depuis le 6 juillet 2017 le « **PLAN CLIMAT** » mis en place par le gouvernement français, prévois d'intégrer l'écosystème et l'agriculture au centre de la lutte contre le changement climatique à travers trois grands points :

- L'agriculture pour lutter contre le changement climatique : Le système agricole doit évoluer pour réduire son empreinte carbone et améliorer le captage du carbone dans les sols.
- S'adapter : Comme preuve de résilience et afin d'informer et protéger les Français sur les futurs évènements climatiques extrêmes un nouveau Plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC) sera mis en place.
- En finir avec l'importation de produits contribuant à la déforestation : Des procédures sévères vont être mises en place pour arrêter l'importation de produits qui conduisent à la destruction de l'Amazonie, Asie du Sud Est et Bassin du Congo, les 3 plus grandes forêts tropicales du monde.

Ses décisions ont pour objectif de rendre l'accord de Paris irréversible et d'améliorer le quotidien des Français. Ses décisions doivent permettre de fixer un cap clair, stable et commun pour une juste création et répartition des valeurs tout en réconciliant agriculture et environnement.
Comme le souligne le gouvernement (Egalimentation.gouv.fr) lors de la publication du 20 juillet 2017, ce dernier est entré en accord avec les États généraux de l'alimentation dont l'objectif est de relever collectivement les défis de l'agriculture en France.
Aujourd'hui l'agriculture doit faire face à 4 enjeux mondiaux :

- La mondialisation des échanges : elle bénéficie à un grand nombre d'agriculteurs et d'industriels mais «le «prix» ou la contrepartie de cette ouverture, reste un aléa non contrôlable malgré tous les efforts déployés.»

- Le climat : inondation, gel, sécheresse, entre autres sont aujourd'hui «des phénomènes qui demeurent encore dans les bornes de l'exception mais qui, un jour, pourraient devenir la règle.»

- Le numérique : «Cette évolution sera comparable à celle de la mécanisation. Une chose est sûre : elle gagne le secteur de la distribution, celui du commerce inter-entreprises, des services à l'agriculture.»

- Le renouvellement des générations : «l'avenir de notre agriculture dépend en grande partie de notre capacité à susciter des vocations et à attirer et former des talents.»

La perte d'hérédité et de transmission de patrimoine agricole pourrait porter la France à des conditions encore méconnus.

## 2.1 Directive-cadre Européenne du 15 juillet 1975

Tout d'abord, il est nécessaire de préciser qu'en France, selon les chiffres les plus récents de l'ADEME (L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie), la production de déchets moyen par habitant et par an est de 4,9 tonnes par habitant. Même si ce chiffre est en baisse (-6,5 % entre 2007 et 2017) il reste conséquent.

Le traitement des déchets est donc un impératif de santé publique mondial d'urgence absolue, il est ainsi « un levier essentiel de la transition vers une économie circulaire » (L541-1 I CE).
La législation de l'articles L541-1 applicable en France c'est fortement inspiré du droit de l'Union Européenne en s'imposant aux Etats-membres avec la directive-cadre du 15 juillet 1975. Cette dernière oblige de prendre les mesures appropriées pour promouvoir la prévention et le recyclage des déchets ainsi que de veiller à leur élimination sans danger par leur détenteur. Elles seront ultérieurement précisées dans le Code de l'Environnement
« la priorité consiste à prévenir et réduire la production et la nocivité des déchets » (L541-1 II 1°), à travers une hiérarchisation claire pour ce qui concerne les modes de traitement : recyclage, réutilisation, valorisation énergétique ou élimination.
Il est bon de rappeler que selon la loi « tout producteur ou détenteur de déchets est tenu d'en assurer ou d'en faire assurer la gestion » et « est responsable de la gestion de ces déchets jusqu'à leur élimination ou valorisation finale, même lorsque le déchet est transféré à des fins de traitement à un tiers » (L541-2). De ce fait dès lors qu'un produit vient catégorisé comme déchet les frais de traitement peuvent être rapidement très onéreux.
Selon La définition juridique de déchet « Est un déchet toute substance ou tout objet, ou plus généralement tout bien meuble, dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire » (L541-1-1 CE).
La non-conformité au traitement des déchets peut entraîner des sanctions financières ou autres amendes administratives, sans exclure la responsabilité de droit commun et l'application des sanctions pénales du droit pénal spécial de l'environnement (art 541-3 CE).

Dans le cadre de la gestion des déchets le Code de l'Environnement exclut de façon automatique certains éléments tel que la paille et autres matières naturelles non dangereuses issues de l'agriculture ou de la sylviculture et qui sont utilisées dans le cadre de l'exploitation agricole ou sylvicole.
Toutefois il existe une réelle différence entre un résidu de production et une substance produite intentionnellement car si tel est le cas la substance produite n'est pas un déchet mais un produit.
Dans certains cas le résidu de production peut ne pas être considéré comme un déchet dans le cas ce dernier serait réutilisé dans des conditions satisfaisantes pour l'environnement. Il entre dans ce cas dans la catégorie de sous-produit.

Même sans être produit intentionnellement le sous-produit a pour vocation d'être utilisé au même titre que le produit d'origine. Les conditions pour pouvoir répondre à ce critère sont listés par l'article L541-4-2 du code de l'environnement. Il y est mentionné la définition de sous-produit tel que « une substance ou un objet issu d'un processus de production dont le but premier n'est pas la production de cette substance »
Dans le cas où l'ensemble des critères suivants sont remplis :

- L'utilisation de la substance ou objet doit être certaine
- Elle doit pouvoir être utilisé sans traitement ultérieur autres que celles industrielles courantes
- Sa production fait partie du processus de production d'une matière première
- La substance ou objet n'affectera d'aucune sorte l'environnement ou la santé humaine.

Malgré tous ces critères sont quelque peu sujet à interprétation ce qui rend parfois ce passage de statut un peu aléatoire

## 2.2 Directive 2008/98/CE et Décret législatif 205/2010

D'un point de vue législatif, la définition de sous-produit a été établie il y a peu, elle vient à nouveau défini et quelque peu étoffée avec le **Décret législatif n.205 du 3 décembre 2010** intitulé «*Dispositions d'application de la directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets et abrogeant certaines directives*». Le décret législatif 205/2010 a mis en œuvre l'exigence précédente et a redéfini la signification du déchet conformément à la directive européenne de 2008 ; en particulier, l'art. 184-bis, a introduit les quatre exigences qu'une substance doit posséder pour être identifiée comme un sous-produit et non comme un déchet :

- la substance ou l'objet provient d'un processus de production dont il fait partie intégrante et dont le but premier n'est pas la production de cette substance ou de cet objet ;

- il est certain que la substance ou l'objet sera utilisé, dans le même processus de production ou d'utilisation ou dans un processus ultérieur, par le producteur ou par un tiers ;

- la substance ou l'objet peut être utilisé directement sans autre traitement que les pratiques industrielles normales ;

- l'utilisation ultérieure est légale, c'est-à-dire que la substance ou l'objet satisfait, pour l'utilisation spécifique, à toutes les exigences pertinentes en matière de protection des produits, de la santé et de l'environnement et n'entraînera pas d'effets négatifs globaux sur l'environnement ou la santé humaine.

Ce décret a encouragé l'utilisation des sous-produits à des fins énergétiques, mais il n'est pas considéré comme l'acte final dans le domaine des déchets, car elle a présenté des difficultés d'interprétation et d'application. Certains éléments sont assez vagues comme le rapport entre matière première et la quantité de sous-produit récupéré.

Lors de la création de certains produits industriel la quantité de matière résiduelle est supérieure à celle du produit principal, il existe donc un risque pour que ce « déchet » ne sois pas considéré comme tel mais comme un élément à part entière du produit fini.

Selon le **Règlement n°1013/2006 du 14/06/06** concernant les transferts des déchets, la **directive 2008/98/CE** du Parlement Européen et du conseil, du 19 novembre 2008 relatif au déchets en particulier l'article 5, ainsi que les lignes guide d'interprétation des principales dispositions de la directive 2008/98/CE de la Commission européenne sur les déchets de juin 2012, il ressort clairement de ces documents que la balle de riz n'est plus considérée comme un déchet qui doit être éliminé dans les décharges, mais comme un déchet non dommageable qui peut donc être réutilisé dans des activités de valorisation simplifiées.

Parmi ceux-ci, cependant, seule l'utilisation de la balle de riz comme fond des étables dans les fermes d'élevage est mentionnée.

En France, et maintenant depuis plusieurs années, le **Décret n°2012-518 du 19 avril 2012,** a modifié le code de la construction et de l'habitation. L'intitulé de la section 4 du chapitre Ier du titre Ier du livre Ier est remplacé par l'intitulé suivant : « Section 4.
Performance énergétique et environnementale et caractéristiques énergétiques et environnementales ».

Un label « Bâtiment Biosourcé » existe depuis quelques années et garantie la qualité environnementale des projets qui incorporent une part significative de biomatériaux.
Ces derniers (bois, chanvre, balle de riz, paille, laine de mouton, plumes…) sont naturels, renouvelables et participent à la diminution des émissions de gaz à effet de serre.

Depuis quelques années, le ministère de l'Ecologie, du Développement durable, des Transports et du Logement soutient les acteurs de ces différentes filières, grâce à l'édition de règles professionnelles d'exécution d'ouvrages, ayant pour objectif une reconnaissance de cette pratique. En 2008, la Commission européenne a mandaté le Comité européen de normalisation afin qu'il propose

un programme d'élaboration de normes relatives aux produits biosourcés.
Ainsi en 2009, le ministère français a mené une vaste consultation publique sur le développement de 18 filières vertes d'avenir, dont « Le bâtiment à faible impact environnemental » et « Biomasse, valorisation matériaux ».

Le label « Bâtiment biosourcé » a été créé afin de mettre en lumière la qualité environnementale de certains projets et de valoriser, sans pour autant accompagner, les démarches volontaires des maîtres d'ouvrages qui intègrent des biomatériaux, participant ainsi à une modification des consciences dans le milieu professionnel et accélérant la transition écologique.

**L'Arrêté d'application du 19 décembre 2012** modifie quelques éléments du précédent décret tout en intégrant des définitions comme celle de « Biomasse » : une matière d'origine biologique, à l'exception des matières de formation géologique ou fossile ; ou bien encore « Matière biosourcée » : une matière issue de la biomasse végétale ou animale pouvant être utilisée comme matière première dans des produits de construction et de décoration, de mobilier fixe et comme matériau de construction dans un bâtiment.
Il Intègre aussi trois niveaux pour le label « Bâtiment Biosourcé ».

Ces derniers sont résumés dans l'article 4 sous forme de tableau :

| Type d'usage principale | Taux d'incorporation de matières biosourcées du label «bâtiment biosourcé» (kg/m² de surface de plancher) | | |
|---|---|---|---|
| | 1er niveau 2013 | 2ème niveau 2013 | 3ème niveau 2013 |
| Maison individuelle | 42 | 63 | 84 |
| Industrie, stockage, service de transport | 9 | 12 | 18 |
| Autres usages (bâtiments collectifs d'habitation, hébergement hôtelier, bureaux, commerces, enseignement...) | 18 | 24 | 36 |

Tab. 13 : Récapitulatif des quantités minimales de matières biosourcés pour chaque type d'usage des bâtimens pour obtenir le Label «Bâtiment Biosourcé»

Dans l'Article 5 il est cité « Pour obtenir le premier niveau du label, il est exigé la mise en œuvre d'au moins deux produits de construction biosourcés appartenant ou non à la même famille et remplissant des fonctions différentes au sein du bâtiment telles que définies dans l'annexe IV.
Pour obtenir le deuxième niveau et le troisième niveau du label, il est exigé la mise en œuvre d'au moins deux familles de produits de construction biosourcées. »
L'Article 6 quant à lui permet de définir le calcul de masse d'élément biosourcé « Le calcul de la masse de matière biosourcée prend en compte le contenu biosourcé de tout produit de construction biosourcé et tout mobilier fixe

incorporés dans un bâtiment à la date de son achèvement, sous réserve que ce produit ou mobilier fixe ait les caractéristiques suivantes :

- il fait l'objet d'une déclaration de ses impacts environnementaux ; la déclaration environnementale établie selon la norme NF P 01-010 : 2004 sur l'ensemble de son cycle de vie est présumée conforme aux exigences du présent arrêté ;
- dans le cas d'un bâtiment à usage principal autre qu'agricole, s'il entre dans le champ d'application du décret du 23 mars 2011 relatif à l'étiquetage des produits de construction ou de revêtement de mur ou de sol et des peintures et vernis sur leurs émissions de polluants, il est classé A ou A + au sens de l'arrêté du 19 avril 2011 relatif à l'étiquetage des produits de construction ou de revêtement de mur ou de sol et des peintures et vernis sur leurs émissions de polluants volatils ;
- dans le cas où il est composé de bois et/ ou de ses dérivés, il dispose de documents attestant la gestion durable des forêts dont le bois et/ ou ses dérivés sont issus. Les marques de certification forestière attestant que les approvisionnements sont issus de forêts gérées durablement peuvent également constituer des modes de preuve. »

## Annexe IV : RATIOS PAR DÉFAUT POUR ESTIMER LA MASSE DE MATIÈRE BIOSOURCÉE CONTENUE DANS DES PRODUITS DE CONSTRUCTION BIOSOURCÉS MIS EN ŒUVRE DANS UN BÂTIMENT

| FONCTION | PRODUIT | DESCRIPTION | CARATÉRISTIQUE DIMENSIONNELLE | | RATIO PAR DÉFAUT |
|---|---|---|---|---|---|
| Aménagements extérieurs | Aménagements extérieurs en bois | Lame de platelage extérieur en bois massif, clouées, vissées ou fixées par système invisible sur lambourdes ou solivage porteur bois. Terrasses extérieurs en bois massif | Exprimée en surface nette | m² | 10kg/m² |
| Structure, maçonnerie gros œuvre, charpente | Charpente traditionnelle en bois reconstitué | Charpentes en bois massif ou lamellé-collé en fermes, portiques y compris pannes et chevrons, ossatures de noues, croupes et autres accidents de toiture | Exprimée en surface projetée au sol, y compris débords, quelle que soit la pente | m² | 20kg/m² |
| | Charpente industrielles | Charpentes en fermettes ou poutres en , y compris entretoises, écharpes, ossatures de noues, croupes et autres accidents de toiture. En cas d'entraits porteurs (combles habitables), la surface des planchers est à compter en sus au titre des planchers bois | Exprimée en surface projetée au sol, y compris débords, quelle que soit la pente | m² | 15kg/m² |
| | Plan d'ossature bois porteur | Ossature bois porteuses incluant semelles, montants, traverses, écharpes, lisses et voile travaillant | Exprimée en surface nette après déduction des baies | m² | 15kg/m² |
| | Ossatures poteaux-poutres | Poteaux poutres et fiches en bois massif ou lamellé collé de toutes sections pour réfends, porches auvents, appentis, balcons, etc... | Exprimé en mètres linéaires développés d'éléments verticaux, horizontaux ou obliques | ml | 12,5kg/m² |
| | Mur en bois massif contrecollé | Mur porteur en bois massif plein, y compris lisse, basse et chaînage | Exprimé en surface nette après déducion des baies | m² | 40kg/m² |
| | Plancher bois porteur | Plancher à solivage bois, y compris platelage en parquet de bois lamellé-collé et de bois massif reconstitué dérivés du bois porteur. Les parquets rapportés sont comptés ailleurs. | Exprimé en surface nette après déducion des trémies | m² | 25kg/m² |
| | Plancher porteur en bois massif | Plancher porteur en bois massif plein. Les parquets rapportés sont comptés ailleurs | Exprimée en surface nette après déduction des trémies | m² | 65kg/m² |
| | Escalier bois | Escaliers en bois massifs, bois lamellé-collé en bois massif reconstitué et panneaux dérivés du bois de tout types (droits, à quartier tournant, colimaçon, échelle de meunier, etc...), y compris rampes et mains courantes | Exprimée en produit de la hauteur d'étage en mètres, mesurée de sol fini à sol fini par la largeur d'emmarchement | m² | 30kg/m² |
| Revêtement de sols et murs, peintures, produits de décoration | Béton de chanvre | Béton de chanvre utilisé en tant que matériau de remplissage, isolation des sols, murs et toiture | Exprimée en volume de béton de chanvre | m² | 100kg/m² |
| | Panneau de paille compressé | Panneau de paille compressé de toutes dimensions utilisé en mur, cloisons, planchers, plafonds ou toiture | Exprimé en surface nette après déduction des baies | m² | 20kg/m² |
| | Plinthes en bois | Plinthes en bois massif, bois lamellé-collé ou bois massif reconstitué ou dérivés du bois de toutes sections | Exprimé en surface de locaux concernés | m² | 1kg/m² |
| | Parquet bois massif | Parquet massif pose bois bois flottant | Exprimé en surface de plancher pour une épaisseur minimale de 2 cm | m² | 10kg/m² |

Tab. 14 : Récapitulatif du calcul des masses des éléments biosourcés en fonction des materiaux de construction pour l'obtention du Label «Bâtiment Biosourcé»

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Parquet massif sur lambourdes | Parquet massif , pose traditionnel sur lambourdes, les parquets porteurs directement posés sur un solivage porteur sont comptés dans l'ouvrage «plancher bois porteur» | Exprimée en surface nette après déduction des trémis | m² | 15kg/m² |
| | Autre parquet | Parquet rapporté en bois massif, bois lamellé-collé, bois massif reconstitué , ou dérivés du bois, généralement finis, pose flottante ou collé. les parquets porteurs directement posés sur un solivage porteur sont comptés dans l'ouvrage «plancher bois porteur» | Exprimée en surface nette après déduction des trémis | m² | 7,5kg/m² |
| | Lambris bois et reconstitués | Lambris intérieurs de murs et plafonds en bois massif, bois lamellé-collé ou bois massif reconstitué ou dérivés du bois de toutes épaisseurs, y compris contre-lattage et ossature | Exprimée en surface nette après déduction des baies et des trémis | m² | 7,5kg/m² |
| Aménagements extérieurs | Mains courantes | Mains courantes en bois, bois massif, bois massif reconstitué ou bois lamellé-collé ou dérivés du bois de toutes sections | Exprimée en mètres linéaires de mains courantes | ml | 1,5kg/m² |
| | Fenêtres, portes-fenêtres en bois | Fenêtres, portes-fenêtres, châssis fixes et châssis de toit en bois, éventuellement habillé d'autres matériaux (bois-alu), dont les parties vitrées représentent plus de 50% de la surface. Comprend les habillages et tapées éventuels | Exprimée en surface de tableau | m² | 12,5kg/m² |
| | Garde-corps en bois | Garde-corps en bois à balustres, lisses, croisillons, etc. les rampes et gardes-corps d'escalier sont à reprendre ici | Exprimée en mètres linéaires de garde-corps | m² | 15kg/m² |
| | Portes extérieurs pleines en bois | Portes d'entrée, de garage ou de service en bois, éventuellement pourvues de parties vitrées représentant moins de 50% de la surface. Comprend les habillages et tapées éventuels | Exprimée en surface de tableau | m² | 17,5kg/m² |
| | Huisseries en bois | Huisseries en bois pour bloc-portes intérieurs | Forfaitisée à l'unité, quelles que soient les dimensions | Unité | 10kg/unité |
| | Portes intérieurs en bois | Portes intérieurs en bois, pleines ou menuisées, éventuellement vitrées. Les huisseries sont sont comptées ailleurs | Forfaitisée par vantail, quelles que soient les dimensions | Unité | 12,5kg/unité |
| | Occultations en bois | Volets en bois pleins ou persiennes avec ou sans écharpes | Exprimée en surface de tableau | m² | 15kg/m² |
| | Ossatures et lames de claustras extérieurs brise soleil | Ossature de claustra comprenant structure porteuse et lames brises soleil | Exprimée en surface occultée | m² | 17,5kg/m² |
| Façades | Sous-face de débord | Habillages en sous-face des débords de toits, porches, apprentis, réalisés en bois ou panneaux dérivés du bois de toutes épaisseurs, y compris contre-lattage | Exprimée en surface de rampant | m² | 7,5kg/m² |
| | Bardage en lames de bois | Bardages extérieurs en lames de bois massif, bois massif reconstitué, bois lamellé-collé ou de dérivés du bois horizontales, verticales ou obliques. Toutes épaisseurs, y compris contre-lattage | Exprimée en surface nette après déduction des baies | m² | 12,5kg/m² |
| | | | | | |

Tab. 14 : Récapitulatif du calcul des masses des éléments biosourcés en fonction des materiaux de construction pour l'obtention du Label «Bâtiment Biosourcé»

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Bardage en panneaux dérivés du bois | Parement extérieur en panneau dérivé du bois, y compris contre-lattage. le panneau est éventuellement enduit | Exprimée en surface nette après déduction des baies | m² | 7,5kg/m² |
| | Support d'isolation extérieur | Support d'isolation en bois massif reconstitué et bois lamellé-collé ou dérives du bois de toutes sections, y compris chevrons | Exprimée en surface nette après déduction des baies | m² | 2,5kg/m² |
| Isolation | Isolants à base de fibres végétales (chanvre, lin, coton, ouate de cellulose, fibre de bois) | Panneaux souples, rouleau ou vrac pour isolation ou complément d'isolation des sols, cloisons, toitures ou plafonds | Exprimée en volume net d'isolant | m³ | 25kg/m³ |
| | Isolants à base de fibres végétales (chanvre, lin, coton, ouate de cellulose, fibre de bois) | Panneaux rigides pour isolation ou coomplément d'isolation des sols, cloisons, toitures ou plafonds | Exprimée en volume net d'isolant | m³ | 110kg/m³ |
| | Petites bottes de paille ou paillettes en vrac tassées | Petite bottes de paille ou paillette en vrac tassées pour isolation ou complément d'isolation des sols, ccloisons, toitures ou plafonds | Exprimée en surface nette de paroi isolée après déduction des baies | m² | 40kg/m² |
| | Grosses bottes de paille | Grosses bottes de paille pour isolation ou complément d'isolation des sols, cloisons, toitures ou plafonds | Exprimée en surface nette de paroi isolée après déduction des baies | m² | 80kg/m² |
| Couverture, étanchéité | Couverture à support discontinu | Support de couverture en liteaux ou voliges non jointives de toutes sections, y compris planches de rives. Un support est considérée comme discontinu si les espacements représentent plus de 50% de la surface totale | Exprimée en surface de rampant | m² | 2,50kg/m² |
| | Couverture à support continu | Platelage en voliges, planches en bois massif reconstitué et bois lamellé-collé ou de dérives du bois de toutes épaisseur, y compris planches de rives. Un support est considéré comme continu si les espacements éventuels représentent moins de 50% de la surface totale. | Exprimée en surface de rampant | m² | 10kg/m² |
| Cloisonnement, plafonds suspendus | Ossature bois non porteuse | Ossature bois pour cloisons, contre cloisons ou isolation par l'extérieur incluant semelles, montant, travers et lisses | Exprimée en surface nette après déduction des baies | m² | 7,5kg/m² |
| Divers | Divers | Forfait à compter lorsqu'il existe divers ouvrages en bois massif reconstitué et bois lamellé-collé ou de érives du bois (cache-tuyaux, coffres de volets roulants, coffreages perdus,etc...) | Exprimée en surface de plancher de bâtiment | m² | 1kg/m² |

Tab. 14 : Récapitulatif du calcul des masses des éléments biosourcés en fonction des materiaux de construction pour l'obtention du Label «Bâtiment Biosourcé»

## 2.3 Décret Ministériel Français du 6 juillet 2012

Le modèle économique français s'oriente vers un modèle plus vertueux et durable afin de lutter contre le changement climatique et la raréfaction de certaines ressources.
Les matériaux biosourcés étant des ressources naturelles de proximité et renouvelables, elles contribuent au développement économique des territoires.
Les Pouvoirs Publics encouragent par des actions concrètes le développement de ces nouvelles filières, l'utilisation de matériaux biosourcés et l'éco-construction.
Porté par les ministères de la Transition écologique et solidaire et de la Cohésion des territoires et mis en vigueur par le Décret n° 2012-518 du 19 avril 2012 et l'arrêté d'application du 19 décembre 2012, le label Bâtiment biosourcé certifie l'intégration d'une part non négligeable de matériaux biosourcés dans la construction. Ce label valorise les ouvrages des maîtres d'ouvrage s'appropriant les matériaux biosourcés.
La Loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) vise à « préparer à l'après pétrole et à instaurer un modèle énergétique robuste et durable face aux enjeux d'approvisionnement en énergie, à l'évolution des prix, à l'épuisement des ressources et aux impératifs de la protection de l'environnement, tout en favorisant le recours aux énergies renouvelables et aux matériaux durables pour la construction ». Un des éléments qui est particulièrement intéressant dans notre projet de thèse et qui constitue un impératif à court terme est celui de la réduction de 50 % de la quantité de déchets mis en décharge à l'horizon 2025 ainsi que découpler progressivement la croissance économique et la consommation en matières premières. Ainsi elle permettra la création de 100 000 emplois à court terme et plus de 200 000 à l'horizon de 2030.

## 2.4 Décret Italien du 13 octobre 2016, n. 264

Il est important de souligner qu'en Italie la caractérisation des résidus de production comme sous-produits et non comme déchets est en avance par rapport à d'autre pays européen. Elle ne fût pourtant pas la première ni la plus avancé dans ce secteur, à l'instar de pays comme la France. Pour justifier cette affirmation nous pouvons citer le Décret du 13 octobre 2016, n°264 entré en vigueur le 2 mars 2017 et intitulé "Regolamento recante criteri indicativi per agevolare la dimostrazione della sussistenza dei requisiti per la qualifica dei residui di produzione come sottoprodotti e non come rifiuti" - «Règlement établissant des critères indicatifs destinés à faciliter la démonstration de l'existence des conditions requises pour que les résidus de production soient classés comme sous-produits et non comme déchets». On y voit la définition de « produit » et de « déchet » alors que la définition de « sous-produit » est restée la même. Les quatre conditions générales prévues par l'article 184-bis du décret législatif 205/2010, doivent être documentées dans un dossier (valable trois ans), qui démontre la possession des exigences aux autorités de contrôle depuis la production du résidu jusqu'au moment de son utilisation. Les producteurs, les intermédiaires et les utilisateurs finaux (inscrits sur les listes de la Chambre de commerce) devront préciser, dans un contrat en amont, l'activité ou les installations où les résidus seront utilisés, y compris les modalités de stockage et de transport.

En ce qui concerne les pratiques industrielles normales, les activités intégrées telles que le lavage, le hachage, le séchage, la fermentation naturelle, etc. sont considérées comme appropriées. Les opérations qui visent à corriger les caractéristiques du produit fabriqué ne sont pas conformes à la réglementation sur les sous-produits (par exemple, l'extraction de la lignine ou de la silice de la paille), dans ce cas, la substance doit être considérée comme dérivant des opérations de récupération.

En conclusion, il est donc possible d'affirmer que la balle de riz n'est plus considérée comme un déchet, mais plutôt comme un sous-produit qui peut être utilisé dans différents secteurs, dont celui de la construction.

# 3. NORMES SUR LE CIMENT ET LES BLOCS EN CIMENT

## Résumé

Bien que la filière du bâtiment et de la construction soit une des filières les plus polluantes, elle est aussi une des premières filières en termes d'engagement sur la voie de la décarbonisation.
Depuis 2010 le commissariat général au Développement Durable du Ministère chargé de l'écologie (CGDD) promulgue l'ensemble des matériaux biosourcés comme essentiels à la transition vers une économie durable. Ces derniers ont un fort potentiel en quantité d'emplois et à haut taux de croissance économique car ils s'épanouissent sur des filières économiques locales. Même si le « Plan de rénovation énergétique » ou la Réglementation environnementale de 2020 (RE 2020) sont de bonnes opportunités pour l'utilisation de matériaux biosourcés, la raison réelle à leur futur épanouissement reste leur impact carbone faible.
La loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) spécifie que « L'utilisation des matériaux biosourcés participe significativement au stockage de carbone atmosphérique et à la préservation des ressources naturelles. Elle est encouragée par les pouvoirs publics lors de la construction ou de la rénovation des bâtiments. » (Article 14). Affirmant la place centrale des matériaux biosourcés dans les performances environnementales.
En 2018, par le biais de « Construire en chanvre », la filière chanvre a pu bénéficier du soutien du programme PACTE afin de rédiger de nouvelles règles professionnelles, la détermination de nouvelles classes de résistance au feu et la rédaction de guides pédagogiques. Grâce à ces aides financières et législatives, les filières du bâtiment se structurent et leur présence de ces matériaux s'accroît de jour en jour.
L'ensemble des nouvelles constructions doivent faire preuve d'exemplarité énergétique et environnementale et doivent chaque fois que possible être à énergie positive et à haute performance environnementale. Les collectivités territoriales peuvent octroyer prioritairement des aides aux bâtiments à énergie positive ou faisant figure d'exemple (Article 8 II de la transition énergétique pour la croissance verte).
Outre les normes en vigueur sur l'engagement environnemental on peut trouver des normes qui s'appliquent directement aux structures portantes ou les éléments qui les composent ainsi que celles s'appliquant aux ciments et bétons.
La NF EN 197-1 d'avril 2012 - composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants, définit et présente les caractéristiques spécifiques de 27 ciments courants et de leurs constituants. Les définitions incluant les proportions de chaque constituant doivent être associées pour obtenir ces ciments dans une plage de 9 classes de résistance. La définition inclut également les exigences auxquelles les constituants doivent satisfaire (exigences mécaniques, physiques et chimiques).
En ce qui concerne la résistance mécanique, c'est-à-dire la résistance à la compression, il faut attendre un délai de 28 jours à la réalisation du mix. Par résistance initiale, en revanche, la norme fait référence à la résistance à la compression à 2 et 7 jours de la réalisation.
En plus de celles du ciment les normes s'appliquent, dans notre cas, aussi à la conformité dans la réalisation de blocs en béton et en particulier dans celle de la réalisation de blocs en béton et matériaux biosourcés. Pour le respect de ces normes et pour assurer au producteur comme au consommateur une qualité minimum du produit fini, le marquage devient un élément incontournable et obligatoire au sein de la communauté européenne comme au niveau national. On observe à ce jour principalement deux marquages, le marquage CE valable au niveau européen (correspond à une directive obligatoire pour entrer sur le marché Européen) et le marquage NF (gage de qualité permettant le plus souvent d'obtenir un produit fini supérieur à la norme CE) valable au niveau français. Ces marquages recensent des directives en matière de santé, de sécurité et de l'environnement.

# 3. NORME SU CEMENTO E BLOCCHI DI CEMENTO

## Sintesi

Sebbene il settore dell'edilizia e delle costruzioni sia uno dei più inquinanti, è anche uno dei settori leader in termini di impegno per la decarbonizzazione.
Dal 2010, la Commissione Generale per lo Sviluppo Sostenibile del Ministero dell'Ecologia (CGDD) promuove tutti i materiali *biobased* come essenziali per la transizione verso un'economia sostenibile.
Questi materiali hanno un alto potenziale in termini di occupazione e crescita economica poiché fioriscono nei settori economici locali. Anche se il «Piano di rinnovamento energetico» o il Regolamento ambientale 2020 (ER 2020) sono buone opportunità per l'uso di materiali *biobased*, la vera ragione del loro sviluppo futuro rimane il loro basso impatto di carbonio.
La legge n° 2015-992 del 17 agosto 2015 sulla transizione energetica per la crescita verde (LTECV) specifica che «L'uso di materiali *biobased* contribuisce significativamente allo stoccaggio del carbonio atmosferico e alla conservazione delle risorse naturali. È incoraggiato dalle autorità pubbliche durante la costruzione o la ristrutturazione degli edifici». (Articolo 14), affermando la centralità dei materiali *biobased* nella performance ambientale.
Nel 2018, attraverso «Costruire con la canapa», il settore della canapa ha potuto beneficiare del sostegno del programma PACT per la redazione di nuove regole professionali, la determinazione di nuove classi di resistenza al fuoco e la redazione di guide educative. Grazie a questi aiuti finanziari e legislativi, il settore dell'edilizia sta diventando più strutturato e la presenza di questi materiali aumenta di giorno in giorno.
Tutti i nuovi edifici devono essere esemplari in termini di prestazioni energetiche e ambientali e devono, ove possibile, essere ad energia positiva e ad alte prestazioni ambientali. Le autorità locali e regionali possono concedere aiuti prioritari agli edifici ad energia positiva o agli edifici che danno l'esempio (articolo 8 II della transizione energetica per la crescita verde).
Oltre alle norme in vigore sull'impegno ambientale, ci sono norme che si applicano direttamente alle strutture portanti o agli elementi che le compongono, così come quelle che si applicano ai cementi e ai calcestruzzi.
NF EN 197-1 dell'aprile 2012 - composizione, specifiche e criteri di conformità per i cementi comuni definisce e presenta le caratteristiche specifiche di 27 cementi comuni e i loro costituenti. Le definizioni includono le proporzioni di ogni costituente che devono essere combinate per ottenere questi cementi in una gamma di 9 classi di resistenza. La definizione include anche i requisiti che i costituenti devono soddisfare (requisiti meccanici, fisici e chimici).
Oltre alle norme sul cemento, nel nostro caso, le norme si applicano anche alla conformità nella realizzazione di blocchi di cemento e in particolare nella realizzazione di blocchi di cemento con materiali *biobased*. Per rispettare queste norme e garantire una qualità minima del prodotto finito sia per il produttore che per il consumatore, la marcatura è obbligatorio nella comunità europea e a livello nazionale. Ad oggi, esistono due tipi principali di marcatura: la marcatura CE, che è valida a livello europeo (corrisponde ad una direttiva obbligatoria per l'entrata nel mercato europeo) e la marcatura NF (una garanzia di qualità che il più delle volte permette ad un prodotto finito di essere superiore alla norma CE), che è valida sul territorio francese. Queste marcature identificano le direttive in termini di salute, sicurezza e ambiente.

La filière du bâtiment et de la construction, malgré qu'elle soit une des filières les plus polluantes, est aujourd'hui une des premières filières en terme d'engagement sur la voie de la décarbonisation.
En 2010, le Commissariat Général au Développement Durable du Ministère en charge de l'Écologie (CGDD) promulgue l'utilisation des matériaux biosourcés comme «un outil essentiel» à la transition vers une économie durable, à fort potentiel en quantité d'emplois futurs et à haut taux de croissance économique (Les filières industrielles stratégiques de l'économie verte) car s'épanouissant sur des filières économiques locales. Afin de lever les freins au développement et d'accompagner les maitres d'ouvrage dans leurs démarches de nombreux travaux portés par l'Etat ont été menés (à travers notamment les Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DREAL) et la Direction de l'habitat, de l'urbanisme et des paysages (DHUP)).
Même si le «Plan de rénovation énergétique» ou la Réglementation Environnementale de 2020 (RE 2020) sont de bonnes opportunités pour l'utilisation de matériaux biosourcés, la raison réelle à leur futur épanouissement reste leur impact carbone faible.
La loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) spécifie que « L'utilisation des matériaux biosourcés participe significativement au stockage de carbone atmosphérique et à la préservation des ressources naturelles. Elle est encouragée par les pouvoirs publics lors de la construction ou de la rénovation des bâtiments. » (Article 14). Affirmant la place centrale des matériaux biosourcés dans les performances environnementales.

En 2018, par le biais de «Construire en chanvre», la filière chanvre a pu bénéficier du soutien du programme Pacte afin de rédiger de nouvelles règles professionnelles, la détermination de nouvelles classes de résistance au feu et la rédaction de guides pédagogiques. Grâce à ces aides financières et législatives, les filières du bâtiment se structurent et leur présence de ces matériaux s'accroit de jours en jours.

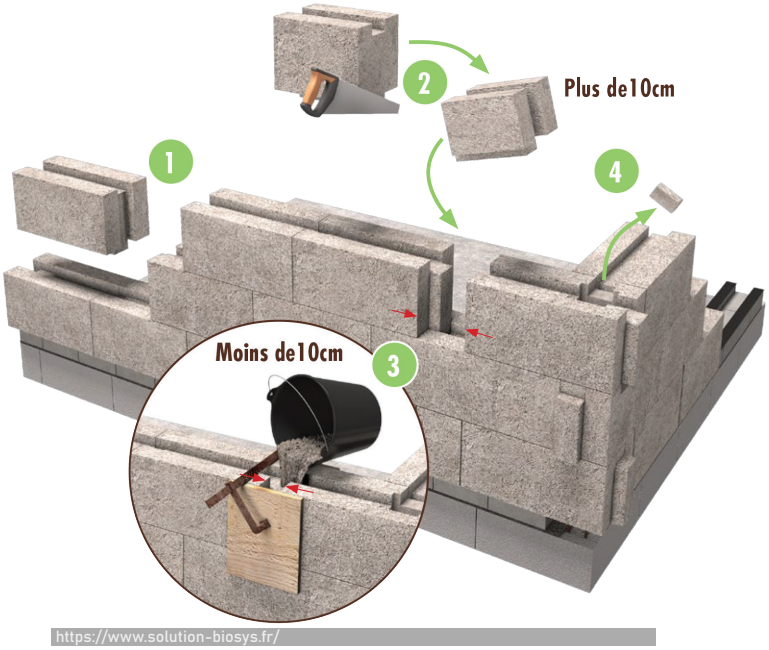



Fig. 20 : Système d'empilement du produit BIOSYS

Le contexte politique prometteur est aujourd'hui acteur d'une évolution majeur dans les démarches de constructions responsables et respectueuses de l'environnement et fait office d'exemplarité dans les commandes publiques. « Toutes les nouvelles constructions sous maîtrise d'ouvrage de l'Etat, de ses établissements publics ou des collectivités territoriales font preuve d'exemplarité énergétique et environnementale et sont, chaque fois que possible, à énergie positive et à haute performance environnementale (...) Les collectivités territoriales peuvent bonifier leurs aides financières ou octroyer prioritairement ses aides aux bâtiments à énergie positive ou qui font preuve d'exemplarité énergétique et environnementale. » (Article 8 II de la LTECV complété par le Décret n° 2016-1821 du 21 décembre 2016 et l'Arrêté du 10 avril 2017 et l'article L228-4 du code de l'environnement).
Cette exemplarité de la commande publique passe notamment par trois points importants :

- Par la prise en compte de la performance environnementale des produits, en particulier de leur caractère biosourcé (respect du premier niveau fixé par le label Biosourcé),
- Par la prise en compte des exigences de lutte contre les émissions de gaz à effet de serre et de stockage du carbone,
- Par le recours à des matériaux issus des ressources renouvelables.

En avril 2020, un guide pratique à destination des acheteurs publics fut publié pour faciliter l'introduction des matériaux biosourcés dans le marché de la construction. Ce dernier fut publié par la direction générale de l'aménagement, du logement et de la nature (DGALN).
Les acteurs de la construction doivent en permanence s'adapter pour réaliser des bâtiments respectant les normes des émissions carbones des nouvelles réglementations. Une évolution des méthodes de conception privilégiant l'écoconception doit être prôné pour réduire la production des émissions de gaz à effet de serre (EGES). Ainsi les enjeux de notre thèse s'intègre parfaitement dans cette dynamique écoresponsable et respectueuse de l'environnement tout en permettant aux acteurs de respecter les normes en vigueur.

Outre les normes en vigueur sur l'engagement environnemental et le respect des émissions de gaz à effet de serre, on peut trouver des normes qui s'appliquent directement aux structures portantes ou les éléments qui les composent ainsi que celle s'appliquant aux ciments et bétons.
La Norme NF EN 197-1 de février 2001, est remplacée par la NF EN 197-1 d'avril 2012 - composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants. Cette dernière définit et présente les caractéristiques spécifiques de 27 ciments courants, de 7 ciments résistants aux sulfates, de 3 ciments à faible résistance à court terme provenant de hauts fourneaux pouvant résister aux sulfates et de leurs constituants. Les définitions incluent les proportions de chaque constituant devant être associés pour obtenir ces ciments dans une plage de 9 classes de

résistance. La définition inclut également les exigences auxquelles les constituants doivent satisfaire (exigences mécaniques, physiques et chimiques).
La présente norme établit les critères de conformité et les règles correspondantes en plus des références relatives à la durabilité. En plus des ciments résistants aux sulfates il a été démontré à un niveau national que d'autres ciments présentaient des propriétés de résistance aux sulfates conformes à la présente norme ou à d'autres normes européennes ou nationales. Ces ciments (cf. : Annexe A), sont considérés par différents pays membres du CEN, dans la limite de leur territoire bien sûr comme des ciments résistants aux sulfates. Cette norme européenne ne couvre pas : les ciments spéciaux à très faible chaleur d'hydratation couvert par l'EN 14216 ; les ciments sursulfatés couvert par l'EN 15743 ; les ciments d'aluminates de calcium couvert par l'EN 14647 ; les ciments à maçonner couverts par l'EN 413-1.
En ce qui concerne la résistance mécanique, c'est-à-dire la résistance à la compression, il faut attendre un délai de 28 jours à la réalisation du mix. Les trois classes de résistance normalisées en ont été déduites : 32,5, 42,5, 52,5.
Par résistance initiale, en revanche, la norme fait référence à la résistance à la compression à 2 et 7 jours de la réalisation. Pour chaque classe de résistance standard, il est possible de distinguer deux classes de résistance initiale, l'une marquée de la lettre N pour une résistance initiale ordinaire, l'autre marquée de la lettre R pour une résistance initiale élevée, comme dans le tableau suivant.

| CLASSE DE RESISTANCE (sigle) | RESISTANCE A COMPRESSION minimum garantie [N/mm²] | | |
|---|---|---|---|
| | 2 jours | 7 jours | 28 jours |
| 32,5R | - | 16 | 32,5 |
| 32,5R | 10 | - | 32,5 |
| 42,5N | 10 | - | 42,5 |
| 42,5R | 20 | - | 42,5 |
| 52,5N | 20 | - | 52,5 |
| 52,5R | 30 | - | 52,5 |

Tab. 15 : Résistance à compression des différentes classes de béton en fonction du temps

En plus de celles du ciment les normes s'appliquent, dans notre cas, aussi à la conformité dans la réalisation de blocs en béton et en particulier dans celle de la réalisation de blocs en béton et matériaux biosourcés.
Il ne faut pas confondre les normes applicables à la conception du produit pour la commercialisation et l'utilisation du produit fini sur chantier. Par exemple dans notre cas la DTU 20.1 ne nous concerne pas car elle fixe les normes et bonnes pratiques en vigueur pour la construction de murs de maçonnerie, de l'isolation thermique à la coupure d'humidité (interne, externe ou parties). Ces murs peuvent être des murs simples, composites, doubles ou bien des murs doublés. Bien qu'essentiels, ces normes ne sont pas en lien avec notre objectif principal.
Pour le respect de ces normes et pour assurer au producteur comme au consommateur une qualité minimal du produit fini, le marquage devient un élément incontournable et obligatoire au sein de la communauté européen comme au niveau national. On observe à ce jour

principalement deux marquages, le marquage CE valable au niveau européen et le marquage NF valable au niveau français.
En effet sur un parpaing le marquage CE correspond à un produit respectant à la réglementation européenne, recensant des directives en matière de santé, de sécurité et de l'environnement. Cette norme doit impérativement être apposée sur le produit fini (parpaing) pour pouvoir être commercialisée sur le territoire français et dans l'Union Européenne.
La marque NF correspond à une norme plus sélective respectant la conformité du produit aux règlementations Françaises, Européennes et Internationales. C'est au fabriquant de demander ou non à bénéficier de la norme NF, il doit alors respecter un cahier des charges précis et en constante évolution pour obtenir cette validation.
Ces essais peuvent être effectués selon deux méthodes, soit :
- dans les laboratoires de la marque servant de référence ;
- dans le laboratoire du demandeur et/ou titulaire en présence de l'auditeur et/ou inspecteur.

Le laboratoire doit lui-même satisfaire aux exigences de la norme ISO/CEI 17025.
Les exigences en termes de maîtrise de la qualité applicables sont indiquées dans le tableau ci-dessous qui liste les thématiques potentiellement applicables en lien avec l'ISO 9001 : 2015. Elles sont expliquées de façon plus exhaustive dans la suite du paragraphe.

Les produits portant le marquage CE peuvent bénéficier de la marque NF si cette dernière concerne des exigences différentes de celles du marquage CE et apporte une valeur ajoutée. Il faut bien comprendre que la norme CE correspond à une directive obligatoire, c'est-à-dire à une réglementation et à une qualité de produit minimal pour rentrer sur le marché Européen. Pour les consommateurs La norme NF est un gage de qualité permettant le plus souvent d'obtenir un produit fini supérieur à la norme CE.

Cette certification vise les blocs de granulats courants ou légers minéraux – à enduire ou de parement et montés à joints horizontaux et verticaux maçonnés, collés, ou sans joint vertical (bloc à emboîtement) – couverts par la norme NF EN 771-3 et le complément national NF EN 771-3/CN.
Ces blocs sont destinés à la réalisation d'ouvrages de maçonnerie porteurs ou non porteurs dans toutes les formes de murs y compris les murs simples, doubles, les cloisons, les refends, les soubassements et l'utilisation générale au-dessous du niveau du sol y compris les murs de protection contre l'incendie, l'isolation thermique et acoustique.

Il ne s'applique pas aux blocs à bancher (blocs de coffrage entrant dans le champ d'application de la norme NF EN 15435 et du complément national NF EN 15435/CN).

| | | NF EN 771-3 ÉDITION EN VIGUEUR | | NF EN 771-3/CN ÉDITION EN VIGUEUR | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Spécifications | Modalités d'essais | Spécifications | Modalités d'essais |
| MATIERES PREMIERES | Teneur en chlorures | | | §4.1 | |
| DIMENSIONS ET TOLÉRANCES | Dimensions | | | §5.2.1 | |
| | Tolérances dimensionnelles | §5.2.2 | NF EN 772-16 | | |
| | Planéité et parallélisme des faces d'appui des blocs D3 et D4 | §5.2.2.2 et 5.2.2.3 | NF EN 772-16 et 772-20 | | |
| | Épaisseur de paroi | | | §5.3.2 | NF EN 772-16 |
| | Alvéoles | | | §5.3.3 | NF EN 772-2 et 772-16 |
| CONFIGURATION (géométrie) | Planéité de surface des blocs en parment | §5.3.2.1 | NF EN 772-20 | Voire NF EN 771-3 | |
| | Aspect de surface | | | §5.3.1 | |
| | Faces latérales d'extrémités | | | §5.3.4 | NF EN 772-16 |
| | Intersection des joints horizontaux et verticaux des blocs de parements | | | §5.3.5 | |
| | Blocs accesoires | | | §5.3.6 | |
| MASSE VOLUMIQUE | Masse volumique apparente du bloc | §5.4.1 | NF EN 772-13 | NF EN 771-3 | |
| | Masse volumique absolue du béton constructif | §5.4.2 | NF EN 772-13 | NF EN 771-3 | |
| RESISTANCE MECANIQUE | Résistance à la compression | | | §5.5.1 | NF EN 772-2 |
| PROPRIÉTÉS THERMIQUES | | | | §5.6 | NF EN 1745 |
| DURABILITÉ | | | | §5.7 | NF EN 491 |
| ABSORPTION D'EAU PAR CAPILLARITÉ | | | | §5.8 | NF EN 772-11 |
| VARIATIONS DIMENSIONNELLES | | | | §5.9 | NF EN 772-14 |
| PERMÉABILITÉ À LA VAPEUR D'EAU | | §5.10 | NF EN 1745 ou EN ISO 12572 | NF EN 771-3 | |
| RÉACTION AU FEU | | §5.11 | NF EN 13501-1 | NF EN 771-3 | |
| RÉSITSTANCE DE L'ADHÉRENCE AU CISAILLEMENT | | §5.12 | NF EN 1052-3 | NF EN 771-3 | |
| DESCRIPTION ET DESIGNATION | | | | §6.1 | |
| CLASSIFICATION | | | | §6.2 | |
| MARQUAGE | | | | §7 | |
| ÉVALUATION ET VÉRIFICATION DE LA CONSTANCE DES PERFORMANCES | | | | §8 | |

Tab. 16 : Référentiel NF - Partie 2 : Règles de certification NF blocs en béton de granulats courants et légers (Janvier 2020)

De façon plus générale l'ensemble des lois, normes et obligations complémentaires en lien sur la résistance du béton et la conformité de ses constituants sont présentes ci-dessous:

Normatives générales :

**BÉTON**

- **UNI EN 12350-6 : 2009** > Essai sur le béton frais - Partie 6 : Densité.
- **UNI EN 12390-7 : 2009** > Essai du béton durci - Partie 7 : Densité du béton durci
- **UNI 7548-1 : 1992** > Béton léger avec argile ou schiste expansé. Définition et classification (le béton léger après séchage au four doit avoir une densité comprise entre 800 et 2000kg/m³).
- **UNI EN 12390-3 : 2009** > Essais sur le béton durci. Partie 3 : Résistance à la compression des échantillons.
- **UNI 6687** > Mortier normal. Analyse de la rétraction hydraulique.

Essais en laboratoires ex :
A -> Dans l'eau avec U.R. 100% e t = 20°C
B -> Dans le four t = 40°C
C -> U.R. 50% e t = 20°C

- **UNI EN ISO 8894-1 : 2010** > Matériaux réfractaires - Détermination de la conductivité thermique - Partie 1 : Méthode du fil chaud - Disposition transversale et thermomètre à résistance
- **UNI EN 206-1 : 2006** > Du béton. Partie 1 : Spécifications, performances, fabrication et conformité (ajouts).
- **UNI EN 12350-1 : 2009** > Essais sur le béton frais. Partie 1 : Échantillonnage
- **UNI EN 12350-3 : 2009** > Essais sur le béton frais. Partie 3 : Essai de Vébé (détermination de la consistance du béton frais).
- **UNI EN 12350-4 : 2009** > Du béton frais. Partie 4 : Indice de compatibilité
- **UNI EN 12350-5 : 2009** > Du béton frais. Partie 5 : Essai d'épandage sur table vibrante (essai d'épandage de béton frais).
- **UNI EN 12390-1 : 2012** > Essai du béton durci. Partie 1 : Forme, dimensions et autres exigences pour les éprouvettes et les coffrages.
- **UNI EN 12390-2 : 2012** > Essais sur le béton durci. Partie 2 : Fabrication et durcissement des épreuves pour les essais de résistance.
- **UNI EN 12390-4 : 2012** > Essai du béton durci. Partie 4 : Résistance à la compression - spécifications pour les machines d'essai.
- **UNI EN 12390-5 : 2012** > Essais sur le béton durci. Partie 5 : Résistance à la flexion des échantillons.
- **UNI EN 12390-6 : 2012** > Essais sur le béton durci. Partie 6 : Résistance à la traction des échantillons.

**LES LIANTS**

- **UNI EN 197-1**
- **UNI CEN/TR 196-4 : 2008** > Méthodes d'essai pour les ciments. Partie 4 : Détermination quantitative des constituants.
- **UNI EN 196-2 : 2013** > Méthodes d'essai des ciments. Partie 2 : Analyse chimique des ciments.

**LES AGRÉGATS**

- **UNI EN 12620 : 2008** > Granulats pour béton
- **UNI 8520-1 : 2015** > Granulats pour béton - Instructions complémentaires pour l'application de la norme EN 12620 - Partie 1 : Critères de désignation et de conformité.
- **UNI 8520-1 : 2005** > Granulats pour béton - Instructions complémentaires pour l'application de la norme EN 12620 - Partie 2 : Exigences.
- **UNI EN 1097-5 : 2008** > Essais pour déterminer les propriétés mécaniques et physiques des granulats. Partie 5 : Détermination de la teneur en eau par séchage dans un four ventilé.
- **UNI EN 1097-6 : 2008** > Essais pour déterminer les propriétés mécaniques et physiques des granulats. Partie 6 : Détermination de la densité des granulés et de l'absorption d'eau.
- **UNI EN 933-1 : 2009** > Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats. Partie 1 : Détermination de la distribution granulométrique - Analyse granulométrique par tamisage.
- **D.M. du 14.01.2008** > (% de granulats recyclés) Approbation de nouvelles techniques de construction.

**L'EAU**

- **UNI EN 1008 : 2003** > Eau de mélange du béton. Spécification pour l'échantillonnage, l'essai et l'évaluation de l'adéquation de l'eau, y compris l'eau récupérée des processus de l'industrie du béton, comme eau de mélange du béton.

**LES ADDITIFS**

- **UNI EN 934-2 : 2012** > Additifs pour béton, mortier et coulis. Partie 2 : Additifs pour béton - Exigences de définition, marquage de conformité et étiquetage.

**LCA**

- **ISO 14040 : 2006** > Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Principes et cadre.

**CIMENTS / MALTE**

- **UNI EN 196-6 : 2010** > Méthodes d'essai pour les ciments. Partie 6 : Détermination de la finesse, peut être définie par la méthode dite de la perméabilité à l'air.
- **UNI EN 196-1 : 2005** > Méthodes d'essai pour les ciments. Partie 1 : Détermination des résistances mécaniques.
- **UNI EN 1015-6 : 2007** > Méthodes d'essai pour le mortier de maçonnerie. Partie 6 : Détermination de la densité apparente du mortier frais.
- **UNI EN 1015-3 : 2007** > Méthodes d'essai pour le mortier de maçonnerie. Partie 3 : Détermination de la consistance du mortier frais.
- **UNI EN 1015-7 : 2007** > Méthodes d'essai pour le mortier de maçonnerie. Partie 7 : Détermination de la teneur en air du mortier frais.

Maintenant que nous avons abordé les lois, normes et décrets sur le ciment et blocs en ciments, une question peut paraitre évidente car encore non traité :

**Quelles lois, normes, décret ou tout autre textes réglementaires s'appliquent aux matériaux biosourcés dans la construction ?**

Tout d'abord il nous faut définir ce qu'est un matériel biosourcé, C'est un matériau issu du vivant, d'origine animale (ex. : laine de mouton…) ou végétale (ex. : bois, paille, balle de riz…). L'utilisation de matériaux biosourcés est encouragée par les pouvoirs publics lors de la construction ou de la rénovation des bâtiments car elle permet le stockage de carbone atmosphérique et à la préservation des ressources naturelles. Toutefois les matériaux biosourcés ne sont pas forcément 100% naturel et sans risque pour l'environnement. Leur transformation, l'ajout d'additifs ou leur transport sur de longues distances peut en atténuer fortement le bilan carbone positif que l'on espère récupérer de ces derniers. Il est donc nécessaire de valoriser le plus possible les matériaux biosourcés les moins transformés et locaux.

On leur trouve aujourd'hui de nombreuses applications tel que dans le domaine du bâtiment et de la construction où l'on trouve :

-les isolants (de liège, ouate de cellulose, laine de fibres végétales ou animales, etc.)

-les mortiers et bétons (bétons de bois, de lin, etc.)

-les panneaux (paille compressée, particules ou fibres végétales, etc.).

La proposition des nouvelles normes porte sur la mise en évidence des terminologies, les méthodes pour déterminer la teneur en biosourcés, les caractéristiques, les critères de durabilité et l'analyse du cycle de vie. Comme expliqué précédemment, les ministères en charge de l'écologie et du logement ont mis en place le label « **bâtiment biosourcé** ». La Norme **CEN/TR 16208 Mai 2011** permet d'obtenir une vue d'ensemble des normes sur les produits biosourcés. La Norme **NF EN 16785-2 de mai 2018**, permet de définir la quantité de biosourcé dans les produits par détermination en utilisant la méthode basée sur le bilan-matière. Les normes **NF EN 16751** (avril 2016) et **NF EN 16760** (décembre 2015) permettent de définir les critères minimums de durabilité ainsi que l'analyse du cycle de vie du produit biosourcé. Il est important de préciser que dans la majorité des cas, les normes cités ne sont pas accessibles gratuitement, limitant ainsi leur compréhension et leur facilité d'accès qui est essentiel au respect de ses dernières.

Les Normes NF EN14474 et NF EN 15498 s'intéressent à l'utilisation du mortier et du béton biosourcé, malheureusement ces dernières se limitent à l'utilisation des copeaux de bois, **NF EN 14474** (mai 2005) Produits préfabriqués en béton – Béton utilisant des

copeaux de bois comme granulat – Exigences et méthodes d'essai - **NF EN 15498** (octobre 2008) Produits préfabriqués en béton – Blocs de coffrage en béton utilisant des copeaux de bois comme granulat – Propriétés et performances des produits.

Enfin à travers les Décrets n° 2016-856 du 28 juin 2016 et l'Arrêté du 12 octobre 2016, les règles de dépassement de constructibilité intègrent également des taux de biosourcés sur les projets sous réserve que ceux-ci soient autorisés par le PLU.

Aujourd'hui, une des critiques majeurs que nous pourrions faire sur l'ensemble des lois et normes, est leur facilité d'accès. En effet, même pour une personne qui souhaiterai respecter l'ensemble des conditions requises à l'élaboration d'un nouveau produit, dans le plus strict respect des normes et lois en vigueur, ce dernier se voit freiné par la difficulté à obtenir des renseignements sur les modalités essentielles devant être respectées. La difficulté d'obtenir une liste exhaustive des conditions légales et mise à jour, ainsi que l'absence d'un libre accès aux textes (non-gratuité) auxquels il est essentiel de se référer, complique grandement les démarches. Nous pouvons espérer que dans un futur proche les démarches légales soit mieux organisées, et allégées ainsi qu'accessible à tous pour faciliter la création de nouveaux matériaux soucieux de l'environnement et responsables.

# LA PRODUCTION DE RIZ :

## D'UN MODÈLE LINEAIRE À UN MODÈLE CIRCULAIRE

Source : Carlo Sguazzini, «Novara tra il riso ed il Rosa», @carlosguazzini

# 4. LE RIZ

## Résumé

Le riz est une plante particulière qui permet de nombreuses cultures durant l'année mais qui demande une attention soignée afin de garder une production constante.
Le riz est une des plus anciennes plantes vivrières cultivées et la compréhension de ses croisements a permis un progrès considérable dans sa stratégie d'amélioration génétique. Les variétés qui en découlent ont été immédiatement sélectionnées pour l'essentiel des surfaces consacrées à la riziculture irriguée dû à leurs avantages non négligeables. Cette céréale est devenue fondamentale pour la subsistance (physique et économique) de beaucoup de population dans le monde. A ce jour, l'Italie est le plus grand producteur européen de riz.
La production de riz a été démultiplié en passant de 220 millions de tonnes avant la révolution verte (année 1960) à 729 millions de tonnes de riz paddy en 2017. Cette augmentation de production est nécessaire afin de nourrir une population mondiale toujours croissante. Le riz est la deuxième céréale après le maïs en termes de surface cultivée et de quantité produite, avec un rendement moyen de 4,0 t par hectare.
Il existe quatre modes de culture pour la riziculture : la riziculture irriguée, la riziculture inondée, la riziculture pluviale et la riziculture flottante.
L'enveloppe du riz se compose physiquement de deux glumes qui recouvrent chaque grain de riz : la glumelle supérieure (balle de riz) et la glumelle inférieure. La balle de riz est égale à 20% du poids total du riz paddy (grain de riz entier) ce qui correspond, en prenant en compte les chiffres de 2017, à 145 millions de tonnes de résidus agricoles au niveau international. Une fois que le riz brut a été débarrassé de sa balle, cette dernière peut ou non subir certains traitements simples comme : le séchage, la stérilisation, la carbonisation ou la fermentation. La balle de riz peut être séparée du grain par « décorticage » ou par « parboiling».
La balle de riz peut facilement être importée de Camargue, d'Italie ou d'Espagne à des coups très raisonnables. La balle de riz possède de nombreuses qualités : sa légèreté, son coût peu élevé, sa basse concentration en humidité et sa forte concentration en silice. Ce dernier point est d'un avantage crucial pour le stockage en intérieur comme en extérieur, permettant de diminuer les risques de moisissure ou fermentation dans le temps et donc de perte de matériel. D'un autre côté son poids relatif très bas et sa souplesse permettent de faciliter son transport et son compactage pour une meilleure mise sur le marché.
La valorisation de la balle de riz s'est surtout étendue au secteur de la construction.
Le riz est une céréale riche en amidon. L'amidon est un polymère de glucose composé de deux polymères : l'amylose (molécule essentiellement linéaire) et l'amylopectine (molécule ramifiée), chacun est capital pour l'amidon et ses caractéristiques physiques. De façon très simplifiée, l'organisation du grain d'amidon résulte de l'agencement de l'amylose et de l'amylopectine en zones amorphes et cristallines. A température ambiante, l'eau pénètre facilement dans les régions amorphes des grains conduisant à un léger gonflement des granules, qui est toutefois réversible. La gélatinisation de l'amidon s'effectue en deux étapes : en premier le gonflement des grains avec l'absorption de l'eau et ensuite la dissolution des macromolécules, transformant progressivement l'amidon en un liquide puis un gel lors de son refroidissement. La grande majorité de l'amidon présent en Europe provient de fournisseurs au sein de la communauté européenne. L'extraction d'amidon est un procédé consistant à séparer les différents éléments composant la plante, tels que l'amidon, les protéines, les fibres de cellulose et les germes. Au niveau industriel, ceci implique une série de phases de séparation physique simples telles que le broyage, le tamisage, la centrifugation, la concentration et le séchage. L'amidon arrive ainsi disponible sur le marché sous une forme poudreuse sans odeur ni saveur.

# 4. IL RISO

## Sintesi

Il riso è una pianta speciale che permette di ottenere un gran numero di colture durante l'anno, ma richiede molta attenzione per mantenerne costante la produzione.
Il riso è una delle più antiche colture alimentari e la comprensione dei suoi incroci ha permesso notevoli progressi nella sua strategia di miglioramento genetico. Gli incroci genetici con un ceppo semi-nano hanno aumentato la produzione di un fattore su tre. Le varietà risultanti sono state immediatamente selezionate per la maggior parte dei terreni dedicati alla coltivazione del riso irrigato a causa dei loro significativi vantaggi. Questo cereale è diventato fondamentale per la sussistenza (fisica ed economica) di molte persone nel mondo. Oggi l'Italia è il maggior produttore europeo di riso.
La produzione di riso è stata moltiplicata da 220 milioni di tonnellate prima della rivoluzione verde (1960) a 729 milioni di tonnellate di risone nel 2017. Questo aumento della produzione è necessario per nutrire una popolazione mondiale in continua crescita. Inoltre, il riso è il secondo cereale più importante dopo il mais in termini di area coltivata e quantità prodotta, con una resa media di 4,0 tonnellate per ettaro.
La gestione dell'acqua per la coltivazione del riso è essenziale perché può portare a un'intensificazione delle colture (doppia o anche tripla a seconda dell'anno) e limitare il consumo di acqua dolce.
La lolla di riso è fisicamente composta da due glume che coprono ogni chicco di riso: la gluma superiore (lolla di riso) e la gluma inferiore. La lolla di riso è pari al 20% del peso totale del risone (chicco di riso intero) che, tenendo conto delle cifre del 2017, corrisponde a 145 milioni di tonnellate di residui agricoli a livello internazionale. Una volta che la lolla di riso è stata rimossa, può essere sottoposta o meno a certi trattamenti come essiccazione, sterilizzazione, carbonizzazione o fermentazione. La lolla di riso può essere separata dal chicco mediante «decorticazione» o «parboling». La lolla di riso può essere facilmente importata dalla Camargue, dall'Italia o dalla Spagna a prezzi ragionevoli. La lolla di riso ha molte qualità: leggerezza, costo ridotto, basso contenuto di umidità e alto contenuto di silice. Quest'ultimo punto è un vantaggio cruciale per lo stoccaggio interno ed esterno, riducendo considerevolmente il rischio di muffa o fermentazione nel tempo e quindi di perdita di materiale. D'altra parte, il suo peso relativo molto basso e la sua flessibilità lo rendono più facile da trasportare e più compatto, caratteristiche vantaggiose per una migliore commercializzazione.
L'uso della lolla di riso è stato esteso principalmente al settore delle costruzioni.
Il riso è un cereale ricco di amido. L'amido è un polimero di glucosio composto da due polimeri: l'amilosio (essenzialmente una molecola lineare) e l'amilopectina (una molecola ramificata), ognuno dei quali è fondamentale per l'amido e le sue caratteristiche fisiche. In modo molto semplificato, l'organizzazione del grano di amido risulta dalla disposizione dell'amilosio e dell'amilopectina in zone amorfe e cristalline. A temperatura ambiente, l'acqua penetra facilmente nelle regioni amorfe dei grani portando a un leggero rigonfiamento dei granuli, che è comunque reversibile. La gelatinizzazione dell'amido avviene in due fasi: prima il rigonfiamento dei grani con l'assorbimento di acqua e poi la dissoluzione delle macromolecole, trasformando gradualmente l'amido in un liquido e poi in un gel quando si raffredda. La grande maggioranza dell'amido in Europa proviene da fornitori all'interno della Comunità europea. L'estrazione dell'amido è il processo di separazione dei diversi componenti della pianta, come amido, proteine, fibre di cellulosa e germe. A livello industriale ciò comporta una serie di procedimenti di separazione fisica come la macinazione, la setacciatura, la centrifugazione, la concentrazione e l'essiccazione. L'amido è poi disponibile sul mercato in forma di polvere senza odore né sapore.

## 4.1 Histoire et morphologie de la plante

Le riz est une des plus anciennes plantes vivrières cultivées appartenant à la famille des graminées appelées aujourd'hui poacées. Comme le blé, le maïs ou le sorgho c'est une plante annuelle à paille, une céréale. L'ancêtre du riz actuellement cultivé serait apparu en Asie il y à plusieurs dizaines de millions d'années. Sa domestication sur le continent asiatique est vieille de plus de 9000 ans et 4000 ans pour le continent africain. Les plus anciennes traces de culture du riz proviennent de Chine centrale, dans la province de Hounan remontant à environ 5000 ans avant J.-C. Peu après, on les retrouve au nord de l'Inde le long des rives du Gange. La première trace d'écriture sur la riziculture date de 2800 avant J.-C, c'est une ordonnance impériale chinoise.
Le riz s'est diversifié grâce à ses nombreux voyages. Le riz fait partie du genre *Oryza* comprenant deux espèces cultivées :

· *Oryza sativa*, la plus cultivée, originaire d'Asie et que l'on trouve dans le monde entier ;

· *Oryza glaberrima*, originaire d'Afrique occidentale, présente uniquement dans cette partie du monde.

Le riz possède plus de 150.000 variétés cultivées dans le monde, lui procurant une diversité génétique considérable et comprenant 107.000 accessions environ dans la banque de gènes de l'IRRI (dont 5.000 espèces sauvages). Cette diversité provient de croisements naturels d'O. sativa avec des formes sauvages d'O. rufipogon ou de croisements génétiques combinés à la sélection naturelle et humaine depuis la domestication (Khush, 1987). Oryza sativa est une céréale autogame (union des gamètes provenant du même individu à travers la fécondation des organes mâles et femelles d'une même fleur). Ce système de fécondation au sein de la même plante permet d'obtenir des structures génétiques provenant de lignées pures.
La compréhension de ces croisements a permis un progrès considérable dans la stratégie d'amélioration génétique du riz.
C'est une espèce fortement bipolaire avec 2 groupes majoritaires d'origines géographiques différentes, les indicas et les japonicas. Clairement distingués sur la base de caractéristiques agromorphologiques, de résilience lors des croisements, et de marqueurs biochimiques et moléculaires.

· L'espèce indica pousse sous climat équatorial et tropical en conditions aquatiques ;
· L'espèce japonica pousse majoritairement sous climat tempéré et en conditions pluviales sous climat tropical en conditions aquatiques.

La variété Indica (riz thaï, riz basmati) est un riz à grains longs, moins collant, de plus en plus utilisé en Europe. Le riz Japonica, quant à lui, aussi appelé riz rond dû à sa forme ronde et peu allongé, est un riz plus collant le plus souvent utilisé dans les risottos et

très présent au japon, où il est cultivé depuis plusieurs milliers d'années. Sa capacité importante d'absorption d'eau en cuisson lui confère une texture élastique moelleuse et une belle brillance.

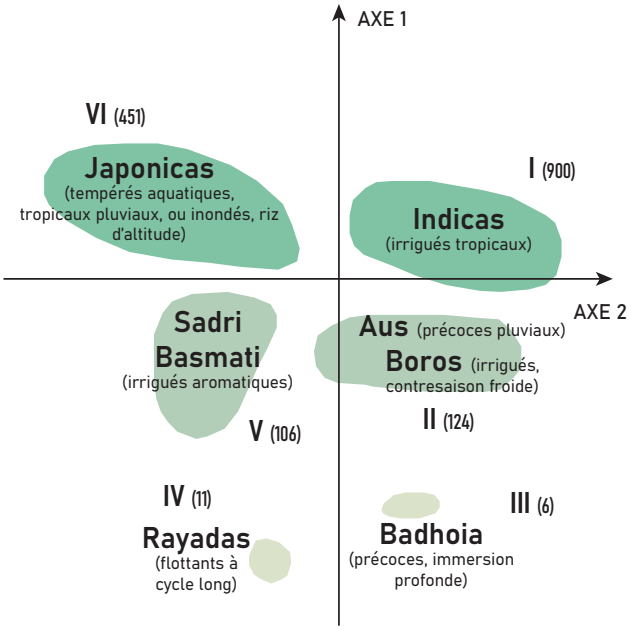



Fig. 21 : Groupes identifiés dans une analyse factorielle des correspondances portant sur les données isozymiques de 1688 variétés asiatiques de l'espèce Oryza Sativa - (Source: Glaszman, 1987)
Variétés intermédiaires (90) non représentées

Le brassage génétique entre les deux groupes n'est ni aisé ni fréquent. Les groupes indica et japonica seraient issu de deux domestications d'O. rufipogon qui se sont produites indépendamment en Inde et en Chine même si des résultats récents montrent que les génomes indica et japonica ont divergé il y a plus de 200.000 ans, séparation bien antérieure à leur domestication.
Les analyses génétiques ont également permis de préciser la position du groupe javanica comprenant, entre autres, les riz pluviaux (Glaszmann, 1988). Considéré par certains comme un groupe à part, il constitue en fait le sous-ensemble tropical du groupe japonica. Le potentiel de croisement génétique à la fin des années 50 a fait un bond prodigieux avec la découverte d'un mutant naturel semi-nain, Dee-geo-woo-gen, qui a été depuis très fortement utilisé comme souche de semi-nanisme. Les variétés issues de cette souche semi-naines résistent beaucoup mieux à la verse, ont moins de tailles improductives, ont une bonne réponse aux engrais et un meilleur indice de récolte. Leur productivité est de 2 à 3 fois plus élevée que celle des variétés traditionnelles. Ces variétés ont été immédiatement sélectionnées pour l'essentiel des surfaces consacrées à la riziculture irriguée dû à leurs avantages non négligeables.

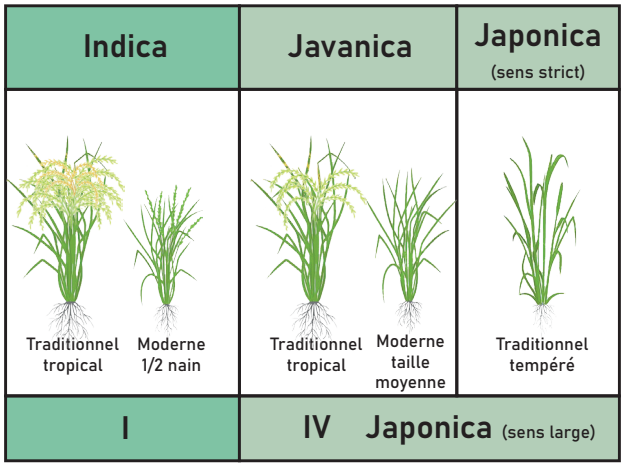



Fig. 22 : Types morphologiques des groupes Indica et Japonica
(source: Brigitte COURTOIS, 2007)

Le riz est très probablement entré en Europe par la Grèce grâce à l'expédition d'Alexandre le Grand jusqu'aux bords de l'Indus, vers 320 avant J.-C. Cependant, sa culture ne s'est véritablement implantée en Grèce qu'au VIIe siècle.
Bien qu'introduit dans la péninsule ibérique par les Arabes à partir du VIIIe siècle le riz reste un produit rare réservé aux tables les plus aisées. Dès le XIIIème La présence de cultures du riz est avérée au Portugal mais son expansion fut réelle qu'après l'ouverture de la route des Indes par Vasco de Gama au XVe siècle. Les navigations outre-Atlantique portugaises jouèrent un rôle déterminant sur la diffusion du riz en Afrique occidentale et en Amérique du Sud. C'est sans doute à partir du Portugal que le riz a gagné l'Italie, tout d'abord le royaume de Naples, puis la plaine du Pô où la culture s'est implantée de manière définitive. En ce qui concerne la propagation du riz comme culture traditionnelle dans la plaine du Pô, il n'existe pas de données certaines, mais seulement des suppositions. Selon certains, il pourrait s'agir des soldats français de Charlemagne, tandis que d'autres émettent l'hypothèse qu'il s'agit des marchands des républiques maritimes. Les premières sources certaines sur la culture du riz en Italie du Nord concernent des parcelles de terre destinées aux rizières près de Vercelli en 1227.

Cette céréale est devenue fondamentale pour la subsistance (physique et économique) de la population, de sorte que sa culture a pris une importance croissante dans toute la vallée du Pô. A ce jour, l'Italie est le plus grand producteur européen de riz, concentrant la culture dans les provinces de Vercelli, Novara et Pavie (Ferrero, A., Tinarelli, A., 2009).
En France, l'arrivé du riz c'est vraiment implanté après-guerre avec l'arrivé du plan Marshall en 1945.

Le monde a fait des progrès considérables pour démultiplier la production de riz, qui est passée de 220 millions de tonnes avant la révolution verte (années 1960) à 729 millions de tonnes de riz paddy en 2017, soit 494 millions de tonnes en équivalent blanchi (www.franceagrimer.fr) et les prévisions de production sont en constante évolution, environ 1% annuel avec 505.4 millions de tonnes pour la période 2021/2022 (USDA). Cette augmentation de production est nécessaire afin de nourrir une population mondiale toujours croissante (https://www.irri.org/).

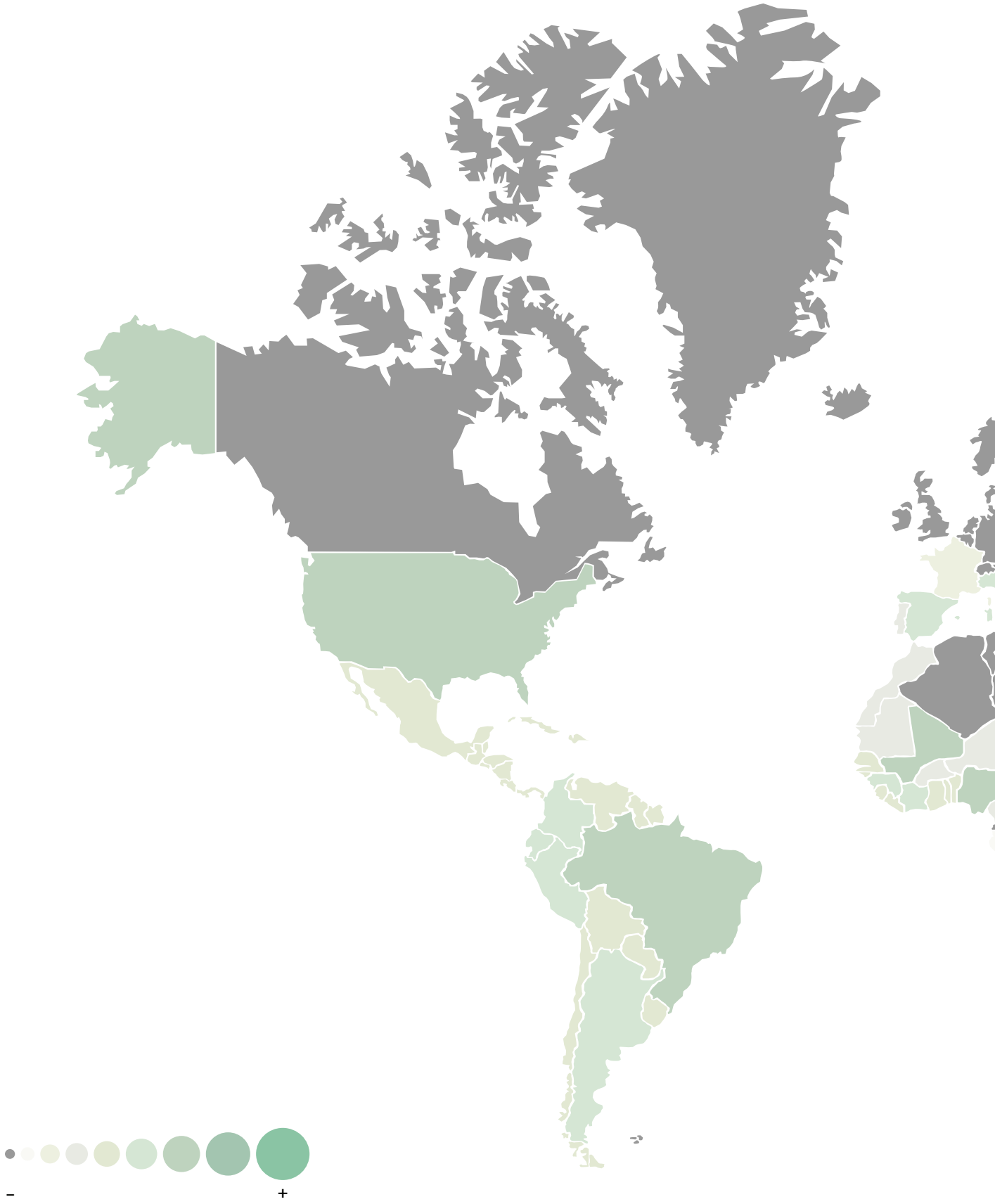
Le riz est la deuxième céréale après le maïs en terme de surface cultivée et de quantité produite, avec un rendement moyen de 4,0 t/ha qui masque de très importantes disparités (World Rice Statistics, 2005). Le riz reste encore aujourd'hui la première céréale pour l'alimentation humaine. Elle représente la base de l'alimentation de plus de **3 milliards de personnes** dans le monde entier avec des consommations annuelles très importantes dépassant dans certains pays les 100 kg/habitant.

L'Asie domine largement l'économie du riz avec 90 % des surfaces et de la production, l'Amérique Latine et l'Afrique se partageant l'essentiel des 10 % restants.

Le riz est avant tout une production d'autoconsommation. Les grands pays producteurs tel que l'Inde, Chine, Indonésie, Bangladesh, Thaïlande, Vietnam sont également les principaux consommateurs. Malgré tout la consommation n'est pas auto-suffisante, ainsi une part relativement faible de la production est échangée sur le marché mondial (6 % de la production), essentiellement par le biais de quelques gros pays exportateurs (Vietnam, Thaïlande, Etats-Unis, Inde, Pakistan). Ainsi la Chine, en tête du palmarès n'est autre que le premier producteur mondial ainsi que le premier importateur. Les exportations concernent en particulier les riz aromatiques basmati et thaïlandais (10 % du total).

En France, les surfaces cultivées en 2016 ont été estimées à 13 600 ha pour une production de riz brut équivalant à 68 000 T. Environ 80% de la surface est cultivée sous le label **IGP Riz de Camargue** (Indication Géographique Protégée). Le riz est d'ailleurs la première céréale en France à obtenir une protection géographique. Cette indication créée en 1995 est une valeur ajoutée à la production territoriale française. (http://www.rizdecamargue.com) La Camargue ne produit pas d'OGM et 20% de la surface cultivé est BIO.

Insuffisante pour alimenter les usines du territoire, la récolte française est nécessairement complétée par des importations, principalement en provenance du Cambodge (43%), de Thaïlande (36%) et d'Inde (7%). Contrairement aux idées reçues, les importations de Chine sont quasi nulles, la Chine n'étant déjà pas autosuffisante pour sa propre consommation.



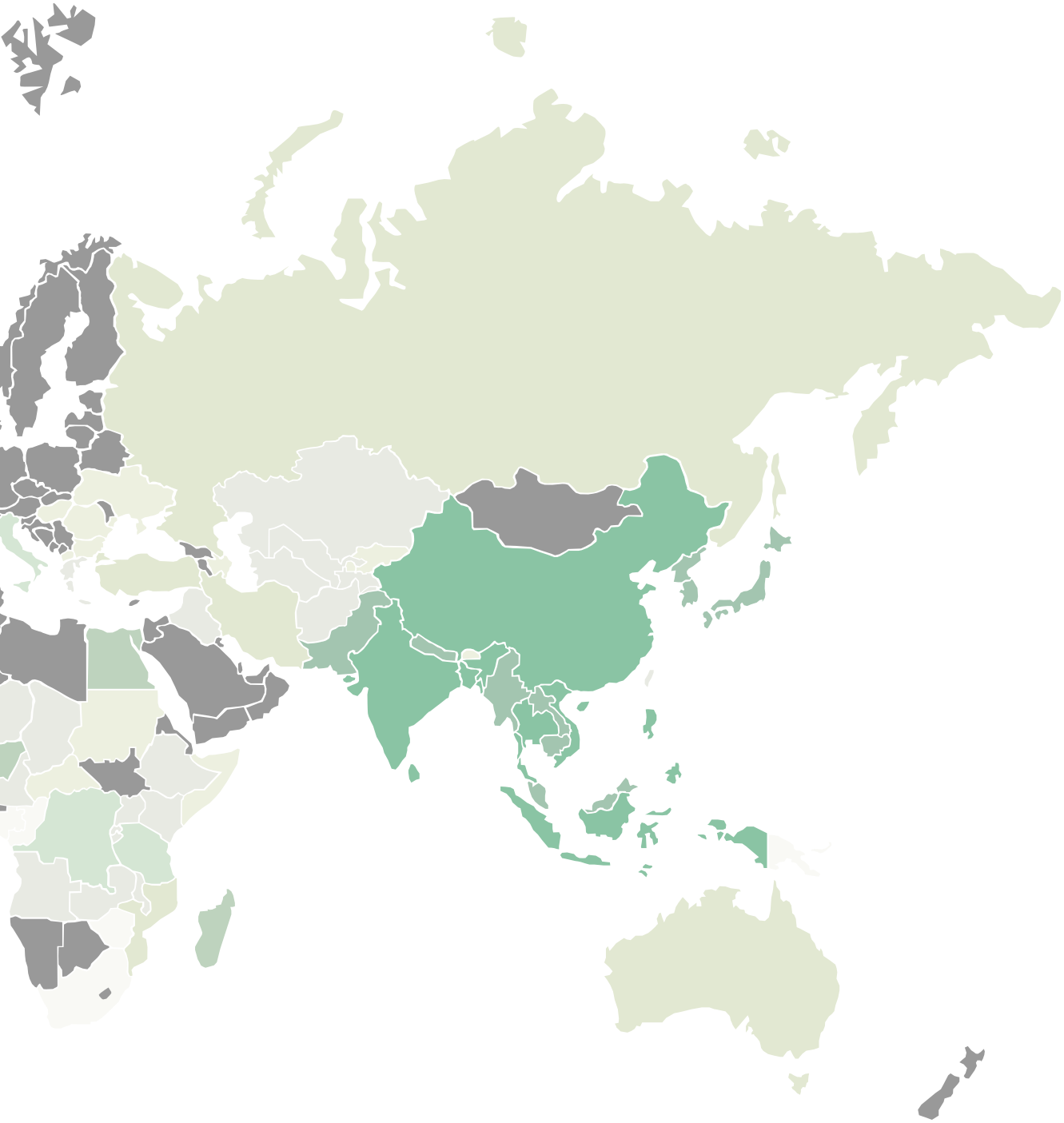


Fig. 23 : Carte des principaux pays producteurs de riz

## 4.2 Cycle végétatif et environnemental

https://blog.altiplano-voyage.com/wp-content/uploads/2020/12/Mu-Cang-Chai_saravut_Fotolia_122260910_Subscription_Monthly_M.jpg

Le riz est cultivé dans des milieux très hétérogènes pouvant varier sur l'altitude et la longitude. Cette plante, d'origine aquatique, et donc assez exigeante en eau par rapport à d'autres céréales, n'en reste pas moins capable de s'adapter de façon assez remarquable aux conditions hydriques. Cette particularité, propre au riz, est due à un dispositif cellulaire interne qui permet à la plante de transporter l'oxygène des parties aériennes (feuilles) vers les racines.

C'est grâce à cette particularité que se formes la plupart des classifications des types de rizicultures (Courtois, 1998) :

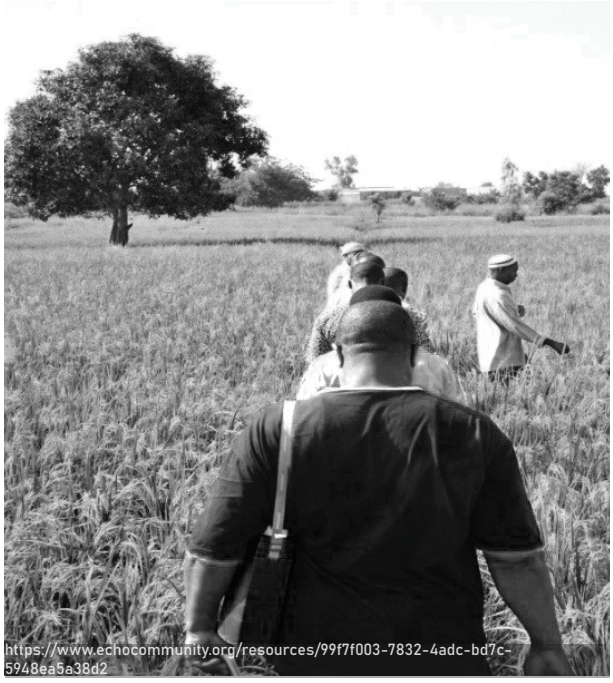
- **Riziculture irriguée**, avec une parfaite maîtrise de l'eau, flux et reflux, qui occupe la grande majorité des surfaces cultivées (environ 58 % des surfaces).

- **Riziculture inondée**, sans maîtrise de l'eau qui peut être subdivisée en fonction des taux de sécheresse et/ou de submersion et de la hauteur d'eau dans la parcelle. Cette forme de riziculture représente 25 % des surfaces.

- **Riziculture pluviale** qui dépend uniquement de la pluviométrie du lieu de culture, peut subir des aléas assez importants en fonction de la période de l'année.
Ce type de riziculture, avec 13 % des surfaces en Asie représente une minorité mais est fortement majoritaire avec 60 et 75 % en Afrique et en Amérique Latine.

- **Riziculture flottante**, qui suit la crue des grands fleuves, occupant 7 % des surfaces.
Parallèlement à la maîtrise de l'eau les rendements augmentent aussi, malheureusement les coûts d'aménagement des rizières grimpent tout autant.

Riziculture Irriguée




Riziculture pluviale

Riziculture Inondée

Riziculture flottante

La maitrise de l'eau grâce à la riziculture irriguée permet une intensification des cultures (double voire triple culture annuelle) et une diminution concrète des aléas (maladies, sècheresses, insectes...) permettant de garantir des rendements élevés (6 t/ha en saison période de mousson et jusqu'à 10 t/ha en saison sèche). Les variétés très productives sont privilégiées dans ce contexte. Au contraire, la culture pluviale, ne nécessite aucun aménagement préalable mais comporte bien plus de risques, dû en grande partie à la fluctuation du l'apport hygrométrique. De même la production se limite souvent à un seul cycle de culture abaissant fortement les rendements et les rendant plus variables (entre 1,5 t/ha et 4,5 t/ha). Les variétés rustiques sont alors privilégiées.

Dès lors que les conditions optimales en humidité et en température (supérieure à 20 °C, optimale à 30 °C) sont réunies la germination commence. Un quart de son poids en eau absorbé par le grain. La croissance de la plante est relativement simple et son cycle complet jusqu'à récolte du grain est plutôt rapide, permettant plusieurs récoltes annuelles.

En premier apparait **la coléoptile** sortant à la base de la glumelle inférieure. Puis **la radicule** apparaît. A la base de chaque tige, à l'angle de chaque feuille nait un bourgeon qui, 20 à 30 jours après le semis, donnera naissance à une deuxième tige. Celle-ci, à son tour, produira une tige secondaire, cette même démarche se reproduisant plusieurs fois. C'est **le tallage**. L'espace libre autour de la plante est déterminant. Avec bonnes conditions et une bonne variété un plant peut produire jusqu'à 30 talles.

**La montaison**. La panicule croit à l'intérieur de la tige et migre vers l'extrémité de cette dernière. Cette phase a lieu 60 à 80 jours après le semis.

Environ 90 à 110 jours après le semis la panicule émerge, c'est **l'épiaison**.

Par la suite arrive **la floraison** correspond à l'ouverture des glumelles d'où vont sortir les étamines. C'est pendant cette période qu'a lieu **l'autopollinisation** : le pollen des fleurs mâle vient se fixer sur les fleurs femelles, des millions de fleurs se transforment alors en grains. Un unique **épillet** apparaitra sur chaque fleur.

Le grain absorbe une grande quantité d'eau avant de le perdre par phénomène de transpiration. Ce dernier arrive à maturation 45 jours environ après l'émergence de la panicule. La récolte peut alors se faire.
Le riz aime la chaleur. Pour pousser convenablement, une température comprise entre 30 à 35 °C est nécessaire. Ce dernier tolère des températures plus basses (jusqu'à 13 °C) mais pas inférieures.

Le besoin en eau pour les riz irrigués est de l'ordre de 10 à 20 000 m3/ha ; pour le riz pluvial, autour de 5 mm par jour, soit 600 mm de pluie pour un riz ayant une maturation à 120 jours.
Le riz nécessite beaucoup de lumière. Dans les régions où la lumière est diffuse (montagnes, présence de brouillard...) une végétation plus frêle et un rendement plus faible est à déplorer.

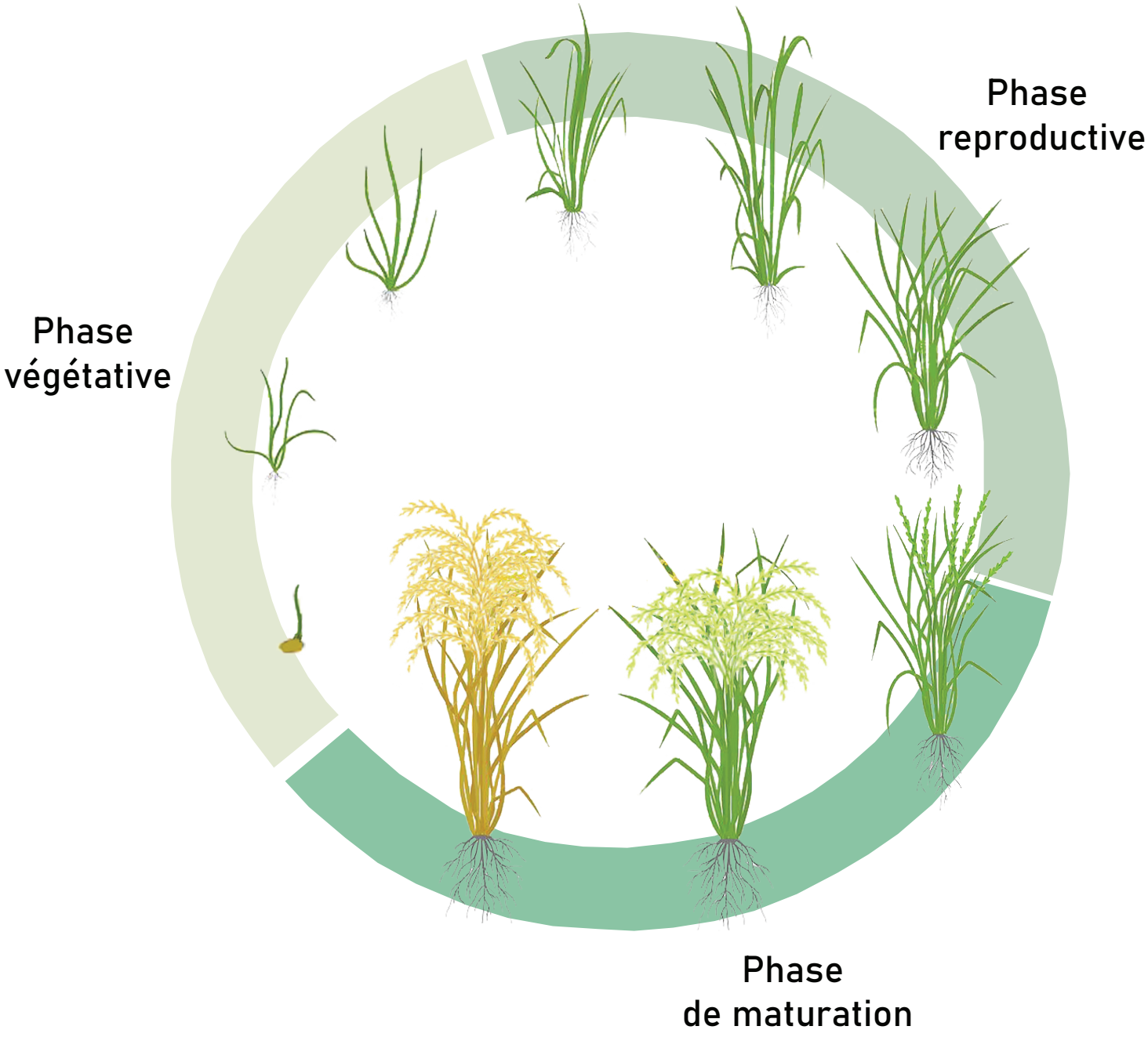



Fig. 24 : Schéma du cycle de croissance de la plante de riz

Dans certains cas les problèmes de parasitisme sont devenus plus aigus sur les plants, cela est dû à de nombreux facteurs comme :

- L'utilisation d'un nombre réduit de nouvelles variétés
- L'utilisation accrue d'engrais et d'eau pour l'irrigation
- Une densité accrue de plants dans les parcelles
- Un passage à la double voire à la triple culture sans rupture du cycle de production

Des résistances multiples à des insectes (cicadelles brunes et vertes, foreurs des tiges, cécidomyie du riz) et des agents pathogènes (pyriculariose, flétrissement bactérien, flétrissement des gaines, virus du tungro, nanisme herbacé), dont certaines en provenance d'espèces sauvages, ont donc été progressivement introduites dans les nouvelles variétés par modification ou sélection génétique, conduisant à stabiliser le rendement à un haut niveau.

En ce qui concerne, par exemple, la question de l'agro-biodiversité, les cultures de riz s'intègrent de manière optimale à d'autres activités productives telles que l'élevage de poissons et de canards, où ils sont libérés et se développent avec les plants de riz.

Ces systèmes ont été introduits afin de diminuer l'utilisation d'engrais chimiques et nocifs pour l'environnement. Les canards comme les poissons se nourrissent de nombreuses mauvaises herbes à feuilles larges et, par leur nage et leur marche réduisent leur germination, tout en se nourrissant également d'insectes.
Enfin, le riz peut être cultivé en même temps que des plantes potagères et des arbres fruitiers, assurant ainsi une agriculture biodiversifiée.
En ce qui concerne l'environnement, le CIR (Commission internationale du riz) entend trouver des solutions aux problèmes liés au développement durable du riz et aux systèmes de production durables.

Tout aussi fondamentale est la gestion des ressources en eau, dont la diminution de la disponibilité est préoccupante. Les cultures de riz ont besoin d'eau pour quatre raisons principales : l'évapotranspiration, l'infiltration, la percolation, la préparation du sol et le drainage avant les semis.

Pour tenter de limiter l'utilisation excessive des ressources en eau, la réduction de leur utilisation a été encouragée par le développement de différentes variétés qui ont moins besoin d'un approvisionnement continu et important en eau, comme la culture à faible consommation d'eau, de meilleurs systèmes d'irrigation et son recyclage.

Au cours des dernières décennies, plusieurs instituts internationaux ont promu de nouvelles techniques de culture du riz, comme la technique aérobie qui utilise la respiration

cellulaire pour oxyder les substrats afin d'obtenir de l'énergie, ou le système basé sur l'alternance de phases humides et sèches.

Une autre technique qui peut devenir favorable à l'expansion de la culture du riz tout en réduisant la pénibilité est le semis direct sur couverture végétale. Cette dernière consiste à semer directement (sans labour) sur une couverture végétale qui protège le sol. Cela permet de réutiliser les résidus de récolte ou couverture vive constituée par une plante différente de celle qui est cultivée. Ces techniques offrent de avantages non négligeables réduisant la pénibilité du travail de l'agriculteur et apportant des effets bénéfiques sur l'environnement (préservation du sol et de l'eau, recyclage des nutriments par les plantes de couverture…).

En ce qui concerne l'aspect environnemental, la protection de l'écosystème, de plus en plus endommagé par l'utilisation de pesticides chimiques et nocifs dans les cultures, est tout aussi importante.
Malheureusement, l'utilisation excessive de pesticides et d'engrais chimiques non assimilés par l'environnement est encore fréquente dans la culture du riz, contribuant ainsi à l'augmentation des émissions de gaz dits à effet de serre. Par exemple, les rizières dans lesquelles la culture par immersion est pratiquée émettent une quantité considérable de méthane, et la culture du riz elle-même induit une quantité drastique de dioxyde de carbone dispersé dans l'atmosphère. En effet, il a été constaté que sur le total des émissions de gaz à effet de serre en Amérique en 2005, environ 0,1% de méthane a été émis par les terres cultivées en riz, et que ce gaz a même atteint le seuil de 9,8% en Inde en 2006.

Ayant mis en évidence ces enjeux, l'ARI a mis en place une stratégie de mise en œuvre de son programme basée sur l'implication de l'ensemble de la communauté mondiale afin d'initier des actions combinées visant à une augmentation durable de la production rizicole. L'ARI a donc créé un cadre pour atteindre cet objectif et fourni certains des moyens nécessaires pour le poursuivre. Un de efforts mis en place actuellement est l'idée de repenser les modalités de culture du riz et augmenter les surfaces de récolte. Actuellement la riziculture pluviale ne représente qu'une faible partie des surfaces rizicoles ( environ 13%) malgré tout elle pourrait permettre de satisfaire la demande alimentaire de demain. En effet, la culture du riz pluvial, n'exige pas d'aménagements coûteux comme pour la riziculture irriguée. Elle est pratiquée sous climat tropical, sur des reliefs divers, plaine, plateau, colline ou montagne… autant de surfaces cultivables encore peu exploitées, notamment en Amérique du Sud et en Afrique. Il reste pourtant important de ne pas défricher des zones boisées pour les cultures mais de limiter la création de ces nouvelles terres de culture à des zones non boisés et/ou avec peu de biodiversité.

Aussi le Cirad (Centre de coopération

internationale en recherche agronomique pour le développement) s'applique à intensifier les cultures ainsi que leurs superficies tout en préservant l'environnement, notamment par la création de variétés céréalières modernes au rendement élevé et stable.

Les trois quarts du volume d'eau consommé dans le monde sont utilisés pour l'agriculture irriguée, indispensable à la sécurité alimentaire de nombreux pays. Or cette ressource planétaire devient rare et il est urgent de l'économiser. C'est pourquoi le Cirad attache beaucoup d'importance à la gestion hydrique des terres irriguées dans le monde. Longtemps assurée par les Etats, la gestion de ces réseaux d'équipements hydrauliques est aujourd'hui prise en charge par les groupements d'agriculteurs eux-mêmes. Afin de faciliter cette gestion devenue complexe et qui nécessite d'intégrer de nombreuses informations, le Cirad intervient auprès des différents acteurs concernés par la ressource. Des méthodes de gestion et de négociation entre tous les partenaires du réseau sont proposées en vue de concilier l'intérêt du paysan et l'intérêt collectif : il s'agit d'obtenir des revenus satisfaisants, un service de qualité, de rentabiliser les équipements, de valoriser au mieux le mètre cube d'eau et de partager la ressource en eau et de la préserver pour demain.

Préserver les ressources naturelles de la planète et mettre en place une riziculture durable, produire plus pour répondre à des besoins alimentaires croissants, répondre à des consommateurs de plus en plus exigeants sont un aperçu des grands défis à relever dans le domaine de l'agriculture !

Source : Khotcharak Siriwong

## 4.3 Modèle circulaire : Sous-produits du riz, de déchet à matière première

Des dizaines de milliers de variétés de riz sont cultivées à travers le monde ; tout au plus quelques-unes d'entre elles sont commercialisées pour être mis sur les étals des centres commerciaux. Le terme RIZ désigne le grain récolté (céréale récoltée tel quel), comme il désigne l'aliment cuisiné (produit fini près à être consommé). Mais avant d'être consommé le riz subit de nombreuses transformations. Avant d'arriver dans l'assiette des consommateurs, il subit un usinage qui le transforme en riz consommable. Chacune de ces étapes à une influence sur la qualité du produit final.

· Après la récolte, le riz est battu, permettant de décrocher les grains des tiges et étant encore vêtus de leur balle (les glumes et glumelles), c'est le riz paddy.

· Puis le riz est décortiqué. Il est débarrassé de la balle, et devient le riz cargo ou riz complet. À cette étape de la transformation le riz est déjà consommable mais est long à cuire (40 à 45 minutes).

· Le riz est ensuite blanchi par abrasion des grains qui sont ainsi débarrassés de leur péricarpe (plus ou moins coloré), téguments et germe. On obtient du riz blanchi. Il est alors essentiellement composé d'amidon, et sa valeur nutritive est comparable à celle du blé.

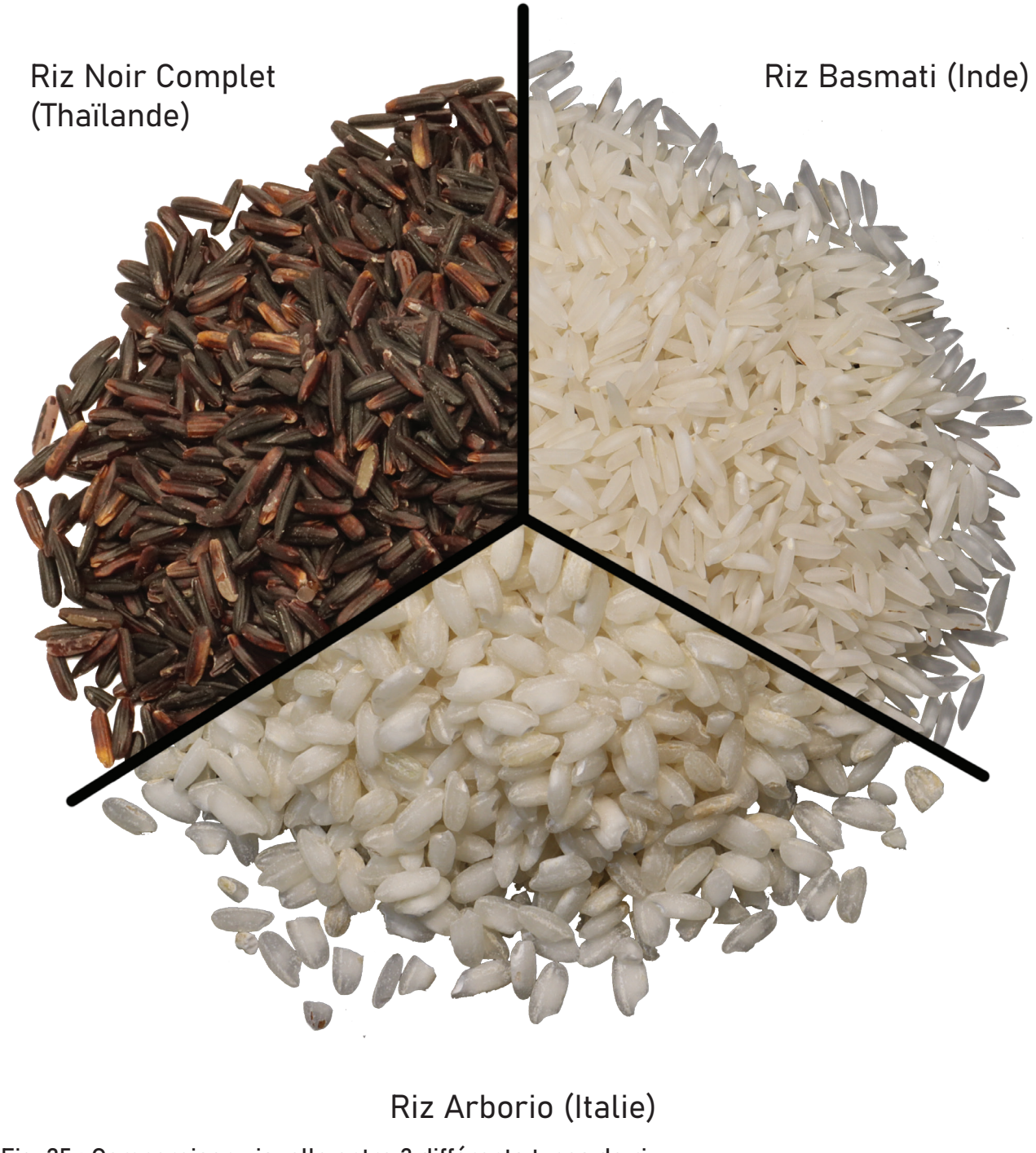



Fig. 25 : Comparaison visuelle entre 3 différents types de riz

La forme des grains (définie par des caractéristiques tels : leur longueur, leur largeur et le rapport entre les deux) permet de classer le riz en différentes catégories commerciales : **riz rond, riz médium, riz long…** Ce classement est utilisé depuis 1988 au sein de la Communauté européenne.

**Le riz gluant** à la caractéristique d'être très collant après la cuisson. Cette particularité est dû à la composition de son amidon possédant une très faible quantité d'amylose. Ce riz particulier se trouve surtout au Japon, en Thaïlande et au Laos.

**Le riz aromatique ou riz parfumé** possède une particularité génétique des plus intéressantes au niveau gustatif, il est naturellement parfumé.

**Le riz Basmati** est cultivé essentiellement en Inde et au Pakistan. Facilement reconnaissable à ses grains longs et très minces, à sa couleur laiteuse et à son délicat parfum de noisettes.

**Le riz Thaï**, au grain long et plus épais que le précédent riz basmati est cultivé en Thaïlande ; il provient essentiellement de la variété Khao Dawk Mali, qui signifie « riz au parfum de jasmin ».

**Le riz vert** est un riz que l'on récolte au Vietnam à l'apogée de la montée de sève lorsque les grains sont au stade « laiteux ». Une fois séchés et aplatis, ils prennent l'apparence de flocons verdâtres.

Le grain de riz est essentiellement composé d'amidon (autour de 90 %) avec des protéines (6 à 12 %) et des vitamines appartenant en majorité au groupe B (principalement thiamine, riboflavine, niacine). Il s'agit d'un aliment riche en énergie, d'une bonne valeur diététique et d'une très bonne digestibilité. Malheureusement malgré ses qualités nutritionnelles, le riz est pauvre en lipides (1 à 2 %) et a une carence en vitamines C, D ou A.
Après la cultivation et avant sa commercialisation le riz peut subir plusieurs transformations en fonction des besoins ou de son utilisation.

**Le riz étuvé** subit un passage sous vapeur et sous haute pression avant d'être décortiqué et blanchi. Le procédé est appelé **étuvage.** S'en suit un **séchage** et un **usinage** pour débarrasser le riz paddy de sa balle, puis de son péricarpe, de ses téguments et de son germe. Le riz étuvé est souvent désigné comme « incollable » cette caractéristique est dû au traitement à la vapeur qui gélatinise les granules d'amidon et limitant ainsi leur libération lors de la cuisson. Outre un meilleur rendement à l'usinage par un plus faible taux de brisures, ce procédé donne au riz une meilleure valeur nutritionnelle, les vitamines et sels minéraux se condensent à l'intérieur du grain lors de l'étuvage.

· Le **riz précuit** est traité à la vapeur en grain blanchi puis séché. Ce traitement permet au riz de cuire seulement en 5 à 10 minutes. Cette opération fissure généralement le grain, ce qui le rend moins attractif.

· **Les brisures de riz** sont d'une certaine façon des résidus de l'usinage. Le plus souvent réduit à l'état de farine et utilisées pour la production nombreux plats. Elles sont très appréciées dans certains pays, comme au Sénégal.

· **Le riz soufflé** est gonflé à sec sur une source de chaleur comme un pop-corn. Il est très apprécié en Inde.

L'utilisation des sous-produits de la culture du riz son aujourd'hui encore beaucoup utilisés dans les pays en voie de développement ou dans les zones conservant une méthode de culture plus traditionnelle. Ainsi La paille contribue à l'alimentation des bovins. Les sous-produits issus des rizières servent aux élevages de poissons, volailles, porcs ; Limitant l'achat de denrées alimentaires destinées aux élevages, limitant la quantité de déchet tout en s'intégrant dans une dynamique de consommation circulaire.

Mais considérer que l'utilisation des sous-produits du riz se limite aux pays en voie de développement serait rétrograde ainsi que totalement faux. Les pays Européens se mobilisent pour améliorer les rendements agricoles, la rentabilité des cultures tout en réduisant considérablement l'impact sur l'environnement. La réutilisation ou recyclage des sous-produits d'agriculture fait partie de ce processus. De façon plus précise, la balle et l'amidon de riz sont aujourd'hui de plus en plus réutiliser et intégrer dans des processus de commercialisation afin de réduire des coups de production ou en tirer des bénéfices.

### 4.3.1 La balle de riz

L'enveloppe du riz se compose physiquement de deux glumes qui recouvrent chaque grain de riz et qui se distinguent en :

- Glumelle supérieure : de taille plus importante et reconnaissable car aristé, c'est-à-dire se terminant à l'apex par une extension filiforme appelée arête ;

- Glumelle inférieure : plus petit et n'est pas aristé.

Tous deux remplissent la fonction importante de protéger les organes floraux qui naissent pendant la période de floraison. Vient ensuite la période de maturation, pendant laquelle de plus en plus de cellules lignifiées commencent à se former dans ces glumes (cellules qui subissent le processus de lignification, c'est-à-dire l'infiltration de lignine en elles), avec une teneur élevée en silicates.

Toujours pendant la période de maturation il est possible d'observer le changement de couleur qu'à l'enveloppe de riz, passant d'un jaune-or quand il est encore attaché à l'épillet et soutient la plante, à un brun-bronze clair après la ramification.

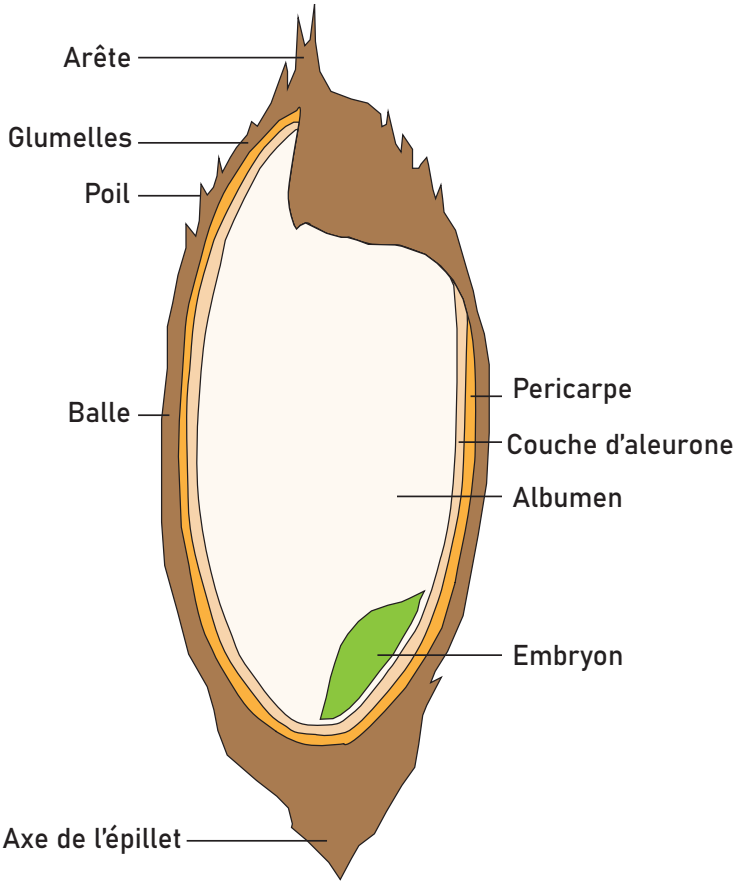



Fig. 26 : Section longitudinale d'un grain de riz

D'un point de vue chimique, la balle de riz est composée de différents composants et substances, tels que :

- **Fibres brutes** : la balle est constituée d'une fraction fibreuse grossière importante. Elles sont le résidu insoluble d'un matériau, produites suite à une hydrolyse alcaline (réaction qui se produit lorsqu'un acide faible et une base forte sont dissous dans une solution aqueuse) puis à une réaction acide (réaction qui se produit lorsqu'un sel dérivant d'un acide fort est dissous dans une solution aqueuse). La cosse en particulier contient des NDF - Neutral Detergent Fiber, qui est la fibre résiduelle à un détergent neutre placé en solution, et des ADF - Acid Detergent Fiber, la fibre résiduelle à un détergent acide toujours ajouté en solution ;

- **Lignine** : polymère organique lourd et complexe composé principalement de composés phénoliques, situé dans la paroi secondaire des cellules végétales qui, résistant à la compression, lui confère sa solidité. De plus, étant hydrophobe, il garantit également l'étanchéité des cellules.

Grâce à ses caractéristiques, si la balle de riz était insérée dans un mélange destiné à la production de béton, elle serait en mesure de maintenir sa forme concave, ce qui favoriserait la présence de vides remplis d'air au sein du mélange, améliorant ainsi en fin de compte ses performances thermiques.

- **Cutine** : substance cireuse hydrophobe présente à l'intérieur de la cuticule protectrice et recouvrant les parties externes des tissus tégumentaires des plantes, empêchant ainsi la déshydratation. Sa concentration dans la balle de riz est élevée.

- **Silice insoluble** : également appelée dioxyde de silicium, sa nature de semi-conducteur de l'électricité favorise son utilisation pour les composants électroniques. Elle également utilisée comme isolant en plus des composés pour la production de produits céramiques, souvent utilisés comme abrasif et comme matériau réfractaire dans les fours.
La teneur en silice de la balle de riz est remarquable, c'est pourquoi elle est souvent réduite en cendres pour être introduite dans le composé constitué par l'eau et le ciment Portland pour la préparation du béton, garantissant ainsi l'activité pouzzolanique.

- **Cellulose** : polysaccharide constitué d'un nombre considérable de molécules de glucose reliées entre elles par une liaison glycosidique. Sa présence dans la balle de riz est faible.

La balle de riz présente également des caractéristiques spécifiques qui améliorent les performances thermiques du béton si elle est ajoutée en tant que granulat naturel, en premier lieu dû à sa morphologie.

Les deux glumelles retirées du caryopse ont la même forme que l'élément qu'elles protègent, elles sont donc oblongues et ont une conformation concave.
Cette concavité est maintenue grâce à la présence dans la balle de la lignine décrite ci-dessus, de sorte qu'elle assurera un grand nombre de pores dans le mélange de béton.

Au niveau microporeux, en observant au moyen d'une analyse SEM (Scanning Electronic Microscopy) la section d'une seule particule d'écorce, on observe de petites concavités vides qui peuvent même atteindre la taille de 0,1 µm.

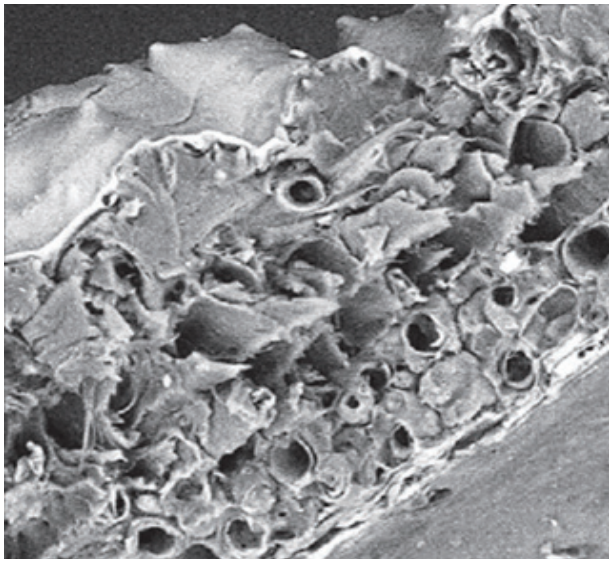


Fig. 27 : Section de la balle de riz réalisée par analyse SEM

Par conséquent, la balle de riz se caractérise par un niveau élevé de porosité fermée (également appelée porosité inefficace, selon laquelle on entend la fraction du volume total dans laquelle des fluides ou des gaz sont présents, mais dans laquelle l'écoulement du fluide ne peut avoir lieu efficacement et qui comprend également les pores fermés) par rapport à d'autres agrégats naturels plus courants, ce qui affecte les propriétés mécaniques de l'éventuel composé dans lequel elle sera ajoutée tout en améliorant la résistance thermique de cette dernière.

Compte tenu de la disponibilité considérable du riz et par dérivation de la balle de riz sur le territoire mondial ainsi que sur le territoire national, celle-ci représente une ressource importante et en tant que telle elle doit être utilisée ou recyclée de la meilleure façon possible.

La balle de riz est égale à 20% du poids total du riz paddy ce qui correspond, en prenant en compte les chiffres de 2017, à 145 millions de tonnes de résidus agricole. Ce chiffre montre la nécessité de devoir trouver des solutions durables à l'utilisation de la balle de riz.

Une fois que le riz brut a été débarrassé de sa balle, elle peut ou non subir certains traitements, grâce auxquels il est possible de faire la distinction suivante :

- Coque fraîche : déchet de riz paddy qui ne subit aucun traitement. Généralement utilisé pour augmenter le drainage et la microporosité des substrats. Elle peut être utilisée entière ou moulue ;

- Coque étuvée : provient du processus d'étuvage qui la stérilise de la présence éventuelle d'agents pathogènes. Après le traitement, il devient jaune et peut également être utilisé entier ou moulu ;

- Coque carbonisée : soumise à de hautes températures dans des fours qui la rendent sèche à 50% ;

- La balle compostée : elle est compostée pendant 24 mois afin d'amorcer une fermentation anaérobie, suivie d'une fermentation aérobie.

- La balle expansée : elle est surchauffée jusqu'à atteindre une température proche de 220°C, ce qui la fait gonfler jusqu'à la rupture ;

- La cosse vieillie : on la laisse simplement vieillir en favorisant une oxydation passive qui la rend naturellement brune.

Outre les méthodes de traitement listés ci-dessus, l'utilisation de la balle de riz est aujourd'hui très variée, elle est utilisée dans la filtration de la bière, dans les litières animales, utilisé comme apport végétal et épandu dans les champs mais aussi et surtout, car en lien avec notre thèse, dans la construction où elle est utilisée comme isolant.

| | Balle brute | Balle étuvée | Unités |
|---|---|---|---|
| Humidité | 12,82 | 12,47 | |
| Matière sèche | 87,18 | 87,53 | |
| Matière organique | 87,18 | 87,53 | %MS Matière sèche |
| Matière minérale | 16,2 | 13,88 | %MS |
| pH Eau | 6,8 | 6,67 | |
| Résistivité | 1078,7 | 1492,5 | ohm.cm |
| Azote total | 0,23 | 0,422 | % MS |
| Rapport C/N | 182,01 | 102,11 | |
| Azote organique | 0,229 | 0,42 | % MS |
| Anhydride sulfurique ($SO_3$) | 0,078 | 0,069 | % MS |
| Anhydride phosphorique ($P_2O5$) | 0,062 | 0,112 | % MS |
| Oxyde de calcium (CaO) | 0,158 | 0,193 | % MS |
| Oxyde de Magnésium (MgO) | 0,051 | 0,056 | % MS |
| Oxyde de Potassium ($K_2O$) | 0,291 | 0,221 | % MS |
| Oxyde de sodium ($Na_2O$) | 0,011 | 0,005 | % MS |
| Fer | 168,09 | 97,49 | mg/kg sec |
| Manganèse | 157,13 | 110,17 | mg/kg sec |
| Cuivre | < 2 | <2 | mg/kg sec |
| Zinc | 8,16 | 7,06 | mg/kg sec |
| Azote ammoniacal | 9,64 | 20,34 | mg/kg sec |
| Azote nitrique | 2,57 | 1,94 | mg/kg sec |
| Cellulose weende | 33,9 | 39,1 | % MS |
| Fraction organique soluble | 17,76 | 13,22 | % MOS (Matière organique sèche) |
| Hemicellulose | 22,67 | 24,57 | % MOS |
| Cellulose | 33,9 | 44 | % MOS |
| Lignine | 15,04 | 18,11 | % MOS |
| Apport d'humus | 251 | 328 | kg/T de produit brut apporté au sol |
| Insoluble Chlorhydrique ($SiO_2$) | 12,1 | 12,7 | % MS |

Tab. 17 : Paramètres Psycho-Chimiques de la balle de riz
Les résultats présentés dans ce tableau sont donnés à titre indicatif et les analyses ont été réalisées en mai 2009 par le Centre Français du Riz

L'analyse approfondie réalisée jusqu'à présent dans cet article sur la balle de riz permet de tirer les conclusions suivantes :

- **La balle de riz** n'est plus considérée comme un déchet mais comme **un sous-produit** agricole pouvant faire l'objet d'activités de recyclage et de valorisation ;

- **Nombreuses** sont les **utilisations** actuelles et le recyclage de la balle de riz dans différents secteurs, notamment dans le domaine de la construction ;

- La balle de riz possède des propriétés qui, si elle est utilisée comme composant pour la production de béton, permettraient d'améliorer certaines de ses performances, en particulier ses **performances thermiques**.

La valorisation de la balle de riz s'est surtout étendue au secteur de la construction. Les premières expériences concernent l'utilisation de ce sous-produit agricole comme ajout pour la préparation d'un des matériaux de construction les plus utilisés au monde, le béton.
Pour la production de ces derniers, les composants tels que les liants et les granulats représentent une consommation importante de matières premières non renouvelables, le processus de production nécessite également une quantité considérable d'énergie, tout en dégageant des émissions nocives pour l'environnement. Cependant, le béton est le matériau de construction le plus utilisé dans le monde, avec une utilisation moyenne d'environ 10 000 millions de tonnes/an, et l'on s'attend à ce que sa demande continue à augmenter fortement au cours des 40 prochaines années. Il a été estimé que la production de ciment induit 74% à 81% des émissions de dioxyde de carbone, et que les granulats sont responsables d'une fraction des émissions allant de 13% à 20%.
En définitive, on a calculé approximativement que la production d'une tonne de ciment Portland entraîne l'émission d'environ 0,94 tonne de dioxyde de carbone.
L'approche développée ces dernières années est basée sur la réduction des émissions nocives et la diminution de l'utilisation de ressources limitées grâce à l'utilisation de matériaux et de composants recyclés. La recherche s'est donc concentrée sur l'utilisation de liants, de granulats et d'eau provenant de processus et d'activités de récupération. Dans ce contexte, le recyclage des balles de riz a trouvé sa place en tant que complément à la préparation de béton à haute performance mécanique et résistance.
L'idée ce projet de thèse conduit au recyclage de la balle de riz et à son utilisation comme agrégat dans le béton pour en améliorer les performances thermiques et substituer l'utilisation d'agrégat minéral.

### 4.3.2 L'amidon de riz

Dans un premier temps il est nécessaire de préciser que pour le choix de l'amidon, celui de maïs aurait pu se satisfaire à l'amidon de riz. Ceci étant dit, notre volonté était de limiter l'utilisation de différents produits issu de différentes origines mais aussi de pouvoir se focaliser sur une plante précise et de mettre en évidence le large éventail de possibilités que cette dernière nous offre.

Le riz est une céréale riche en amidon. L'amidon est un polymère de glucose composé de deux polymères : l'amylose (molécule essentiellement linéaire) et l'amylopectine (molécule ramifiée), chacun est capital pour l'amidon et ses caractéristiques physiques tel que : viscosité, stabilité du gel, résistance au cisaillement, gélatinisation, texture, pouvoir adhésif, gonflement au froid et rétrogradation, solubilité, tout dépend de l'équilibre entre amylopectine et amylose. L'amidon est en très grande majorité composé d'une fraction glucidique (98 à 99%) et d'une fraction non glucidique (1 à 2%). Même si la présence de cette dernière semble faible à l'intérieur de l'amidon, elle reste non négligeable car elle modifie les propriétés fonctionnelles en particulier par la présence des lipides. C'est un polymère de réserve accumulé dans les chloroplastes des tissus chlorophylliens ou sous forme de tubercules ou graines dans d'autres cas. Il sert de réserve d'énergie pour la plante (glucides) et fait l'objet d'utilisations alimentaires et non alimentaires.

La teneur en amylose et amylopectine affecte la qualité et les propriétés de l'amidon. Environ

150 000 variétés de riz sont répertoriées dans le monde. Cette variabilité repose sur une diversité allélique et porte sur la forme de grain de riz, sa couleur, ses qualités gustatives, son parfum, son aspect gélatineux… L'amidon de riz diffère des autres types d'amidon par le volume contenu de ses granules, qui, lorsqu'ils sont observés au microscope, apparaissent multiformes.
Cette particularité rend l'amidon de riz facile à digérer. La teneur d'amylose dans l'amidon de riz est peut-être le facteur influençant le plus la qualité du riz lors de la consommation. La teneur en amylose est directement en corrélation avec la quantité d'eau absorbé pendant la cuisson par l'amidon du riz.

Selon l'origine botanique, les teneurs en amylose peuvent varier entre 20 à 30% et celles de l'amylopectine de 70 à 80% pour les amidons dits standards. Cependant, quelques espèces d'amidon peuvent contenir moins de 1% d'amylose (maïs cireux ou waxy) ou entre 45 à 80% d'amylose (amylomaïs).

L'amylose est caractérisée par une macromolécule de structure linéaire constituée d'unités a-D-glucose, liées par des liaisons de type A(1-4) (Fig. 28). L'amylose se compose de plusieurs chaînes présentant des degrés de polymérisation variables,

Du fait de son caractère essentiellement linéaire et de la présence de liaisons de type A(1-4), l'amylose est susceptible de former des complexes d'inclusion avec de nombreuses molécules organiques ou minérales, comme l'iode, les acides gras libres… (Fig. 29). Dans ces complexes, l'amylose a une conformation hélicoïdale (6 unités glucose/tour), dans laquelle tous les groupements hydrophiles de la chaîne sont tournés vers l'extérieur et les groupements hydrophobes vers l'intérieur.

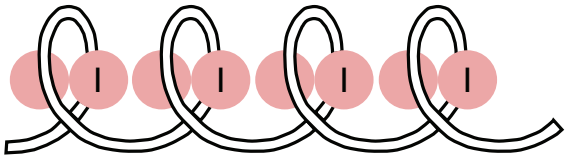



Fig. 29 : Structure Amylose-iode formé par une hélice d'amylose et une molécule d'iode, (source: BOURSIER, 2005)

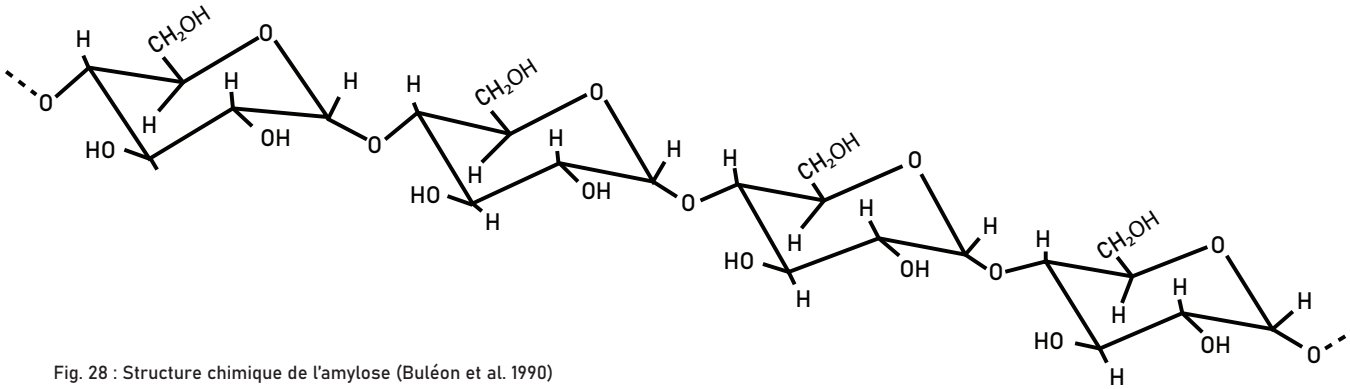



Fig. 28 : Structure chimique de l'amylose (Buléon et al. 1990)

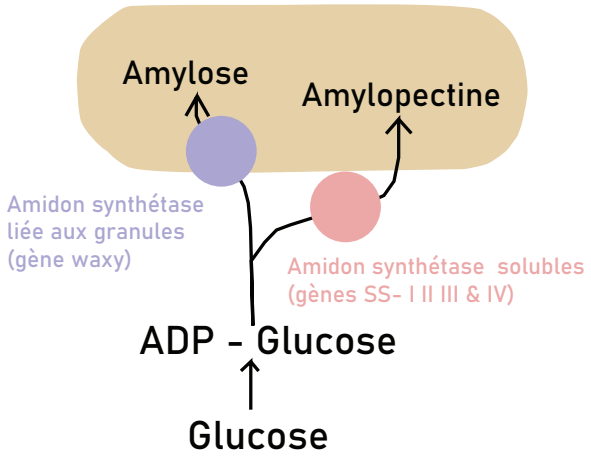



Fig. 30 : Schéma simplifié de la granule d'amidon

Pour L'amylopectine en revanche, contrairement à la longue chaîne linéaire d'amylose, est une macromolécule de structure ramifiée (Fig. 31). L'amylopectine est formée par la polymérisation d'un seul monomère D-glucose, lié principalement par des liaisons A(1-4) et quelques liaisons A(1-6) à l'origine des ramifications, ces dernières représentent environ 5 à 6% du nombre total de liaisons[1].

Ces chaînes ne sont pas greffées au hasard les unes sur les autres. La masse moléculaire moyenne de l'amylopectine est assez élevée, les valeurs les plus souvent citées dans la littérature se situent entre 107 et 108 g/mole. On attribue à l'amylopectine la propriété de pouvoir gélifier très lentement.

Les granules d'amidon, insolubles dans l'eau à température ambiante (et froide), sont des particules blanches semi-cristallines, dont la taille varie entre 2 et 100µm. Pour chaque espèce végétale, la forme et la taille des granules d'amidon est unique.

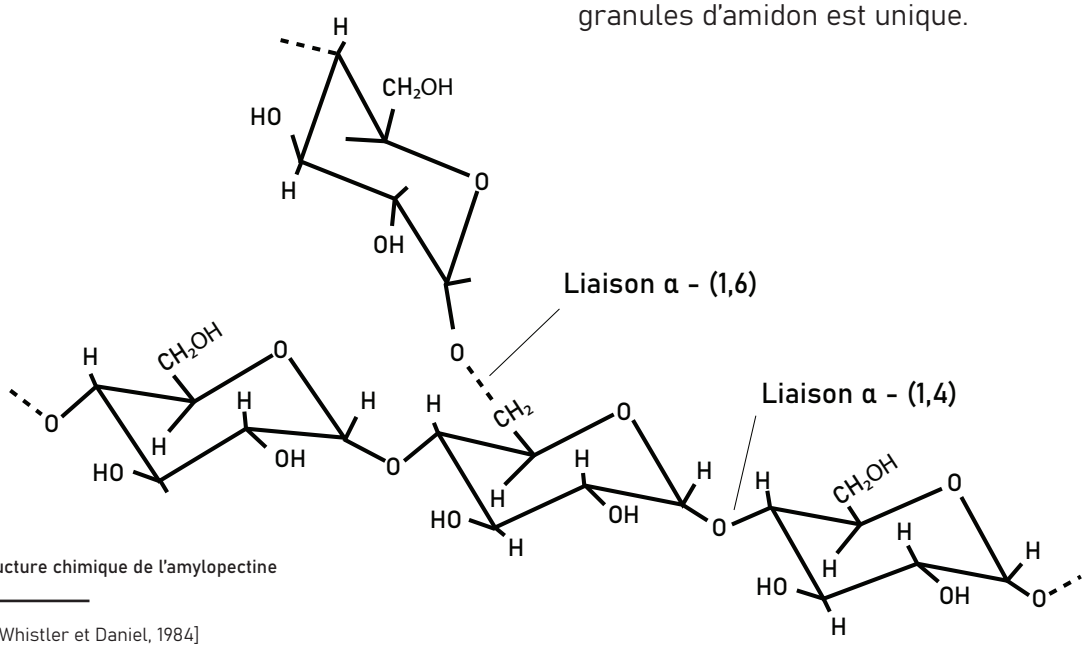



Fig. 31 : Structure chimique de l'amylopectine

1 [Whistler et Daniel, 1984]

De façon très simplifiée, l'organisation du grain d'amidon résulte de l'agencement de l'amylose et de l'amylopectine en zones amorphes et cristallines, pores traversant les anneaux cristallins et semi-cristallins) disposées de manière concentrique à partir du hile (zone périphérique et centrale du grain d'amidon) (Fig. 32). La cristallinité des amidons serait due essentiellement aux chaînes en doubles hélices de l'amylopectine ; la cohésion des zones cristallines est assurée par des liaisons hydrogène intermoléculaires.

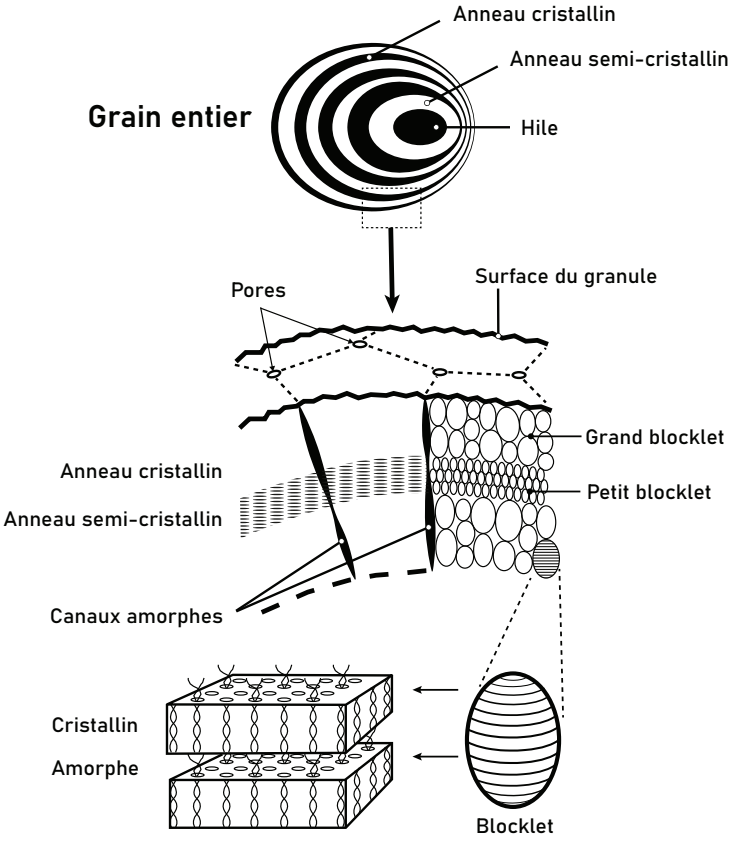



Fig. 32 : Schéma de la structure d'un grain d'amidon à différents niveaux d'organisation [Gallant et al., 1997]

Les grains d'amidon sont des éléments semi-cristallins dont les cristallites (éléments composants les blocklets) diffractent les rayons X en donnant deux types principaux en fonction de l'origine botanique et éventuellement des traitements technologiques subis.

Le type A, caractéristique des amidons de céréales et le type B, des amidons de tubercules, de céréales riches en amylose (>40%) ainsi que des amidons rétrogradés. Il existe un troisième type, le type C, qui est spécifique aux amidons de légumineuses (haricots, pois, fève), et présente des caractéristiques intermédiaires entre celles des types A et B. Pour les types cristallins A et B, les chaînes macromoléculaires s'organisent en doubles hélices gauches à 6 unités glucose par tour. Chaque hélice est parallèle à sa voisine avec un décalage d'un demi-pas selon l'axe de l'hélice. Deux chaînes courtes d'amylopectine ou deux chaînes d'amylose peuvent donner naissance à deux types différents de cristaux A ou B. Le type A correspond à une maille cristalline peu hydratée contenant 4 molécules d'eau, tandis que le type B correspond à une structure hydratée contenant 36 molécules d'eau[2].

A température ambiante, l'eau pénètre facilement dans les régions amorphes des grains (à travers les pores et les canaux amorphes) et interagit avec les molécules d'amidon par l'intermédiaire de liaisons hydrogène, conduisant à un léger gonflement des granules, qui est toutefois réversible.

2 [Boursier, 2005]

En revanche à des températures supérieures à 60 °C et en présence d'un excès d'eau (> 60%), les grains d'amidon subissent un gonflement irréversible dû à la rupture des liaisons hydrogène[3], le grain devient soluble et perd sa structure semi-cristalline., une fois refroidie, l'amidon forme un gel (Fig. 33). La solubilisation de l'amylose et la fusion de la structure cristalline des granules implique la gélatinisation de l'amidon.[4].

La réaction de gélatinisation est caractérisée par trois phases de températures : température initiale, température de pic et température finale ainsi que l'enthalpie de gélatinisation[5]. Le comportement lors de la gélatinisation dépend de l'espèce botanique et éventuellement du génotype (maïs cireux, maïs normal, maïs riche en amylose, riz japonica, riz indica...).

Afin d'hydrater correctement les molécules d'amidon et permettre la gélatinisation, l'eau doit être présente en quantité suffisante[6]. La teneur en eau influence la température de gélatinisation, mais aussi la forme de l'endotherme. Ainsi différentes études ont pu démontrer que les énergies nécessaires à l'activation de la réaction de gélatinisation diminuent lorsque la teneur en eau dans le système augmente, et se stabilisent à partir de 60% d'eau.

La gélatinisation de l'amidon s'effectue en deux étapes : dans un premier temps le gonflement des grains avec l'absorption de l'eau et ensuite la dissolution des macromolécules va s'effectuer, transformant progressivement l'amidon en un liquide puis un gel lors de son refroidissement[7].

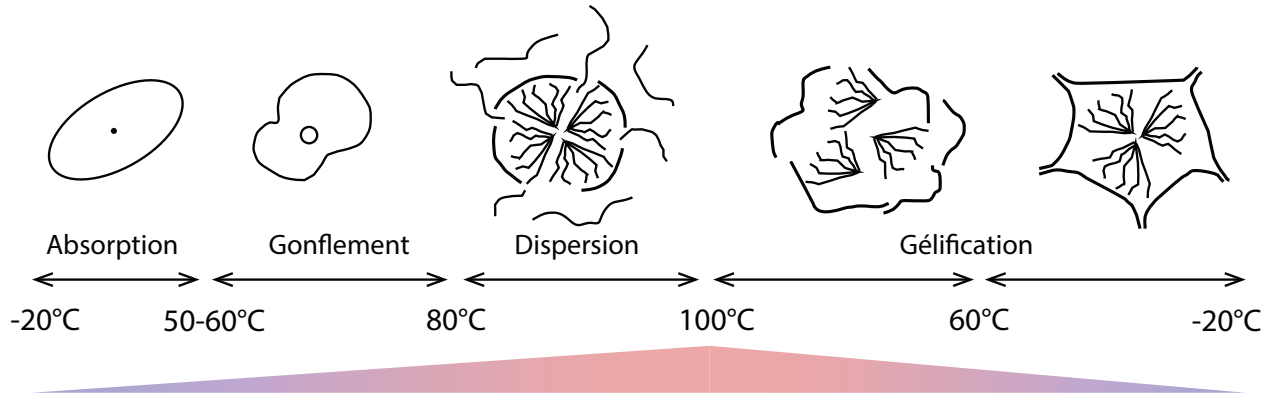



**Fig. 33 : Transformation hydrothermique d'un grain d'amidon [Buléon et al., 1990]**

3 [Zobel et al., 1988a; Donovan, 1979]

4 [Tester et Debon, 2000; Jacobs et Delcour, 1998 ; Stute, 1992]

5 [Wootton et Bamunuarachchi, 1979; Stevens et Elton, 1971]

6 [Biliaderis, 1992]

7 [Buléon et al., 1998]

Lors de la disparition de la structure cristalline dû au chauffage avec une teneur basse en eau le terme de fusion est préféré.

Les empois d'amidon en présence d'un excès d'eau ayant subi un traitement thermique au-delà de 100 °C, sont instables à température ambiante. Au cours du refroidissement de l'amidon gélatinisé, les macromolécules d'amylose et d'amylopectine se réorganisent et tendent à adopter un nouvel équilibre structurel, ce qui donne lieu au phénomène de rétrogradation qui conduit à la formation d'un gel composite.

Les réarrangements de l'amylose semblent être à la base des modifications qui ont lieu au cours du refroidissement juste après la gélatinisation. La texture du gel est dû à ces réarrangements. [Malumba, et al., 2011], qui sera d'autant plus rigide que la concentration en amylose sera importante. Il faut comprendre que la gélification de l'amylose est un processus dont la rapidité va dépendre de la concentration en amidon ainsi que de sa teneur en amylose. L'analyse du gel permet de nous rendre compte de l'obtention d'un système assez complexe, composé de grains d'amidon gonflés dans un milieu continu formé de macromolécules solubilisées [Doublier, 2001].

## 4.4 Récolte de la balle de riz et de l'amidon

### La balle de riz

À l'état naturel le grain de riz « paddy » (grain de riz non décortiqué et possédant encore sa balle) est composé d'un albumen qui sert de réserve d'énergie, d'un germe, de plusieurs couches protectrices servant d'enveloppes fines (tégument, nucelle, péricarpe) que l'on appel de façon général le « son » et enfin d'une enveloppe externe plus épaisse riche en silice, véritable rempart contre les agressions externes, que l'on appelle la balle.

Elle protège le grain et le préserve durant toute sa croissance. Les deux parties de la balle (glumelles) de forme concave, épouses la forme du grain et y sont solidement accrochées. Contrairement au reste de la plante (paille ...) que l'on ramasse indépendamment aux champs, la balle ne peut pas être séparé du grain au moment de la récolte avec la moissonneuse-batteuse. Une fois le riz récolté avec sa balle, il vient stocker au sec tel quel et vient décortiquer tout au long de l'année dans les usines spécialisées (Rizeries). La balle de riz est ainsi disponible toute l'année à l'abri du développement de mycotoxines, insectes et ravageurs.
La particularité de la culture du riz en Camargue, suivant le cahier des charges de l'IGP Camargue, est qu'elle est une culture non gravitaire obligeant à n'utiliser que de faibles quantités de composés chimiques indésirables limitant ainsi leur accumulation dans le grain et sur la balle.

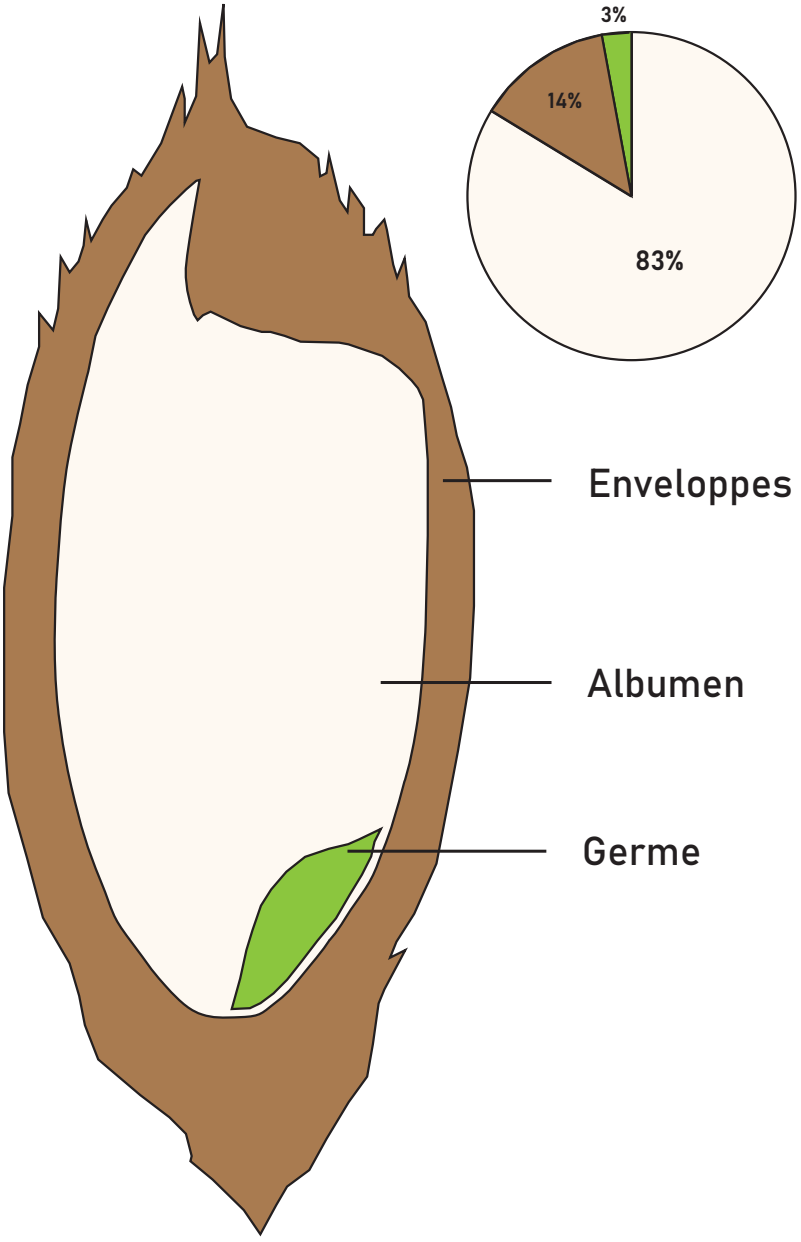



Fig. 34 : Composition massique du riz paddy

| | Glucides | Proteines | Lipides | Fibres | Fer (% AJR) | Autres |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Enveloppes | 63 | 16 | 3 | 43 | 59 | vitamines B |
| Albumen | 79 | 7 | 0 | 4 | 7 | - |
| Germe | 52 | 23 | 10 | 14 | 35 | vitamines B omégas- 3/6 |

Tab. 18 : Compositions nutritionnelles en g (pour 100g)

Le riz une fois récolté est dans un premier temps nettoyé, il est passé aux cribles à travers un trieur magnétique (cône à sifflet) permettant de piéger toutes les particules métalliques. Tous les pieds des élévateurs sont équipés de ce procédé.

Il vient ensuite décortiquer, la balle de riz provient de l'une des premières opérations effectuées sur le riz paddy fraîchement récolté, à savoir le décorticage.
Cette dernière consiste à enlever les couches cellulaires externes (appelées glumelles) qui recouvrent le caryopse. Cette opération est effectuée en faisant passer le riz paddy, préalablement séché dans des séchoirs pour réduire le taux d'humidité du riz paddy de 20-25% à 12-14%.

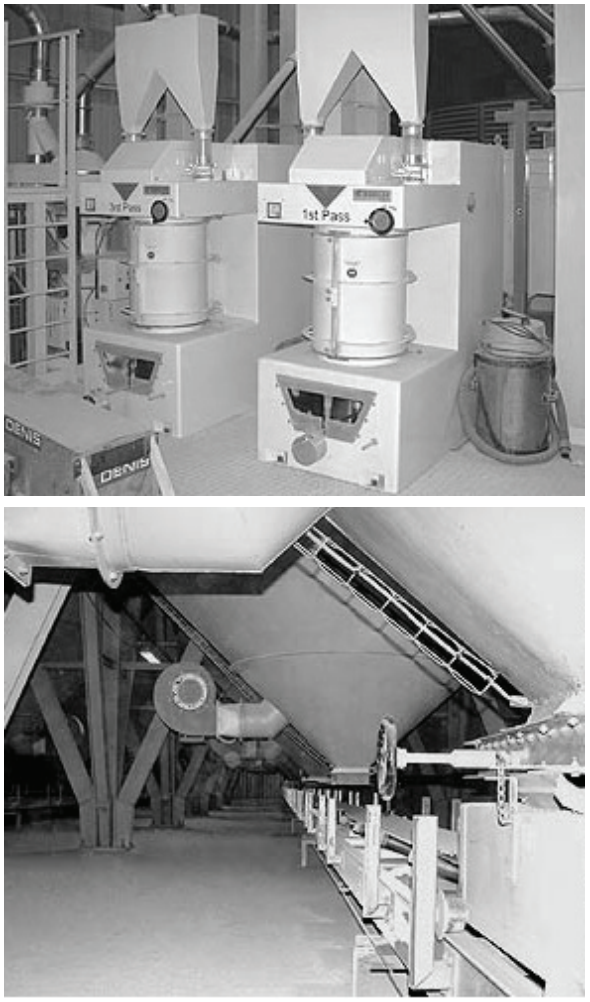



Fig. 35 : Chambre à pression et disque à décortiquer

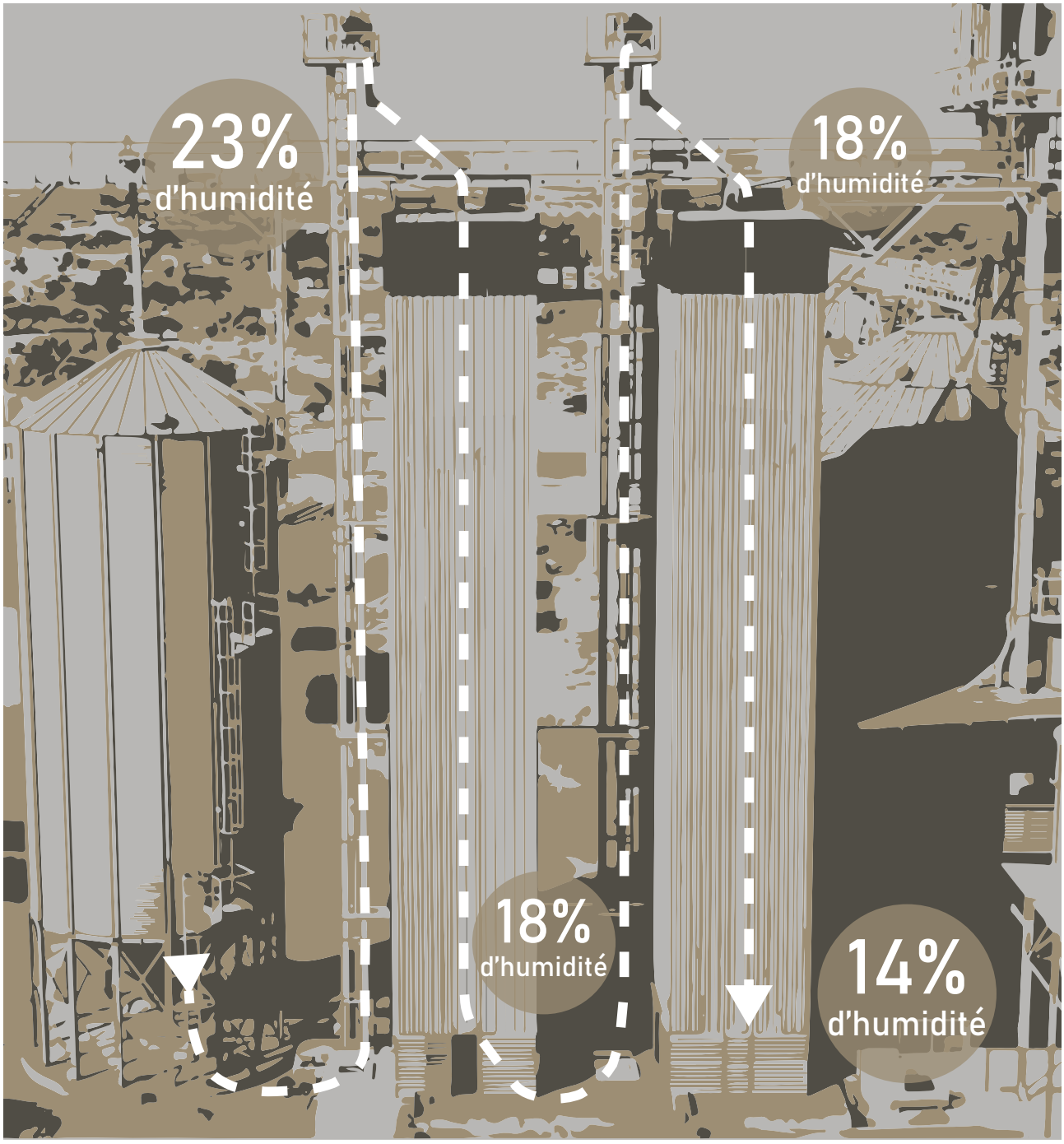



Fig. 36 : Composition massique du riz paddy

Il passe ensuite entre deux disques en caoutchouc horizontaux revêtus d'un matériau abrasif, fonctionnant à assistance pneumatique, assurant ainsi une pression de friction constante. Pendant le processus, le disque supérieur reste immobile, tandis que le disque inférieur commence à tourner sur lui-même, ce qui permet d'enlever la glume et la glumelle, en évitant de casser le grain. Le riz ainsi décortiqué tombe dans une chambre a pression d'où la balle est extraite. Un compresseur expulse la balle à l'extérieur directement dans un silo prévu à cet effet.

Le décorticage est le processus le plus souvent effectué pour décortiquer l'enveloppe, mais aujourd'hui, celle-ci est généralement éliminée également par le processus appelé « parboling », qui consiste en une élimination complète et délicate des enveloppes. Le riz paddy est placé dans de grandes cuves remplies d'eau chaude, puis il est traité à la vapeur à haute pression et haute température et enfin reséché. Cela rend les balles stériles et augmentent en même temps la durée de conservation du riz et sa teneur en vitamines.
Il faut comprendre qu'auprès de nombreux riziculteur, la balle de riz reste considérée comme un déchet et est ou brulée ou enterrée dans les rizières pour favoriser l'apport en nutriment pour la prochaine période de semage.

Actuellement la balle de riz peut facilement être importée de Camargue, d'Italie ou d'Espagne à des coups très raisonnables. Le fournisseur de la balle de riz que nous avons utilisé pour effectuer les tests est la société **SARL BalleConcept** situé à Arles et important les balles de Camargue.

## L'amidon de riz

Maintenant que nous avons vu comment est extrait la balle de riz nous allons nous intéresser de plus près à la production de l'amidon de riz. Comme tous les amidons, ce dernier est produit dans les amidonneries. La production de l'amidon de riz, hormis pour quelques points, similaire à la production de l'amidon de maïs. La grande majorité de l'amidon présent en Europe provient de fournisseurs au sein de la communauté européenne (Italie, Espagne, France...).
La matière première est d'abord broyée et l'amidon est extrait par action mécanique et utilisation de l'eau. Le séchage est effectué de façon à préserver au maximum les caractéristiques du produit.

L'extraction d'amidon est un procédé consistant à séparer les différents éléments composant la plante, tel que l'amidon, les protéines, les fibres de cellulose et les germes. Au niveau industriel, ceci implique une série de phases de séparation physique simples telles que le broyage, le tamisage, la centrifugation, la concentration et le séchage. L'amidon arrive ainsi disponible sur le marché sous une forme poudreuse sans odeur ni saveur.

De façon plus précise l'ensemble de ce procédé est effectué selon un ordre et une méthodologie bien précise.
Tout d'abord le grain de riz est trempé dans l'eau chaude (45-50°C) pendant 2 jours. Pour le riz il faut 2 volumes de riz pour 3 volumes d'eau. Le pH doit se stabiliser tout seul aux alentours de 4 (+ ou - 0.2) sinon, une petite quantité d'acide (lactique de préférence) est inséré dans le mélange.

Une fois effectué, on utilise un tamis grossier qui permet de séparer les grains. L'eau est gardée pour être réutilisé. Les grains sont broyés grossièrement, placés sur un tamis lavés plusieurs fois avec l'eau préalablement récupérée, puis les grains sont finement broyés (mixeur, cryobroyeur ...) ; Une fois effectué la mixture est à nouveau filtrée et lavée avec l'eau des étapes précédentes. L'ensemble des précédentes étapes s'effectue à une température constante avoisinant les 50°C.

La solution est ensuite analysée avec un densimètre pour concentrer la solution autour d'une densité de 1.03 à 1.06. Si nécessaire une partie de l'eau peut être évaporée pour augmenter cette densité. Le pH est ensuite testé pour s'assurer qu'il soit toujours constant (autour de 4).
Enfin le mélange est refroidi à température ambiante. La solution est versée délicatement et plusieurs fois sur un tapis à très faible inclination (0,5-1%) de façon que l'amidon se dépose sur la surface pour ensuite être séché et broyé.

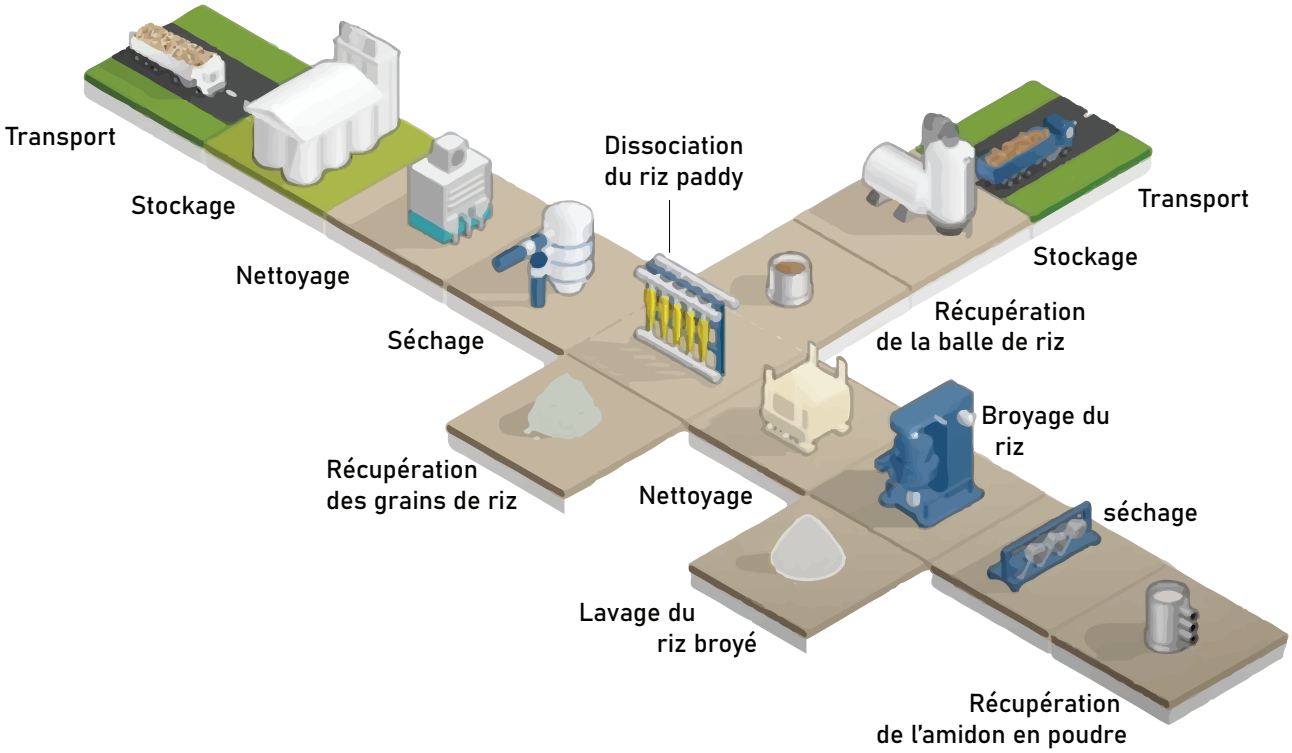



Fig. 37 : Schéma du processus d'extraction de l'amidon depuis le riz paddy

Un autre procédé peut être utilisé pour extraire l'amidon des grains de riz, il s'agit de l'extraction alcaline de l'amidon. L'augmentation de l'utilisation de l'amidon comme additif dans l'industrie alimentaire (Juliano, 1984) a stimulé le développement de différentes méthodologies d'extraction dans le but d'isoler des produits de grande pureté et aux propriétés physiques bien définies.
Dans ce contexte, des avancées importantes ont été réalisées au cours des dernières décennies dans le développement de méthodes pour l'isolation de l'amidon.

La méthode d'extraction alcaline a été inaugurée par Dimler et al. (1944) permettant l'extraction de l'amidon des farines de blé et de maïs.
Cette procédure s'est avérée être une méthode efficace pour l'isolation de l'amidon de la farine de blé, avec un rendement et une pureté élevée. Depuis lors, l'extraction alcaline a été étudiée comme une méthode efficace pour l'isolation de l'amidon à partir de la farine de maïs du blé et du riz (Yang et al., 1984 ; Lumdubwong et Seib, 2000 ; Chiou et al., 2002 ; Sodhi et Singh 2003 ; Puchongkavarin et al., 2005).

Parmi tous ces produits, le riz a fait l'objet d'une grande attention, principalement en raison de son applicabilité dans les produits industriels et comme additif alimentaire.

Dans le traitement du riz, lors du décorticage et du polissage, une quantité importante de grains de riz peut être brisée en fonction des machines utilisées (Elias et al., 2005). Ce riz brisé devient un produit bon marché. Il est abondant et peut donc être utilisé pour produire de l'amidon. En raison de ses propriétés, l'amidon de riz peut être utilisé comme substitut de l'amidon de maïs dans les applications alimentaires (Juliano, 1984). La procédure alcaline pour isoler l'amidon du riz est différente de celle utilisée pour extraire l'amidon du maïs, du blé et de la pomme de terre. Cela est dû aux différences de contenu en protéines et de propriétés de l'amidon dans chaque cas. Le grain de riz contient quatre types de protéines présentes dans l'endosperme. Elles sont étroitement associées à la surface du granule d'amidon, ce qui rend difficile leur détection et leur élimination (Tanaka et al., 1980). Ces protéines ont été fractionnées par solubilité sélective.

La farine de riz est d'abord rincée à l'eau pour éliminer l'albumine. Ensuite, des traitements séquentiels avec des solutions de saumure diluée, d'alcali dilué et d'éthanol à 70 % sont effectués pour extraire respectivement la globuline, la glutéline et la prolamine (Agboola et al., 2005).

Ainsi, la méthode alcaline a été couramment utilisée pour extraire l'amidon de riz, malgré le fait que ce traitement peut altérer la structure des granules d'amidon. On pense que la nature de la solution alcaline joue un rôle important dans la modification de la structure granulaire de l'amidon qui, par conséquent, affecte l'organisation et les propriétés physiques du matériau résultant. En raison de la variété des conditions (concentration de l'alcali et temps de contact avec la farine de riz), il est important d'étudier l'effet de l'alcali pendant l'extraction de l'amidon.

## 4.5 Chaîne de stockage

**La balle de riz** possède de nombreuses qualités, sa légèreté, son cout peu élevé, sa basse concentration en humidité et sa forte concentration en silice. Ce dernier point est d'un avantage crucial pour le stockage en intérieur comme en extérieur, permettant de diminuer les risques de moisissure ou fermentation dans le temps et donc de perte de matériel. D'un autre coté son poids relatif très bas et sa forme concave allié à sa souplesse permettent de faciliter son transport et son compactage pour une meilleure mise sur le marché.

La balle de riz peut être stocké plusieurs mois sous hangar ou sous bâche à l'abri de l'humidité. De façon générale la balle de riz ne craint pas l'eau mais peux être sensible à l'humidité stagnante, cette dernière pouvant faire noircir la balle de façon localisé, lui faisant perdre ses attributs de durabilité sans perdre sa structure et sa forme. Pour diminuer ses risques il est possible de retourner régulièrement les balles entreposées ou de les protéger avec un film plastique des pluies et remontés d'humidité par le sol.

La balle de riz est conditionnée sous des formats très variés permettant l'emballage avec des poids tout aussi variés de façon à s'adapter aux besoins des clients et/ou du transport. Les sacs manu portables (< 40 kg / ≈ 330 litres foisonné) sont relativement pratiques à décharger et à transporter jusqu'au lieu de stockage/utilisation.
Même si les sacs plastiques sont pratiques pour pouvoir stocker la balle de riz au sec, ses derniers sont souvent de faible épaisseur et se percent facilement, les limitant à un usage unique. À travers le monde la balle de riz est commercialisée dans de nombreux pays. Nous trouverons ci-dessous une liste non exhaustive des possibles formats sous laquelle elle est commercialisée.

**Sacs imperméables à petite quantité** (Sacs d'aspiration pour copeaux) sont souvent utilisés pour transporter de petites quantités, ce sont des sacs PE à bouche ouverte (faciles à remplir et vider). Ils sont suffisamment épais (200 µm) pour être réutilisés et manipulés mais pas assez pour être trainé par terre comme un big bag. Les sacs d'épaisseur 500 mm permettent de transporter de 18 à 20 kg de balle de riz, ceux de 600 mm 36 à 40 kg. La hauteur des sacs est variable. L'objectif de ce mode de stockage est de transporter des quantités plus modestes et d'être utilisés rapidement car les thermo-soudure des sacs palettisés vieillissent assez mal, sous l'effet combiné du soleil et de la pression à l'intérieur des sacs. Au bout de 3 mois (printemps/été), les soudures peuvent présenter des signes de faiblesse. De façon générale le plastique vieilli mal au soleil, il devient cassant et inutilisable, de ce fait il est préférable de les conserver en intérieur et à l'abri des intempéries.
Une fois le sac fermé par thermosoudure il devient difficilement réutilisable, à moins que la soudure soit faite de façon à anticiper ce processus.

Du scotch peux être utilisé mais cela ne suffit pas pour rendre le sac étanche.
Pour étanchéifier le sac, on s'inspirera de ce qui se pratique pour fermer les sacs étanches (Fig. 38).
Le sac ainsi fermé peut être stocké à plat, avec l'enroulage de la bouche ouverte "vers le bas", pour que l'eau coule sur le sac plutôt qu'elle ne s'accumule au niveau de l'enroulage.
Les sacs peuvent ensuite être palettisés par groupe.

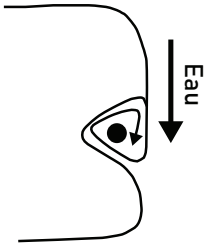



Fig. 38 : Modalité de fermeture étanche d'un sac

Fig. 39 : Conditionnement en sacs à copeaux étanches

Le conditionnement en **sacs à gravats** est aussi possible sur des courtes périodes si les sacs sont stockés à l'abri de l'humidité car ils ne sont pas étanches, ce problème peut tout de moins être résolu par l'utilisation d'un "superbag" qui est un sac interne étanche. Ils restent tout de moins facilement manipulables et peuvent être traînés par terre.

Pour limiter les coups de la balle de riz lors du transport, ils peuvent être livré une fois conditionné en **Blocs** de gros formats, mais ils deviennent par la même occasion plus difficilement manipulables car la balle de riz est compactée avec un facteur de 1.5 par rapport à sa densité foisonnée et commercialisée en éléments parallélépipédiques de 125 kg.

Fig. 40 : Conditionnement en ballot rectangulaire dee balle de riz

**Les big bag** (sacs polypropylène) sont un mode de conditionnement classique et pratique, les sacs peuvent être de grande hauteur (jusqu'à 2 m et on peut les tirer sur le sol sans qu'ils ne se déchirent), mais restes non étanche. Plusieurs types de big bag sont proposés en fonction des contraintes lors du remplissage et du déchargement (équipés d'une jupe ou d'une goulotte de chargement/déchargement)

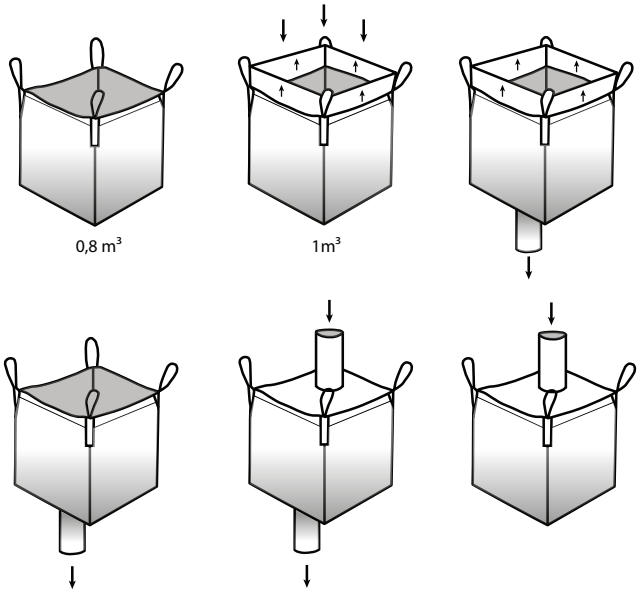



Fig. 41 : Schéma du système Big bag

La balle de riz a une résistante à l'eau assez élevée, malheureusement dans certains cas de stockage en extérieur certaines complications peuvent être observées.

Si le sac est perforé, l'eau pourra s'y infiltrer et ne pourra difficilement ressortir, elle s'accumulera au fond du sac et fera à long terme noircir la balle de riz (fermentation), pour remédier à ce problème, il est nécessaire de stocker le big bag sur une palette (pour que l'eau ne s'infiltre pas depuis le sol et puisse s'écouler facilement) tout en laissant la possibilité à l'eau de s'évacuer (sac délibérément percé).

La condensation à l'intérieur du sac se redépose en permanence sur le haut du sac. Ainsi lors de longues périodes de stockage, la balle de riz peut noircir en haut du sac, de plus les quelques graines qui peuvent rester présentes avec les balles de riz se mettent à germer et des moisissures apparaissent.
La balle de riz, comme tout isolant d'origine végétale, ne doit pas être mise en œuvre encore humide. L'humidité aura du mal à s'évacuer du fait de la présence du frein-vapeur ou du pare pluie. Si la fermentation a commencé dans les sacs, elle continuera de fermenter dans le mur.

Fig. 42 : Comparaison de balle de riz en décomposition (gauche) et bon état de conservation (droite).

La livraison et l'utilisation sur chantier peuvent être facilités par le conditionnement. Des big bag trop lourds ne seront pas facilement manipulables. Une piste à explorer est un conditionnement en big bag de petits formats, gerbés sur une palette.

**Le compactage** permet d'optimiser le transport de la balle de riz. Cependant, plus la balle de riz est compactée, plus les balles seront broyées par le compactage. Même si la balle de riz est décompactée, les balles auront perdu leur intégrité physique.
Pour ces mêmes raisons la balle de riz compactée peut être considérée comme un produit différent avec des prestations différentes. Ces produits seront plus poussiéreux. Ceci peut avoir de l'importance pour une utilisation en tant qu'isolant ou autre.

L'utilisation de **balles rondes** enrubannées de 125x123 cm (Fig. 43) peu être aussi utilisé, pour ce faire la balle de riz est légèrement humidifiée avant d'être bottelé pour faciliter sons conditionnement.

Source: GTP.fr

**Fig. 43 : Conditionnement en ballot cylindrique de balle de riz enrubannées**

Enfin, de façon à pallier un grand nombre de problèmes lors du stockage extérieur le système « cocoon » peut être appliqué. Il s'agit d'utiliser un container souple et étanche qui permet de protéger les sac PP des rongeurs et de l'humidité (volume allant jusqu'à 413m³).

Pour ce qui est du stockage et de la mise sur le marché de **l'amidon de riz** les possibilités sont variées. De façon générale L'amidon est transporté dans des sacs étanches, souvent en plastique car la poudre d'amidon est fine et craint l'humidité. La contenance des sacs peut varier de 1 à 60 kg. On peut trouver l'amidon de riz sous d'autres formats, mais lorsqu'elle est en contenant inférieure à 1kg elle s'adresse à des particuliers et lorsqu'elle est distribuée en cargaison non empaquetée elle est destinée à être conservée dans des silos.

Les débouchés de l'amidon sont quasi exclusivement liés au milieu de l'agroalimentaire. Grâce à son utilisation il est possible de confectionner des boissons, confiseries, boulangeries, bioéthanol, colles, des produits pharmaceutiques, cosmétiques, papier ainsi que les matières plastiques biodégradables (PLA) et même liant pour le béton.

Les industries alimentaires utilisent l'amidon sous forme modifiée ou non modifiée, de sirop de glucose et de dextrose (D-glucose). Il est utilisé comme épaississant (potages, sauces, ...) pour le coffrage et le capsulage, comme gélifiant et comme stabilisant par exemple dans la création des bonbons gélifiés (grâce à sa grande capacité de rétention d'eau).

## 4.6 Mise en œuvre de la chaîne d'approvisionnement et commercialisation

L'objet de cette recherche se concentrant sur la balle de riz, il n'est pas possible de donner une liste exhaustive de tous les acteurs de la filière riz.

De façon générale la filière est représentée par le « Syndicat des Riziculteurs de France» comprenant plusieurs sociétés productrices réparties essentiellement sur le bassin camarguais. Ces dernières peuvent être soit des sociétés productrices de riz soit des sociétés de transformation récupérant le riz produit en amont afin de le préparer pour une future commercialisation. L'ensemble du riz traité par ces sociétés n'est pas entièrement produit en Camargue mais est aussi importé d'autres régions françaises ou de l'étranger afin d'être commercialisé.

La Quantité annuel de balle de riz produite issu de la transformation du riz paddy s'élève à environ 35 000 – 40 000 tonnes, résultat de plus de 10 000 hectares cultivés chaque années. Même si cela représente 0,2% de la production céréalière française elle permet d'isoler plus de 1000 maisons individuelles par an en étant intégré en vrac dans les toitures, les murs et les sols. Ce chiffre est en constante évolution. La balle de riz peut être vendue en vrac, mais aussi conditionnée. En vrac, en France métropolitaine, elle est livrée par camions

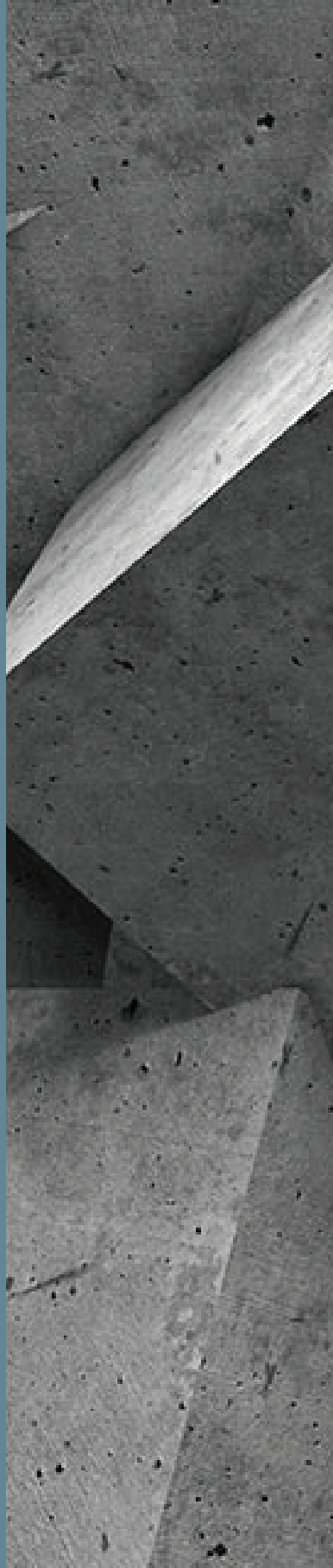
bennes de 45, 60, 78 m³ ou par camions à fond mouvant de 90 m³ (dans toute la France).

La majeure partie est utilisée en litière animale mais l'on retrouve la balle de riz dans de nombreuses autres utilisations. Certaines des sociétés citées précédemment utilisent la balle en interne comme carburant aux chaudières nécessaires pour le processus d'étuvage du riz paddy. Malheureusement ces chaudières restent difficiles à gérer et demande un entretien constant. Elles permettent malgré tout de produire de la cendre de balle de riz qui est commercialisée et utilisée principalement en aciéries.

La balle de riz peut aussi être valorisée comme terreau où elle apporte de la souplesse et aère les soules lourds ou bien elle peut être intégrer dans la fabrication de briques monomur où elle est incorporée aux briques et brulées lors de la cuisson. Cela permet sa transformation en bulles de gaz qui améliorent la capacité isolante de la brique. Bien sûr il ne s'agit pas d'une liste exhaustive et de nombreuses autres solutions d'utilisations sont disponibles à ce jour.

https://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/botanique-riz-plante-fascinante-2411/

# VERS UN NOUVEAU PRODUIT INDUSTRIEL : « FUTURIZ »



# 03

# 5. ACTIVITÉ EXPERIMENTALE

## Résumé

Les recherches préliminaires sur la réutilisation des déchets agricoles dans la production de matériaux et de composants pour le secteur du bâtiment, ont offert une procédure pour la réalisation des échantillons lors de l'activité expérimentale.
La sélection des matériaux nécessaires à la réalisation des échantillons ainsi que la connaissance de leur comportement une fois mélangés est indispensable pour bien préparer les éprouvettes. Le ciment Prompt qui est utilisé est un liant hydraulique naturel obtenu par la simple cuisson de calcaire. Il est parfaitement intégré dans le domaine de l'éco-construction et sa vitesse de prise lui permet d'être utilisée dans la restauration de bâtiment ancien ou monument historique ainsi qu'en maçonnerie rapide. Pour ralentir la prise de ce ciment il est important de rajouter un retardateur de prise. Ce dernier permet de passer d'une prise initiale du ciment de 2 min à 15 min. Lors des expériences réalisées les retardateurs traditionnels ont été substitués par de l'acide citrique sous forme de poudre, car offrant les mêmes performances et exempt de substances chimiques néfastes pour l'environnement. Seul un agrégat d'origine végétal est utilisé pour les expériences : la balle de riz. Cette activité expérimentale est divisée en quatre séries permettant de : contrôler la quantité de balle de riz, contrôler la concentration en ciment, analyser la réaction du béton lors de l'ajout d'amidon de riz et enfin étudier les caractéristiques techniques du béton réalisé à travers l'étude de sa consistance, de sa résistance au feu et aux intempéries.
Les expériences ont démontré que la balle de riz doit être compressée (30% de compression pour un résultat optimal) lors de la réalisation du béton afin de permettre au ciment de fixer les balles entre elles et de pallier une éventuelle perte de volume lors du séchage du béton. La concentration en ciment doit être comprise entre 250 et 450 kg/m³, concentration inférieure ne permet pas de garantir une bonne cohésion des échantillons. Il semblerait, selon les premières études réalisées, que l'ajout d'amidon de riz puisse offrir un gain de résistance à compression non négligeable. Enfin, l'étude de la consistance du béton par le biais du test du cône d'Abrams a démontré qu'il n'y avait aucun affaissement grâce à la présence de la balle de riz. Cette dernière offre aussi une bonne résistance au feu dû au fait qu'elle se consume sans brûler et que la couche de cendre se formant en surface protège les couches inférieures. De plus, après 2 mois passés en extérieur, les tests ont montré que le béton de balle de riz réalisé possède une bonne résistance au gel et à l'humidité.

# 5. ATTIVITÀ SPERIMENTALE

## Sintesi

La ricerca preliminare sul riutilizzo dei rifiuti agricoli nella produzione di materiali e componenti per il settore delle costruzioni ha fornito una procedura per la produzione di campioni nella fase sperimentale di questo lavoro di tesi.
La selezione dei materiali necessari per realizzare i campioni e la conoscenza del loro comportamento una volta mescolati è essenziale per la corretta preparazione dei campioni. Il cemento Prompt utilizzato è un legante idraulico naturale ottenuto dalla cottura del calcare. Si integra perfettamente nel campo dell'eco-costruzione e la sua velocità di messa in opera ne permette l'utilizzo nel restauro di vecchi edifici o monumenti storici così come nella muratura rapida. Per rallentare la presa di questo cemento, è importante aggiungere un ritardante. Questo permette al cemento di passare da un tempo di presa iniziale di 2 minuti a 15 minuti. Negli esperimenti condotti, i ritardanti tradizionali sono stati sostituiti dall'acido citrico in polvere, poiché offre le stesse prestazioni ed è privo di sostanze chimiche dannose per l'ambiente. Per gli esperimenti viene utilizzato solo un aggregato di origine vegetale: la lolla di riso. Questa attività sperimentale si divide in quattro fasi: controllo della quantità di lolla di riso, controllo della concentrazione di cemento, analisi della reazione del calcestruzzo quando si aggiunge l'amido di riso e infine studio delle caratteristiche tecniche del calcestruzzo prodotto attraverso lo studio della sua consistenza, la sua resistenza al fuoco e alle intemperie.
Gli esperimenti hanno dimostrato che la lolla di riso deve essere compressa (30% di compressione per un risultato ottimale) durante la realizzazione del calcestruzzo per permettere al cemento di fissare le lolle insieme e per compensare una possibile perdita di volume durante l'essiccazione del calcestruzzo. La concentrazione di cemento deve essere compresa tra 250 e 450 kg/m³, in quanto una concentrazione inferiore non garantirebbe una buona coesione dei campioni. Sembrerebbe inoltre, secondo i primi studi effettuati, che l'aggiunta di amido di riso potrebbe offrire un guadagno significativo nella resistenza alla compressione. Infine, lo studio della consistenza del calcestruzzo per mezzo del test del cono di Abrams ha mostrato che non esiste slump grazie alla presenza della lolla di riso. La lolla di riso offre anche una buona resistenza al fuoco perché arde senza bruciare e lo strato di cenere sulla superficie protegge gli strati inferiori. Inoltre, dopo 2 mesi di esposizione alle intemperie, i test hanno dimostrato che il calcestruzzo di lolla di riso prodotto ha una buona resistenza al gelo e all'umidità.

## 5.1 Sélection des matières premières

La recherche appliquée et les expériences réalisées, qui prévoient la réutilisation des déchets agricoles dans la production de matériaux et de composants pour le secteur du bâtiment, sont assez vastes. Aujourd'hui plus que jamais l'étude de ses nouveaux matériaux comme éléments centraux à la composition et la construction de nouveaux édifices admet leur capacité à s'intégrer et supplanter de façon naturel les anciens matériaux d'origine pétrochimiques, qui seront un jour désuets.
Le béton est un matériau composite obtenu par la prise et le durcissement d'un mélange contenant des quantités précises de liant, de granulats, d'eau, d'additifs et d'éventuelles adjonctions.
Le béton se compose de deux éléments principaux :

- Composants inertes : comprennent ce que l'on appelle les agrégats ou les granulats, tels que le sable, le gravier, la pierre concassée ou bien les nouveaux matériaux biosourcés comme ici analysés ;

- Composant de liaison : également défini comme la matrice ou la pâte de ciment qui comprend le liant et l'eau.

Le béton, composé de granulats d'une granulométrie maximale de 32-40 mm, est largement utilisé dans le secteur de la construction grâce à sa facilité de moulage. Il est souvent utilisé pour réaliser des moulages à l'intérieur d'éléments rigides, tels que des coffrages, qui sont ensuite retirés après durcissement, ou il peut être directement coulé in situ ou utilisé pour réaliser des éléments préfabriqués.

Outre les ingrédients principaux, d'autres ingrédients en plus faible concentration sont souvent utilisés dans la production du béton, tels que des ajouts minéraux en poudre, des fibres métalliques et polymères, dans le but d'améliorer ou d'introduire des performances que le béton ordinaire ne possède pas.

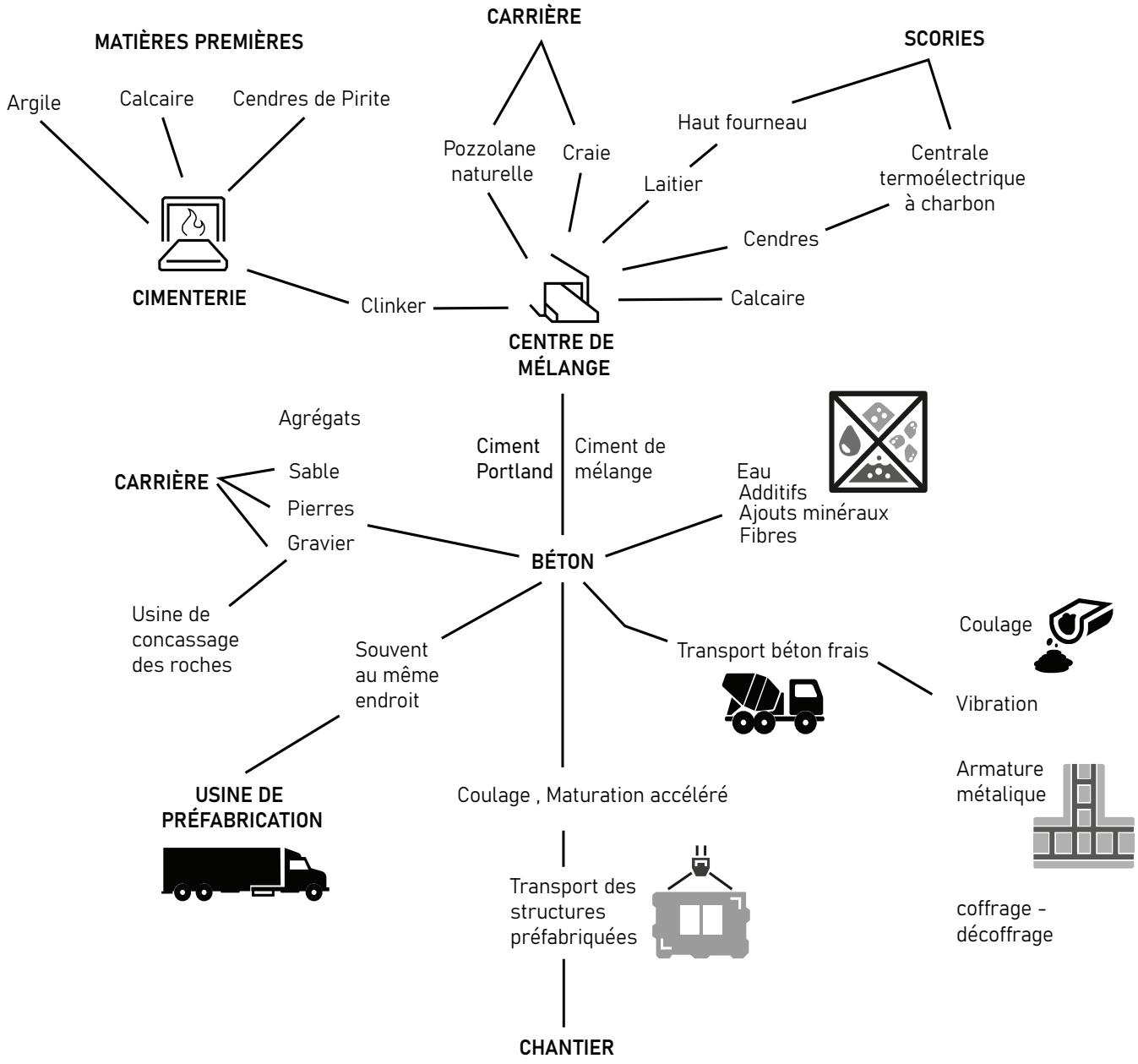



Fig. 44 : Schéma de l'obtention du béton, de l'extraction des matières premières à l'utilisation sur chantier

### 5.1.1 Ciment Prompt + retardateur de prise

Le liant est une substance cimentaire qui, mélangée à l'eau, donne naissance à une masse plastique qui, avec le temps, subit un processus de rigidification progressive, divisé en deux phases :

- La prise initiale : consiste à faire passer la matière du fluide à une masse de plus en plus consistante ;
- Durcissement : processus au cours duquel il y a une augmentation progressive de la résistance mécanique de la pâte.

Comme déjà analysé dans le paragraphe (1.1.3 Ciment Prompt) Le ciment produit par la société VICAT (CNP) est un liant hydraulique naturel fabriqué à partir d'une seule matière première. Résultat de la cuisson entre 500°C et 1 200° C d'un calcaire argileux de composition régulière, extrait de bancs homogènes, suivi d'un broyage très fin. C'est un liant à prise et durcissement rapide. Il est parfaitement intégré dans le domaine de l'éco-construction et sa vitesse de prise lui permet d'être utilisé dans la restauration de bâtiment ancien ou monument historique ainsi qu'en maçonnerie rapide.
La rapidité de sa prise peut être un avantage dans certaines maçonneries ou lorsqu'il est utilisé dans l'eau ou l'assainissement, mais elle réduit sa capacité à être travaillé.

Le temps de prise moyen du CNP est environ de 2 min utilisé en mortier à une température de 20 °C, temps relativement court qui est problématique quand ce dernier doit être soigneusement appliqué ou que les conditions de pose ou utilisation ne permettent pas un travail rapide. Pour palier à ce problème, comme dans le cas de notre thèse, un faible pourcentage d'acide citrique peut être incorporé dans le mix afin de ralentir la vitesse de prise initiale.

La société VICAT développe déjà un produit à incorporer lors de l'utilisation du CNP, le produit « TEMPO », qui se dose par rapport au volume de ciment naturel Prompt utilisé. Ce dernier facilite l'utilisation et donne le temps d'une bonne mise en œuvre pour réaliser un travail de qualité et facilite le nettoyage des outils. Ce dernier en quantité suffisante permet de faire passer le temps de prise initiale lors d'une utilisation à 30°C de 1min à 10min, à 20°C de 2min à 15min et enfin à 10°C de 4min à 30min, gain de temps essentiel dans certaines conditions de travail. Lors d'une préparation à une température inférieur à 10°C le dosage peut être diviser par deux voir même annulé si besoin.

Durant notre travail de thèse, nous n'utiliserons pas ce produit commercialisé par la société VICAT mais utiliserons de l'acide citrique commercialisé sous forme de poudre dans les magasins de fourniture culinaire, à un dosage de 0,3%. Ayant les mêmes propriétés de retardateur de prise initiale il nous

permettra de garantir une meilleure capacité à être travaillé. La poudre d'acide citrique est incorporée avec le ciment avant l'ajout des agrégats (saupoudré sur le ciment naturel Prompt).

La rhéologie du béton est un élément très important à calibrer car il permet de définir les conditions avec laquelle ce dernier sera travailler. Une mauvaise gestion de la rhéologie peut entrainer une incorporation non régulière des agrégats ou de l'eau et provoquer une détérioration accélérée du béton dû à une mauvaise hydratation du ciment ou induire une mauvaise répartition du béton dû à la présence de bulles d'air.

**Fig. 45 : Photo de l'acide citrique en poudre utilisé**

### 5.1.2 Les agrégats

Les granulats ou agrégats, qui constituent environ 2/3 du volume du béton et représentent 1/4 de son poids total, sont des matériaux granulaires utilisés dans l'industrie de la construction et se divisent selon leur origine en :

- Naturel
- Industriel
- Recyclé
- Mixte

Dans le cas des expériences menées pour cette thèse 100% des agrégats utilisés sont d'origine naturel. Ainsi seul la balle de riz est utilisée remplaçant les agrégats minéraux normalement utilisés dans les bétons traditionnels.

La caractéristique la plus évidente de l'agrégat est sa granulométrie, c'est-à-dire le fait qu'il se présente sous la forme de granules lâches, de taille différente.

C'est précisément sur la base de leur taille que la norme UNI EN 12620:2008_Agrégats pour béton fait la distinction entre les agrégats.

Dans cette norme, les granulats sont encore distingués sur la base du diamètre minimal (d) et du diamètre maximal (D), selon les classes

indiquées dans le tableau suivant.

| Nomenclature | Dimensions [mm] |
|---|---|
| Agrégats gros | d > 2; D > 4 |
| Agrégats fin | d = 0; D < 4 |
| Granulométrie naturelle mixte | d = 0; D < 8 |
| Agrégats mixtes | d = 0; D < 45 |
| Agrégats de remplissage | d > 0,063 |

**Tab. 19 : Nomenclature des agrégats en fonction de leur dimensions**

Il y a plusieurs raisons d'ajouter des agrégats à la pâte de ciment. Il y a d'abord une raison économique, puisque le granulat coûte beaucoup moins cher que la pâte de ciment, et ensuite une raison technique, puisque plus la quantité de granulat augmente, plus le retrait de la pâte de ciment diminue proportionnellement. Une autre raison technique importante concerne la durabilité du mélange de béton, qui peut être améliorée en remplaçant une grande partie de la pâte de ciment, un matériau relativement résistant aux attaques de l'environnement, par un matériau plus durable tel que le granulat, si celui-ci est choisi sur la base de certaines exigences physiques et chimiques.

De nombreuses autres propriétés du béton peuvent être améliorées par l'utilisation de granulats, comme la résistance mécanique, le module d'élasticité, le fluage, la résistance à l'abrasion et la résistance thermique, qui dépendent de la qualité et de la quantité des granulats.
Par conséquent, pour la caractérisation de tout agrégat, il est nécessaire de faire des considérations sur :

**- Taille** : comme nous l'avons déjà mentionné ci-dessus, les agrégats sont classés et nommés de différentes manières en fonction de leur diamètre. En particulier, ce qui différencie un agrégat fin d'un gros agrégat est le passage d'au moins 95% du matériau dans un grille avec une ouverture de 4 mm ;

**- Forme** : la forme des particules qui composent l'agrégat peut être arrondie, irrégulière, plate, angulaire ou allongée. Elle est généralement évaluée à travers deux paramètres, l'angularité et le coefficient de forme. La première peut être déduite en appliquant la formule suivante, N=V-33 où V représente le pourcentage de vides présents dans la masse de l'agrégat. Le coefficient de forme est plutôt le rapport entre le volume effectif des particules de l'agrégat et le volume des sphères circonscrites, il approche généralement 1 lorsque l'agrégat tend vers la forme sphérique ;

**- Porosité** : la porosité des agrégats dépend du matériau dont ils sont issus. Elle peut varier de 2 % pour les roches ignées intrusives, à 10-40 % pour les roches calcaires ou volcaniques. Il influence les propriétés chimiques et physiques du béton, ainsi que sa durabilité.

**- Densité** : définie comme le rapport entre la masse et le volume, cependant, les sous-catégories suivantes peuvent également être calculées :

**-Densité absolue** : la masse par unité de volume de chaque particule, en l'absence de pores ;

**- Densité apparente** : la masse par unité de volume de chaque particule du matériau tel qu'il apparaît, pores compris ;

**- Densité de la pile** : la masse contenue dans une unité de volume de matériau dans l'état où il se trouve effectivement avant son utilisation, donnée par la somme du volume occupé par les particules de l'agrégat et de celui des vides entre les différentes particules.

Dans le tableau des « Paramètres psycho-chimiques » (4.3.1 La balle de riz, Tab. 17) nous trouvons l'ensemble des caractéristiques physiques et chimiques de la balle de riz. Ces derniers expliquent en grande partie la raison pour laquelle une fois incorporé dans le béton cette dernière permet de donner une meilleure résistance à la transmission thermique ainsi que d'alléger la masse volumique du béton comparé à un béton traditionnel avec des agrégats minéraux. En revanche l'utilisation de la balle de riz fait perdre le béton en résistance à compression ; Ainsi le gain en résistance thermique est proportionnellement inverse à la perte en résistance mécanique.

Afin de déterminer l'humidité finale des agrégats il est nécessaire d'utiliser la formule suivante issu de la norme UNI EN 1097-5 :

$$W = \frac{M1 - M2}{M1} \times 100$$

Tel que:

W = Humidité contenu dans l'agrégat [%]
M1 = Masse humide de l'agrégat [g]
M2 = Masse sèche de l'agrégat [g]

- Masse de la balle de riz : 110-120 kilos par m³
- Pouvoir d'absorption : 1,6
- Taux de matière sèche : 88 %

**Fig. 46 : Photo de la granulométrie de la balle de riz**

### 5.1.3 Les additifs

Les adjuvants ou additifs sont des produits chimiques d'origine organique qui peuvent se présenter sous forme de liquide ou de poudre et qui, lorsqu'ils sont utilisés en petites quantités, induisent, par une action chimique ou physique, des modifications particulières visant à améliorer ou à donner des performances spécifiques au béton.

Il convient de se référer à la norme *UNI EN 934-2:2012_ Adjuvants pour béton, mortier et coulis - Partie 2 : Adjuvants pour béton - Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage*, qui spécifie les définitions et les exigences relatives aux adjuvants pouvant être utilisés dans le béton, fixant l'utilisation maximale des adjuvants à 5% en masse de ciment et inclut les adjuvants pour béton non armé, armé et précontraint à utiliser dans le béton mélangé sur site, pré-mélangé et préfabriqué.

Il existe à ce jour plusieurs types d'adjuvants, parmi les plus utilisés dans la construction :

- **Agents fluidifiants et super-fluidifiants** : ils sont capables d'améliorer la maniabilité du béton avec le même rapport eau/ciment ;

- **Accélérateurs** : ils ont pour fonction de modifier le degré d'hydratation du ciment pendant la cure courte, de manière à réduire le temps de prise ou à augmenter la résistance mécanique dans les premiers jours de la cure. On distingue les accélérateurs de prise, qui agissent sur le matériau dans les premiers stades de l'hydratation, et les accélérateurs de durcissement, qui augmentent la résistance à court terme ;

- **Retardateurs** : capables de réduire le degré d'hydratation du ciment dans les premières heures, surtout dans les climats chauds où les températures élevées accélèrent l'hydratation du ciment, avec pour conséquence une perte de maniabilité du mélange de ciment ;

- **Agents d'aération** : ils sont capables de modifier la tension superficielle de l'eau (c'est pourquoi ils sont également appelés tensioactifs), favorisant ainsi la formation de bulles d'air dans le béton coulé et améliorant finalement la résistance aux cycles de gel et de dégel ;

- **Anti-rétrécissement** : il s'agit de produits liquides à base de substances organiques telles que les glycols et les polyols, qui ont la capacité d'agir sur la tension superficielle de l'eau présente dans les micropores du béton, diminuant ainsi le retrait hygrométrique et plastique causé par l'évaporation de l'eau du béton à l'état durci et frais respectivement ;

- **Agents de viscosité** : utilisés pour prévenir la ségrégation et le ressuage (un aspect particulier de la ségrégation du béton qui consiste en partie en la remontée de l'eau de gâchage à la surface pendant le compactage du mélange de béton, formant une couche d'eau et de ciment à la surface du mélange). Largement utilisé pour les bétons autoplaçants ;

- **Inhibiteurs de corrosion** : ils sont ajoutés dans le but de prévenir la corrosion des tiges d'armature induite par les chlorures ;

- **Bactéricides et fongicides** : produits à base de benzoate de sodium, de phénols polyhalogénés, de sels de cuivre et d'arsenic, ils permettent de stopper la croissance des algues et des champignons sur les surfaces en béton ;

- **Hydrophobisants** : additifs à base de silane, généralement appliqués à la surface des mélanges de béton pour les rendre hydrophobes.

Dans notre cas l'adjuvant utilisé est l'amidon de riz, ce dernier a pour principale fonction d'améliorer la plasticité du béton de façon à augmenter sa résistance à la compression et élever son point de fracture.

Sachant que l'amidon une fois hydraté passe de l'état liquide à celui gélatineux à une température avoisinant les 70°C, l'incorporation dans le béton, qui une fois ses composants mélangés ont une action exothermique (chaleur d'hydratation) qui va favoriser la gélatinisation de l'amylose et l'amylopectine.

« Lors des expériences menées auparavant, une étude systématique de la technologie du mortier de riz et de chaux ont été menées pour aider à déterminer les plans d'action appropriés dans la restauration des bâtiments anciens. Des mortiers de chaux à teneur variable en riz ont été préparés et testés.
Les propriétés physiques, la résistance mécanique et la compatibilité du mortier de chaux se sont avérées considérablement améliorées par l'introduction du riz gluant, ce qui suggère que le mortier de riz et de chaux est un matériau approprié pour réparer le mortier dans la maçonnerie ancienne.
D'ailleurs, l'amylopectine dans le mortier de chaux s'est avéré agir en tant qu'inhibiteur ; la croissance des cristaux de carbonate de calcium est contrôlée par sa présence, et une structure compacte en résulte, ce qui peut expliquer les performances améliorées de ce composite organique-inorganique par rapport au mortier de chaux à composant unique. [1]»

1 Fuwei Yang, Bingjian Zhang and Qinglin Ma, « Study of Sticky Rice Lime Mortar Technology for the Restoration of Historical Masonry Construc-

Ainsi sans l'ombre d'un doute les caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques de l'amidon de riz sont non négligeables et possède un potentiel encore non utilisé. Leur incorporation au sein de matériaux de construction devrait s'accroître fortement durant les prochaines années et les tests en laboratoires sur leur réaction chimique avec d'autres matériaux devrait considérablement augmenter pour en comprendre les limites.

Concernant les propriétés chimiques et physiques de l'amidon de riz, l'ensemble des données nous intéressant sont répertoriées dans le tableau (Tab. 20):

| Propriétés Physico-chimiques | |
|---|---|
| masse volumique | généralement constante à 1,5 g/cm³ |
| Température de gélatinisation | 60-70°C (empois) |
| Température de fusion | 200°C |
| Température d'auto-inflammation | environ 400°C |
| Solubilité | 50 g/L dans l'eau à une température de 90°C |
| Apparence | poudre blanche inodore |
| Identification | N° CAS 9005-25-8 |
| | N° ECHA 100.029.696 |
| | N° CE 232-679-6 |

**Tab. 20 : Propriétés Physico-chimiques de l'amidon de riz**

Les résultats présentés dans ce tableau sont donnés à titre indicatif et ont été répertoriés auprès de différentes sources lors d'analyses physico-chimiques

tion », American Chemical Society, Mai, 2010 http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/ar9001944

## 5.2 L'impact environnemental et l'utilisation

Aujourd'hui, le béton est l'un des matériaux les plus utilisés dans le secteur du bâtiment, notamment pour la construction de structures porteuses, mais aussi pour des accessoires tels que les façades de plus en plus texturées des panneaux préfabriqués, sous forme de blocs pour la réalisation de clôtures ou de murs porteurs et de cloisons, de tuiles, de pavés, d'éléments de décoration urbaine et intérieure et même de sculptures.

D'autre part, le béton est aujourd'hui un matériau inorganique, partiellement recyclable, souvent difficilement démontable et dont la production nécessite des installations industrielles qui contribuent fortement à l'augmentation de la pollution environnementale. Par exemple, on attribue aujourd'hui à l'industrie de l'un de ses principaux composants, le ciment, 6 % des émissions de $CO_2$ au niveau mondial.

Suivant une approche respectueuse de l'environnement, il est aujourd'hui absolument nécessaire d'analyser l'utilisation des ressources et de l'énergie pour la réalisation de tout produit. À cet égard, l'intérêt porté à examiner et réduire la consommation énergétique ainsi que des matières premières se fait toujours croissant. Cependant cette activité doit être supervisée pendant tout le cycle de vie du produit lui-même. Cette approche est actuellement résumée par l'acronyme LCA, qui signifie «Life Cycle Assessment» ou en français «évaluation du cycle de vie» et constitue le principal outil opérationnel de la réflexion sur le cycle de vie, «Life Cycles Thinking».

La méthode LCA comprend les étapes d'évaluation suivantes :

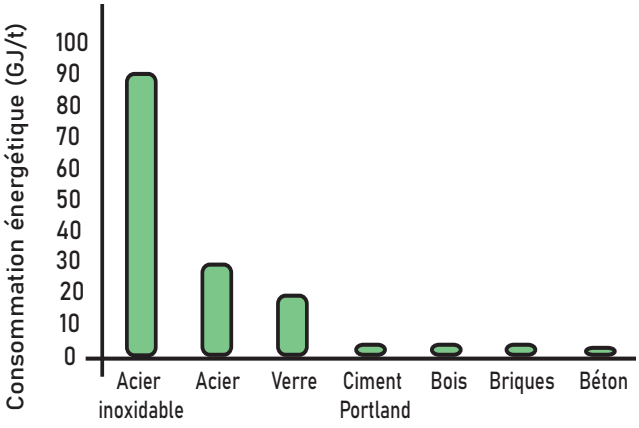
- Définition de l'objectif et de la portée de l'analyse ;

- Compilation d'un inventaire des entrées et des sorties d'un système donné ;

- L'évaluation de l'impact environnemental potentiel lié à ces entrées et sorties et enfin l'interprétation des résultats.

Ces différentes étapes sont nécessaires pour la compréhension et l'interprétation du cycle de vie. Le LCA déterminée par la norme ISO 14040:2006_Management environnemental -- Analyse du cycle de vie -- Principes et cadre, consiste en une méthode objective d'évaluation et de quantification des charges énergétiques et environnementales et des impacts potentiels associés à tout produit, processus ou activité, en considérant l'ensemble de son cycle de vie, c'est-à-dire de l'acquisition des matières premières à la fin de sa vie. Selon cette perspective, toutes les phases d'un processus de production sont nécessairement interdépendantes et dépendantes.

Si l'on se réfère d'abord à la première phase caractérisant le cycle de vie du béton, c'est-à-dire sa production, la concentration de polluants émis dans l'environnement est considérable, bien que nettement inférieure à celle émise pour la production d'autres matériaux tels que les plastiques et les métaux, comme le montre le graphique ci-dessous.




Tab. 21 : Consommation énergétique pour la production de matériaux de construction (Sources: ecoconso (2016), Encyclo ecolo (2015), XPAIR (2017))

Malgré que la consommation d'énergie pour la production de béton reste bien inférieure à celle de l'acier inoxydable, il faut comprendre que ce résultat est dû à la quantité de béton produit tout au long de l'année dans le monde entier. L'inertie de consommation énergétique lors de la production du béton limite l'utilisation de matière première pour la production de quantités supérieures de béton. En d'autres thermes plus la quantité de matière produite est importante plus le niveau de consommation énergétique sera bas, niveau qui correspond bien au béton car il est le matériau de construction le plus produit au monde toutes catégories confondues.

Les phases de production et de transport des matières premières pour la fabrication du béton sont celles qui ont le plus d'impact sur l'environnement. En particulier, c'est la phase de production du ciment qui apporte la plus grande contribution.

Par ailleurs, le béton est aujourd'hui un matériau qui peut être partiellement recyclé après sa démolition, ce qui donne naissance au béton à granulats recyclés, c'est-à-dire un matériau dans lequel il y a un remplacement total ou partiel des granulats naturels par des déchets de démolition et de construction. On retrouve aussi parfois le béton concassé lors de la création de nouvelles routes ou bitumes.

Ainsi une des parties sur lesquelles il serait important de travailler est la diminution des quantités de matières premières non renouvelables utilisées lors de la création du béton. C'est un des arguments clés qui oriente la création de cette thèse, pouvoir continuer à utiliser le béton, qui est un matériau incontournable dans la construction, tout en limitant au maximum son empreinte écologique et environnementale à court therme.
A long therme l'objectif serait de trouver une matière première biosourcé qui puisse être utilisée à la place du ciment et incorporé des agrégats renouvelables dans le béton pour considérablement réduire l'empreinte carbone de ce dernier.

Heureusement, ces dernières années, le secteur du béton a adopté des réponses stratégiques et innovatives importantes pour réduire l'impact de sa production, de son utilisation et de son élimination sur l'environnement et la santé humaine.

Une des méthodes de réduction les plus significatives en therme d'impact écologique, de coup de production et de vitesse de mise en œuvre est l'utilisation de plus en plus fréquente de système préfabriqués.

## 5.3 Le Mix design

Le mix design signifie littéralement la conception du mélange. Elle consiste à concevoir la composition du béton, en rendant explicite le dosage des composants individuels déterminés par les exigences exécutives, les performances que l'on veut atteindre et les conditions environnementales en service.
La différence entre un béton médiocre et un béton performant ne réside pas seulement dans la qualité des composants, mais aussi et surtout dans leur dosage, le soin apporté au coulage, au compactage et au durcissement.

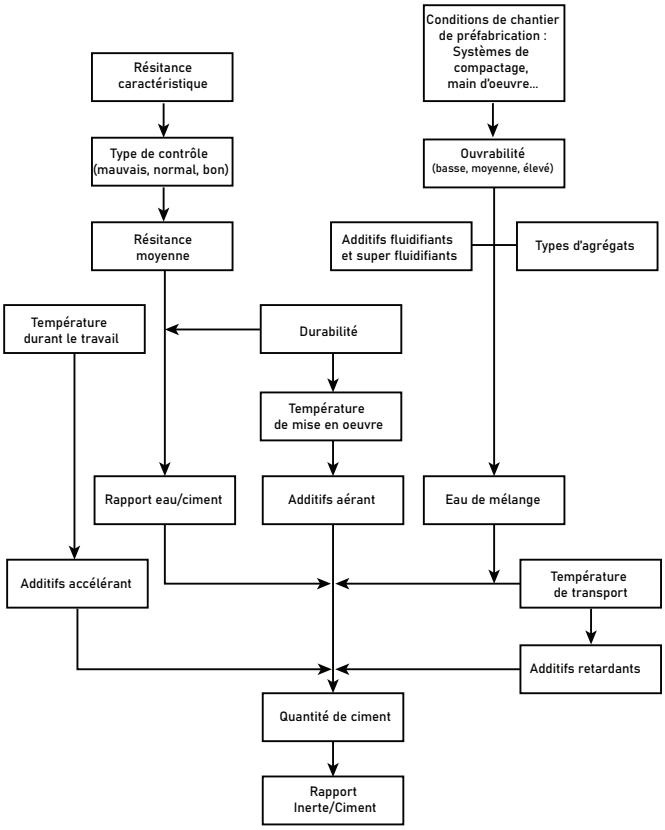



Fig. 47 : Schéma du mécanisme de reflexion pour la fabrication d'un ciment de qualité optimale et adapté aux conditions d'ouvrage

En suivant le schéma ci-dessus, à partir de la résistance caractéristique requise, on établit la résistance moyenne, basée sur le degré de contrôle présumé. Ensuite, en tenant compte également des conditions environnementales dans lesquelles l'ouvrage doit être réalisé, et donc de la durabilité requise pour le matériau, on établit le rapport eau/ciment, en choisissant la valeur la plus basse parmi celles qui peuvent être déduites sur la base de la résistance mécanique ou de la durabilité. En outre, si la température de l'environnement dans lequel la structure sera fréquemment utilisée descend en dessous de 0° C, une certaine quantité d'air doit être incorporée. Si, en revanche, la température est toujours basse, mais supérieure à 0° C, il est possible d'utiliser un additif accélérateur.

Une fois que l'ouvrabilité du mélange requis a été établie, sur la base des conditions d'exploitation sur le chantier, le volume d'eau dans le mélange est fixé, en tenant également compte du type de granulat disponible. A partir du rapport eau/ciment et de la teneur en eau du mélange, on calcule d'abord la teneur en ciment, puis le rapport granulat/ciment, en tenant compte du diamètre maximal du gros granulat et de la finesse du sable.

D'une manière générale, on constate qu'une réduction des granulats pierreux au profit de la pâte liante (eau + ciment) améliore la cohésion et l'ouvrabilité du mélange frais, qui est également plus facile à transporter, à couler et à compacter car il est plus plastique.

En revanche, la réduction des granulats au profit de la matrice cimentaire détériore les performances du béton durci, qui est plus facilement sujet aux phénomènes de fissuration. Cela se produit à la fois à cause des tensions d'origine thermique dues au plus grand développement de la chaleur d'hydratation, et à cause de la plus grande contraction en milieu sec (retrait hygrométrique) qui augmente avec la quantité de pâte de ciment.

En fin de compte, une conception optimale du mélange est basée sur plusieurs corrélations expérimentales existant entre la composition du béton et les performances et caractéristiques des matières premières, telles que :

- **La quantité d'eau [kg/m3]** dépend de la maniabilité du mélange frais, ainsi que du type de granulat (arrondi ou concassé), de sa taille (diamètre maximal) et de la présence d'adjuvants (réducteurs d'eau et agents d'aération) ;

- **Le rapport E/C** requis dépend également de la durabilité du mélange de ciment durci par rapport à la classe d'exposition (degré d'agression environnementale) à laquelle la structure est exposée ;

Dans le cas de notre thèse la particularité de l'agrégat végétal (nombreuses fibres, forme simple et régulière, faible porosité superficielle, forme concave) permet d'obtenir une bonne cohésion globale de l'ensemble du béton. De plus elle implique peu d'absorption d'eau de la part de la balle de riz. En effet la forte présence de silice dans la balle la rend en légèrement hydrophobe et de ce fait protège le béton d'une hydratation suivie d'une déshydratation brutale de ces dernières pouvant créer des fissures ou des trous à l'intérieur de la pâte. La quantité d'agrégat végétal (balle de riz) sera constante est sera basé sur les essais préalables effectué pas la société VICAT sur le « béton balle de riz ».
En observant les tests à résistance du béton balle de riz (Partie 1 : 1.1.4 Performances des blocs en chanvre « Biosys » et Béton balle de riz) il nous faut trouver un pourcentage en ciment qui nous permette d'obtenir un compromis entre résistance à compression et résistance thermique. Ainsi plusieurs tests seront effectués allant de 200 kg/m³ à 450 kg/m³.

Pour une bonne hydratation du ciment le rapport eau/ciment doit être optimal, de ce fait la teneur en eau doit être adaptée au ciment naturel Prompt. Dans notre cas la quantité d'eau doit être proportionnelle en fonction de la quantité de ciment et s'étendant entre 0,7 et 0,6 afin de faciliter sa mise en œuvre et d'assurer une bonne résistance et cohésion de l'ensemble grâce à une hydratation parfaite des cristaux de carbonate de calcium du ciment Prompt.

Après une analyse visuelle globale de la cohésion de l'ensemble des éléments composant le béton, le meilleur résultat sera

sélectionné pour effectuer de nouveau le test avec de la balle de riz lavée.
Une fois effectué cette analyse entre balle de riz normale et lavée, nous effectuerons une dernière analyse de performance avec l'ajout d'amidon de riz dans le mix pour définir le gain potentiel en résistance mécanique et cohésion du béton. Plusieurs niveaux de concentration d'amidon de riz seront testés pour comprendre la concentration maximale que peut contenir le béton afin d'obtenir une meilleure résistance à compression et une vitesse de séchage adéquat.

Fig. 48 : Photos de l'amidon (à gauche) du ciment Prompt (au centre) et de l'acide citrique (à droite)

## Phase 1

**Ciment CNP 100 %** (ciment naturel Prompt)
(ciment en vrac : 1000kg/m³)
Concentration variable allant de 250 à 450 kg/m³

**Balle de riz** en fonction du volume de l'échantillon
( balle de riz en vrac : 110 kg/m³ avec l'analyse du lavage de la balle)

**Eau** (rapport eau/ciment décroissant avec l'augmentation de la quantité de ciment)

**Retardateur de prise** ( acide citrique sous forme de poudre : 0,3% de la quantité de ciment)

**Compression des échantillons**
(Compression variable allant de 10% à 50%)

## Phase 2

**Ciment CNP 100 %** (ciment naturel Prompt)
(ciment en vrac : 1000kg/m³)
Concentration variable allant de 250 à 450 kg/m³

**Balle de riz** en fonction du volume de l'échantillon
( balle de riz en vrac : 110 kg/m³ )

**Eau** (rapport eau/ciment décroissant avec l'augmentation de la quantité de ciment)

**Retardateur de prise** ( acide citrique sous forme de poudre : 0,3% de la quantité de ciment)

**Compression des échantillons**
(Compression variable allant de 10% à 30%)

**Amidon de riz** (tests de dosages avec concentration variable de 1% - 2% - 3% - 4% -5% - 10% - 50%, en fonction de la quantité de Ciment naturel)

Fig. 49 : Classification du Mix Design en deux phases d'analyses

## 5.4 Première série d'activités expérimentales : balle de riz naturelle

Dans ce paragraphe nous nous intéresseront de façon plus concrète à l'utilisation de la balle de riz et de la concentration de chaque composant à l'exception du ciment au sein de notre mix design. Comme nous l'avons précédemment expliqué dans le paragraphe « 1.3 Analyse d'antériorité » l'utilisation de la balle de riz comme substitut des agrégats minéraux dans le béton a déjà été étudié, mais notre objectif est d'étayer les recherches précédentes tout en formulant de nouvelles hypothèses. Ces dernières, à travers les activités et les échantillons testés, vont nous permettre d'obtenir de nouvelles clefs de réponse pour arriver aux conclusions de notre thèse.

La première phase expérimentale s'est essentiellement centré sur l'intégration de la balle de riz dans la pâte cimentaire. Nous ne nous intéressons pas aux caractéristiques de la récolte de cette dernière mais préciserons que la balle de riz une fois achetée auprès du revendeur fut stockée dans un garage dans la région lyonnaise à l'abris de l'humidité dans un sac plastique de 1mm d'épaisseur et d'un poids global de 20 kilos.

La balle de riz étant composée en grande majorité de silice elle n'est pas facilement sujette à décomposition par l'humidité. Cela a été confirmé grâce à l'utilisation d'un testeur d'humidité « Stanley 0-77-030 » traduisant une humidité superficielle de 9% au moment de l'utilisation. La balle de riz ayant été au préalable séchée par la société fournisseur il nous est impossible de calculer la différence de masse entre balle humide et balle sèche et le temps de séchage moyen de cette dernière.

Avant toute utilisation de la balle de riz, cette dernière a été tamisé afin d'en extraire les particules les plus fines et les poussières qui risquent d'interférer sur la cohésion entre balle de riz et béton. Pour cela un « tamis à graines toile 14 diamètre de fil (mm) 0.31 ouverture de maille (mm) 1.8 » a été utilisé.

Fig. 50 : Photos du tamisage de la balle de riz

Dans cette première phase de test les composants utilisés ont été le ciment, la balle de riz, l'eau et l'acide citrique comme retardateur de prise. Nous avons pris comme masse volumique de référence de la balle de riz 110kg/m³ et masse volumique du CNP foisonné de 1000kg/m³. Les échantillons ont été réalisés dans des tubes cylindrique en PVC de diamètre 100mm et d'une hauteur de 93mm et un volume de 0,00074684 m³.

Une quantité non variable de liant VICAT a été utilisé (échantillons 1-8) afin de comprendre l'importance de chaque élément constituant les échantillons. Le dosage de ciment Prompt utilisé dans notre cette première phase de test est de 200 kg/m³ (m= 164g).

Dans la phase d'échantillonnage la quantité de balle de riz est toujours constante (90g). Ces quantités correspondent aux masses volumiques des éléments en fonction du volume du cylindre avec un ajout volumique de 10% supplémentaire pour pallier à une éventuelle compression dû à l'hydratation de la balle de riz. Les échantillons ont été compressé de manière variable entre 10-50% pour offrir à ces derniers une meilleure densité et une meilleure cohésion. Le rapport eau ciment pour une concentration de 200kg/m³ de CNP est de E/C= 0,7.

Dans la phase de mise en œuvre, le ciment et l'acide citrique ont été préalablement mélangé puis l'eau fut ajouté et enfin la balle de riz fut insérée en dernière.
Après 48h les échantillons viennent finalement démoulés permettant d'arriver à un niveau de résistance satisfaisant pour éviter la casse des échantillons.

Les résultats de ses essais ont été analysés dans le paragraphe suivant.

Fig. 51 : Photo de l'échantillon 1 démoulé après 48h (forte présence d'humidité)

Fig. 52 : Photo de l'échantillon 1 démoulé après 48h fracturé lors d'un test de résistance à la casse

### 5.4.1 Résultats et discussions

Dans cette première phase d'analyse nous commenterons les résultats des 8 premiers échantillons.

Pour ce qui correspond aux **échantillons 1 à 3** nous nous sommes intéressés à l'importance du retardateur de prise et sa concentration (0,3 – 1 – 2%) afin de facilité la création des échantillons. Dans l'échantillons 1 (CNP 200 = 164g, E/C = 0,7 ; balle de riz = 90g, acide citrique = 0,3% ; compression de 10%) l'aspect reste correct mais une mauvaise cohésion est à déplorer probablement dû à la présence de vide d'air trop importants, d'une concentration en CNP trop faible et d'une trop forte humidité au sein de l'échantillon.
A ce niveau de concentration l'acide citrique permet de travailler correctement le mix design sans corrompre les résultats finaux.

En revanche pour les échantillons 2 et 3 la cohésion de la balle de riz avec la pâte cimentaire c'est détériorée (surtout pour l'échantillon 3) ce qui traduit qu'une trop forte concentration en acide citrique (au-delà de 1%) impact directement la résistance mécanique du béton.

Pour l'**échantillon 4** nous avons doublé la concentration initiale d'eau dans le mix design passant de E/C = 0,7 à E/C = 1,4. L'augmentation de la quantité d'eau a permis d'obtenir une pâte plus malléable mais a induit une diminution du volume initiale avant compression, de plus cela a considérablement augmenté le temps de séchage laissant l'échantillon encore humide après 72h. Enfin l'échantillon a eu une cohésion initiale moins bonne mais une meilleure cohésion une fois l'échantillon sec.

Dans l'**échantillon 5** la concentration en eau est redevenu normale (E/C = 0,7) mais la compression de l'échantillon a augmenté, passant de 10 à 30%. Cette plus forte compression a permis d'augmenter la cohésion de l'échantillon en réduisant les vides d'air présents en son sein mais a aussi augmenté la densité de ce dernier. Malgré tout, ce niveau de compression permet d'obtenir un bon compris pour palier le manque de résistance mécanique (résistance à compression et aux déchirures/chocs) de la balle de riz une fois mélangé dans la pâte cimentaire.

Dans l'**échantillon 6** nous analysons la possibilité de réduire l'absorption d'eau par la balle de riz au moment de son intégration avec le ciment afin de faciliter son mélange et de laisser le temps au ciment de bien s'hydrater. Pour cela la balle de riz a été pré-mouillée en étant plongé dans une eau à 20°C pendant 30 sec puis filtrée et mise à égoutter pendant 5min avant d'être intégrée au béton. La balle de riz a rapidement absorbée l'eau. Pendant la mise en moule et la compression un fort excès d'eau est à déplorer. Après 48h l'échantillon n'est toujours pas sec et a du mal à s'agglomérer. Malheureusement l'absorption d'eau par la balle de riz est trop importante entrainant des périodes de séchage bien trop longues pour pouvoir être intéressant à court terme et altérant la cohésion du ciment.

Dans l'**échantillon 7** nous analyserons la possibilité d'une compression à 50% de l'échantillon avec le même mix design que l'échantillon 1. Grâce à cela nous avons pu déterminer que la compression a 50% a

augmenté la résistance à compression de l'échantillon mais présente deux problèmes majeurs qui sont la difficulté d'une compression à un niveau si élevé et une friabilité encore trop importante dû à une concentration en ciment trop faible. Il est possible d'affirmer que la compression à 50% est probablement au-delà du niveau maximum de compression permettant de garder les caractéristiques souhaitées du béton et de la balle de riz.

Enfin dans l'**échantillon 8** nous avons reprodui le mix design de l'échantillon 1 en enlevant totalement l'acide citrique. Nous avons pu voir que l'agglomération de la balle de riz est assez bonne et l'absence de l'acide citrique n'empêche pas le travail de l'échantillon dû au fait que les tests ont été effectués à une température de 15°C et que l'échantillonnage est effectué rapidement. Cependant pour les prochains tests il est préférable de garder l'acide citrique avec une concentration de 0,3% permettant de faire passer le temps initial de prise de 3 à 15 min.

Fig. 53 : Photo de deux échantillons identiques avec une compression de 10% (à droite) et 30% (à gauche).

## 5.5 Deuxième série d'activités expérimentales : concentration en liant

À partir des expériences réalisées précédemment il a été possible de définir la concentration optimale de chaque élément composant le mix design à l'exception du ciment naturel Prompt de chez VICAT. Ainsi dans cette deuxième série d'activité différentes quantités de CNP ont été utilisées pour les différents échantillons afin d'évaluer le gain de résistance avec l'ajout progressif de ciment.

La concentration de ciment dans les échantillons (échantillons 9 à 29) varie de 250 kg/m³ à 550 kg/m³. Afin de garder la même rhéologie du mix design sur l'ensemble des échantillons la proportion d'eau sera elle aussi variable et sera proportionnellement inverse à la concentration de ciment, en d'autres termes plus la concentration en ciment est grande plus le rapport eau/ciment est faible (rapport E/C compris entre 0,66 et 0,5). Enfin afin de comprendre au mieux l'importance de la compression du mix design deux niveaux de compression ont été réalisés (10% et 30%).

L'ensemble de ces tests sont par la suite divisés en deux groupes. La première partie des échantillons (échantillons 9 à 24) ont été analysés après un démoulage au bout de 48h comme dans la première série d'activités du paragraphe 5.4, en revanche la deuxième partie des échantillons (échantillons 25 à 29) ont été analysés après un démoulage au bout de 48h et un séchage complet de 14 jours.

L'idée première était de laisser ces derniers 14 jours durant dans leur moule mais il s'est avéré que cela entrainait un séchage de mauvaise qualité et beaucoup trop lent. Ces derniers reprennent les échantillons 9 à 24 de façon synthétique avec une compression à 30%.

Les résultats de ses essais ont été analysés dans le paragraphe suivant.

**Fig. 54 : Photo de l'insertion du béton balle de riz dans les moules pour échantillons**

### 5.5.1 Résultats et discussions

Dans cette phase d'analyse il était important de définir tout de suite les limites maximales de concentration en ciment naturel Prompt afin de voir si celle-ci était déjà suffisante au maintient structurel de l'échantillon. De ce fait, dans l'**échantillons 9** nous avons augmenté la concentration de CNP à une valeur de 550 kg/m³ (CNP 550= 452g, E/C = 0,5 ; balle de riz = 90g, acide citrique = 0,3% ; compression de 10%) ainsi que dans l'**échantillon 10** (CNP 550= 452g, E/C = 0,5 ; balle de riz = 90g, acide citrique = 0,3% ; compression de 30%). On observe qu'après 48h les échantillons sont totalement sec et présentes une forte cohésion. Il n'y a pas de perte de volume et même à 10% de compression l'échantillon est résistant. On observe tout de même que l'échantillon 9 reste fragile sur les bords et que certains morceaux peuvent se détacher par le biais d'un choc ou d'une pression trop forte, chose beaucoup moins évidente avec une compression à 30%.

Une fois établi que la concentration maximale de CNP pouvait être suffisante à 550 kg/m³ nous somme passer aux **échantillons 11** (CNP 250= 205g, E/C = 0,66 ; balle de riz = 90g, acide citrique = 0,3% ; compression de 10%) et **12** (CNP250 = 205g, E/C = 0,66 ; balle de riz = 90g, acide citrique = 0,3% ; compression de 30%) pour lesquels nous sommes redescendu à une concentration de 250 kg/m³. Nous avons pu vérifier une cohésion correcte à première vue, mais une abrasion légère en surface fait s'effriter l'échantillon. La résistance à compression (compression au centre de l'échantillon avec le pouce) fait se déchirer l'échantillon en deux sans trop d'efforts. La compression à 30% permet d'obtenir une meilleure résistance à la compression mais ne résout pas le problème de manque de cohésion.

**Fig. 55 : Echantillon n°22 avec une concentration en CNP de 450 kg/m³ et une compression de 30%**

Les **tests 15** (CNP 300= 246g, E/C = 0,63 ; balle de riz = 90g, acide citrique = 0,3% ; compression de 10%) et **16** (CNP 300= 246g, E/C = 0,63 ; balle de riz = 90g, acide citrique = 0,3% ; compression de 30%) ont une concentration en CNP de 300 kg/m³. On observe une cohésion correcte et une bonne résistance à pression verticale, malheureusement ces derniers restes trop fragile sur les bords. La résistance globale est encore limite surtout face aux chocs et s'effrite encore trop facilement. Comme précédemment, l'augmentation de la compression de l'échantillon de 10 à 30% permet d'augmenter la résistance mécanique.

Les **échantillons 17** (CNP 350= 287g, E/C = 0,6 ; balle de riz = 90g, acide citrique = 0,3% ; compression de 10%) et **18** (CNP 350= 287g, E/C = 0,6 ; balle de riz = 90g, acide citrique = 0,3% ; compression de 30%) ont une concentration en CNP de 350 kg/m³. Cette concentration de ciment naturel Prompt permet d'obtenir une bonne résistance à compression verticale, un aspect visuel et au touché correct ainsi qu'une résistance à l'abrasion correct. Malheureusement les parties comprimées s'effritent encore légèrement et la résistance aux chocs est encore moyenne (bords cassants et friables). La résistance globale reste tout de même limite.

Pour les **échantillons 19** (CNP 400= 329g, E/C = 0,58 ; balle de riz = 90g, acide citrique = 0,3% ; compression de 10%) et **20** (CNP 400= 329g, E/C = 0,58 ; balle de riz = 90g, acide citrique = 0,3% ; compression de 30%) nous avons appliqué une concentration de 400 kg/m³. Ce niveau de concentration en CNP possède une très bonne résistance à compression verticale, un aspect visuel et au touché correct, une résistance à l'abrasion correct ainsi qu'une bonne cohésion pour les parties extérieures mais un intérieur friable.

Pour les **échantillons 2**1 (CNP 450= 369g, E/C = 0,56 ; balle de riz = 90g, acide citrique = 0,3% ; compression de 10%) et **22** (CNP 450= 369g, E/C = 0,56 ; balle de riz = 90g, acide citrique = 0,3% ; compression de 30%) nous avons appliqué une concentration de 450 kg/m³. On obtient une très bonne résistance à compression verticale, un aspect visuel et au touché correct, une résistance à l'abrasion correct. On obtient aussi une bonne cohésion pour les parties extérieures malheureusement l'intérieur de l'échantillon reste encore légèrement friable. Malgré tous à partir de 450 kg/m³ la résistance globale de l'échantillon est satisfaisante. Cette friabilité interne et la présence des bords cassant peuvent traduire un manque d'hydratation du ciment dû à un rapport eau/ciment trop faible ou bien une trop forte humidité interne dû à un manque de séchage.

Les échantillons 25 à 29 devrait nous apporter cette clef de réponse.

Fig. 56 : Photos d'échantillons de béton avec balle de riz constante et des concentrations croissantes de Ciment Naturel Prompt ( 1. 250 kg/m³ - 2. 300 kg/m³ - 3. 350 kg/m³ - 4. 400 kg/m³ - 5. 450 kg/m³ )

Enfin pour terminer cette première partie de cette phase de test les **échantillons 23** (CNP = 410g, E/C = 0,53 ; balle de riz = 90g, acide citrique = 0,3% ; compression de 10%) et **24** (CNP = 410g, E/C = 0,53 ; balle de riz = 90g, acide citrique = 0,3% ; compression de 30%) ont été réalisés avec une concentration en CNP de 500 kg/m³. On observe une très bonne résistance à compression verticale et une bonne cohésion. La quantité de ciment est largement suffisante pour assurer la cohésion des éléments du mix design voir même trop importante.

Dans la seconde partie de cette phase de test nous trouvons les **échantillons 25 à 29**. Ces derniers nous on permis de nous rendre compte de l'importance d'un séchage correct et complet pour une bonne résistance mécanique et une bonne cohésion de la balle de riz avec la pâte cimentaire.

Les échantillons 25 à 29 reprennent les mêmes concentrations et la même compression que les échantillons 14 – 16 - 18 - 20 et 22, seule la durée de séchage change car cette dernière passe de 48h à 15 jours.
Nous avons pu voir que grâce à ce temps de séchage supplémentaire la résistance mécanique est beaucoup plus grande, la cohésion de la balle de riz avec le béton est aussi bien supérieure même sur les bords des échantillons (parties qui étaient les plus sensibles auparavant). Tout ceci nous permet d'obtenir des qualités d'échantillons bien meilleurs avec un dosage en ciment bien inférieur. Malgré tout des dosages en ciment trop faibles (inférieurs à 300 kg/m³ ) ne permettent pas d'obtenir un béton balle de riz assez résistant pour permettre la création d'un bloc en béton.

Ainsi il est probable qu'une concentration en ciment de l'ordre de 350 ou 400 kg/m³ suffise pour fabriquer des blocs en ciment tout en assurant une bonne résistance aux chocs.

**Fig. 57 : Echantillons n°25 avec concentration en CNP de 250 kg/m³ (présence de cassures sur les bords dû à une trop faible concentration en ciment)**

## 5.6 Troisième série d'activités expérimentales : Ajout d'amidon de riz

Sur la base des expérimentations effectuées préalablement sur des composants tels que la balle de riz, l'acide citrique ou l'eau et par la suite sur la concentration optimale de ciment à l'intérieur du mix design, nous avons étudié dans ce paragraphe la possibilité d'insérer de l'amidon de riz au sein du béton comme liant naturel permettant d'augmenter la résistance mécanique et la cohésion des éléments qui composent ce dernier.

Pour faciliter l'utilisation et le dosage de l'amidon il est nécessaire de s'assurer que ce dernier a été préalablement concassé et transformé sous forme de poudre.

Afin de ne pas être gêné par les attributs du ciment et de ne pas compromettre l'analyse des réactions liés à l'intégration de l'amidon de riz, nous nous sommes intéressés à un niveau de concentration en ciment naturel Prompt assez bas (CNP = 250kg/m³) afin de pouvoir observer correctement l'augmentation ou la diminution de cohésion de l'échantillon. Ainsi pour cette série d'échantillons (échantillons 30 à 41) nous aurons une concentration en CNP de 250kg/m³ = 205g, un rapport Eau/ciment de 0,66 ; une masse de balle de riz constante de 90g, une compression des échantillons de 10% pour les échantillons de 30 à 35 et de 30% pour ceux allant de 36 à 41. Enfin pour l'amidon, une concentration progressive sera ajoutée proportionnellement à la concentration de ciment allant de 1 à 10%.

D'après les analyses antérieures du paragraphe « 1.3 Analyse d'antériorité » nous avons pu voir que la concentration en amidon jouait un rôle intéressant sur la résistance mécanique avec des concentrations relativement basses. Ainsi l'ajout progressif d'amidon se fera par paliers allant de 1 en 1 pour les concentrations de 1 à 5% avec une transition directe à 10% par la suite. Le temps de séchage de ces échantillons est de 48h. Temps à partir duquel ces derniers viennent démoulés et analysés.

Ces échantillons seront comparés avec l'échantillon 12 possédant les mêmes caractéristiques à l'exception de la présence d'amidon. Il est à préciser que l'intégration d'amidon fut testée sous deux formes, la première sous forme de poudre avec le ciment avant d'être mélangée à l'eau et une deuxième fois prédiluée avec une petite quantité d'eau avant d'être mélangée avec le ciment et le reste de l'eau normalement nécessaire à la création de l'échantillon.

Malgré différents tests nous n'avons pas pu observer de différences significatives nous affirmant qu'une solution puisse prévaloir sur une autre. Enfin dans un dernier temps le test de comparaison de l'intégration de l'amidon s'est poursuivi avec l'échantillon 45 (CNP = 102g, amidon de riz = 102g E/C = 1.07 ; balle de riz = 90g, acide citrique = 0,3% ; compression de 30%). Dans ce dernier nous avons testé la possibilité de remplacer la moitié du ciment par de l'amidon de riz afin d'observer si nous pouvions diminuer drastiquement l'utilisation du ciment.

### 5.6.1 Résultats et discussions

Pour l'analyse des **échantillons 30 et 36** correspondants à une concentration d'amidon de 1% (1% = 2,05g) nous avons pu constater une augmentation de la résistance à compression avec une cohésion générale de la balle de riz accrue par rapport à l'échantillon 12. L'amidon de riz agissant comme un régulateur de prise pour le ciment, le séchage est très légèrement ralenti par rapport à l'échantillon de référence sans amidon de riz.

Dans le cas des **échantillons 31 et 37** avec une concentration en amidon de riz de 2% (2% = 4,1g), un gain non négligeable de cohésion de la balle de riz est à constater par rapport à l'échantillon 12 et supérieur à l'échantillon 30. Une fois encore le temps de séchage est légèrement ralenti par rapport à un échantillon sans amidon de riz. Il est possible d'imaginer que l'augmentation du temps nécessaire au séchage de l'échantillon permette entre autres d'hydrater de façon plus homogène le ciment et d'assurer de meilleures prestations mécaniques.

Pour le reste des échantillons et au-delà d'une concentration de 2% d'amidon de riz nous pouvons constater une perte progressive de résistance mécanique proportionnel à la concentration en amidon. En d'autres thermes au-delà de 2%, plus la concentration en amidon de riz est grande plus le gain en résistance mécanique est faible. On peut observer que le béton devient fragile et se décompose sous forme de sable hétérogène.
Dans l'**échantillon 45** nous avons remplacé 50% de la quantité de ciment par de l'amidon de riz. L'objectif était de comprendre si l'amidon de riz pouvait remplacer le ciment lors de la création des blocs. Malheureusement ce remplacement provoque une perte quasiment totale de la cohésion de l'échantillon, de plus il augmente considérablement la quantité d'eau utilisé pour obtenir la même rhéologie du ciment car l'amidon de riz est beaucoup plus gourmand en eau.

Fig. 58 : Mélange du ciment naturel Prompt avec l'amidon de riz avant d'être intégré avec la balle de riz

Fig. 59 : Amidon de riz utilisé pour les échantillons sous forme de poudre blanche

## 5.7 Quatrième série d'activités expérimentales : Consistance, résistance au feu et aux intempéries

Dans cette dernière série d'activités expérimentales nous avons analysé différentes caractéristiques techniques du béton. Cela va nous permettre de classer ce dernier de façon informelle dans des classes de résistances au différents agents extérieurs ainsi que d'analyser la consistance du mix design.

Ces analyses se concentrent essentiellement sur la consistance du béton, qui est analysé à l'aide d'un procédé stricte que l'on nomme « cône d'Abrams », dans l'analyse de la résistance au feu ainsi que la résistance aux intempéries.

Pour réaliser ces analyses 8 échantillons sont nécessaires. Deux échantillons pour la consistance du béton avec deux concentrations différentes de ciment de 250 et 350 kg/m³, deux échantillons pour la résistance au feu reprenant les mêmes dosages de ciment que précédemment. Enfin quatre échantillons pour l'analyse de la résistance aux intempéries sont nécessaires, deux sans amidon avec des concentrations de ciment de 250 et 350 kg/m³ et deux autres avec les mêmes concentrations de ciment mais dans lesquelles nous avons inséré 2% d'amidon de riz.

### 5.7.1 Résultats et discussions

Pour l'analyse du **cône d'Abrams** nous avons effectué deux préparations de béton frais correspondant aux **échantillons 46** (CNP 250= 205g, E/C = 0,66 ; balle de riz = 90g, acide citrique = 0,3%) et **47** (CNP 350= 287g, E/C = 0,6 ; balle de riz = 90g, acide citrique = 0,3%). Nous avons pour cela moulé des troncs de cônes en béton (cône de 30cm de hauteur, de base de 20cm de diamètre et de 10cm de diamètre au sommet). Nous avons rempli le cône de 3 couches de béton piqués chacune de 25 coups à l'aide d'une tige de 16mm de diamètre.

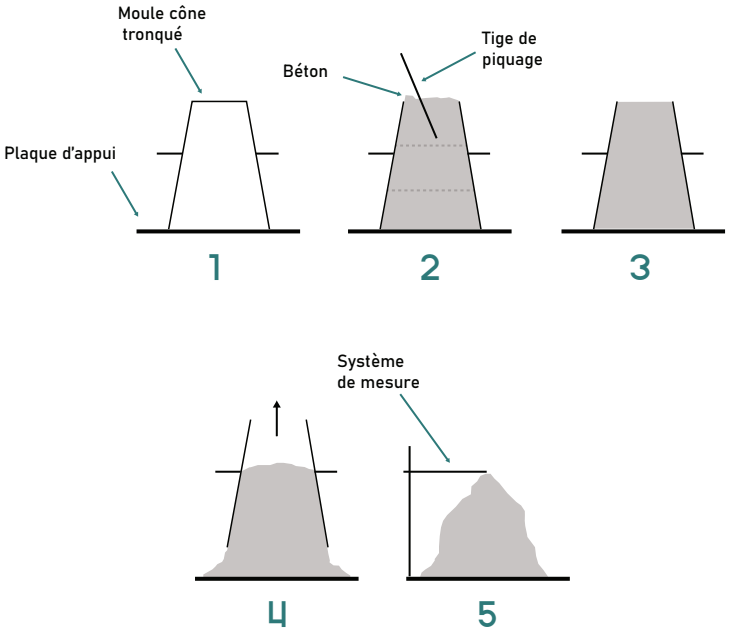



Fig. 60 : Schéma du fontionnement du test du cône d'Abrams

Après cette première étape on soulève délicatement le moule et on mesure aussitôt l'affaissement (SLUMP). Il existe 5 classes de consistance en fonction de l'affaissement allant de S1 (entre 10 et 40 mm) à S5 (> ou = à 220mm).

| Classe de consistance | Affaissement [mm] |
|---|---|
| S1 | 10 à 40 |
| S2 | 50 à 90 |
| S3 | 100 à 150 |
| S4 | 160 à 210 |
| S5 | > ou = 220 |

Tab 22 : Classification des consistances du béton

Fig 61 : Photo de la réalisation du test du cône d'Abrams

Fig 62 : Mesure d'affaissement du béton (SLUMP)

Pour la phase d'analyse de la **résistance au feu**, deux échantillons ont été réalisés, l'échantillon 48 (CNP 250= 2,36kg, E/C = 0,66 ; balle de riz = 1,35kg, acide citrique = 0,3%, compression de 30%) et 49 (CNP 350= 3,3kg, E/C = 0,6 ; balle de riz = 1,35kg, acide citrique = 0,3%, compression de 30%). Ces derniers ont été compressés dans des moules de forme rectangulaire de 30x45cm et de 7cm d'épaisseur.

Afin de réaliser l'analyse de résistance au feu nous nous sommes basés sur les analyses réalisées par le CERIB Centre d'Essais du Feu dans la gamme de « RESISTANCE AU FEU d'un mur non porteur en béton de chanvre » et PROMETHEE (Laboratoire de résistance au feu agréé par le ministère de l'intérieur). Cette appréciation de laboratoire de référence est celle déposée par la société « Construire en Chanvre » en date du 16/06/2020. La classification Française de résistance au feu va de M4 (inflammable) à M0 voire même incombustible.

| Classement des EUROCLASSES selon EN 13501-1 | | | Exigences réglementaires françaises |
|---|---|---|---|
| Comportement au feu | Production de fumée | Gouttelettes enflammées | |
| A1 | - | - | Incombustible |
| A2 | s1 | d0 | M0 |
| A2 | s1 | d1 | M1 |
| A2 | s2<br>s3 | d0<br>d1 | |
| B | s1<br>s2<br>s3 | d0<br>d1 | |
| C | s1<br>s2<br>s3 | d0<br>d1 | M2 |
| D | s1<br>s2<br>s3 | d0 | M3 |
| | | d1 | M4 (non gouttant) |
| E | Non applicable | d1 | M4 |
| E | Non applicable | d2 | Pas de classement |
| F | Non applicable | Non applicable | Pas de classement |

Tab 23 : Classement des EUROCLASSES selon la norme EN 13501-1

Dans cette analyse nous ne nous somme pas intéressés au finitions intérieures et extérieures du produit ni au type de mise en œuvre mais bien au produit fini brut après séchage. Pour pallier au manque de moyen en comparaison des laboratoires d'analyses nous avons exposé les échantillons à la flamme d'un poste de soudage oxyacétylénique avec brûleur de diamètre 60mm et de puissance de 6,4kW.

Ce dernier permet d'atteindre des températures de 300°C similaire à celle qui sont analysé durant les tests de combustion au feu.

Fig 63 : Brûleur de diamètre 60mm

Fig 64 : Post de soudage

Les échantillons ont été séché complétement pendant 1 mois avant d'être utilisé. Nous avons pu voir qu'après une exposition à la flamme du bruleur durant une période de 10 min les échantillons ont une bonne résistance à la combustion avec des résultats plutôt encourageants. En effet, même si l'échantillon 49 contenant une plus grande concentration en ciment possède aussi une meilleure résistance au feu, pour l'ensemble des deux échantillons lors de l'exposition à la flamme :

- il n'y a pas eu de fumée,
- pas de dégagement d'odeur,
- les échantillons se sont consumés sans s'enflammer,
- pas de présence de craquement ou fissures,
- le béton offre une bonne résistance à la chaleur en stoppant cette dernière de se diffuser à travers les 7cm de l'échantillon,
- enfin la combustion de l'échantillon s'est effectué sur une très faible profondeur (environ 5mm pour l'échantillon 49 et 8mm pour l'échantillon 48).

Malgré que l'on ne puisse pas effectuer de classification officielle nous avons pu tester que les échantillons possèdent une bonne résistance au feu s'approchant au minimum d'une classe M0 et supérieur à des produits similaires tel que le système « Biosys » de VICAT (test effectué dans les mêmes conditions sur des échantillons de même dimension). Ainsi il nous est possible d'hypothétiser que le bloc FUTURIZ puisse arriver à des niveaux de résistance au feu au minimum de REI 30.

Fig 65 : Test de résistance au feu

Fig 66 : Résultat du test de résistance au feu pour l'échantillon 48 (CNP=250)

Fig 67 : Résultat du test de résistance au feu pour l'échantillon 49 (CNP=350)

Fig 68 : Photo de la combustion superficiel de l'échantillon 48 (CNP=250)

Fig 69 : Photo de la carbonisation de la balle de riz de l'échantillon 48 (CNP=250)

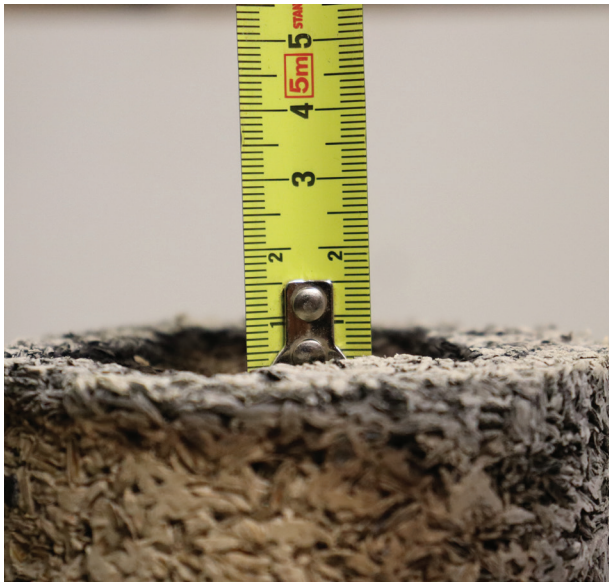


Fig 70 : Photo de la combustion de l'échantillon 48 (CNP=250) sur environ 5mm de  profondeur

Fig 71 : Photo de la différence entre la balle de riz brulée et celle intact de l'échantillon 48 (CNP=250)

Enfin dans un dernier temps, après avoir analysé la consistance du béton et sa résistance au feu, nous nous sommes concentrés sur la capacité du béton à **résister aux intempéries**.

Pour cela 4 différents échantillons ont été réalisés, l'**échantillon 50** (CNP250 = 205g, E/C = 0,66 ; balle de riz = 90g, acide citrique = 0,3% ; compression de 30%), l'**échantillon 51** (CNP250 = 205g, E/C = 0,66 ; balle de riz = 90g, acide citrique = 0,3% ; compression de 30%, amidon 2% ), l'**échantillon 52** (CNP350 = 287g, E/C = 0,6 ; balle de riz = 90g, acide citrique = 0,3% ; compression de 30%) et enfin l'**échantillon 53** (CNP350 = 287g, E/C = 0,6 ; balle de riz = 90g, acide citrique = 0,3% ; compression de 30%, amidon 2%).

Ces derniers, après 3 jours de séchage en intérieur ont été placés en extérieur à ciel ouvert. Sachant que les échantillons ont été exposés aux intempéries dans la région de Lyon, ces derniers ont été exposés à la pluie, au vent, au gèle et à des températures allant de 13°C à -8°C.

Les échantillons ont été réalisés le 26/11/2021 et retiré le 20/01/2022.

Après deux mois en extérieur on peut constater que l'ensemble des échantillons sont en parfait état et la présence d'humidité, de pluie ou de gel n'a pas altérer leur capacité de séchage et n'a pas créé de fissure ou casse sur ces derniers.

Fig 72 : Photo de la mise en place des échantillons en extérieur

Fig 73 : Photo des échantillons 50 et 51 lors de leur mise en extérieur

Fig 74 :Photo des échantillons 50 et 51 après 2 mois en extérieur

Fig 75 : Photo des échantillons 52 et 53 lors de leur mise en extérieur

Fig 76 : Photo des échantillons 52 et 53 après 2 mois en extérieur

# Tableau récapitulatif des échantillons réalisés

| Echantillons | Temps de séchage | Quantité de ciment naturel Prompt | Rapport eau/ciment | Quantité de balle de riz | Pourcentage de retardateur de prise | Niveau de compression | Pourcentage d'amidon de riz |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Test 1** : 14/10/2021 9,3x10 | 48h | CNP 200 = 164g | Eq = 0,7 | Balle de riz : 90g | 0,3% | 10% | - |
| **Test 2** : 15/10/2021 9,3x10 | 48h | CNP 200 = 164g | Eq = 0,7 | Balle de riz : 90g | 1% | 10% | - |
| **Test 3** : 15/10/2021 9,3x10 | 48h | CNP 200 = 164g | Eq = 0,7 | Balle de riz : 90g | 2% | 10% | - |
| **Test 4** : 18/10/2021 9,3x10 | 48h | CNP 200 = 164g | Eq = 1,4 | Balle de riz : 90g | 0,3% | 10% | - |
| **Test 5** : 18/10/2021 9,3x10 | 48h | CNP 200 = 164g | Eq = 0,7 | Balle de riz : 90g | 0,3% | 30% | - |
| **Test 6** : 18/10/2021 9,3x10 | 48h | CNP 200 = 164g | Eq = 0,7 | Balle de riz : 90g prémouillé | 0,3% | 30% | - |
| **Test 7** : 18/10/2021 9,3x10 | 48h | CNP 200 = 164g | Eq = 0,7 | Balle de riz : 90g | 0,3% | 50% | - |
| **Test 8** : 18/10/2021 9,3x10 | 48h | CNP 200 = 164g | Eq = 0,7 | Balle de riz : 90g | - | 30% | - |
| **Test 9** : 18/10/2021 9,3x10 | 48h | CNP 500 = 452g | Eq = 0,5 | Balle de riz : 90g | 0,3% | 10% | - |
| **Test 10** : 18/10/2021 9,3x10 | 48h | CNP 500 = 452g | Eq = 0,5 | Balle de riz : 90g | 0,3% | 30% | - |
| **Test 11** : 21/10/2021 9,3x10 | 48h | CNP 250 = 205g | Eq = 0,66 | Balle de riz : 90g | 0,3% | 10% | - |
| **Test 12** : 21/10/2021 9,3x10 | 48h | CNP 250 = 205g | Eq = 0,66 | Balle de riz : 90g | 0,3% | 30% | - |

| Echantillons | Temps de séchage | Quantité de ciment naturel Prompt | Rapport eau/ciment | Quantité de balle de riz | Pourcentage de retardateur de prise | Niveau de compression | Pourcentage d'amidon de riz |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Test 13** : 21/10/2021 9,3x10 | 48h | CNP 250 = 205g | Eq = 0,66 | Balle de riz : 90g | 3% | 10% | - |
| **Test 14** : 21/10/2021 9,3x10 | 48h | CNP 250 = 205g | Eq = 0,66 | Balle de riz : 90g | 3% | 30% | - |
| **Test 15** : 21/10/2021 9,3x10 | 48h | CNP 300 = 246g | Eq = 0,63 | Balle de riz : 90g | 0,3% | 10% | - |
| **Test 16** : 21/10/2021 9,3x10 | 48h | CNP 300 = 246g | Eq = 0,63 | Balle de riz : 90g | 0,3% | 30% | - |
| **Test 17** : 26/10/2021 9,3x10 | 48h | CNP 350 = 287g | Eq = 0,6 | Balle de riz : 90g | 0,3% | 10% | - |
| **Test 18** : 26/10/2021 9,3x10 | 48h | CNP 350 = 287g | Eq = 0,6 | Balle de riz : 90g | 0,3% | 30% | - |
| **Test 19** : 26/10/2021 9,3x10 | 48h | CNP 400 = 329g | Eq = 0,58 | Balle de riz : 90g | 0,3% | 10% | - |
| **Test 20** : 26/10/2021 9,3x10 | 48h | CNP 400 = 329g | Eq = 0,58 | Balle de riz : 90g | 0,3% | 30% | - |
| **Test 21** : 26/10/2021 9,3x10 | 48h | CNP 450 = 369g | Eq = 0,56 | Balle de riz : 90g | 0,3% | 10% | - |
| **Test 22** : 26/10/2021 9,3x10 | 48h | CNP 450 = 369g | Eq = 0,56 | Balle de riz : 90g | 0,3% | 30% | - |
| **Test 23** : 28/10/2021 9,3x10 | 48h | CNP 500 = 410g | Eq = 0,53 | Balle de riz : 90g | 0,3% | 10% | - |
| **Test 24** : 28/10/2021 9,3x10 | 48h | CNP 500 = 410g | Eq = 0,53 | Balle de riz : 90g | 0,3% | 30% | - |

| Echantillons | Temps de séchage | Quantité de ciment naturel Prompt | Rapport eau/ciment | Quantité de balle de riz | Pourcentage de retardateur de prise | Niveau de compression | Pourcentage d'amidon de riz |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Test 25** : 29/10/2021 9,3x10 | 15j | CNP 250 = 205g | Eq = 0,66 | Balle de riz : 90g | 0,3% | 30% | - |
| **Test 26** : 29/10/2021 9,3x10 | 15j | CNP 300 = 246g | Eq = 0,63 | Balle de riz : 90g | 0,3% | 30% | - |
| **Test 27** : 29/10/2021 9,3x10 | 15j | CNP 350 = 287g | Eq = 0,6 | Balle de riz : 90g | 0,3% | 30% | - |
| **Test 28** : 29/10/2021 9,3x10 | 15j | CNP 400 = 329g | Eq = 0,58 | Balle de riz : 90g | 0,3% | 30% | - |
| **Test 29** : 29/10/2021 9,3x10 | 15j | CNP 450 = 369g | Eq = 0,56 | Balle de riz : 90g | 0,3% | 30% | - |
| **Test 30** : 04/11/2021 9,3x10 | 48h | CNP 250 = 205g | Eq = 0,66 | Balle de riz : 90g | 0,3% | 10% | 1% = 2,05g |
| **Test 31** : 04/11/2021 9,3x10 | 48h | CNP 250 = 205g | Eq = 0,66 | Balle de riz : 90g | 0,3% | 10% | 2% = 4,1g |
| **Test 32** : 04/11/2021 9,3x10 | 48h | CNP 250 = 205g | Eq = 0,66 | Balle de riz : 90g | 0,3% | 10% | 3% = 6,15g |
| **Test 33** : 04/11/2021 9,3x10 | 48h | CNP 250 = 205g | Eq = 0,66 | Balle de riz : 90g | 0,3% | 10% | 4% = 8,2g |
| **Test 34** : 04/11/2021 9,3x10 | 48h | CNP 250 = 205g | Eq = 0,66 | Balle de riz : 90g | 0,3% | 10% | 5% = 10,25g |
| **Test 35** : 04/11/2021 9,3x10 | 48h | CNP 250 = 205g | Eq = 0,66 | Balle de riz : 90g | 0,3% | 10% | 10% = 20,5g |
| **Test 36** : 04/11/2021 9,3x10 | 48h | CNP 250 = 205g | Eq = 0,66 | Balle de riz : 90g | 0,3% | 30% | 1% = 2,5g |

| Echantillons | Temps de séchage | Quantité de ciment naturel Prompt | Rapport eau/ciment | Quantité de balle de riz | Pourcentage de retardateur de prise | Niveau de compression | Pourcentage d'amidon de riz |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Test 37** : 05/11/2021 9,3x10 | 48h | CNP 250 = 205g | Eq = 0,66 | Balle de riz : 90g | 0,3% | 30% | 2% = 4,1g |
| **Test 38** : 05/11/2021 9,3x10 | 48h | CNP 250 = 205g | Eq = 0,66 | Balle de riz : 90g | 0,3% | 30% | 3% = 6,15g |
| **Test 39** : 05/11/2021 9,3x10 | 48h | CNP 250 = 205g | Eq = 0,66 | Balle de riz : 90g | 0,3% | 30% | 4% = 8,2g |
| **Test 40** : 05/11/2021 9,3x10 | 48h | CNP 250 = 205g | Eq = 0,66 | Balle de riz : 90g | 0,3% | 30% | 5% = 10,25g |
| **Test 41** : 05/11/2021 9,3x10 | 48h | CNP 250 = 205g | Eq = 0,66 | Balle de riz : 90g | 0,3% | 30% | 10% = 20,5g |
| **Test 42** : 25/11/2021 9,3x10 | 48h | CNP 250 = 205g | Eq = 0,66 | Balle de riz : 90g | 0,3% | 30% | - |
| **Test 43** : 25/11/2021 9,3x10 | 48h | CNP 250 = 205g | Eq = 0,8 | Balle de riz : 90g | 0,3% | 30% | - |
| **Test 44** : 25/11/2021 9,3x10 | 48h | CNP 250 = 205g | Eq = 0,66 | Balle de riz : 90g lavée | 0,3% | 30% | - |
| **Test 45** : 25/11/2021 9,3x10 | 48h | CNP 250 = 102g ciment + 102g amidon de riz (50%) | Eq = 1,07 car l'amidon de riz absorbe trop d'eau | Balle de riz : 90g | 0,3% | 30% | - |
| **Test 46** : 20/01/2021 | - | CNP 250 = 205g | Eq = 0,66 | Balle de riz : 90g | 0,3% | - | - |
| **Test 47** : 20/01/2021 | - | CNP 350 = 287g | Eq = 0,6 | Balle de riz : 90g | 0,3% | - | - |
| **Test 48** : 20/01/2021 | - | CNP 250 = 205g | Eq = 0,66 | Balle de riz : 90g | 0,3% | 30% | - |

| Echantillons | Temps de séchage | Quantité de ciment naturel Prompt | Rapport eau/ciment | Quantité de balle de riz | Pourcentage de retardateur de prise | Niveau de compression | Pourcentage d'amidon de riz |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Test 49** : 20/01/2021 | - | CNP 50 = 287g | Eq = 0,6 | Balle de riz : 90g | 0,3% | 30% | - |
| **Test 50** : 26/11/2021 9,3x10 mis en exterieur le 29/11/2021 | 2 mois | CNP 250 = 205g | Eq = 0,66 | Balle de riz : 90g | 0,3% | 30% | - |
| **Test 51** : 26/11/2021 9,3x10 mis en exterieur le 29/11/2021 | 2 mois | CNP 250 = 205g | Eq = 0,66 | Balle de riz : 90g | 0,3% | 30% | 2% = 4,1g |
| **Test 52** : 26/11/2021 9,3x10 mis en exterieur le 29/11/2021 | 2 mois | CNP 350 = 287g | Eq = 0,66 | Balle de riz : 90g | 0,3% | 30% | - |
| **Test 53** : 26/11/2021 9,3x10 mis en exterieur le 29/11/2021 | 2 mois | CNP 350 = 287g | Eq = 0,66 | Balle de riz : 90g | 0,3% | 30% | 2% = 4,1g |

# 6. CONTRÔLE DES PERFORMANCES

## Résumé

Dans le prolongement de l'activité expérimentale, la phase de contrôle des performances permet d'obtenir des résultats quantifiables.
Plusieurs échantillons ont été analysés au sein du laboratoire de la société Vicat afin de déterminer les résistances à compression de chacun d'entre eux. Chaque éprouvette a été réalisée dans des moules cylindriques appropriés de 11x22cm et laissée sécher pendant 28 jours avant d'être séchée mécaniquement pendant 2 jours dans un four à 50°C.
Dans un premier temps trois échantillons ont été réalisés afin de comparer l'importance du nettoyage préalable de la balle de riz à l'eau claire et de comprendre si l'ordre d'intégrations des éléments lors de la création du béton pouvait affecter ses performances. L'ensemble des échantillons ont une concentration en ciment de 250 kg/m³, une compression de 30% de leur volume et une concentration en retardateur de prise de 0,3%. L'amidon de riz n'est pas testé dans ses échantillons. Malheureusement, malgré toutes les précautions, au moment du séchage dans le four l'ensemble des échantillons se sont cassés. Cette fragilité peut probablement s'expliquer par une trop faible concentration en ciment.
Dans un second temps, six autres échantillons ont été réalisés afin de déterminer le gain de résistance à compression lors de l'ajout d'amidon de riz dans le béton. La balle de riz a été préalablement lavée dans l'ensemble des échantillons.
Les éprouvettes ont une concentration en ciment de 250, 350 et 450 kg/m³ et trois d'entre elles incorporent de l'amidon de riz avec une concentration de 2% tandis que les trois autres n'en possèdent pas. Ces dernières vont nous servir de comparaison pour évaluer le gain potentiel de résistance à compression grâce à l'apport d'amidon de riz. Malheureusement les deux échantillons avec une concentration en ciment de 250 kg/m³ se sont aussi cassés.
Grâce à l'analyse des résultats il s'est avéré que plus la quantité de ciment dans la formulation est importante plus les résistances à compression sont améliorées. De plus, les résultats de casses montrent que les résistances à la compression maximale atteignent 0,34 MPa. Enfin il semblerait que l'ajout d'amidon de riz dans la Formulation ne semble pas apporter de résistance supplémentaire au matériau. Il est à noter aussi que les résultats de résistance à compression sont deux fois inférieurs à ceux obtenus par la société Vicat lors de la création du béton avec balle de riz.
Ces résultats sont en désaccord avec les hypothèses émises jusqu'à maintenant. Il semblerait qu'un problème lors de la réalisation des échantillons soit responsable de la perte de résistance à compression.
Dans un dernier temps le système « FUTURIZ » a été produit. Un des parti pris à respecter était la possibilité de pouvoir empiler les blocs pour éviter l'utilisation de mortier. Deux blocs différents ont été réalisés afin d'obtenir la forme définitive. Le premier bloc réalisé s'est fissuré lors du démoulage. Une mauvaise compression et la présence d'un moule avec des formes trop complexes peuvent expliquer cette casse. Le deuxième échantillon, qui est aussi celui définitif, possède des formes plus simples lui permettant de résister correctement aux chocs. De plus sa forme est pensée et adaptée à une utilisation avec emboîtement en quinconce. Les dimensions finales du bloc sont de 20 x 25 x 50 cm pour un poids de 18 kg offrant une certaine facilité d'utilisation.

# 6. VERIFICA DELLE PRESTAZIONI

## Sintesi

Come estensione dell'attività sperimentale, la fase di controllo delle prestazioni fornisce risultati quantificabili.
Diversi campioni sono stati analizzati nel laboratorio Vicat per determinare le resistenze alla compressione di ciascuno di essi. Ogni campione è stato fatto in stampi cilindrici appropriati di 11x22cm e lasciato asciugare per 28 giorni prima di essere asciugato meccanicamente per 2 giorni in un forno a 50°C.
Inizialmente sono stati fatti tre campioni per confrontare l'importanza della pulizia della lolla di riso con acqua chiara e per capire se l'ordine di integrazione degli elementi durante la creazione del calcestruzzo potesse influenzare le sue prestazioni. Tutti i campioni hanno una concentrazione di cemento di 250 kg/m³, una compressione del 30% del loro volume, una concentrazione di ritardante di presa dello 0,3%. L'amido di riso non è testato in questi campioni. Purtroppo, nonostante le precauzioni prese, tutti i campioni si sono rotti durante l'essiccazione nel forno. Questa fragilità può probabilmente essere spiegata da una concentrazione di cemento troppo bassa.
In una seconda fase, sono stati presi altri sei campioni per determinare il guadagno in resistenza alla compressione quando l'amido di riso è stato aggiunto al calcestruzzo. La lolla di riso è stata precedentemente lavata in tutti i campioni.
I campioni hanno una concentrazione di cemento di 250, 350 e 450 kg/m³ e tre di essi incorporano amido di riso con una concentrazione del 2% mentre gli altri tre no. Quest'ultimo sarà usato come confronto per valutare il potenziale guadagno in resistenza alla compressione dovuto all'aggiunta di amido di riso. Purtroppo, anche i due campioni con una concentrazione di cemento di 250 kg/m³ si sono rotti.
L'analisi dei risultati ha mostrato che maggiore è la quantità di cemento nella formulazione, maggiori sono le resistenze alla compressione. Inoltre, i risultati di rottura mostrano che le massime resistenze alla compressione raggiungono 0.34MPa. Infine, sembra che l'aggiunta di amido di riso alla formulazione non fornisca alcuna forza aggiuntiva al materiale. Bisogna anche notare che i risultati di resistenza alla compressione sono due volte più bassi di quelli ottenuti da Vicat nella creazione di calcestruzzo con lolla di riso.
Questi risultati sono in contrasto con le ipotesi fatte finora. Sembrerebbe che un problema durante la produzione dei campioni sia responsabile della perdita di resistenza alla compressione.
Infine, è stato prodotto il sistema «FUTURIZ». Uno dei requisiti era che i blocchi potessero essere impilati per evitare l'uso della malta. Sono stati fatti due blocchi diversi per ottenere la forma finale. Il primo blocco prodotto si è incrinato durante la sfornatura. La ragione della rottura può essere una scarsa compressione e la presenza di uno stampo con forme troppo complesse. Il secondo campione, che è anche quello finale, ha forme più semplici che gli permettono di resistere correttamente agli urti. Le dimensioni finali del blocco sono 20 x 25 x 50 cm per un peso di 18 kg offrendo una certa facilità d'uso.

Une fois la phase précédente d'analyse des échantillons sur le comportement du béton de balle de riz et de l'intégration de l'amidon dans le mix design terminé, il est nécessaire de s'intéresser de façon plus ciblée aux résistances mécaniques des bétons réalisés.
Afin d'obtenir des résultats plus précis, des tests à compression sur des échantillons cylindriques de 11,5x23 cm ont été réalisé au sein du laboratoire de la société VICAT situé à L'Isle d'Abeau (fr). Ces échantillons répondent, en terme de dimensions et de volumes, à des normes précises tels que la UNI EN 12390-1:2012 affirmant entre autre que les échantillons doivent avoir un rapport hauteur/diamètre égale à 2.

Il est bon de préciser qu'en l'absence de vrais normatives sur la méthodologie des tests a réaliser pour les bétons possédant des agrégats végétaux, nous pouvons trouver des « protocoles de tests » spécifiques à la France qui sont des « règles » professionnelles sur les produits naturels et en chanvre que nous avons appliqué à nos échantillons.

En prenant en considération ces exigences d'échantillonnage nous avons réalisé deux séries de tests pour un total de 9 échantillons.

Fig 77 : Moules cylindriques pour la réalisation des échantillons pour la phase de test

Fig 78 : Siège sociale de la société VICAT à l'Isle-d'Abeau

## 6.1 Résistance à compression : liant – Balle de riz naturelle et lavée

Dans la première phase de test nous avons analysé trois échantillons cylindriques de 11,5x23cm avec des doses de ciment fixe de 250 kg/m³.

Pour réaliser l'analyse des résistances mécaniques des différents échantillons nous avons utilisé une presse hydraulique Zwick/Roell ZMART 1475 (FMax 5-100kN) et une vitesse de mouvement de la plaque de test de 3mm/min.

Fig 79 : Presse hydraulique Zwick/Roell ZMART 1475 avec un de nos échantillons prêt à être testé

Les échantillons ont été démoulés après un séchage de 48h et entreposés dans un endroit sec et ventilé avec une température moyenne de 20°C. Au terme de cette période de maturation de 28 jours les échantillons ont été placés dans un four à une température de 50°C pendant 48h.

Les trois échantillons correspondent aux **échantillons 54** (CNP250 = 678g, E/C = 0,66 ; balle de riz = 300g lavée, acide citrique = 0,3% ; compression de 30%), **l'échantillon 55** (CNP250 = 678g, E/C = 0,66 ; balle de riz = 300g non lavée, acide citrique = 0,3% ; compression de 30%) et **l'échantillon 56** (CNP250 = 678g, E/C = 0,66 ; balle de riz = 300g lavée, acide citrique = 0,3% ; compression de 30%).

Les deux premiers échantillons se sont intéressés à l'importance de laver la balle de riz (en plus de l'utilisation du tamis) afin de retirer l'ensemble des poussières et des dépôts micro ou macroscopique pouvant altérer l'adhésion du ciment à la balle de riz.

Afin de permettre une bonne utilisation et de pallier aux problèmes rencontrés précédemment dans les échantillons 5 et 6 (excès d'eau) la balle de riz utilisée dans les échantillons 54 et 56 a été rincée à l'eau claire puis séchée en intérieur pendant 24h à une température de 20°C après avoir été étalée pour faciliter l'évaporation de l'eau. Une fois sèche cette dernière fut utilisée dans les mêmes conditions que la balle de riz non lavée de l'échantillon 55.

Enfin dans l'échantillon 56 notre intéret s'est porté tout particulièrement à l'ordre d'ajout des composants pour la réalisation du béton. À la différence de l'échantillon 54, qui sert de comparaison et où nous avons préalablement mélangé le ciment avec l'eau puis avec la balle de riz, dans l'échantillon 56 nous avons utilisé le procédé de mélange « à sec » correspondant au mélange de tous les composants secs (ciment, balle de riz, acide citrique) avant de les mélanger avec l'eau.

Malheureusement après la phase de séchage dans le four, l'ensemble des échantillons précédents se sont cassés. Il semblerait que les échantillons n'ai pas pu resister à la phase de séchage forcé entrainant des micro-fissures qui ont rendus les éprouvettes friables et fragiles provoquant des casses partielles ou totales de ses dernières.

Il est probable que lors de la perte d'humidité dans la balle de riz, ces dernières est par la même occasion perdues en volume, entrainant des vides entre les aggrégats et le ciment provoquant une perte drastique de résistance.

Ainsi pour pallier à ce manque de résistance et fragilité il serait probablement nécessaire d'augmenter la quantité de ciment présent dans les formulations. Nous avons pu constater que seul les échantilons ayant une concentration inférieurs à 350 kg/m³ ont été endommagés. Une plus grande concentration en ciment pourrait augmenter la cohésion et pallier aux modifications de volume de la balle de riz.

| Echantillons | Temps de séchage | Quantité de ciment naturel Prompt | Rapport eau/ciment | Quantité de balle de riz | Pourcentage de retardateur de prise | Niveau de compression | Pourcentage d'amidon de riz |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Test 54** : 24/12/2021 11x22 | 48h | CNP 250 = 678g | Eq = 0,66 | Balle de riz : 299g lavée | 0,3 % | 30% | - |
| **Test 55** : 24/12/2021 11x22 | 48h | CNP 250 = 678g | Eq = 0,66 | Balle de riz : 299g non lavée | 0,3 % | 30% | - |
| **Test 56** : 24/12/2021 11x22 | 48h | CNP 250 = 678g | Eq = 0,66 | Balle de riz : 299g lavée et mélangé à «sec» | 0,3 % | 30% | - |

**Tab 24 : Echantillons de la première phase de test**

Fig. 80 : Présentation des échantillons 57 à 62 dans leur moules

## 6.2 Résistance à compression : liant – Balle de riz lavée avec ajout d'amidon

Au même titre que les échantillons analysés dans le paragraphe « 6.1 Résistance à compression : liant – Balle de riz naturelle et lavée » les échantillons ont été réalisés après avoir été mélangés avec un malaxeur/ mélangeur pour perceuse à ciment SIGMA 50. Les échantillons ont été démoulés après un séchage de 48h et entreposés dans un endroit sec et ventilé avec une température moyenne de 20°C. Au terme de cette période de maturation de 28 jours les échantillons ont été placés dans un four à une température de 50°C pendant 48h.

Pour cette deuxième phase d'analyse six échantillons ont été testés. Dans ces derniers incorporent de la balle de riz préalablement lavée selon le même procédé que celui expliqué dans le paragraphe précédent.

À la différence des échantillons 54, 55 et 56 la concentration en ciment est variable, allant de 250 à 450kg/m³.

Les six échantillons peuvent être séparés en deux groupes distincts. Dans un premier temps nous pouvons trouver les **échantillons 57** (CNP250 = 678g, E/C = 0,66 ; balle de riz = 300g lavée, compression de 30%), **l'échantillon 58** (CNP350 = 955g, E/C = 0,6 ; balle de riz = 300g lavée, compression de 30%), et **l'échantillon 59** (CNP450 = 1228g, E/C = 0,56 ; balle de riz = 300g lavée, compression de 30%). Ces derniers ont une concentration en ciment croissante mais ne possèdes pas de différences majeures entre eux si ce n'est la concentration en ciment.

Fig 81 : Malaxeur/ mélangeur SIGMA 50

Fig 82 : Mélange du béton de balle de riz avec le malaxeur

Le second groupe d'échantillons quant à lui reprend exactement les mêmes concentrations que les trois premiers échantillons mais intègrent une concentration en amidon de riz de l'ordre de 2%.

On trouve les **échantillons 60** (CNP250 = 678g, E/C = 0,66 ; balle de riz = 300g lavée, compression de 30%, amidon 2% = 13,6g), **l'échantillon 61** (CNP350 = 955g, E/C = 0,6 ; balle de riz = 300g lavée, compression de 30%, amidon 2% = 19,1g), et **l'échantillon 62** (CNP450 = 1228g, E/C = 0,56 ; balle de riz = 300g lavée, compression de 30%, amidon 2% = 24,6g).

Il est important de préciser que pour cette deuxième phase de test nous n'avons pas incorporé d'acide citrique comme retardateur de prise et nous avons préalablement mouillé la balle de riz avant de la mélanger avec le ciment préalablement dillué dans l'eau.

L'objectif de ses tests est de comprendre si l'ajout d'amidon en faible quantité peut effectivement augmenter la résistance mécanique des bétons avec balle de riz et en quelles proportions.

Fig 83 : Mise en place de l'échantillon 58 entre les deux plaques de test de la presse hydraulique Zwick.

Malheureusement comme dans la partie « 6.1 Résistance à compression : liant – Balle de riz naturelle et lavée » l'échantillon 57 et 60 comportant une concentration en CNP de 250 kg/m³ n'ont pas résisté au séchage du four. Cela à provoqué la perte de deux éprouvettes supplémentaires sur les 6 de cette phase de test.
En contre partie pour les échantillons 58, 59, 61 et 62 les tests à compression ont bien pu être effectués.

Une fois l'analyse des résultats effectuée, de nous rendre compte de l'invalidité des suppositions effectuées jusqu'à maintenant.

Les résultats obtenus infirme nos suppositions précédentes sur le gain de résistance mécanique lors de l'ajout d'amidon de riz dans les formulations.

| Echantillons | Temps de séchage | Quantité de ciment naturel Prompt | Rapport eau/ciment | Quantité de balle de riz | Pourcentage de retardateur de prise | Niveau de compression | Pourcentage d'amidon de riz |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Test 57** : 15/12/2021 11x22 | 48h | CNP 250 = 678g | Eq = 0,66 | Balle de riz : 299g lavée | - | 30% | - |
| **Test 58** : 15/12/2021 11x22 | 48h | CNP 350 = 955g | Eq = 0,6 | Balle de riz : 299g lavée | - | 30% | - |
| **Test 59** : 15/12/2021 11x22 | 48h | CNP 450 = 1228g | Eq = 0,56 | Balle de riz : 299g lavée | - | 30% | - |
| **Test 60** : 15/12/2021 11x22 | 48h | CNP 250 = 678g | Eq = 0,66 | Balle de riz : 299g lavée | - | 30% | 2% = 13,6g |
| **Test 61** : 15/12/2021 11x22 | 48h | CNP 350 = 955g | Eq = 0,6 | Balle de riz : 299g lavée | - | 30% | 2% = 19,1g |
| **Test 62** : 15/12/2021 11x22 | 48h | CNP 450 = 1228g | Eq = 0,56 | Balle de riz : 299g lavée | - | 30% | 2% = 24,6g |

**Tab 25 : Echantillons de la deuxième phase de test**

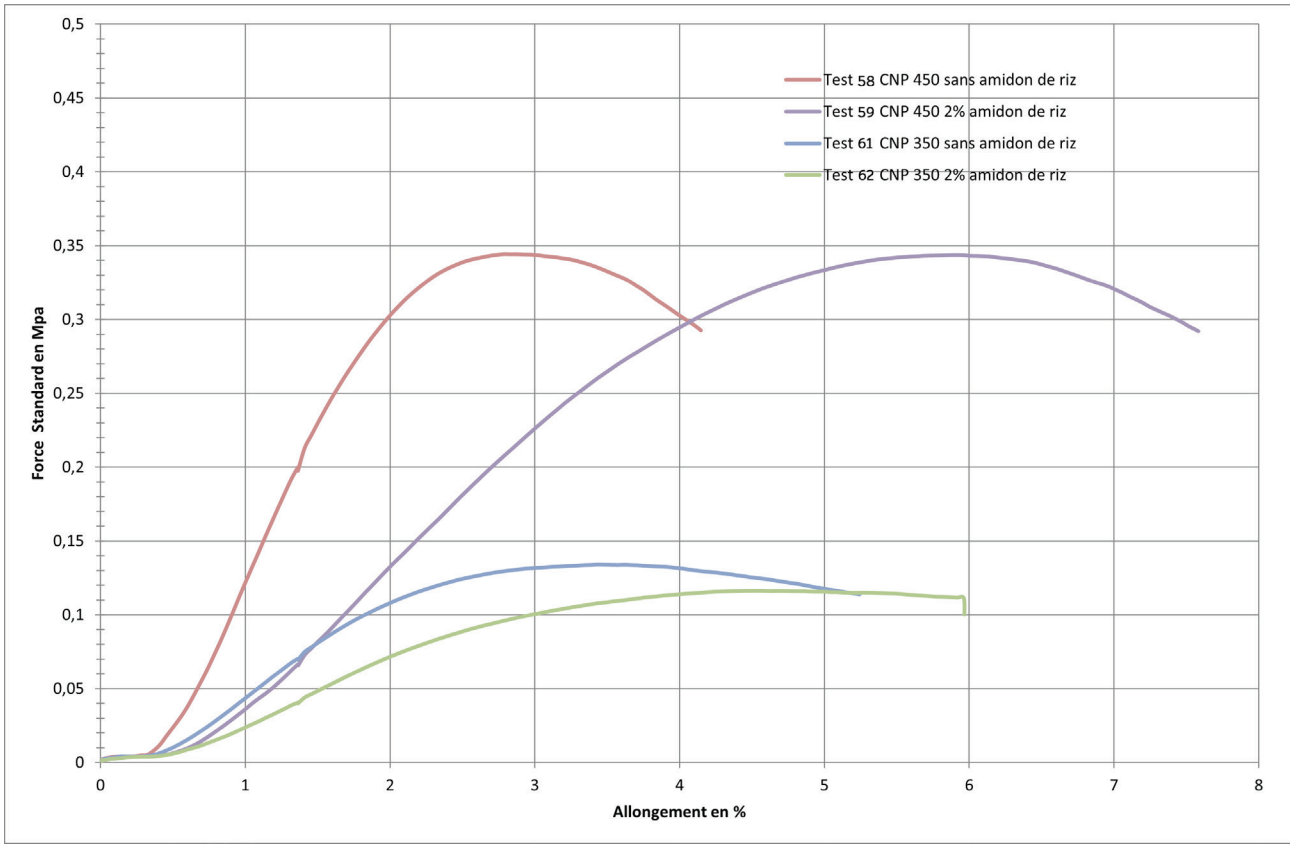


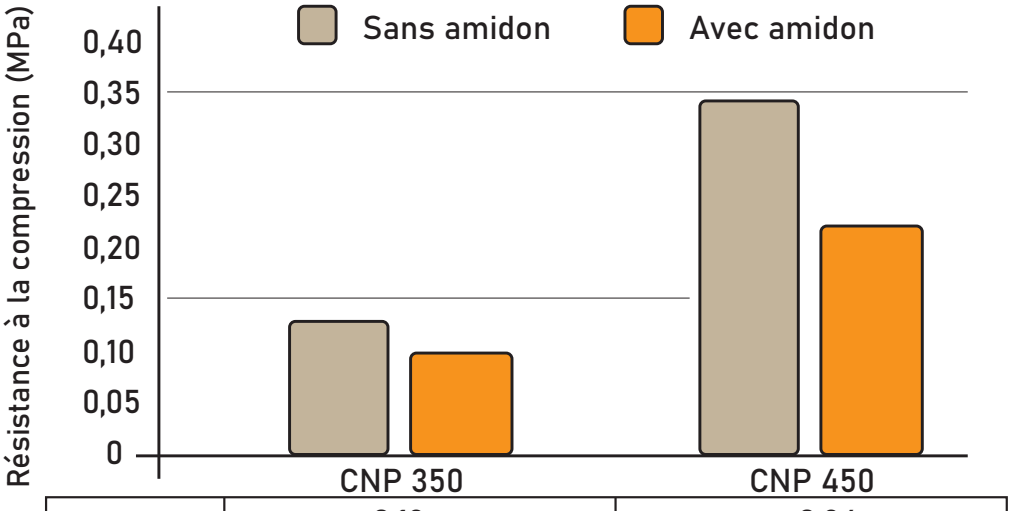

**Fig 84 : Courbe représentative de la résistance à compression et de l'allongement des échantillons 58, 59, 61 et 62**

Au contraire de nos attentes l'ajout d'amidon de riz en poudre lors de la réalisation des mélanges semblerait réduire la résistance mécanique du béton de balle de riz. Tout de même il semble que malgré la perte de résistance mécanique les échantillons avec de l'amidon de riz possède une plus grande élasticité (résistance à la fracture plus élevée).

Par la même occasion les résultats de résistance à compression de l'ensemble des échantillons sont relativement bas.

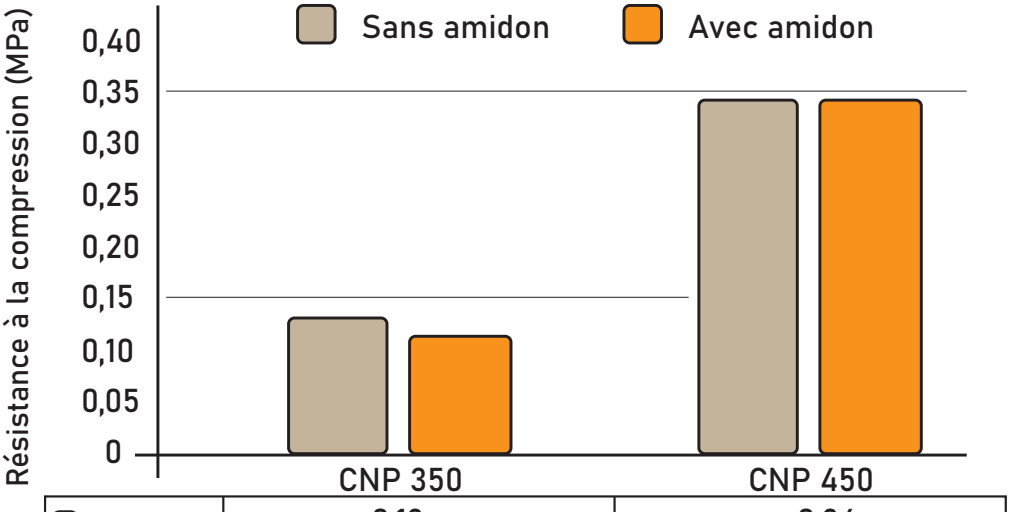
Nous pouvons observer des valeurs maximales de résistance à la compression pour les concentrations en CNP les plus élevées (450 kg/m³) de l'ordre de 0,34 MPa et une valeur de 0,13MPa pour une concentration en ciment de 350 kg/m³.

En comparaison des échantillons de chez Vicat pour le béton de balle de riz avec les mêmes concentrations en ciment (450 kg/m³), le niveau de résistance mécanique atteignait 0,78 Mpa et 0,50 MPa pour une concentration de 350 kg/m³.




| | CNP 350 | CNP 450 |
|---|---|---|
| Sans amidon | 0,13 | 0,34 |
| Avec amidon | 0,10 | 0,22 |

Fig 85 : Graphique de résistance à la **compression à 3% de déformation**




| | CNP 350 | CNP 450 |
|---|---|---|
| Sans amidon | 0,13 | 0,34 |
| Avec amidon | 0,12 | 0,34 |

Fig 86 : Graphique de résistance à la **compression maximale**

Il est possible de voir que grâce à l'amidon de riz les échantillons obtiennent un meilleur allongement et par la même occasion réussissent à obtenir une résistance à la compression maximale plus élevée que lors du test à 3% de déformation. Chose qui n'est pas effective pour les échantillons sans amidon de riz.

Après analyse des résultats il est fort probable que les échantillons aient hérité des problèmes lors de leur réalisation. Ces problèmes pourraient venir de certaines modifications dans le cycle de production comme : **le prémouillage de la balle de riz**, faisant augmenter le ratio eau/ciment et diminuant la résistance du béton une fois sec, ou bien **l'abscence de retardateur de prise** dans le mélange provoquant le séchage prématuré du ciment Prompt et ainsi créant des «fissures» sur l'échantillon sec, invisibles à l'oeil nu.

En d'autre termes il est difficile d'évaluer avec précision et certitude quels ont été le ou les problèmes provoquant une perte de résistance des échantillons. Il est probable que la perte de résistance mécanique lors de l'ajout d'amidon de riz soit une conséquence de cette mauvaise création des échantillons.

Il serait ainsi nécessaire de réeffectuer les tests sur un plus grand nombre d'échantillons dont nous nous sommes assué la conformité afin de calculer à nouveau la résistance à compression et le gain potentiel de résistance mécanique grâce à l'ajout d'amidon de riz.

De nombreux autres tests pourraient être effectués pour compléter ceux déjà réalisés, comme par exemple le calcul de : la résistance thermique, de l'absorption phonique, de l'absorption de l'humidité ainsi que les tests de résistance à la traction.

## 6.3 Réalisation du produit fini « FUTURIZ »

Grâce aux tests préalablements effectués nous pouvons voir que l'utilisation de la balle de riz, à la différence du chanvre, nous oblige à garder une concentration en ciment supérieur dû à la présence de fibres moins résistantes et avec une plus grande tendance à la déchirure (avec des concentrations en ciment faibles).
En revanche, la balle de riz permet la réalisation de bétons avec une qualité de finitions plus élevées et la concentration supérieure en ciment assure une meilleure résistance à la casse.

Grâce à une concentration en béton variable allant de 250 à 450kg/m³ il nous est possible d'obtenir des résistances mécaniques satisfaisantes pour la réalisation du bloc FUTURIZ tout en gardant un poid limité permettant la manipulation et la mise en place sur chantier. Les teneurs plus élevés en ciment peuvent servir à réaliser des blocs pour les murs de façade tandis que des concentrations en ciment plus faibles peuvent servir à réaliser des systèmes de cloisonnement et d'isolation intérieur.

La grande variation de concentration en ciment pour la réalisation du bloc FUTURIZ nous autorise à choisir entre qualité d'isolation (grâce à la présence de fibres végétales) et résistance mécanique.

En comparaison des classes de résistance pour les blocs en ciment traditionnels le bloc FUTURIZ offre de résistances à compréssion bien inférieurs.

Le projet de réalisation du bloc FUTURIZ s'inscrit dans un processus de bloc à emboitement à sec permettant de limiter considérablement l'utilisation de matière complémentaire tel que les mortiers.

Tout en s'inspirant de systèmes déjà existants nous avons essayé de développer une forme et des dimensions qui puisse permettre d'allier rapidité et facilité d'utilisation.

La facilité de transport étant un atout non négligeable nous avons décider de garder des dimensions plus modestes en comparaison de blocs similaires. Ainsi les dimensions définitives pour les blocs FUTURIZ sont de 50cm de longueur, 20cm de largeur et 25cm de hauteur. Ces dimensions permettent aussi d'alléger considérablement le poids de chaque bloc.
Afin de pallier au problèmes de résistance et de cohésion de béton avec balle de riz le bloc FUTURIZ a été pensé sous forme de blocs pleins

Lors du premier essai de la réalisation du bloc nous avons tenté de concevoir un bloc avec des formes géométriques complexes (Fig.87). Malheureusement la trop grande fragilité du béton réalisé a confirmé que la multiplication des formes géométriques lors de la conception

du bloc implique une multiplication des risques de casse, de rupture lors du démoulage et une fragilité lors de la manipulation.

Il a aussi été nécessaire de revoir le système d'empilement et d'emboitement du bloc qui doit permettre à ces derniers de s'encastrer facilement sans laisser de joints excessivements larges entre chaque blocs qui pourraient diminuer les performances thermiques des murs une fois réalisés.

Fig 87 : Cassures lors du démoulage du premier bloc (provoqué par une trop grande complexité du moule)

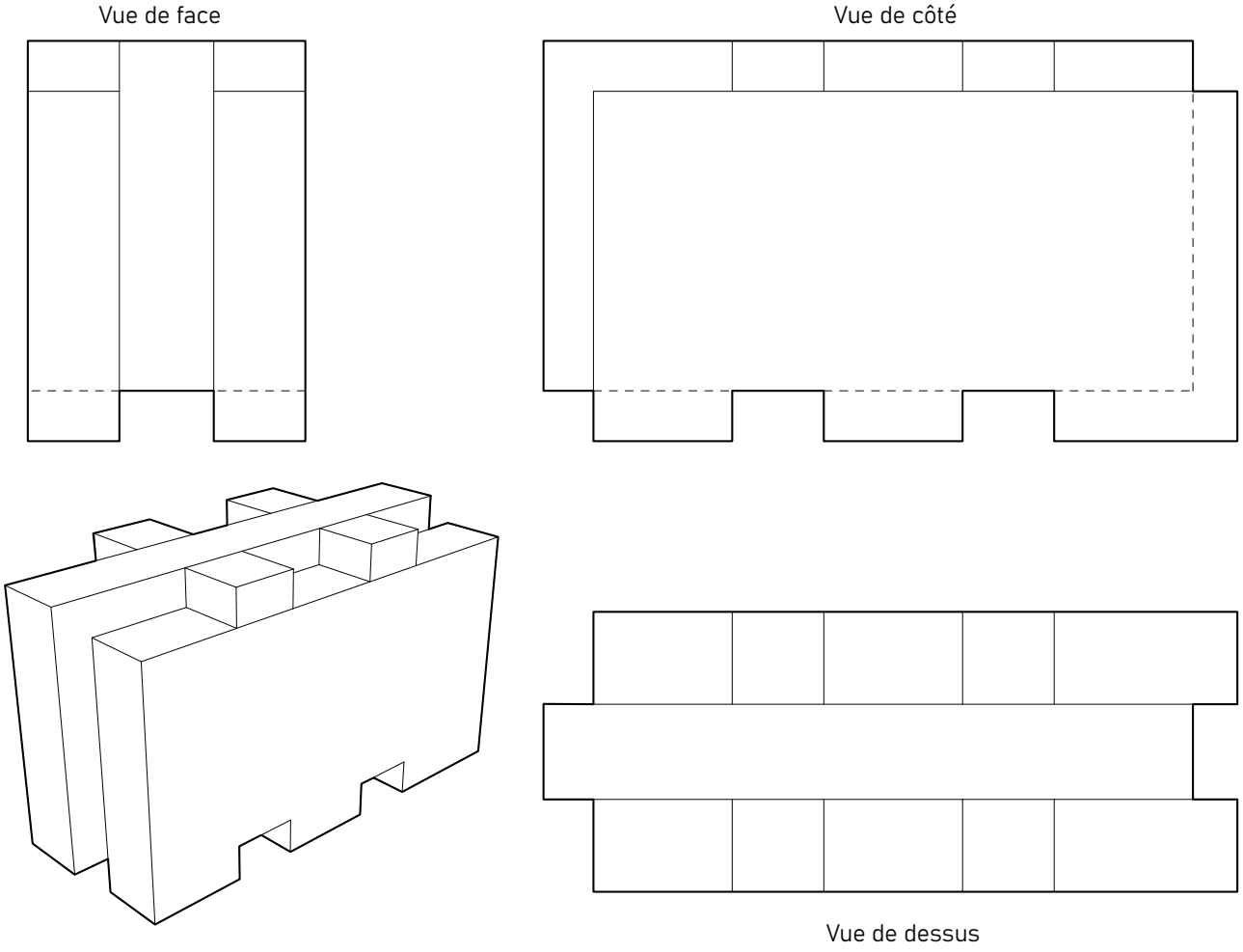



Fig 88 : Vue dessins technique du premier bloc réalisé (forme non concluante)

Après une première série d'échecs et d'erreurs de conception nous somme finalement arriver à une forme optimale et définitive du bloc (Fig.90).

Il a été nécessaire de garder une compression du béton réalisé de l'ordre de 30% pour s'assurer une bonne cohésion de la balle de riz.

La forme actuel et définitive du Bloc FUTURIZ lui permet d'être facilement transportable grâce à l'aide de « poignées » latérales facilitant la manipulation sur chantier, d'être encastré en quinconce afin d'améliorer la résistance du monomur réalisé et de limiter le risque de casses lors de son utilisation. De plus, les faibles dimensions du bloc permettent à ce dernier d'avoir un poids maximal de 18kg diminuant la pénibilité du travail lors de son utilisation.

Le système d'emboitement permet de relier les blocs latérallement et verticallement entre eux. Pour permettre de créer une structure en béton armé sur lequel les blocs puissent ce fixer, il est nécessaire de réaliser des formes alternatives à celle actuelle. Ces nouvelles formes pourraient être pensées comme des «blocs pilliers» permettantle coullage de pilliers en béton armé.

Pour une future commercialisation il est nécessaire d'éffectuer la réalisation des blocs selon un procédé industriel. Cela implique l'utilisation de machines spécialisés de type «pondeuses» permettant la réalisation de béton vibré, ce ui augmenterai considérablement la résistance du produit fini tout en assurant une production rapide et régulière.

Il serait aussi éssentiel de faire tester les blocs pour s'assurer la présence du marquage CE afin de s'assurer une commercialisation au sein de la communauté Européenne.

Fig 89 : Photos du bloc FUTURIZ réalisé

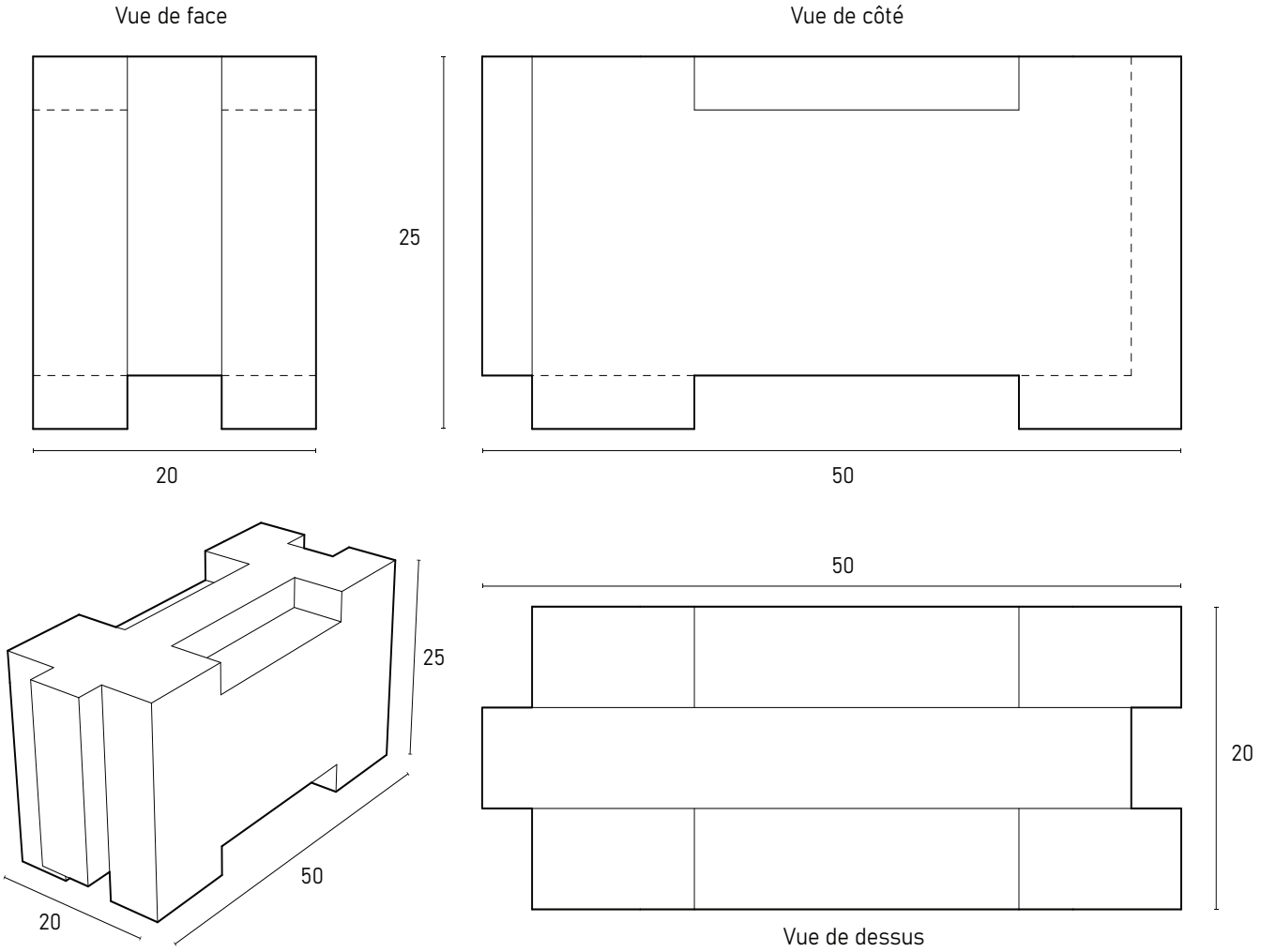



Fig 90 : Vue dessins technique du bloc FUTURIZ avec sa forme définitive

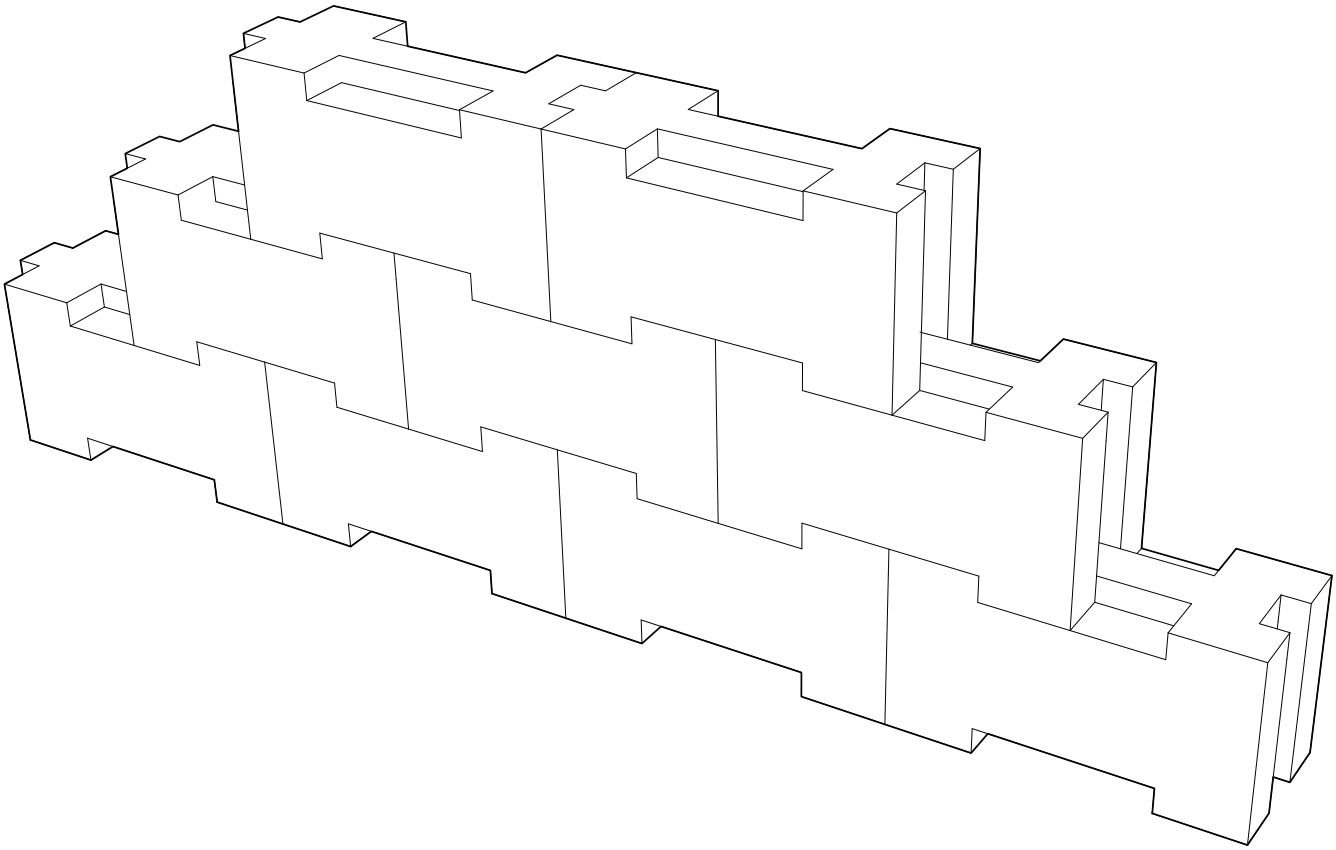


Fig 90 : Dessin 3D d'un mur monté avec le système FUTURIZ

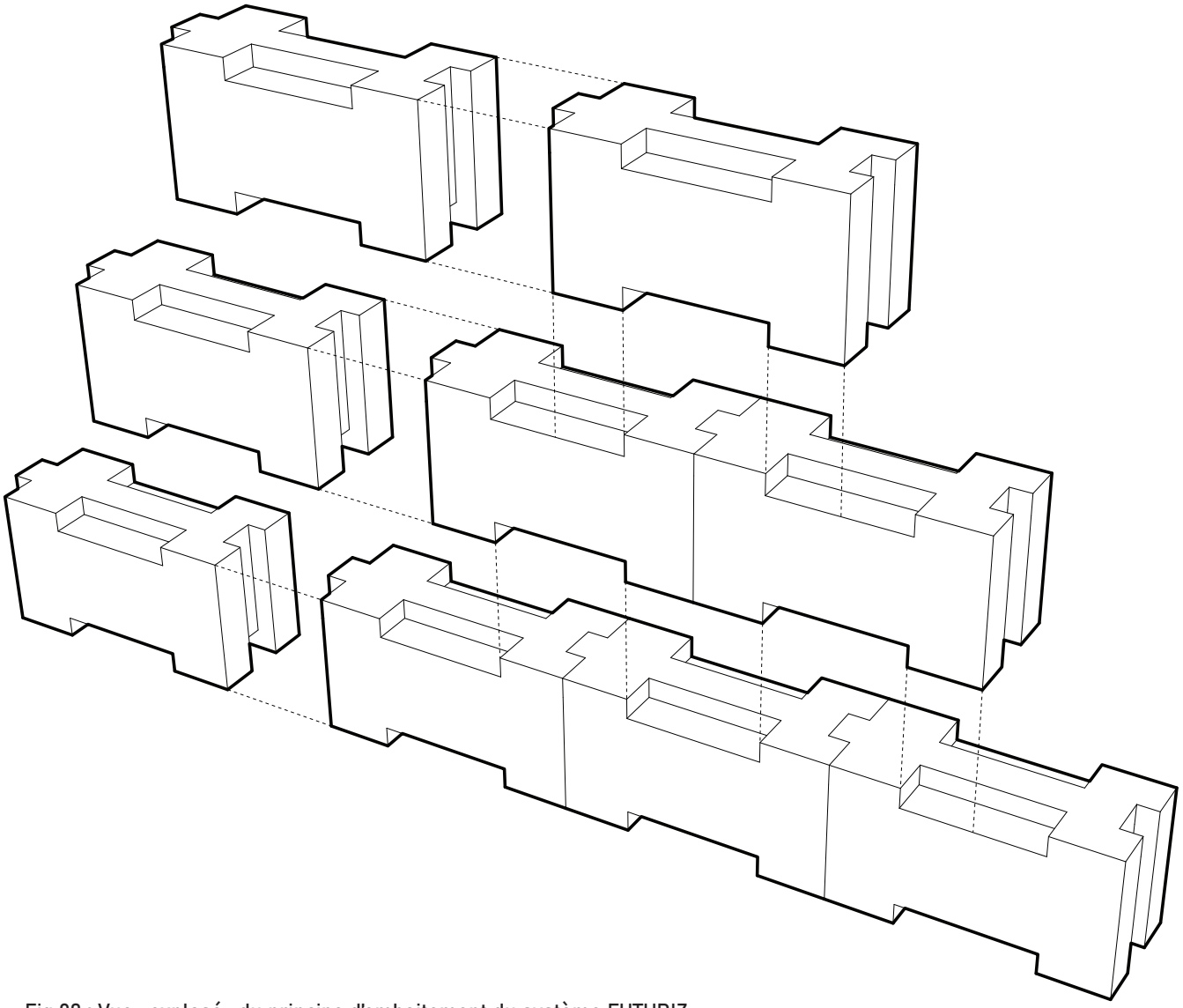


Fig 90 : Vue «explosé» du principe d'emboitement du système FUTURIZ

# CONCLUSIONS

## FR:

À travers notre travail de thèse nous avons étudié le potentiel de réutilisation d'un sous-produit Agricole d'origine végétale dans la construction : la balle de riz. Ce travail nous a amené à la réalisation d'un prototype de bloc en béton, le bloc FUTURIZ.

La grande disponibilité de la balle de riz et du ciment ainsi que la proximité de la société Vicat et des rizières en France et en Italie permet de nous assurer une facilité de réalisation du bloc.

Même si les tests à compression ne nous ont pas permis d'obtenir de résultats satisfaisant dû à des problèmes inhérents aux échantillons, les essais de réalisation du bloc nous promettent une réelle faisabilité de ce dernier. La qualité du béton avec balle de riz réalisé permet d'obtenir un bloc : avec un haut niveau de finition, résistant aux chocs, facilement transportable, facilement modifiable (perçage ou découpe) et qui ne s'effrite pas facilement. De plus, le système d'emboîtement à sec permet d'assurer une rapidité de mise en place sur chantier.

En comparaison de produits déjà commercialisés comme le système Biosys, le bloc FUTURIZ possède une meilleure résistance au feu, un niveau de finition supérieur et une meilleure cohésion des agrégats végétaux.

En contrepartie, la forte concentration de ciment dans le bloc diminue les performances thermiques de ce dernier. Il serait nécessaire de faire de nouveaux tests pour : déterminer la résistance à la compression, la résistance thermique, et obtenir une classe de résistance au feu.

À l'aide des tests effectués sur les échantillons de béton, les tests à compression, la réalisation du bloc, les tests au feu et aux intempéries, le système FUTURIZ pourrait être utilisé comme mur de façade non porteur pour la réalisation de bâtiments d'habitations type maisons individuelles et de petits bâtiments tertiaires dans la limite de construction R+1 avec toiture légère. Il est possible d'envisager de réaliser des dérivés du bloc FUTURIZ utilisant des concentrations moins élevées de ciment pour le cloisonnement intérieur.

Il n'est pas à exclure que des modifications sur le mix design puissent être effectués pour améliorer sa résistance à la compression, assurer une meilleure cohésion de la balle de riz pour des concentrations plus faibles en ciment ce qui permettrait de diminuer le poids du bloc et améliorerait sa résistance thermique.

Pour obtenir un marquage CE il sera nécessaire d'effectuer des tests de perméabilité à la vapeur, d'absorption de l'eau, et d'absorption phonique.

Pour une future commercialisation, il serait bon de s'interroger sur le niveau d'Embodied Energy ainsi que sur le coût de fabrication du bloc FUTURIZ pour déterminer si ce dernier est économiquement viable et concurrentiel.

En fin de compte nous avons été capable de transformer un bloc en ciment traditionnel en un bloc biosourcé utilisant uniquement des agrégats d'origine végétal. De nombreux matériaux de construction sont aujourd'hui sur la voie de la décarbonisation grâce à l'utilisation de matériaux biosourcés provenant de récupération ou bien issus du recyclage. La transition entre consommation linéaire et consommation circulaire s'intensifie de jour en jour et il est possible d'imaginer que dans les prochaines années l'ensemble des matériaux utilisés dans la construction puissent être recyclables et biodégradables.

## IT:

Attraverso questo lavoro di tesi, si è studiato il potenziale riutilizzo di un sottoprodotto agricolo di origine vegetale nell'edilizia: la lolla di riso. Questo lavoro ha portato alla creazione di un prototipo di blocco di cemento, battezzato sotto il nome «FUTURIZ». L'ampia disponibilità di lolla di riso e di cemento, così come la vicinanza dell'azienda Vicat e delle risaie in Francia e in Italia, assicurano che il blocco sia di facile produzione.

Nonostante le prove di compressione non ci abbiano permesso di ottenere risultati soddisfacenti a causa di problemi inerenti ai campioni, le prove di realizzazione del blocco promettono una reale fattibilità di quest'ultimo. La miscela utilizzata per la realizzazione di quest'ultimo permette di ottenere un blocco con un alto livello di qualità delle superfici, resistente agli urti, facilmente trasportabile, facilmente modificabile (foratura o taglio del blocco) e che non si sgretola facilmente. Inoltre, il sistema di incastro a secco assicura una rapida installazione in loco.

Rispetto ai prodotti già presenti sul mercato, come il sistema Biosys, il blocco FUTURIZ ha una migliore resistenza al fuoco, un livello di finitura superiore e una migliore coesione degli aggregati vegetali. D'altro canto, l'alta concentrazione di cemento nel blocco riduce le sue prestazioni termiche. Sarebbero necessari ulteriori test per determinare la resistenza alla compressione, la resistenza termica e ottenere una classe di resistenza al fuoco.

Con l'aiuto delle prove effettuate sulla miscela di progetto, le prove di compressione, la costruzione del blocco, le prove di fuoco e le prove climatiche, il blocco FUTURIZ potrebbe essere utilizzato come tamponamento esterno non portante per la costruzione di edifici residenziali come case singole e piccoli edifici terziari nei limiti della costruzione R+1 con un tetto leggero. È possibile creare derivati del blocco FUTURIZ utilizzando altri blocchi con livelli di concentrazione di cemento meno elevate per la suddivisione interna.

Non è escluso che si possano apportare modifiche alla miscela di progetto per migliorarne la resistenza alla compressione, garantire una migliore coesione della lolla di riso per concentrazioni di cemento inferiori, il che permetterebbe di ridurre il peso del blocco e migliorarne la resistenza termica.

Per ottenere un marchio CE sarà necessario effettuare prove di permeabilità al vapore, assorbimento dell'acqua e di assorbimento fonico.

Per una futura commercializzazione, sarebbe bene interessarsi al livello di Embodied Energy così come analizzare più a fondo il costo di fabbricazione del blocco FUTURIZ per determinare se è economicamente valido e competitivo sul mercato.

Infine, siamo riusciti a trasformare un blocco di cemento tradizionale in un blocco biobased utilizzando solo aggregati di origine vegetale. Molti materiali da costruzione sono ora sulla strada della decarbonizzazione attraverso l'uso di materiali a base biologica provenienti dal recupero o dal riciclaggio. La transizione dal consumo lineare a quello circolare diventa ogni giorno più intensa ed è possibile immaginare che nei prossimi anni tutti i materiali usati nell'edilizia potrebbero essere riciclabili e biodegradabili.

# BIBLIOGRAPHIE

## MONOGRAPHIES

J. FAURE, F. MAZAUD, *La qualité du riz dans l'Union européenne », Agriculture et développement*, (Juin 1995)

COURTOIS Brigitte, *Une brève histoire de l'amélioration génétique du riz*, France, CIRAD, (2007), https://agritrop.cirad.fr/545575/3/document_545575.pdf

DELOT Pierre, *Balle de riz : Utilisée pour réaliser des bétons isolants (liant chaux-ciment-plâtre)*, (Juillet 2015)

## THÈSE DE FIN D'ÉTUDES

TAP Julien, *les Amidons*, (2015)
https://www.yumpu.com/fr/document/read/29814991/les-amidons-julien-tap-free

ANDREOTTI Jacopo, FARUKU Denis, *ECOFFI: Ecologial COncrete Filled Fibers. Progetto, sviluppo e monitoraggio di un sistema di involucro a base di cemento naturale e fibre vegetali riciclate*, Rel. GIORDANO Roberto., MONTACCHINI Elena Piera, CARBONARO Corrado. POLITECNICO DI TORINO, Corso di laurea magistrale in Architettura Per Il Progetto Sostenibile, (2018)

GARIANO Roberta, *CONCRICE : riciclo di un sottoprodotto vegetale in edilizia : uso della lolla di riso per la realizzazione di un calcestruzzo dalle alte prestazioni termiche*,
Rel. GIORDANO Roberto., MONTACCHINI Elena Piera, TULLIANI Jean Marc Christian, POLITECNICO DI TORINO, Corso di laurea magistrale in Architettura Per Il Progetto Sostenibile, (2016)

RUMMAN R., BARI M.S., MANZUR T., KAMAL M.R., NOOR M.A., ET AL., *A Durable Concrete Mix Design Approach using Combined Aggregate Gradation Bands and Rice Husk Ash Based Blended Cement*, Department of Civil Engineering, BUET, Dhaka, Bangladesh, (2020).

CHETAN D., ARAVINDAN A., ET AL., *An experimental investigation on strength characteristics by partial replacement of rice husk ash and Robo sand in concrete*, Department of Civil Engineering, Koneru Lakshmaiah Education Foundation, Andhra Pradesh, India, (April 2020).

VIGNESHWARI M., ARUNACHALAM K., ANGAYARKANNI A., ET AL., *Replacement of silica fume with thermally treated rice husk ash in Reactive Powder Concrete*, Department of Civil Engineering, Thiagarajar College of Engineering, Madurai, Tamilnadu, 625015, India, (2018).

DEVLIN L., GRUJIC E., MOSES S., ET AL., *Mortar composition and method*, Davco Construction Materials pty limited, Wetherill park, NSW 2164, Australia, (January 2002).

CHABANNES M., *Formulation et étude des propriétés mécaniques d'agrobétons légers isolants à base de balles de riz et de chènevotte pour l'éco-construction*, Université de Montpellier, Faculté des Sciences, Ecole des Mines d'Alès (EMA), (Novembre 2015).

IZAGUIRRE A., LANAS J., ALVAREZ I., *Behaviour of a starch as a viscosity modifier for aerial lime-based mortars*, Department of Chemistry and Soil Sciences, School of Sciences, University of Navarra, 1, 31008 Pamplona, Spain, (2009).

ZHANG, ZHE, MIAO, BUQUAN, POITRAS, GERARD J. AND XUN, YONG, *Effect of sticky rice on compressive strenght of cement stucco containing lime and slag,* Département de génie civil, Université de Moncton, Moncton, NB, Canada, School of Civil Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng, Jiangsu, China, (2018).

SUHAD M. ABD, ALAA SAMEER, ZAINAB HASAN ALI, ET AL., *Effect of using corn starch as concrete admixture,* International Journal of Engineering Research and Science & Technology , (2016), https://www.researchgate.net/publication/325557575

DOROTHY KAMILAH BROWN, B.S., *Unprocessed rice husk ash as a partial replacement of cement for Low-cost Concrete*, Massachusetts Institute of Technology, (2012).

## Actes de conférence/ rapports de recherche

GLOBAL ALLIANCE FOR BUILDINGS AND CONSTRUCTION (GABC) – UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, *2020 GLOBAL STATUS REPORT FOR BUILDING AND CONSTRUCTION, Toward a zero-émissions, efficient and resilient buildings and construction sector*, (2020)

MEURICE Constance, *Vers un beton a liant d'amidon*, (Janvier 2014) https://seminairemateriaux.files.wordpress.com/2014/01/bibliographie_constance-meurice.pdf

MEURICE Constance, *Vers un ciment « vert » l'espoir des alternatives écologiques*, R8 – séminaire de recherche AMC2 « Matériaux pour l'éco-conception » Enseignants : R. Leroy, L. Dimitriadi ENSA Paris Malaquais, (2014) https://seminairemateriaux.files.wordpress.com/2014/06/constance_meurice_vers-un-ciment-vert.pdf

HAINAULT Baptiste, *Tenue au feu des maçonneries de blocs en béton*, FICHE LABORATOIRE n°130, CERIB, (mars 2021)

HAINAULT Baptiste, *Tenue au feu des maçonneries de blocs en béton revêtus*, FICHE LABORATOIRE n°131, CERIB, (Juillet 2020)

BARTHOU Bernard, *Performances acoustiques des maçonneries de blocs en béton*, FICHE LABORATOIRE n°131, (Septembre 2019)

LE THIERRY S., JACQUEMOT F., MARTIN G., RASORI J., PAYOT T., *Projet agrobloc : développement d'une gamme de blocs de maçonnerie en béton à base de granulats agrosourcés*, CERIB
https://gdr-mbs.univ-gustave-eiffel.fr/fileadmin/contributeurs/MBS/postersMBS/lethierry_CERIB.pdf

BIENVENIDO O. JULIANO - ORGANISATION DES NATIONS UNIES POUR L'ALIMENTATION ET L'AGRICULTURE, « *Le riz dans la nutrition humaine*, Rome, (1994)

UNESCO, *Rapport mondial des nations unies sur la mise en valeur des ressources en eau*, WWDR, (2020)

## Revues/ Banques d'informations

VICAT – VIEILLE MATERIAUX, *BIOSYS - béton de chanvre*

AFNOR, *Règles générales de la marque NF*

CERIB, *Présentation du projet AGROBLOC*, (février 2016)

SINFONI, *Panorama des marchés*, *Fibres végétales techniques*
*Matériaux (hors bois),* Structuration de la filière fibres techniques végétales, Lin et Chanvre à usage matériaux, (2016)
https://www.france-miscanthus.org/wp-content/uploads/2020/03/Memento-March%C3%A9s-fibres-v%C3%A9g%C3%A9tales-techniques-mat%C3%A9riaux-2020-va.pdf

FRANCEAGRIMER, *Le marché du riz : Monde, Europe, France*, (Mars 2019)

FEDERATION FRANCAISE DU BATIMENT, *Les Matériaux biosourcés dans le bâtiment*, (Novembre 2015)

LAVOISIER, *Revue juridique de l'environnement*, (2021)

## Sitographie

https://www.cirad.fr/

https://www.maxisciences.com/

https://www.ipcc.ch/languages-2/francais/

https://seminairemateriaux.wordpress.com/

https://www.planetoscope.com/dechets/614-.html#:~:text=31%20millions%20de%20tonnes%20de,d'ordures%20m%C3%A9nag%C3%A8res%20par%20an.

https://www.unep.org

https://www.fao.org/home/en/

https://evaluation.cstb.fr/fr/appreciation-technique-expertise-atex/demander/

http://www.cimentarchitecture.com/fr

https://www.solution-biosys.fr/

https://www.construire-en-chanvre.fr/missions

https://anr.fr/fr/

https://www.fib.org/

https://www.sciencedirect.com

https://www.orbit.com

https://www.archives-ouvertes.fr

https://www.google.com

https://www.wipo.int/portal/en/index.html

https://www.infociments.fr/auteurs/cimbeton

http://www.mattonesumattone.org/

http://www.enterisi.it/

http://rizdecamargue.com/

https://wikifarmer.com/fr/

https://www.leriz.fr/

https://www.passioncereales.fr/

https://agridemain.fr/

http://centrefrancaisduriz.fr/
https://www.istat.it/it/

https://www.ismeamercati.it/analisi-e-studio-filiere-agroalimentari

https://balleconcept.com/

http://www.ballederiz.fr/

https://agriculture.gouv.fr/

https://www.gouvernement.fr/

http://www.senat.fr/

https://normalisation.afnor.org/

https://www.ecologie.gouv.fr/

https://www.programmepacte.fr/

https://www.guidemaisonecologique.com/

http://www.akafuji.fr/

https://www.francetvinfo.fr/

## Vidéographie

CREPU Jean, BORIS Jean-Pierre, *Main basse sur le riz*, Documentaire sur l'utilisation et la commercialisation du riz durant la crise alimentaire de 2008, ARTE. Prix Italia fot TV Documentary- Current Affairs (2010)
https://boutique.arte.tv/detail/main_basse_sur_le_riz

DECHREF L., BERTRAND N., BOHN F., BONTE B., BELLOIR M., KUMARI N., PIRES J., *Le riz français est-il en voie de disparition ?* , (Novembre 2015)
https://www.francetvinfo.fr/culture/cuisine/le-riz-francais-est-il-en-voie-de-disparition_1161457.html

## Normes, Lois et Décrets

CERIB, « RÉFÉRENTIEL DE CERTIFICATION NF Partie 1 : Règles de fonctionnement applicables aux certifications NF, gérées par le CERIB » (Janvier 2020)

CERIB, « RÉFÉRENTIEL DE CERTIFICATION NF Partie 2 : Règles de certification NF Blocs en béton de granulats courants et légers » (Janvier 2020) NF025A

Norme NF EN 771-3:2011 -2012 « Spécification pour éléments de maçonnerie - Partie 3 : éléments de maçonnerie en béton de granulats (granulats courants et légers) - Complément national à la NF EN 771-3:2011 »

NF EN 206/CN : « spécifications, performances, production et conformité » (en application depuis décembre 2014)

NF EN 13670 « Exécution des structures en béton »

NF EN 14474 « Produits préfabriqués en béton - Béton utilisant des copeaux de bois comme granulat - Exigences et méthodes d'essai » (Mai 2005)

NF EN 15498 « Produits préfabriqués en béton - Béton utilisant des copeaux de bois comme granulat - Exigences et méthodes d'essai – Propriétés et performances des produits » (Octobre 2008)

NF EN 197-1 d'avril 2012 - composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants

ARRETE DU 19 DECEMBRE 2012 relatif au contenu et aux conditions d'attribution du label « bâtiment biosourcé » JORF n°0299 du 23 décembre 2012

BILAN DE L'APPLICATION DES LOIS AU 31 MARS 2020

DECRET N° 2012-518 DU 19 AVRIL 2012 relatif au label « bâtiment biosourcé » JORF n°0095 du 21 avril 2012

DECRET N° 2007-30 DU 5 JANVIER 2007 relatif à la valorisation des produits agricoles, forestiers ou alimentaires et des produits de la mer. NOR : AGRP0602566D

DECRETO LEGISLATIVO DEL 3 APRILE 2006, N° 152 (Codice ambientale)

ARTICLE L541-4-1 CODE DE L'ENVIRONNEMENT (Juillet 2020)

LOI DE TRANSITION ENERGETIQUE POUR LA CROISSANCE VERTE (LTECV), Loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte, (Aout 2015)

LOI n° 2020-699 du 10 juin 2020 relative à la transparence de l'information sur les produits agricoles et alimentaires, JORF n°0142 du 11 juin 2020

PLANT CLIMAT, Ministère de la transition écologique, (aout 2018)

LOI N° 2020-105 DU 10 FEVRIER 2020 relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire, JORF n°0035 du 11 février 2020

NF EN 197-1 Avril 2012 Ciment - Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants

REGLEMENTATION ENVIRONNEMENTALE 2020 (RE2020), Introduites par la Loi de transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) de 2015, la Stratégie nationale bas-carbone (SNBC) et la Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE)

# REMERCIEMENTS

Après de si nombreuses années d'études et si nombreuses difficultés affrontées, les mots me manquent cruellement pour pouvoir remercier l'ensemble des personnes qui m'ont soutenues et accompagnées durant mon parcours universitaire en Italie. Je souhaite remercier le professeur Roberto GIORDANO pour son soutien et son accompagnement durant cette thèse. Merci à Marco CAPPELLARI pour m'avoir orienté et conseillé régulièrement durant cette thèse, et un remerciement à la société Vicat pour le soutien technique qu'elle a su m'offrir.

Je tiens à dire **MERCI** tout particulièrement à mes parents qui ont toujours été présents à mes côtés, depuis mon premier jour en Italie jusqu'à la conclusion de cette thèse. Ils ont été le ciment de mon âme, me permettant de résister chaque jour aux problèmes rencontrés et de colmater les fuites de mon esprit. Ils sont l'exemple parfait de ce que les mots « Père et Mère » peuvent incarner de plus fort.

Je souhaite remercier aussi :

- Mon Frère qui a toujours su me pousser et me montrer la signification des mots « persistance et résilience ».
- Ma sœur qui a su me prouver que l'âge et le regard des autres importe peu et que seule la volonté de réaliser ses rêves est important.
- Ma Famille sans qui tout cela n'aurait jamais pu être possible et n'aurait pas eu le moindre sens. Merci à Mila, Adam, Ayuna et Rio qui ont été ma source d'inspiration et ma source d'énergie durant toutes ces années. Merci à Didier, Edwige, Jade, Arthur, Sébastien, Nadia, Ines, Ema, Béatrice, Angelo, Anne-Laure, Benoit, Emilie, Luca et Mattia.
- Ma famille de cœur en Italien qui a été d'une importance capitale, qui m'ont soutenu moralement chaque jour passé à leur côté, m'ont accueilli les bras ouverts et m'ont donné autant d'amour que ma propre famille, Merci infiniment à Véronique, Tazio, Tecla, Ciccio, Laura et Dino.
- Merci à Marie, Caroline, Amélie, Alix, Clarisse, Willy et Loan, ma bande de petits mouchoirs qui ont su croire en moi et me soutenir moralement, psychologiquement et intellectuellement depuis toutes ces années.
- Merci à Alessandro, Steven, Fabien, Feno, Alberto, Matteo, Carole, Angelica, Shayan et toutes les autres personnes qui ont fait partie intégrante de ma vie durant toutes ces années et ont contribué à transformer chaque journée en un voyage incroyable et inoubliable.

Je souhaite finir avec une pensée toute particulière aux personnes chers qui aujourd'hui ne sont plus là, ma tante Mireille, ma tante Yvonne, ma tante Kiri, mon oncle et parrain Claude, mes deux grand mères Yvonne et Lucie, ainsi que mon grand-père Mario que je n'ai pas eu la chance de connaître, mais que j'aurai tant aimé rendre si fier.

J'espère que cette thèse pourra aider, orienter et inspirer l'ensemble des personnes qui souhaitent être acteurs des changements à venir dans notre société et qui par leurs actes, aussi petits qu'ils puissent paraître, participeront à faire prendre conscience de l'importance de protéger la biodiversité de notre planète.