

DEMODULOR : une démarche de mixité des matériaux pour favoriser la démontabilité

Jean-Luc Kouyoumji
FCBA
Bordeaux, France



En 2012, l'ADEME a lancé un appel à projets portant sur les déchets du BTP. Réunis au sein de l'alliance MECD, quatre centres techniques de la construction (CTICM, CERIB, CTMNC et FCBA) ont choisi d'engager une recherche commune de solutions constructives de prévention de la production de déchets grâce à une approche systématique de **démontabilité**. Retour sur ce projet achevé récemment.

Le projet DEMODULOR vise les techniques de mise en œuvre représentatives du gros œuvre et de l'enveloppe qui sont pour une large part à l'origine du volume important de déchets attribué à la construction, secteur qui constitue un enjeu majeur en matière de prévention des déchets. L'approche globale et multi-matériaux portée par les partenaires a pour but de sélectionner des solutions constructives et d'envisager une évolution de ces procédés pour faciliter :

- la séparation des systèmes et composants sur chantier,
- la séparation des matériaux en vue d'un recyclage ou d'une élimination optimisée,
- la réutilisation ou le réemploi des matériaux et composants.

Mené sur un peu plus de deux ans, le projet s'est déroulé en phases successives : l'analyse des marchés et des volumes de matériaux et de déchets, la détermination de solutions constructives porteuses, la conception de leur adaptation et les premiers essais mécaniques de validation et, enfin, une analyse environnementale et socio-économique des potentialités.

1. Analyse des pratiques actuelles de gestion des déchets du bâtiment et de construction-déconstruction

L'évolution de la ville et de ses usages appelle une mutation récurrente des éléments de composition du tissu urbain qui se traduit par de nombreux programmes de réorganisation et de construction. Pour les accompagner, il est fréquent de lancer auparavant des projets de démolition totale ou partielle du domaine bâti : démolition/reconstruction, réutilisation du patrimoine, construction dans les friches urbaines ou industrielles,... La pénurie de la ressource foncière, le besoin croissant de répondre à la nécessité structurelle de ces nouvelles constructions et la meilleure maîtrise de la consommation de ressources naturelles justifient d'améliorer la prise en compte des déchets issus de la construction : la valorisation des matériaux ouvre aujourd'hui de nouvelles perspectives environnementales, économiques et technologiques.

La déconstruction engendre des millions de tonnes de déchets de natures diverses chaque année et ce mélange est à l'origine des difficultés de traitement et de tri des matériaux et produits.

Pour le Bâtiment, la répartition en masse des 38,2 Mt entre les 3 catégories de déchets est la suivante (Enquête SOeS_2008) :

- déchets inertes : 27,6 Mt, dont Béton (3,9 Mt) et Briques/céramique/ardoise (2,4 Mt)
- déchets non dangereux : 10 Mt, dont Bois (1,52 Mt) – Métaux (0,83 Mt)
- déchets dangereux : 0,6 Mt

La pratique la plus répandue de gestion des déchets issus de la construction a longtemps été la mise en décharge, en centres spécialisés ou non, en vue de leur enfouissement. Depuis plusieurs années, les préoccupations sanitaires et environnementales ont apporté une série d'évolutions, soutenues par des réglementations, notamment en termes de déchets dangereux. De plus, les principaux matériaux concernés (acier, béton, bois, terre cuite) ont chacun leurs propriétés et leur spécificité lors de ces étapes de fin de vie. Les études récentes menées par chaque filière et notamment chaque CTI, ont été rassemblées pour permettre de disposer de la ventilation des usages observés en fin de vie : entre les filières de valorisation, dont le recyclage, et l'enfouissement.

Désormais, même si les pratiques tardent parfois à changer, la valorisation des déchets en fin de vie est la voie à privilégier : soit pour une production énergétique via incinération, soit par la collecte effectuée par des entreprises spécialisées aux fins de recyclage de matériaux, soit encore parfois pour une réutilisation des produits.

En amont, le constat montre qu'à ce jour peu de produits ou systèmes constructifs utilisés dans le bâtiment font l'objet d'une réflexion, dès la conception industrielle ou lors des études de projet, pour réduire la production des déchets et pour améliorer leur exploitation en fin de vie. Cela est particulièrement le cas pour les structures des bâtiments pour lesquels la nécessaire séparation des matériaux pour faciliter leur valorisation en seconde vie est cruciale.

Lors des étapes de démolition ou de déconstruction, la sécurité des abords du site et des personnels intervenant dans les opérations est une donnée fondamentale. La nécessité de comprendre l'historique d'une construction et de la traçabilité des matériaux et des interventions s'avère cruciale au moment de préparer un tel chantier.

Le traitement des déchets valorisables issus de ces opérations est en principe conçu pour favoriser leur évacuation vers des filières plus ou moins structurées afin de recycler le plus possible de matériaux. ; Cependant l'espace disponible sur les sites pour le tri et surtout le coût de ces traitements (organisation du chantier, transport, ...) constituent bien souvent un obstacle majeur.

2. Solutions DEMODULOR : Sélection-conception-expérimentation

Après une revue du parc construit, des techniques de déconstruction sur site et de la capacité à la valorisation des produits et matériaux, la suite du projet consiste à établir une sélection de procédés constructifs susceptibles d'être améliorés pour les rendre démontables.

En premier lieu, ces procédés, tous utilisés pour le gros œuvre et l'enveloppe du bâtiment, ont été choisis à l'aide de critères permettant d'estimer leur potentiel de valorisation des éléments qui les composent. Ces critères d'évaluation pour la détermination des procédés constructifs potentiellement intéressants pour la démontabilité reposent sur les 4 principes suivants :

- le volume de matériaux utilisés dans les constructions courantes, en fonction de la segmentation des marchés (résidentiel, commercial et bureaux, industriel, etc.) permettent d'estimer le gisement de ressources disponibles par parties d'ouvrages.
- la capacité au recyclage et le niveau de développement des filières déterminent le champ des débouchés et, par extension, la valeur économique envisageable.
- les techniques de la démolition et la faisabilité sur le site (accessibilité, outillage, sécurité) renseignent sur les freins au déploiement ou non de nouvelles approches de démantèlement.
- Les interfaces et les procédés d'assemblages entre éléments constructifs sont directement liés aux exigences de performances requises.

La méthode de sélection repose moins sur la seule capacité intrinsèque du système à sa démontabilité que sur la marge de progression du potentiel des systèmes constructifs à une « seconde vie ». En ce sens, les voies du recyclage/valorisation et du réemploi ont été considérées distinctement dans l'analyse des procédés.

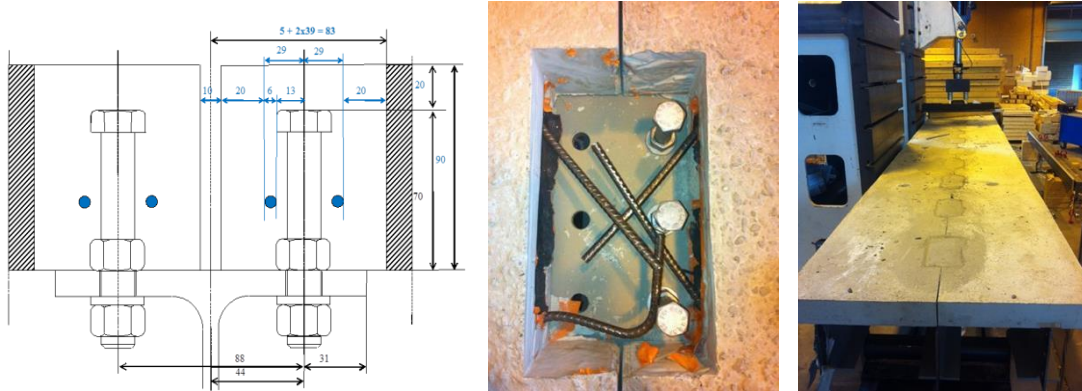
Quatre systèmes constructifs ont été finalement retenus : deux pour le plancher et deux pour la façade.

- Une solution de plancher mixte acier-béton, avec une connexion réalisée par boulons, visant un usage tertiaire,
- Le plancher sec multi composants pour la rénovation ou le neuf en maison individuelle ou petit collectif résidentiel.
- Le mur modulaire en terre cuite destinée à la façade de maison individuelle,
- La paroi à ossature bois, constitutive de parois légères en façades,

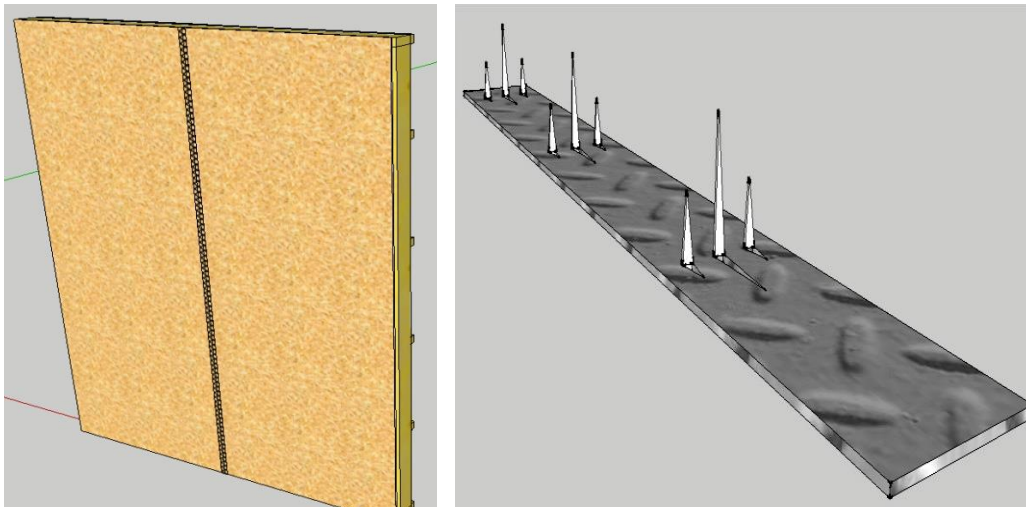
Pour chaque procédé, les partenaires de DEMODULOR ont étudié les composants d'origine et déterminé les modifications à apporter, puis établi une étude des processus de montage et démontage des éléments. Enfin, la complémentarité des systèmes a permis de proposer une association deux à deux.

Le plancher mixte acier-béton et le panneau bois (usage tertiaire)

Le plancher mixte acier-béton est une évolution du principe de connexion, habituellement effectué par goujons soudés tout au long de la poutre acier, pour être noyés dans la dalle béton coulée sur place. Dans le cas présent, les dalles en béton sont préfabriquées en présentant une série de réservations formant des boutonnières au droit de chaque zone de connexion sur la poutre support. Ces boutonnières accueillent les boulons fixés au travers de la poutre acier jouant ainsi le rôle de connecteur, et le béton de clavetage

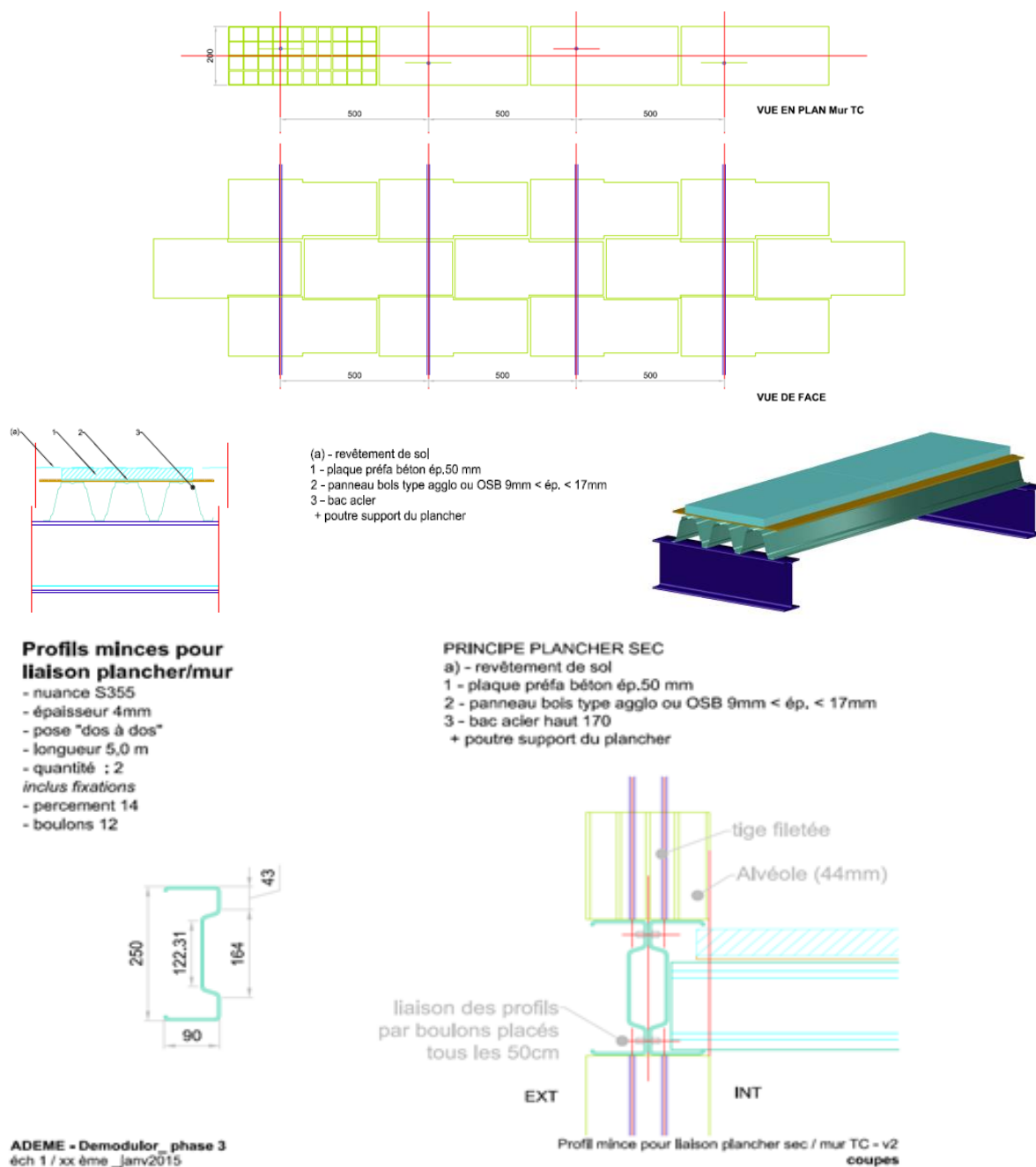


La solution de façade à ossature bois destinée à l'enveloppe, propose la mise en place d'un assembleur métallique, sur le modèle des connecteurs de fermettes, disposé à la jonction de deux panneaux. Cet assembleur ne modifie pas la mise en œuvre et rend le démontage rapide, facilitant la séparation de composants préservés et donc le réemploi des ossatures.



Le mur démontable en terre cuite et le plancher sec acier-bois-béton (usage résidentiel)

La solution associe une maçonnerie porteuse en briques Terre Cuite (mise en œuvre à sec et reprenant les charges gravitaires) entre des profils acier horizontaux haut et bas reliés par des tirants en acier mettant en précontrainte la paroi (solidarisation des éléments, efforts de traction, flexion, etc.) entre chaque niveau de plancher. Ce dernier est constitué d'un bac acier, de panneaux bois revêtus de dalles de béton allégé Thermolitys®, conçu à l'occasion du projet. L'ensemble entièrement démontable ne comporte que des composants manportables, avec des assemblages mécaniques (pas de mortier ni enduit).



Bilan de la campagne d'essais menée sur les 4 solutions constructives DEMOMULOR.

Le projet DEMOMULOR a permis de tester les capacités potentielles de montage-démontage et de résistance mécanique de chaque partie d'ouvrage. Elles ont été contrôlées sur des maquettes réalisées à l'échelle 1 dans un même laboratoire.

Dans le cas du mur terre cuite, l'ensemble des composants manportables sont réutilisables à l'exception du rail d'ancrage de départ bas inséré dans la dalle béton après le coulage.

Pour le dimensionnement des ouvrages en résistance et contreventement, les niveaux de performances permettent déjà de répondre aux cas de logements R+1 qui constituent le cœur de cible visée.

Des briques faisant appel aux procédés de rectification industrielle permettraient d'améliorer la rigidité et la résistance du mur. Dans ce cas, les performances devraient être similaires à celle d'une maçonnerie traditionnelle.

Dans le cas du plancher sec, les modalités actuelles de fixation par vissage permettent le démontage et la séparation facilitée des composants ; ces derniers ne pourraient être réutilisés qu'en décalant le pas de fixations. Il est possible d'envisager une évolution du procédé de fixation (type goupille filetée) qui permettrait le réemploi des dalles préfabriquées en béton allégé (sous réserve de la vérification de leur intégrité).

Pour le plancher mixte (destination tertiaire) l'ossature acier est réutilisable, mais les boulons doivent être intégralement remplacés, compte tenu des chocs reçus lors de la dépose. La solution permet bien une déconstruction sélective, dissociant les différents composants et une capacité partielle au réemploi. Pour optimiser l'emploi de la dalle béton, des études complémentaires sont à mener sur les armatures de liaison.

Enfin, pour les panneaux de façade à ossature bois, deux voies de valorisation sont envisagées, Les pièces de bois massifs démontées, peuvent être réemployées après examen visuel (exclusion des pièces attaquées par les insectes ou les champignons). Les panneaux inutilisables après déconstruction doivent être recyclés. Les éléments métalliques (assembleurs, équerres, vis, etc.) sont recyclés.

Essais Solutions DEMODULOR	Montage/démontage	Essais mécaniques	Objectif de l'essai
Murs terre cuite	Remontage intégral	Essai dans le plan Essai hors plan	Effort maximal pour assurer le contreventement Capacité de résistance aux actions du vent
Plancher sec	Remontage partiel après désolidarisation :	Essai de flexion	Charge limite à partir de laquelle le plancher perd son intégrité et déplacements relatifs des composants
Plancher mixte	Tri des composants après désolidarisation ou remontage partiel :	Essai de flexion (test de la liaison boulonnée)	
Façade bois	Remontage partiel de l'ossature :	Essais dans le plan	Effort maximal pour assurer la stabilité du panneau

Tableau résumant les propriétés de montage-démontage et essais subis par les solutions DEMODULOR

3. Solutions DEMODULOR : évaluations environnementale et économique

Analyse environnementale multicritères

La méthodologie retenue pour l'analyse environnementale entre systèmes existants et systèmes démontables innovants est une démarche multicritère qualitative. Au-delà des aspects environnementaux, cette dernière permet d'apporter une palette d'éléments contextuels déclinable à plusieurs aspects sociaux : santé, sécurité et perception des parties prenantes.

Cette approche a été préférée à une analyse de cycle de vie (ACV), méthode quantitative habituellement pratiquée pour les études environnementales, car cette dernière nécessite un nombre important de données chiffrées qui ne sont actuellement disponibles que pour le système existant. De plus, les évolutions apportées ne représentaient pas toujours un changement de quantité significatif, risquant alors de n'être que peu perceptible dans une ACV.

Pour conduire l'analyse multicritères, les systèmes ont été considérés intégrés dans un bâtiment et leur durée de vie sont inspirés des modules du cycle de vie figurant dans les normes en vigueur de l'ACV :

A – production et construction ; B – Utilisation ; C – fin de vie ; D – bénéfices et charges au-delà du système

Afin de mieux exprimer l'évaluation de la démontabilité, les modules A et B sont groupés et le chantier de déconstruction a été isolé pour faciliter la lecture, donnant le découpage en étapes suivant :

- Production, construction & utilisation (modules A et B) ;
- Déconstruction (module C1)
- Fin de vie (modules C2 à C4 et D)

Les charges et bénéfices liés à la seconde vie des constituants réutilisés sont évalués dans l'étape de fin de vie. Les gains et impacts environnementaux et sociaux sont groupés et présentés selon les catégories suivantes :

- les consommations de matières premières et énergétiques ;
- les émissions (air, eau, sols) et la production de déchets ;
- les aspects sanitaires et sécurité ;
- la perception des parties prenantes.

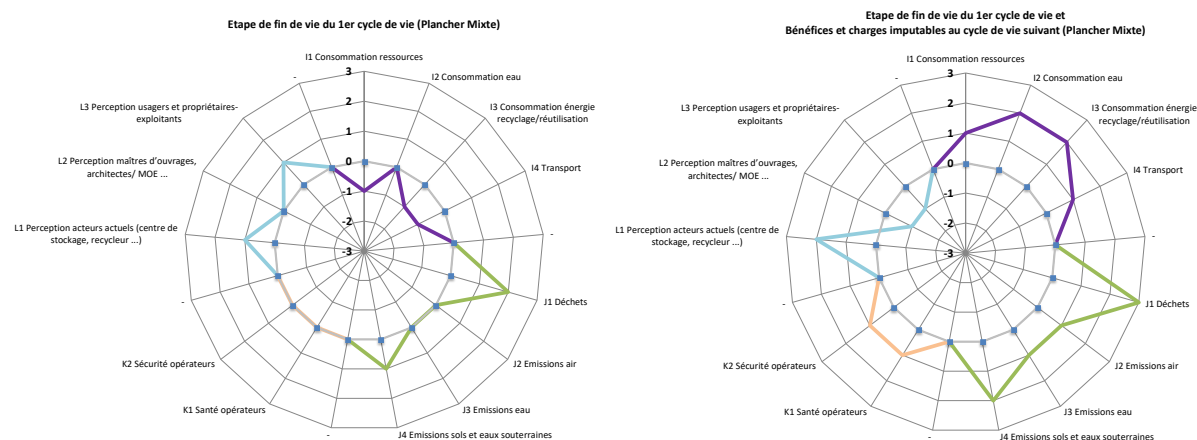
La durée de vie d'un produit de construction peut avoir plusieurs sens. La durée de vie de référence (DVR), utilisée pour les fiches de déclaration environnementale et sanitaire, correspond à la performance technique et fonctionnelle du produit dans un bâtiment. Elle dépend des propriétés du produit et des conditions d'utilisation de référence.

Il s'agit souvent de 50 ou 100 ans pour l'acier, le béton, le bois et la terre cuite. Cette DVR peut être différente de la durée de vie totale, et ne tient pas clairement compte d'un possible réemploi.

Selon la méthodologie établie, le niveau des impacts ou des effets liés à la solution de démontabilité est estimé par différence entre les deux systèmes, l'actuel et sa version innovante.

Dans le cas des solutions constructives de mise en œuvre à sec, les gains apparaissent déjà durant la phase de production-construction-utilisation aux postes : consommations de ressources (eau et emballage), émission dans l'eau et le sol et/ou dans la production de déchets.

Lors de l'étape de déconstruction, le démontage s'apparentant à un curage permet logiquement des progrès très significatifs en matière de réduction des émissions et déchets. Les bénéfices des solutions DEMODULOR s'expriment pleinement lorsque l'on prend en compte les gains sur le début du second cycle de vie traduisant l'intérêt du réemploi. Dans ce cas, les économies observées sur les postes de consommation de ressources, d'eau, d'énergie et de production de déchets sont clairement mises en évidence.



Vue de 2 graphiques prenant en compte la fin de vie sans ou avec le début du cycle de vie suivant (ex : du plancher mixte)

On constate pour l'ensemble des étapes du cycle de vie considéré que le système démontable est majoritairement plus avantageux que le système traditionnel aux points de vue environnemental, sanitaire et sécuritaire. Le système traditionnel comportant initialement un fort potentiel de recyclabilité et l'évaluation ne quantifiant que la différence entre les deux systèmes, les effets engendrés par la solution DEMODULOR ne sont pas toujours novateurs mais restent significativement bénéfiques, surtout lorsqu'on considère les avantages apportés au cycle de vie suivant.

Analyse économique sur 2 cycles de construction/déconstruction

Le bilan économique semble intéressant lorsque le montage/démontage pourra être reproduit plusieurs fois durant la vie des produits notamment pour absorber les opérations de curage et de préparation (tri, palettisation) des matériaux du gros œuvre plus longues comparées à une démolition traditionnelle. Toutefois, il convient de préciser que les éléments de l'analyse économique se sont arrêtés au site de démolition-déconstruction, sans

estimation des coûts observés dans le circuit de tri et de valorisation. Sans évolution significative du contexte actuel sur la gestion des déchets de construction, la solution semble plus particulièrement pertinente dans la perspective d'apporter une réponse aux demandes croissantes d'évolutivité dans le temps des programmes de construction résidentiels ou tertiaires.

Les deux analyses comparatives, environnementales et économiques, menées au cours de la phase 4 du projet DEMODULOR mettent en évidence une série d'atouts, propres aux différentes solutions constructives et à leurs usages privilégiés. Les variations proviennent surtout des incertitudes liées à des sujets innovants : manque de lisibilité sur les temps et les prix pour l'analyse économique, imprécision sur les possibilités de réemploi dans le cadre des évaluations environnementales.

Dans les deux approches, la prise en compte réaliste du réemploi a permis de souligner la pertinence de l'approche de la déconstruction, même si plusieurs freins restent à lever.

4. **Opportunités et freins pour le développement de l'économie circulaire intégrant le principe de démontabilité des constructions**

Au-delà du développement de solutions constructives pertinentes, la maturité des marchés, la culture des métiers et des professions et même les grands aspects du développement durable peuvent aboutir à des freins à la diffusion de ce type de solutions.

Analyse des gains et conséquences sur les usages et sur les conditions de réalisation d'une opération jusqu'à son démantèlement :

Pour rendre attractif un nouveau concept (la démontabilité), celui-ci doit apporter soit des avantages en termes de coût soit en terme de différenciation par rapport aux solutions concurrentes (traditionnelles dans ce cas) qui doivent permettre :

- Une appropriation durant toute la chaîne de valeur,
- Une croissance en termes de volume et de marge.

Les filières de recyclage s'organisent mais le **marché du réemploi** des produits de la construction est aujourd'hui anecdotique et inexistant pour les produits dits « industrialisés ». La nécessaire professionnalisation du négoce de produits de réemploi ne pourra se faire qu'au travers d'un nouveau modèle économique d'économie circulaire attractif pour les investisseurs.

Heureusement deux leviers favorables que nous avons développés précédemment, apparaissent pour rendre viable ce modèle économique nécessaire à l'émergence du concept de démontabilité dans la construction/déconstruction.

- **La traçabilité des produits** pendant tout leur cycle de vie, un volet prometteur de la démarche de la transition numérique de la construction.
- **L'évolutivité des bâtiments**, nouvelle demande croissante rendue incontournable par l'évolution de la société et des technologies.

Les scénarios de développement des solutions DEMODULOR que nous proposons composent le schéma du modèle stratégique (figure ci-dessous) fondé sur trois pôles essentiels (sommets du triangle) à la croissance du concept de démontabilité : évolutivité, traçabilité, réemploi. Ces trois pôles permettent de créer les passerelles entre les enjeux du développement durable que sont :

- L'utilisation des ressources,
- La gestion des déchets,
- L'économie de fonctionnalité.

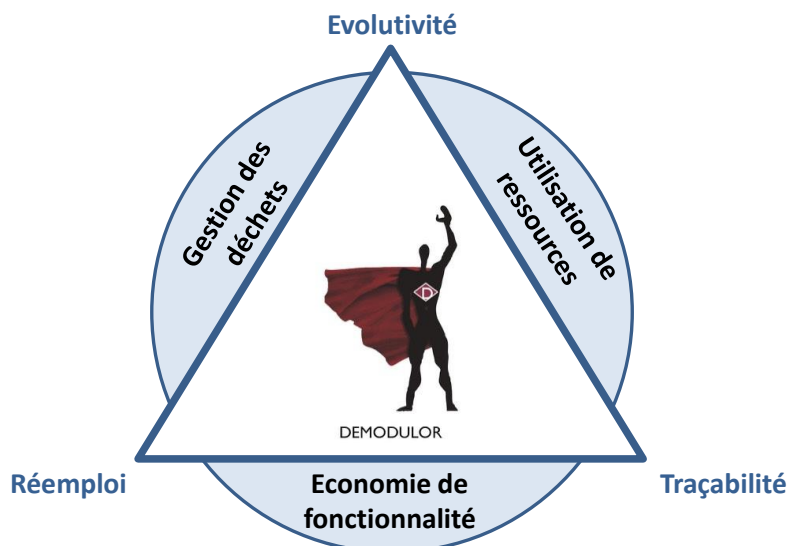


Figure : Schéma du modèle stratégique pour DEMODULOR

5. Conclusion et poursuite du projet DEMODULOR

Le projet DEMODULOR a été une recherche prospective passionnante dont la première innovation a consisté à réunir les centres techniques industriels des principaux matériaux de construction utilisés dans le gros œuvre et plus habitués à une situation de forte concurrence que de partenariat ouvert. L'objectif initial du projet était de définir et faire évoluer des procédés constructifs de gros œuvre pour faciliter leur démontabilité. L'étude préliminaire des marchés et des volumes a permis de mieux comprendre les modes de gestion des déchets et d'identifier les voies de valorisation selon leur organisation actuelle et, ce, malgré l'hétérogénéité des données recueillies.

Le projet a permis de sélectionner quatre procédés de gros œuvre (structure et enveloppe), représentatifs d'un volume de marché significatif dans les domaines du résidentiel et du tertiaire. Chaque système, porteur d'un potentiel de progrès, a été revisité pour les rendre démontables en conservant les niveaux de performance requis initialement. Au-delà des attentes du programme, les partenaires ont réussi à réaliser des prototypes à l'échelle 1 qui ont permis de vérifier la démontabilité des systèmes et de les soumettre à des essais mécaniques.

Les objectifs d'écoconception du projet ont été confirmés par une évaluation qualitative multi-critères, préférée à l'analyse de cycle de vie initialement envisagée. Ses résultats satisfaisants soulignent en particulier tout l'intérêt du réemploi.

Les opérations de montage et démontage ont été effectuées avec nos équipes, mais une collaboration plus étroite avec les professionnels de la démolition est une piste afin de mieux ajuster les modes opératoires.

Techniquement, la première campagne d'expérimentations de concepts constructifs a apporté des résultats satisfaisants mais elle doit se prolonger vers les autres exigences. A terme, aboutir à des montages d'opérations de bâtiments prototypes est un prolongement souhaitable de DEMODULOR.

Au vu des scénarios précédents, les perspectives sont prometteuses de développement de nouvelles pratiques tant pour la construction/déconstruction que pour l'utilisation des bâtiments (évolutivité, maintenance, coût global, remplacement de la démolition par un curage étendu au gros œuvre...). Des opportunités pour la création de nouveaux modèles économiques, filières ou métiers sont aussi à investiguer.

Ce sera l'opportunité en associant des partenaires industriels, constructeurs, maîtres d'ouvrages, entreprises et distributeurs d'évaluer le potentiel d'appropriation du concept. Les enseignements de cette confrontation seront les clés pour déterminer la pénétration technologique et le volume des marchés potentiels et par voie de conséquence les bénéfices en matière de valorisation des déchets.

Au préalable, les premiers objectifs à réaliser seront :

L'optimisation des composants pour l'industrialisation des solutions DEMODULOR;

- La réalisation des essais complémentaires de caractérisations des performances en laboratoires et in situ ;
- La validation complète des systèmes proposés, allant jusqu'à l'Avis Technique, pour la mise sur le marché,
- Des approches expérimentales coordonnées par les entreprises de déconstruction et de mise en œuvre, démonstrateur ;
- L'approfondissement des réflexions pour l'extension à d'autres systèmes constructifs permettant d'étendre l'aptitude au réemploi favorisant le réemploi.



Figure : L'histoire du projet DEMODULOR résumée en quelques mots...

Les partenaires du projet DEMODULOR souhaitent aujourd'hui prolonger la démarche en faisant appel à l'ensemble des acteurs de la filière construction / déconstruction.

Nos espoirs portent aussi sur un renforcement des engagements des pouvoirs publics pour favoriser les démarches de recyclage des déchets et surtout de réemploi des matériaux « durables » de construction, Ce soutien pourrait être marqué par des initiatives à court terme telles que :

- lancer une réflexion sur le statut des déchets de construction,
- initier la mise en place active du « carnet de santé du bâtiment »,
- inciter un taux élevé de recyclage des déchets de construction et de démolition par opération,
- introduire dans les appels d'offres une clause de « mieux disant recyclage – réemploi »,
- renforcer les contrôles sur chantiers,
- soutenir l'élaboration effective des plans de gestion des déchets dès la conception des ouvrages.

L'ensemble de nos actions devront être envisagées aussi au travers d'une communication renforcée et spécifique pour convaincre les parties prenantes des bénéficiaires de la démontabilité, du réemploi et de sa nécessaire généralisation dans les bâtiments du futur.

*Stéphane HERBIN, CTICM
Céline VINOT, CERIB
Olivier DUPONT, CTMNC
Jean-Luc KOUYOUMJI, FCBA*