



Mercedes-Benz

## **La nouvelle fabrication de moteurs à l'usine de Mannheim : une référence mondiale en termes de précision, d'efficience et de qualité**

**Information de presse**

Date:  
17 mars 2011

- **Fonderie : matériaux high-tech pour les pièces coulées**
- **Des assemblages de noyaux en sable extrêmement fin fabriqués par des robots**
- **Du grand art au processus parfait : le coulage de la fonte à Mannheim**
- **L'un des plus grands ateliers d'usinage du monde pour les « 5 C » des moteurs de véhicules industriels**
- **Le premier arbre à cames assemblé pour moteurs de la gamme lourde**
- **De nombreux procédés d'enlèvement de matière spectaculaires et uniques**
- **« Facteur Illig » – un critère de propreté dans l'industrie automobile**
- **Montage : des moteurs assemblés dans des conditions de propreté extrêmes**
- **Tests moteurs par microphone directionnel**
- **L'usine de Mannheim au centre d'un réseau mondial de productions interdépendantes**
- **Un nouveau hall de fabrication préservant le voisinage et l'environnement**

Mannheim, 17 mars 2011. La nouvelle fabrication de moteurs de l'usine de Mannheim a fait de la qualité sans compromis un enjeu majeur. Chaque détail des installations a été optimisé en vue de la production de la nouvelle famille de moteurs Mercedes-Benz OM 47x. Les trois espaces Fonderie, Usinage par enlèvement de matière et

Montage travaillent en parfaite collaboration. Leur objectif commun : Page 2  
fabriquer des moteurs d'une qualité irréprochable. Pour ce faire,  
plusieurs centaines de millions d'euros ont été investis dans un  
nouveau hall de fabrication.

### **La « fabrication synchronisée »**

Un moteur de la nouvelle génération Mercedes-Benz doit franchir les différentes étapes de fabrication, du stade de la fonte liquide dans la fonderie au montage en passant par l'usinage par enlèvement de matière, en l'espace de six jours. Cet objectif relativement sportif ne pourrait être atteint sans une parfaite organisation du processus de production. L'usine de Mannheim a opté dans cette optique pour le système de la « fabrication synchronisée » : les trois espaces de fabrication Fonderie, Usinage par enlèvement de matière et Montage fonctionnent comme un système global au sein d'un flux de production en continu comprenant seulement 50 % des stocks des anciennes gammes.

Ce système ne laisse aucune place à l'erreur. Des collaborateurs parfaitement qualifiés, un système de production abouti, un équipement mécanique de pointe et une multitude de contrôles statistiques de qualité ont permis d'éliminer toute imperfection. Tous les secteurs travaillent en étroite collaboration en termes de contenu. Ils sont également très proches les uns des autres ; les distances à parcourir pour les livraisons internes ont été réduites au minimum.

Les préparatifs intensifs menés en amont garantissent une qualité maximale dès le coup d'envoi de la production. Les premiers moteurs de la nouvelle génération OM 47x Mercedes-Benz ont été assemblés sur la ligne de montage dès l'été dernier. Depuis la fin 2010, la

qualification approfondie des collaborateurs focalise, dans un second temps, toutes les attentions. La fabrication de série qui démarre actuellement permet de poser les derniers jalons avant l'augmentation brusque de cadence prévue au troisième trimestre de cette année. Une fois que tous les moteurs de la nouvelle gamme seront commercialisés, l'usine de Mannheim pourra assurer la production de plus de 100 000 groupes propulseurs de cette génération par an. Page 3

### **Fonderie : des matériaux high-tech pour les pièces coulées**

La fonderie implantée sur le site accueille la première étape de la fabrication des moteurs. L'atelier de l'usine de Mannheim n'a plus grand-chose à voir avec les images classiquement associées à un tel lieu : une chaleur insoutenable, des conditions de travail extrêmes et la fonte comme aboutissement ultime d'un procédé métallurgique assimilé à du grand art. Il s'agit ici d'une fabrication high-tech, de la fonderie la plus moderne du monde affichant la meilleure productivité et le taux de rebut le plus faible. Contrairement à d'autres usines de moteurs, le site de Mannheim a entièrement intégré la fonderie dans le processus de production. De cet atelier sortent des carters-cylindres, des culasses et des volants moteurs destinés aux moteurs de la nouvelle génération.

Certains procédés de coulage sont brevetés ; la fonderie a développé ses propres matériaux pour la nouvelle génération de moteurs en collaboration avec des universités. La fonte grise du carter-cylindres présente ainsi une composition spécifique. Ce matériau high-tech unique ne voit le jour que dans les fours de fusion de l'usine de Mannheim. Il n'est pas commercialisé et ses composants sont tenus secrets. Il permet à la fonte grise d'offrir des propriétés quasiment du même haut niveau que la fonte à graphite vermiculaire, un matériau

utilisé pour les culasses particulièrement exigeantes.

Page 4

### **Des assemblages de noyaux en sable extrêmement fin fabriqués par des robots**

L'extrême précision qui caractérise la fabrication est perceptible entre autres dans l'atelier de noyautage entièrement automatisé. Les assemblages de noyaux de sable y sont fabriqués pour la première fois par des robots – un défi technique majeur. Le site de Mannheim utilise un matériau extrêmement propre et exempt de poussière : le diamètre des grains de sable a été fixé à 0,35 mm, et la tolérance pour la taille moyenne des grains de sable est limitée à 0,02 mm. Des noyaux constitués de systèmes de liant à base de résine synthétique définissent la forme intérieure des pièces coulées ; des moulages en sable liés par de l'argile composent le moule externe. Le moulage sable de Mannheim repose à 90 % sur un fonctionnement en circuit, une référence synonyme de respect de l'environnement dans le secteur.

### **Des températures de coulée proches de 1 400° C, une phase de repos après le coulage**

La coulée s'effectue de manière entièrement automatique, à l'abri de l'air et dans une atmosphère confinée. Les températures de coulée définies avec précision sont comprises entre 1 395° C pour les carters-cylindres et 1 450° C pour les culasses. Les pièces coulées reposent ensuite dans du sable ou sur un lit de sable au cours d'une première phase de refroidissement d'au moins quatre heures – tout autre traitement rendrait le matériau sec et friable. Les pièces ne présentent plus qu'une température d'environ 650° C. Elles sont alors refroidies de manière ciblée à l'air ambiant pendant 12 heures supplémentaires. Une fois à température ambiante, elles peuvent être usinées.

A ce stade, la surface des pièces coulées ne scintille pas encore d'un reflet métallique, mais offre un aspect noir. Les pièces sont recouvertes d'une très fine couche de sable. Leur coloration résulte du fait que le sable à noyau a été mélangé à du carbone afin de ne pas se lier avec la fonte liquide pendant le processus de coulée. Le sable est éliminé dans une installation de projection de grenaille d'acier. Lors du processus de nettoyage de la fonte qui suit, les quelques ébarbures subsistant sur les pièces coulées sont supprimées.

Page 5

### **Canaux et conduits prévus lors du moulage de la culasse**

Il est particulièrement intéressant d'examiner de plus près les pièces finies. La culasse des nouveaux groupes propulseurs est la plus complexe dans cette catégorie de moteurs. Les conduits de retour d'huile, d'eau et de retour de carburant y sont ainsi d'ores et déjà moulés. C'est pourquoi de nombreux conduits habituellement implantés autour du moteur ont disparu. Cette caractéristique facilite les opérations de montage et se traduit par une étanchéité extrêmement élevée du moteur.

### **Du grand art au processus parfait : le coulage de la fonte à l'usine de Mannheim**

Succès de la nouvelle technologie de fabrication : d'art habilement maîtrisé, le coulage de la fonte s'est transformé en processus parfaitement sûr. Véritable site de référence pour la fabrication des moteurs, l'usine de Mannheim a transmis son expertise à d'autres usines du groupe. Les carters-cylindres du nouveau bloc Mercedes-Benz OM 471 de 12,8 l de cylindrée sont ainsi moulés dans l'usine Atlantis Foundries du Cap, en Afrique du Sud, selon les mêmes principes. Livrées pour transformation au centre de production de

Mannheim, ces pièces de la nouvelle famille de moteurs sont celles qui Page 6  
auront effectué le plus long voyage.

### **L'un des plus grands ateliers d'usinage du monde pour les « 5 C » dans la fabrication de moteurs de véhicules industriels**

L'atelier d'usinage est situé à proximité directe de la fonderie. Traitant 100 000 tonnes de fonte par an, il figure parmi les plus grandes installations de ce type dans le monde et assure l'usinage des principaux composants en métal, également surnommés les « 5 C » dans le jargon technique anglais : cylinderhead (culasse), camshaft (arbre à cames), crankcase (carter-cylindres), crankshaft (vilebrequin), connecting rod (bielle). Dans l'atelier d'usinage comme dans la fonderie, les ingénieurs de production de l'usine de Mannheim ont repoussé les limites technologiques et atteint des tolérances de fabrication extrêmes. Plusieurs exemples en témoignent.

### **Le premier arbre à cames assemblé pour moteurs de la gamme lourde**

Parmi les réalisations phares de la technologie moteur et de fabrication de la nouvelle génération de moteurs figure le premier arbre à cames assemblé au monde destiné aux véhicules industriels de gros tonnage. Sur les arbres à cames assemblés, la séparation entre arbre et cames permet de choisir, pour chaque composant, des matériaux parfaitement adaptés et d'optimiser leur usinage. Elle requiert de ce fait un savoir-faire considérable.

L'arbre lui-même n'est pas massif, mais composé, pour des raisons de poids, d'un seul tube. Les cames préchauffées se dilatent et reprennent exactement leur position initiale une fois refroidies. Ce procédé

permet d'obtenir un assemblage extrêmement solide et parfaitement adapté, pour une précision d'ajustage maximale : la position des cames est ajustée à 2  $\mu$  près (1  $\mu$ , prononcé « Mu » correspond à un millième de millimètre). Les arbres à cames assemblés présentent d'importants avantages par rapport aux modèles conventionnels monoblocs conçus par enlèvement des copeaux : leur poids est divisé par deux, et leurs coûts de production sont inférieurs d'un tiers environ. Le rebut est par ailleurs considérablement réduit.

### **De nombreux procédés d'enlèvement de matière spectaculaires et uniques**

D'autres procédés spectaculaires attirent également l'attention dans l'atelier d'usinage de l'usine de Mannheim. Il convient notamment de citer les perçages profonds pour les conduits situés à l'intérieur de la culasse : ceux-ci présentent une profondeur de 900 mm maxi, pour un diamètre d'à peine 10 mm. La précision du perçage est de l'ordre de 10  $\mu$ , soit un centième de millimètre.

Sur le site de Mannheim, le vilebrequin est meulé pour la première fois en une seule opération, au lieu de deux jusqu'à présent. Le serrage unique du vilebrequin accroît nettement la précision d'usinage. Après le meulage en une opération, les vilebrequins présentent un voile de seulement 0,2 mm maxi, ce qui ne nécessite plus qu'un retraitement minimal.

Parmi les particularités de l'atelier, il convient également de citer le rodage (ou honage) plateau des chemises de cylindres des nouveaux moteurs. Dans le cadre d'une opération de finition supplémentaire, une pierre spéciale vient gommer les pointes de rugosité subsistant sur la surface pierrée des chemises après le traditionnel rodage

(appelé aussi déglacage ou honage) à stries croisées. Celles-ci présentent alors une surface du type plateau parsemée de poches formant réserve d'huile. Avec les procédés de fabrication conventionnels, cette surface est obtenue pendant la période de rodage des nouveaux moteurs, grâce au frottement des segments racleurs d'huile sur les chemises. Ce rodage générateur d'usure n'est plus nécessaire sur la nouvelle génération de moteurs. La répartition du film d'huile sur les surfaces de contact est de ce fait plus régulière et toute abrasion des segments de piston est exclue. La consommation d'huile s'en trouve en outre réduite des deux tiers environ.

Au plan de l'enlèvement de matière, la fabrication s'effectue de manière hybride. Elle est structurée en lignes de transfert et une multitude de centres d'usinage. Ceux-ci présentent une organisation modulaire : le nombre d'unités progresse en continu grâce à des investissements dans de nouvelles machines, à mesure que la production en série de la nouvelle génération de moteurs monte en régime.

### **Une propreté clinique dans l'ensemble de la fabrication**

L'extrême précision de rigueur dans la fonderie et le montage se double du souci constant d'une propreté maximale. Avant leur transformation, toutes les pièces sont soigneusement nettoyées au cours de différents processus : par grenaillage acier, ultrason ou projection de liquide via des buses haute pression. C'est pourquoi les pièces coulées grand format telles que les carters-cylindres présentent un intérieur aussi propre que les conduits en plastique livrés par les sous-traitants. La taille maximale des particules ne dépasse pas 1  $\mu$ . Par comparaison : un cheveu humain présente une épaisseur d'environ 0,1 mm, soit 100  $\mu$ .



## **« Facteur Illig » – un critère de propreté dans l'industrie automobile**

Page 9

Un laboratoire interne dédié au lavage et au nettoyage contrôle et recueille en continu des informations sur la propreté quasi clinique des pièces et équipements. Pour ce faire, les minuscules particules de saleté résiduelle sont séparées et analysées à l'aide de microscopes spéciaux. Le « facteur Illig », du nom du responsable du laboratoire de l'usine, représente désormais une référence absolue dans ce domaine. Il s'agit d'une formule déterminant la propreté technique des pièces de fabrication, utilisée depuis l'automne dernier comme unité de mesure par l'ensemble de l'industrie automobile et incluse dans la documentation de la Fédération des constructeurs allemands (VDA).

La propreté maximale figure parmi les exigences de qualité extrêmes conduisant à une production zéro défaut. La batterie de tests organisée en amont et en aval des différentes phases de traitement s'inscrit également dans cette logique. Cette démarche garantit le contrôle multiple de chaque pièce. Tous les composants doivent donc franchir à plusieurs reprises, avant et après leur passage dans la fonderie et dans l'atelier d'usinage, des « sas de qualité » proposant une série de tests intensifs.

## **Montage : des moteurs assemblés dans des conditions de propreté extrêmes**

Précision et propreté sont également deux mots d'ordre du montage de la nouvelle génération de moteurs. Dans le hall 150, érigé en 2007 pour la production de la nouvelle génération de moteurs, règne en permanence une légère surpression afin d'éviter toute infiltration de poussière extérieure. L'approvisionnement et l'expédition s'effectuent

via des sas situés à l'extérieur du hall proprement dit.

Page 10

Non moins sophistiqué, le montage des moteurs a été conçu, dans certains domaines essentiels, par les collaborateurs eux-mêmes : tous les jours pendant une semaine, les monteurs ont assemblé des moteurs sur un poste spécialement aménagé à cet effet en présence de la protection du travail et de l'assurance qualité ; ils ont simulé les différentes stations de travail et ont noté toutes les informations correspondantes dans le système didactique de la production, ainsi que tous les conseils et astuces associés. Ensemble, ils ont trouvé de nouvelles solutions pour élaborer un processus de montage sans équivalent dans le monde.

Sur chaque ligne de montage, l'activité quotidienne est organisée de manière collective par les cadres dirigeants et les collaborateurs dans le cadre de la gestion Shopfloor. Chaque matin, à 7h30, les équipes de production se réunissent pour discuter des chiffres clés de la veille, d'éventuels problèmes, ainsi que de la répartition des collaborateurs. A la mi-journée, vers 13h00, sont abordés tous les thèmes qui n'ont pas encore été résolus. Ce processus a même été depuis standardisé à l'échelle mondiale.

### **La première étape : gravure de la plaque signalétique**

Dans l'atelier de montage, les moteurs sont acheminés d'une station à l'autre à travers le hall 150, comme mus par une force invisible, sur des convoyeurs filoguidés. La première étape de la fabrication consiste à graver la plaque signalétique du moteur sur le carter-cylindres à l'aide d'une aiguille dans une cabine prévue à cet effet. Le montage des différents composants, du vilebrequin aux cylindres en passant par le carter d'huile, commence ensuite. Les étapes s'enchaînent

jusqu'à ce que le carter-cylindres soit au complet.

Page 11

En parallèle a lieu le prémontage de la culasse et des soupapes. Les opérations de prémontage se déroulent selon un schéma « en arêtes de poisson », à proximité directe de la ligne de montage. La culasse est montée sur le carter-cylindres à l'aide de 36 vis. Une visseuse multiple entièrement automatique dotée de quatre unités de vissage se charge de serrer celles-ci dans un ordre défini, avec un couple bien précis.

A la mise en place de la culasse succède l'implantation des arbres à cames et des culbuteurs de la commande de soupapes. Le réglage du jeu des soupapes est assuré par un monteur à un poste spécialement développé à cet effet au sein de l'usine même. Une fois le train d'engrenages monté, le moteur est déjà mécaniquement opérationnel. Les opérations suivantes concernent le volant moteur, la pose des faisceaux de câbles et le montage de la gestion moteur, des modules de filtre et du turbocompresseur. Le moteur est recouvert d'un vernis incolore. Toutes les pièces de la nouvelle famille de moteurs arborent ainsi leur couleur d'origine.

### **Les moteurs s'annoncent à chaque station de travail**

La technique épaula les monteurs dans leur travail. Chaque moteur s'annonce ainsi automatiquement avec ses caractéristiques aux différents postes de travail. Le monteur se procure ensuite les pièces nécessaires sur un rayonnage à système « pick-to-light » : il retire les pièces du rayonnage les unes après les autres jusqu'à ce que le voyant vert sur le casier concerné s'éteigne. Grâce à l'indication préalable des caractéristiques du moteur, le couple de serrage et l'angle de vissage sont automatiquement préréglés.

Si des problèmes surgissent pendant le montage, le monteur donne l'alerte grâce à un bouton d'alarme. Si 70 % du temps imparti à la station de travail concernée est écoulé et que le problème n'est toujours pas résolu, un assistant vient prêter main forte au monteur. Les problèmes sont directement réglés sur place : l'écartement provisoire d'un moteur de la ligne de montage est impossible.

De multiples contrôles de qualité sont programmés au cours de la phase de montage. Durant la fabrication, chaque moteur est passé plusieurs fois au crible. A l'extrémité de chaque ligne, le moteur doit franchir un portique de qualité signalé par des colonnes bien visibles. A ce point de passage obligé, il est contrôlé par deux monteurs selon le principe de la double vérification. Les points contrôlés concernent l'étanchéité et l'installation électrique. Le vilebrequin lui-même doit effectuer une rotation pour permettre la mesure des frottements.

Aux sas de qualité, les collaborateurs effectuent un contrôle sur la base de différentes listes. Ils se réfèrent tout d'abord à une check-list générale établie pour chaque portique respectif. Si un défaut est effectivement détecté chez l'équipementier ou le client, chaque moteur en cours de production fait l'objet d'une vérification sur le point concerné pendant trois semaines, le temps de vérifier que la défaillance constatée ne réapparaît pas. Si un défaut a ponctuellement affecté un moteur, sa suppression est à nouveau contrôlée. Lors du lancement de la série de la nouvelle génération de moteurs, des experts passent même au crible la recherche de défauts : ils intègrent de manière ciblée des erreurs mineures et vérifient ensuite qu'elles ont bien été identifiées.

Pour finir, tous les moteurs sont testés sur un banc d'essai. Huit cellules de contrôle sont implantées à cet effet dans une zone de contrôle située dans le hall de montage. Le moteur est soumis à des tests à froid et à de brefs essais à chaud. Cette procédure dure moins de dix minutes pour un niveau de qualité maximal. Elle combine pour la première fois au monde des tests à froid et à chaud de moteurs de grosse cylindrée sur un même banc d'essais. Des mesures du bruit de structure sont même effectuées sur les moteurs à l'aide d'un microphone directionnel en vue de localiser d'éventuels défauts.

L'atelier de montage du hall 150 fait actuellement l'objet de transformations en prévision du lancement de la production de série des moteurs. Lorsque les travaux seront achevés, fin 2011, ce bâtiment abritera le montage de moteurs le plus moderne du monde.

## Une logistique parfaite pour l'expédition des moteurs

L'expédition des moteurs a également été placée sous le signe d'une efficacité maximale. Elle s'effectue à proximité immédiate du hall de montage. La voie des camions est ici abaissée, ce qui permet à l'expédition de se dérouler à niveau. Les chariots élévateurs ne doivent accomplir qu'une infime partie des opérations d'élévation autrefois nécessaires et leurs déplacements ont été nettement réduits.

L'expédition repose sur une logistique parfaite : les durées d'exécution ont pu être ramenées de deux jours à seulement quatre heures. Des vignettes apposées sur les moteurs finis indiquent l'heure exacte de leur expédition.

## **L'usine de Mannheim au centre d'un réseau mondial de productions interdépendantes**

Page 14

L'usine de Mannheim constitue le centre névralgique international de la fabrication des moteurs de véhicules industriels de gros tonnage Daimler Trucks. Elle pilote tous les processus logistiques et qualité au sein du réseau de productions interdépendantes et assure ainsi la qualité et la disponibilité des pièces au sein du réseau mondial. C'est à Mannheim que sont déterminés les standards de production et de qualité, les processus et la technique des installations. C'est également là que s'effectue la coordination de la gestion régionale des fournisseurs.

L'usine se trouve au cœur du réseau international de productions interdépendantes de la fabrication de moteurs de Daimler Trucks. C'est sur ce site que sont fabriqués tous les blocs de la nouvelle génération de moteurs Mercedes-Benz, de même que les organes destinés à Fuso, au Japon. Detroit Diesel, aux Etats-Unis, dispose de son propre montage en Amérique du Nord.

La nouvelle génération de moteurs est le fruit d'une incroyable collaboration à l'échelle mondiale : après le coup d'envoi de la production de série des moteurs Mercedes-Benz, l'usine de Mannheim fabriquera l'ensemble des culasses, des arbres à cames et des volants moteurs, ainsi que les blocs moteurs de l'OM 47x Mercedes-Benz, mais aussi les vilebrequins des moteurs Mercedes-Benz et Fuso. Les carters-cylindres des autres moteurs de cette famille seront en partie produits par l'usine du groupe Atlantis implantée au Cap, en Afrique du Sud. La production des bielles de tous les moteurs de la gamme lourde de nouvelle génération sera centralisée aux Etats-Unis.

L'usine de Mannheim profite au mieux de la collaboration intensive mise en œuvre par delà les continents. Les comparaisons réalisées entre les lignes de montage en Amérique du Nord et à Mannheim contribuent à améliorer la qualité. Un échange d'expérience international a lieu en continu : dès qu'un problème fait son apparition sur un continent, l'information est transmise aux deux autres et des spécialistes des trois continents recherchent simultanément une solution. En raison du décalage horaire, des visioconférences sont organisées le matin avec Fuso, au Japon, et le soir avec Detroit Diesel, aux Etats-Unis.

Chacun tire parti de la collaboration avec l'autre. La gestion Shopfloor sur les chaînes de montages de Mannheim a notamment été importée d'Amérique du Nord. La démarche qualité sans concessions vient du Japon. Les opérateurs japonais pulvérisent le nouveau moteur de chaux blanche avant de le faire tourner plusieurs heures afin de détecter d'éventuelles fuites. Dans un pays où les chauffeurs de camions effectuent chaque jour un contrôle visuel minutieux du moteur, cabine basculée, une simple plaque montée de travers est considérée comme un défaut inacceptable. Sur la nouvelle génération de moteurs Mercedes-Benz, même les plaques sont donc positionnées avec une extrême minutie.

### **Un nouveau hall de fabrication préservant le voisinage et l'environnement**

Les nouveaux plans de la fabrication de moteurs de Mannheim prévoient la proximité directe de la fonderie, de l'usinage par enlèvement de matière, du montage et de l'expédition. Cette

caractéristique constitue la condition d'une efficacité maximale, mais aussi la clé d'une qualité exemplaire. Chaque secteur applique par ailleurs des principes de production ultramodernes. L'usine de moteurs de Mannheim n'est toutefois pas un lieu isolé : elle jouxte notamment des zones résidentielles. C'est pourquoi les bâtiments dédiés à la fabrication des moteurs sont disposés en L et garantissent une excellente isolation phonique aux riverains. Aucune fenêtre ne peut être ouverte de leur côté – lors de la restructuration de la fabrication, la protection des résidents figurait en tête de la liste des priorités.

### **Travailler dans une enclave d'air pur**

Le respect de l'environnement et la conscience des coûts sont perceptibles dans de nombreux secteurs. Les monteurs du hall de montage 150 travaillent dans un espace d'air pur : l'aération est assurée par des colonnes montant jusqu'à 2,5 mètres du sol. Ce procédé garantit non seulement un climat bien tempéré, mais aussi des économies d'énergie représentant près d'un tiers de la consommation du système de chauffage et de ventilation.

L'énorme proportion du recyclage du sable des noyaux dans la fonderie illustre parfaitement la démarche intelligente consistant à conjuguer préservation de l'environnement et conscience des coûts : 92 % des matériaux sont réutilisés.