

Stabilisation de la tour Brunin de la Cathédrale Notre-Dame de Tournai

Ing. M. DUMONT
ISICHt - Mons

La cathédrale de Tournai a subi de nombreux dommages aux cours des années de son existence. Toutefois, la tornade du 14 août 1999 a accéléré sa dégradation. Il fallait donc agir vite pour conserver ce patrimoine. Après plus de deux années de réflexion et de recherches scientifiques, la phase de stabilisation a commencé en août 2004. C'est la technique de stabilisation par jet-grouting qui a été employée.

Mots-clefs : stabilisation, jet-grouting, tour Brunin, hors-plomb, tassement différentiel, calcaire, fondations, coulis

The Cathedral of Tournai has suffered of most of damages in the process of time.

However, the tornado of the 14 August 1999 has speeded up its damages.

It was thus necessary to act quickly to preserve this inheritance.

After more than two years of reflexion and scientific research, the phase of stabilization started in Augustus 2004.

It is the technique of stabilization by jets-grouting which was employed.

Keywords : stabilization, jet-grouting, Brunin tower, non-lead, relative settlement, limestone, foundations, purée

1. Introduction

La cathédrale de Tournai a subi de nombreux dommages aux cours de son existence. Vers 1960, on s'est rendu compte qu'il fallait agir et restaurer cet édifice. Toutefois, un élément aussi déterminant qu'imprévisible est venu perturber l'ordonnancement des réflexions et accélérer la nécessité des interventions : la tornade du 14 août 1999. Il fallait donc agir vite et en priorité stabiliser la tour Brunin dont l'obliquité ne cessait d'augmenter.

Les problèmes sont de diverses natures, mais dans le cas de la tour Brunin, c'est le sol qui est le principal responsable. En effet, la zone calcaireuse est particulièrement complexe car elle comporte, en sus de ses failles et d'effondrements karstiques possibles, de gros écarts de niveaux ce qui entraîne, pour les fondations, une disposition sur des terrains d'assises parfois très différents.

Après plus de deux années de réflexion et de recherches scientifiques, la phase de stabilisation a commencé en août 2004. C'est la technique de stabilisation par jet-grouting qui a été employée. Initié en Angleterre, ce procédé est réservé à de gros travaux spécifiques. Il s'agit d'une technique empirique qui s'est principalement développée au cours des ces cinquante dernières années

2. Etat actuel de la tour Brunin

La tour Brunin présente un hors-plomb important, bien illustré par la photo ci-après. Pour comprendre comment la tour s'est inclinée, il faut étudier la géologie aux alentours de la cathédrale.

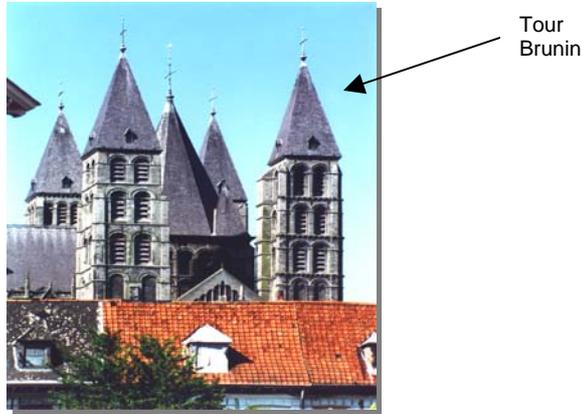


Figure 1 : Tour Brunin

3. Etude géologique

En analysant les courbes de niveaux et la carte des failles aux alentours de la cathédrale, on s'aperçoit qu'une faille passe très près de la cathédrale. On peut donc comprendre d'où proviennent les problèmes de déstabilisation de la tour Brunin.

En outre, différentes campagnes de reconnaissance du sous-sol de la cathédrale ont été effectuées par Monsieur Verslype (UCL) à différents endroits de celle-ci. Les résultats de ces essais sont intéressants car ils montrent la présence d'une épaisseur non négligeable de remblais divers et de terrains sablo-argileux surmontant le substratum calcaire.

Au pied de la tour Brunin, des fouilles ont mis en évidence un tassement différentiel des fondations de cette structure. Les campagnes géotechniques ont détecté à cet endroit d'importantes différences de niveau du socle calcaire passant de la cote +22 à +12 sur quelques dizaines de mètres (fig. 2).

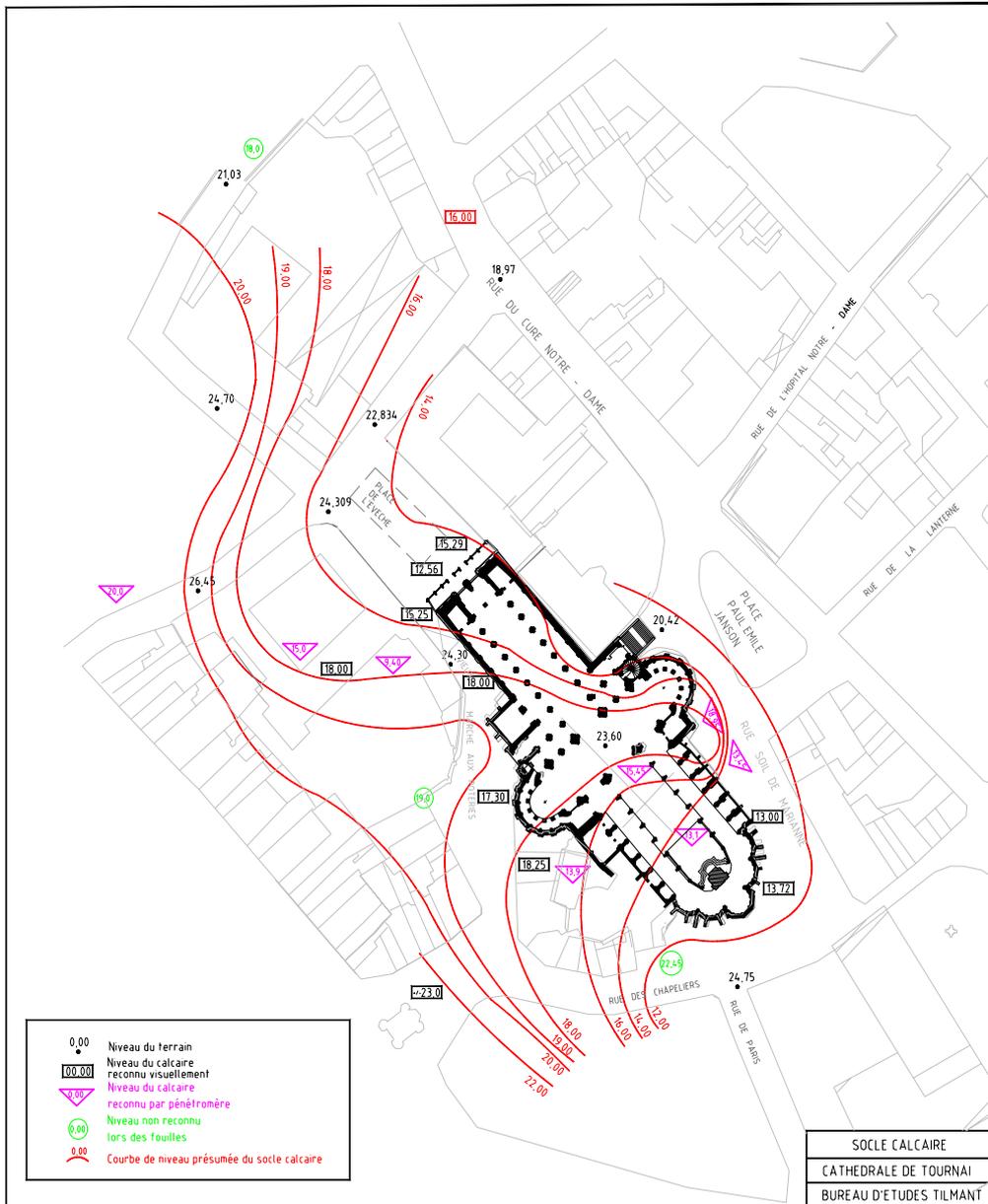


Figure 2 : Courbe de niveaux du socle calcaire sous la tour Brunin

4. Causes probables de la dégradation

Les deux bras du transept ont été réalisés à la même époque et sont identiques. On peut donc les comparer.

L'un, le bras sud, ne présente pas de hors-plomb, de déformation, de fissure, de renforcement quelconque, etc. Il s'agit d'un bâtiment sain qui a très peu souffert des attaques du temps pendant plus de huit siècles.

Par contre, l'autre, le bras nord, est affecté par une série de désordres et de tentatives de consolidation. On peut dès lors rendre pour responsable la nature du sous-sol.

Le tassement dépend du temps et, s'il est généralement grand lors de la mise en charge, il se stabilise progressivement. Le temps de stabilisation est plus ou moins long suivant les caractéristiques du sol. Dans le cas de la cathédrale de Tournai, le tassement aurait dû être terminé depuis longtemps, d'autant plus qu'ici c'est le poids mort seul qui induit les contraintes provoquées dans le sol, et cette charge a peu changé depuis la fin de la construction c'est-à-dire il y a 8 siècles. Il ne faut pas perdre de vue que cette construction est très hétérogène et que des bâtiments annexes ont été soit ajoutés, soit supprimés.

C'est ainsi que certains renforcements placés il y a 3 ou 4 siècles ont cédé, le badigeonnage réalisé il y a 3 ou 4 décennies est à nouveau fissuré au travers d'anciennes crevasses. Les fissuromètres placés il y a quelques années accusent un déplacement d'un millimètre.

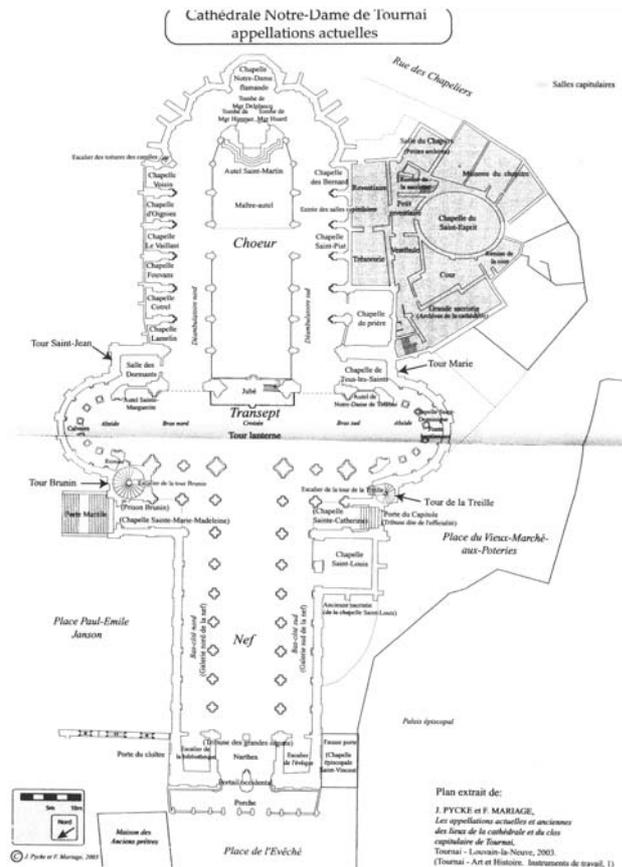


Figure 3 : Plan de la Cathédrale Notre-Dame de Tournai

A ce tassement différentiel on peut ajouter un tassement général de la tour et d'une partie de l'abside. Celui-ci est mis en évidence par les fissures observées dans la galerie et le désordre au niveau du triforium, près de la tour Saint Jean. Tout ceci est en relation avec le socle primaire. La tour Saint Jean doit reposer sur le calcaire puis le niveau de celui-ci descend vers la tour Brunin non pas suivant une pente régulière mais en escalier dont les marches ont des hauteurs et des largeurs différentes. La complexité de la structure et de la nature du sous-sol fait qu'il est illusoire de vouloir expliquer chaque désordre en particulier, c'est l'allure générale qui est importante.

Ce basculement de la tour Brunin a entraîné avec lui la travée droite qui lui est adossée et par-là l'arc brisé contre l'abside supportant le fronton triangulaire.

5. Etude de la stabilité

L'étude de stabilité de la structure et des fondations a été réalisée par les bureaux d'études Tilmant et Greisch respectivement en 1997 et 2004. Le but de cette étude est de déterminer une descente de charge afin de pouvoir renforcer, en certains endroits précis, la tour Brunin.

6. Conclusion de l'étude

L'étude a permis de mettre en évidence un désordre important qui affecte l'édifice. D'autres problèmes plus limités sont souvent la conséquence de ce désordre, ce qui définit l'ordre dans lequel les travaux de restauration doivent être menés.

Les autres problèmes sont la conséquence d'un manque d'entretien ou d'une dégradation naturelle et ne doivent pas être négligés. Dans un tel mode de construction, ils peuvent avoir des conséquences graves à court terme.

Ce désordre important est occasionné par les fondations. Celles-ci ne sont pas directement en cause car leurs dimensions sont suffisantes pour transmettre les charges qu'elles reprennent. Par contre, la nature du sous-sol provoque des déformations et des lésions à des parties bien déterminées de la construction.

En ce qui concerne les fondations du transept nord, l'étude a démontré que c'est certainement l'endroit où il fallait agir en urgence. En effet, le réseau de fissuration à l'abside du transept s'est constitué dans les dernières décades. Il y avait donc lieu d'intervenir de toute urgence si l'on ne voulait pas être devant une situation irréversible et irrémédiable. La solution proposée était la réalisation de colonnes de jet-grouting pour renforcer les fondations.

7. Etude de la stabilisation

La technique de stabilisation qui a été retenue est la réalisation de colonnes de jet-grouting.

Une autre méthode de renforcement aurait pu consister à placer des micropieux au travers de la fondation. C'est cette technique qui est habituellement retenue pour les bâtiments anciens. Mais c'est un travail relativement complexe qui n'a pas été étudié bien qu'il soit réalisable. D'un point de vue économique, il n'y a pas de différence significative avec la technique de jet-grouting.

8. Technique du jet-grouting

On désigne par jet-grouting un procédé de construction utilisant un jet de fluide à haute énergie cinétique pour déstructurer un terrain et le mélanger avec un coulis autodurcissant pour former des colonnes, panneaux et autres structures dans le terrain. Ce procédé s'applique aux terrains difficilement injectables par les procédés classiques (fig. 4).

Il ne s'agit pas exactement d'une technique d'injection, mais plutôt d'un procédé de mélange hydrodynamique terrain-coulis visant à former un « béton de sol » in situ dans la masse du terrain et qui donne les caractéristiques mécaniques et dimensionnelles recherchées.

L'idée du jet-grouting est née au Royaume-Uni à la fin des années 50. Différentes méthodes de jet-grouting (jet simple, jet double, jet triple) sont utilisées en fonction de l'énergie hydrodynamique nécessaire pour détruire et mélanger le terrain avec un coulis liquide.

Le choix du système à employer et des paramètres à utiliser s'effectue en fonction :

- de la nature et des caractéristiques géotechniques du sol à traiter,
- du rayon d'action du jet nécessaire pour atteindre la dimension des éléments à réaliser,
- des caractéristiques mécaniques demandées pour le sol traité,
- des contraintes du site.

Le jet-grouting fait appel, séparément ou en combinaison, à trois phénomènes physiques :

- destructuration du terrain par un jet à très grande vitesse,
- extraction d'une partie du terrain jusqu'à la surface par les fluides de jetting,
- incorporation d'un liant apporté par le coulis.

Le traitement se déroule généralement ainsi :

- réalisation d'un forage de petit diamètre (100 à 200 mm) sur la hauteur à traiter,
- dans ce forage, injection d'un jet de fluide à l'aide d'une pompe à haute pression (plusieurs dizaines de MPa) à travers une ou plusieurs buses de petit diamètre (1 à 10 mm) placées sur un « moniteur » au pied d'un train de tiges de diamètre 70 à 100 mm,
- remontée lente des tiges, avec mise en rotation pour former une colonne de béton de sol.

Pendant la phase de jet, les volumes en excès du mélange sol-ciment (appelés « rejets ») doivent ressortir librement en tête de forage (sinon, l'excès de matériaux risque de « claquer » le terrain et de créer des désordres au voisinage) et être évacués du chantier au fur et à mesure.

Le résultat (diamètre, composition, résistance des colonnes) dépend des paramètres du traitement (vitesses de translation et de rotation des tiges, pressions et débit des fluides utilisés, dosage du coulis), des caractéristiques du terrain en place (nature, granulométrie, composition, compacité) et de la méthode employée (simple, double ou triple).

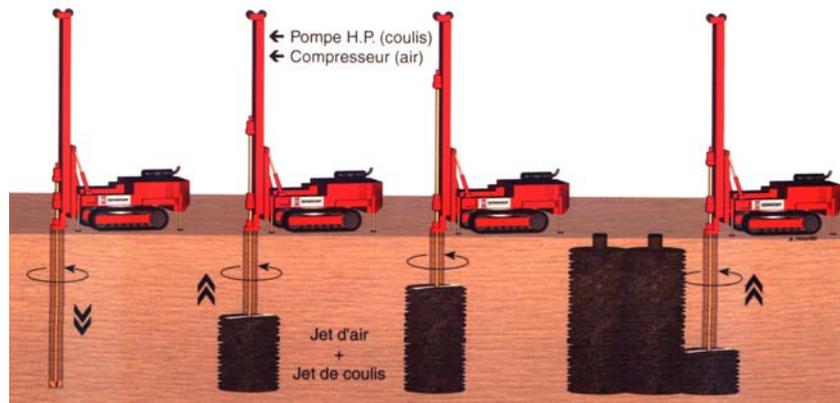


Figure 4 : construction de colonnes de jet double

9. Principaux systèmes de jet

9.1 Jet simple

Dans ce procédé, le fluide du jet est le coulis lui-même, qui assure les trois fonctions de destructuration, extraction et incorporation.

Une partie importante de l'énergie cinétique du jet est dissipée par frottement dans le terrain mis en suspension et les rejets formés deviennent parfois trop visqueux pour remonter librement jusqu'en tête de forage

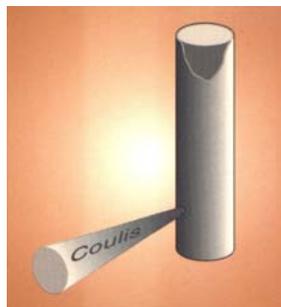


Figure 5 : jet simple

9.2 Jet double

Si on protège le jet de coulis à très grande vitesse par un jet d'air annulaire, le rayon d'action du jet en face du même terrain se trouve considérablement augmenté par le cône d'air enveloppant.

Dans le procédé jet double, le rôle de l'air est d'améliorer les possibilités d'extraction du terrain par phénomène d'air lift.



Figure 6 : Jet double

9.3 Jet triple

Dans le jet triple, les fonctions de destruction et d'extraction du terrain sont obtenues par un jet double d'eau et d'air séparément de la fonction d'incorporation du liant assurée par un jet de coulis envoyé simultanément à basse pression (quelques Mpa) par une buse inférieure.

La pompe et le circuit haute pression utilisés en jet triple ne supportent que de l'eau avec en contre partie la nécessité d'une pompe supplémentaire à basse pression pour le coulis et d'une ligne d'outils à triple tube.



Figure 7 : Jet triple

10. Conception d'un projet

La conception d'une structure de jet-grouting comprend plusieurs phases, qui peuvent être itératives pour une meilleure optimisation :

- définition de la géométrie et de la résistance globale de la structure (parfois de la perméabilité),
- définition des éléments de jet constituant la structure (géométrie, arrangement) en tenant compte des caractéristiques géotechniques et hydrogéologiques du terrain, des performances des systèmes de jet et de leurs contraintes,
- réalisation d'essais préalables pour vérifier que la méthode et les paramètres de jet choisis répondent aux exigences de la conception.

11. Sélection du système de jet et des paramètres

Cette sélection s'opère en évaluant :

- l'énergie de jet à mettre en œuvre suivant le rayon d'action souhaité avec le système de jet prévu (fig. 8),
- le dosage du coulis nécessaire pour atteindre la résistance demandée pour le sol traité.

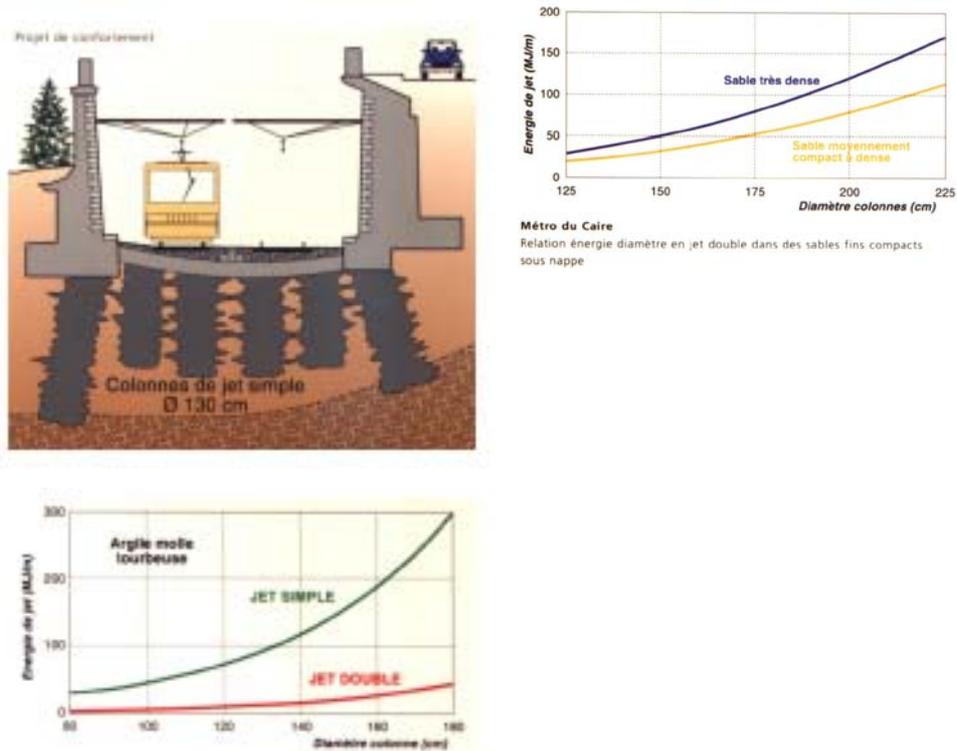


Figure 8 : Choix du système et des paramètres de jet

12. Réalisation des colonnes de jet-grouting à la Cathédrale de Tournai

Les colonnes de jet-grouting sont réalisées en-dessous des murs de fondation et de chaînage de la tour Brunin. Elles visent évidemment à stabiliser celle-ci. Elles peuvent être verticales ou inclinées.

Pour exécuter ces colonnes de jet-grouting, on commence par réaliser un forage préliminaire (fig. 9) jusqu'à une profondeur de plus ou moins 1,5 m. Il s'agit en fait d'un carottage de diamètre 180 mm à l'aide d'une couronne diamantée.



Figure 9 : Forage préliminaire

Cette couronne diamantée est, comme son nom l'indique, incrustée de petits diamants, qui permettront une usure moins rapide, cependant, vu la dureté des calcaires, après quelques carottages, ils doivent être remplacés.

Lorsque que la carotte est extraite, on exécute un forage à l'aide d'une foreuse automotrice sur chenille (fig. 10). Ce forage va être réalisé au moyen d'un tricône (fig. 11) placé à l'extrémité de l'élément porteur des différents injecteurs.



Figure 10 : Foreuse automotrice



Figure 11 : Tricône

Dans la phase de forage, le liquide injecté est de l'eau. Le diamètre de ce forage est de 150 mm environ et la profondeur est d'un mètre sous les sommets calcaires.

Un appareil de mesure de la pression sur l'outil est placé sur la foreuse et permet de savoir exactement où se trouvent les sommets calcaires.

Cette profondeur d'un mètre est justifiée par le fait qu'il y a présence de roches karstiques dans le Tournaisis, c'est-à-dire de zones altérées avec des poches de dissolution dans la partie supérieure du calcaire.

Ainsi, pour être certain d'avoir une bonne résistance on choisit une profondeur d'un mètre.

Quand cette phase de forage est terminée, on peut commencer à réaliser les colonnes de jet-grouting. Pour ce faire, on va occulter le passage des fluides d'injections au moyen d'une bille en acier qui va venir se placer au-dessus du siège conique du tricône sous l'effet de la pression (400 bar).

Pour ce chantier, c'est la technique du jet simple qui a été retenue. Le fluide d'injection sera donc uniquement un coulis composé de ciment et d'eau.

Ce coulis est préparé au moyen d'une centrale de fabrication de coulis et est injecté à l'aide d'une pompe haute pression.

Le dosage et la quantité demandée du coulis se font via un tableau de commande. Le reste se fait automatiquement (mélange, malaxage, etc.).

Le dosage demandé est d'environ 1 kg de ciment pour 1 kg d'eau, ce qui donne une densité d'environ 1,49.

Ce coulis est stocké dans de grands réservoirs et est continuellement mélangé pour éviter la ségrégation.

Le coulis va alors être envoyé avec une pression de 400 bar au travers de 3 injecteurs qui ont un diamètre de 2,4 mm (fig. 12). Cette pression s'établit sur la colonne d'injection et non sur le terrain, il y a en effet transformation de l'énergie de pression en énergie cinétique.



Figure 12 : Injecteur

La colonne de jet commence à moins 4,5 m par rapport au terrain naturel (surface de la cathédrale) et est effectuée en remontant à une vitesse de 1 centimètre par seconde.

Lors de l'exécution de la colonne, des déchets qu'on appelle spoils remontent à la surface et peuvent très vite rendre le chantier extrêmement boueux. Ces spoils sont un mélange du terrain en place et du ciment. Pour éviter de salir le chantier, ces spoils sont pompés à l'aide d'une pompe à palets et placés dans des conteneurs étanches.

13. Conclusions

Les problèmes de stabilité de la cathédrale ont été aggravés avec la tornade du 14 août 1999. En effet, la cathédrale avait très mal supporté cette tornade qui s'était abattue sur la ville. Une véritable claque, donnée par des vents de 280 km/h, l'avait frappée sur une diagonale sud-nord au niveau du chœur gothique. La masse avait chancelé avant de se remettre en place. Mais les dégâts étaient faits. La vieille Dame n'avait pas besoin de cette épreuve supplémentaire. En effet, on avait déjà constaté auparavant des problèmes de stabilité dus à la nature du sol. Il fallait donc agir vite pour éviter une catastrophe.

Dans un premier temps, des reconnaissances géologiques ont été entreprises de manière à avoir plus de précision sur la nature du sol et sur les courbes de niveaux des couches du sous-sol. Il était capital de savoir sur quel sol la cathédrale repose. En effet, c'est entre autre à cause de celui-ci que la stabilité de la cathédrale s'est détériorée puisqu'une partie de ses fondations se trouve sur du calcaire et l'autre sur des remblais. C'est cette dernière partie qui va principalement être stabilisée.

Pour « conforter » la cathédrale, plusieurs phases de travaux doivent être exécutées sur une durée que personne ne connaît à l'heure actuelle.

Dans un premier temps il a fallu faire des travaux d'urgence. Il s'agissait de consolider et étançonner tout en mesurant sans cesse les fissures, en attendant la solution de fond. Pendant ce temps, des études ont été réalisées pour déterminer les travaux à effectuer. Il en est ressorti qu'il fallait s'occuper de la stabilisation de la tour Brunin en priorité à cause de son obliquité croissante.

Les bureaux d'études ont donc étudié la meilleure solution pour stabiliser la tour Brunin, et c'est la technique de stabilisation par colonne de jet-grouting qui a été retenue. Des plans d'exécutions de ces colonnes ont été établis et les travaux ont commencé en août 2004. Le coût de l'opération est de 5,7 millions d'euros, mais il faut signaler que ces travaux ont été subsidiés à 95% par la Région Wallonne.

Fin mars 2005, toutes les colonnes de jet-grouting étaient établies. Il faut noter que sur la durée d'exécution de ces colonnes, aucun accident majeur n'est survenu, le chantier s'est donc déroulé correctement.

La tour Brunin stabilisée, le premier objectif des travaux de stabilisation de la cathédrale est atteint.

14. Références bibliographiques

- [1] BUREAU D'ETUDES TILMANT., *Etudes préalables de stabilité*, 1997, 170p.
- [2] BUREAU D'ETUDES GREISCH S.A., *Calcul des efforts exercés sur le sol par la cathédrale au voisinage de la tour Brunin au moyen d'un calcul par éléments finis*, mars 2004, 61p.
- [3] SOLETANCHE BACHY, *Construire sur du solide*, 2004, 16p.
- [4] SOLETANCHE BACHY, *Les technologies du sol*, 2002, 39p.
- [5] SOLETANCHE BACHY, *Technologie et expérience*, 2002, 6p.
- [6] DUMOULIN J. ET PYCKE J., *La cathédrale Notre-Dame de Tournai et son trésor*, 1972, 60p.
- [7] LE COURRIER DE L'ESCAUT, *Tour Brunin : Ni remontée, ni redressée : stabilisée*, août 2004, 1p.
- [8] LE COURRIER DE L'ESCAUT, *Restauration de la cathédrale : Il y en a encore pour 20 à 30 ans*, avril 2005, 1p.