

Techniques des démolitions à l'explosif

par **Jean BÉNAZET**

Ingénieur

*Chef de la Division acoustique, vibrations, thermique
et travaux à l'explosif au CEBTP – CEMEREX*

1. Méthodes de démolition à l'explosif	C 5 425 - 2
1.1 Méthodes pratiquées.....	— 2
1.2 Avantages et inconvénients des différentes techniques.....	— 2
1.2.1 Pour les méthodes universelles des foudroyages antérieures à 1986	— 2
1.2.2 Pour les méthodes du foudroyage à la française après 1986.....	— 3
1.2.3 Pour les méthodes du basculement à charnière haute développées par le CEMEREX	— 4
2. Montage d'un marché de maîtrise d'œuvre	— 4
2.1 Maîtres d'ouvrages privés	— 4
2.2 Maîtres d'ouvrages publics.....	— 5
3. Démolitions suivant les méthodes françaises	— 6
3.1 Types de démolitions	— 6
3.1.1 Foudroyage intégral (souvent appelé à tort : implosion)	— 6
3.1.2 Basculement.....	— 6
3.1.3 Type mixte ou semi-foudroyage	— 7
3.2 Préparation des niveaux minés	— 7
3.2.1 Affaiblissements mécaniques des niveaux minés et dégraissages	— 7
3.2.2 Nettoyage des niveaux affaiblis	— 7
3.2.3 Perforation.....	— 7
3.2.4 Types de protection	— 8
3.2.5 Contraintes liées au minage des éléments à dynamiter	— 8
3.3 Recommandations et détail des éléments des boucles pyrotechniques	— 10
3.3.1 Principe général et conseils relatifs à la boucle	— 10
3.3.2 Précautions à prendre contre toutes interférences électriques	— 11
3.3.3 Éléments pyrotechniques de la boucle de mise à feu	— 12
3.4 Surveillance du chantier	— 13
3.5 Traitement des gravois de la démolition	— 14
3.5.1 Mise en décharge des gravois.....	— 14
3.5.2 Moyens d'évacuations	— 14
3.5.3 Recyclage du béton	— 14
3.5.4 Bâtiments à ossatures métalliques	— 14
3.6 Principales nuisances	— 14
3.6.1 Poussière.....	— 14
3.6.2 Onde de choc aérienne	— 14
3.6.3 Bruit	— 14
3.6.4 Projections de matériaux	— 15
3.6.5 Vibrations solidiennes engendrées dans le sol.....	— 15
3.7 Inventaire et évaluation des difficultés des démolitions.....	— 15
3.8 Exemple de la démolition de la tour Bertrand à Lille	— 20
3.8.1 Caractéristiques de la tour	— 20
3.8.2 Impératifs de la démolition.....	— 20
3.8.3 Choix de la démolition et des exécutants.....	— 20
3.8.4 Détail de la démolition, de sa préparation et des simulations	— 20

La qualité de la vie et la détérioration des constructions des années 50 ont conduit les maîtres d'ouvrages à remodeler leurs patrimoines par des démolitions intégrales ou partielles de bâtiments construits dans des sites divers et souvent très urbanisés.

Ces démolitions sont réalisées d'une façon mécanique ou à l'explosif.

La difficulté des démolitions à l'explosif diminue lorsque celle des démantèlements mécaniques augmente.

C'est ainsi qu'avec des hauteurs d'édifices supérieurs à 20 m, la démolition à l'explosif devient plus adaptée et moins dangereuse que l'abattage sauvage du type : « démantèlement à la boule, grignotage par pinces à béton ou tout autre engin souvent utilisé sans considérations des circulaires de sécurité en vigueur ».

Toutefois, la démolition à l'explosif, qui n'offre un danger qu'à la minute du tir (contrairement au démantèlement mécanique dont les risques sont continus durant toute la durée du chantier), n'est pas simple. Et l'entrepreneur qui la réalise doit savoir maîtriser les connaissances :

- générales des explosifs ;
- des lois physiques liées à la dynamique des chutes ;
- de la résistance mécanique des matériaux.

Dans ce qui suit, nous ne développons que la technicité de la démolition par explosifs. Cela afin de donner aux entrepreneurs et aux maîtres d'ouvrages les bases des démantèlements du XX^e siècle qui s'appliquent :

- aux habitations ;
- aux cheminées ;
- aux aérofrigérants ;
- aux châteaux d'eau ;
- aux blockhaus ;
- aux constructions industrielles (y compris nucléaires).

1. Méthodes de démolition à l'explosif

1.1 Méthodes pratiquées

L'ingénieur n'avait, jusqu'en 1986, que 2 solutions pour abattre à l'explosif les constructions :

- le **foudroyage lent** (figure 1a), qui consiste à effondrer le bâtiment sur lui-même en une dizaine de secondes ;
- le **basculement de l'édifice au moyen de charnière basse** (figure 1b), après ouverture à l'explosif d'un coin avant (à l'image du bûcheron qui entame à la hache le bas de l'arbre à abattre).

Depuis 1986, le CEBTP-CEMEX a développé les 5 autres méthodes suivantes dont la précision des résultats n'est plus à mettre en doute :

- le **foudroyage ultrarapide** (figure 2a), fondé sur la rapidité d'enchaînement des mises à feu. D'où comme résultat : « une explosion en moins d'une demi-seconde, là où les Américains, les Japonais et les Sud-Africains en mettaient 10 ». Ce type de foudroyage appelé « foudroyage à la française » donne une précision de chute extraordinaire ;
- le **basculement à charnière haute** (figure 2b), qui n'a pu être appliqué aux bâtiments à démolir qu'après de longues simulations de neutralisation de la force horizontale de recul inhérente aux lois physiques des basculements ;
- le **foudroyage en tonneau** (figure 2c), pour lequel l'explosif pousse, de l'intérieur et à mi-hauteur, les parois du bâtiment à effondrer (études pour le nucléaire espagnol). Ce foudroyage se réalise également avec une séquence de tir très rapide ;

- le **foudroyage en pâquerette** (figure 2d) (études pour les arènes et stades espagnols) ;
- le **semi-foudroyage**, qui est un mélange simultané des méthodes précédentes.

1.2 Avantages et inconvénients des différentes techniques

1.2.1 Pour les méthodes universelles des foudroyages antérieures à 1986

Elles se caractérisent principalement par :

- un abattage par division de gros volumes verticaux ;
- une durée de la rafale des tirs de la division du bâtiment à démolir étalée sur un temps relativement long (une dizaine de secondes).

Elles ont fait leurs preuves et possèdent encore de nombreux adeptes hors de France (ou en France) pour les constructions isolées.

Toutefois, elles sont entachées des inconvénients suivants :

— à cause de la **lenteur des découpes** :

- la verticalité de la descente du volume dynamité est influencée par les parties restantes à foudroyer. D'où, chute déséquilibrée de chaque volume avec orientation de l'étalement imprécise sur le sol,
- augmentation du risque de projections des tirs sur l'environnement par désorganisation des protections mises en périphérie des niveaux minés. Car le volume qui chute a le temps d'arracher les protections des volumes en attente des tirs ;

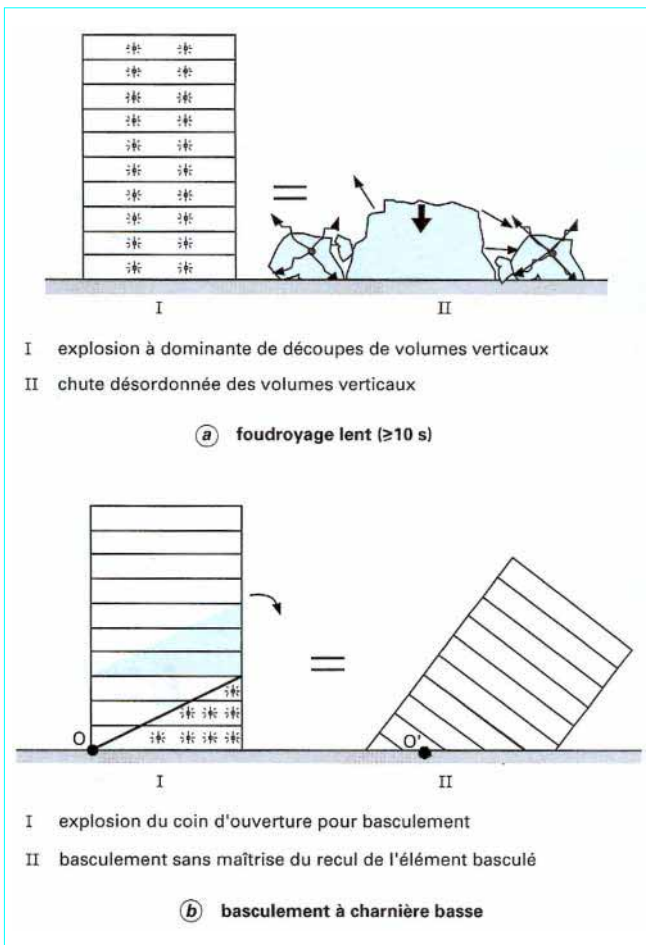


Figure 1 – Méthodes de démolition avant 1986

— du fait des découpes en gros volumes verticaux, les vibrations solidiennes induites sur l'environnement sont répétitives et non amorties puisque chacune des descentes martèle directement le sol.

Ces types de démolitions ont l'avantage d'être moins coûteux que les abattages ultrarapides.

1.2.2 Pour les méthodes du foudroyage à la française après 1986

Les méthodes françaises d'après 1986 ont pu être développées grâce à des explodeurs multilignes dont la temporisation entre lignes voisines est gérée électroniquement avec des pas variables de 2 ms à 999 ms.

En 1986, seule la société Nobel Explosifs France possédait ces appareils (appelés séquentiels) qu'elle faisait agréer pour le marché français. C'est sa collaboration qui a permis au CEMEREX d'industrialiser le résultat de ses études.

La première application du foudroyage ultrarapide a été mise en œuvre en mai 1987 à Dunkerque. C'est une entreprise de démolition, possédant toute la compétence souhaitée pour mener à bien une expérience de premier intérêt national, qui réalisa les travaux.

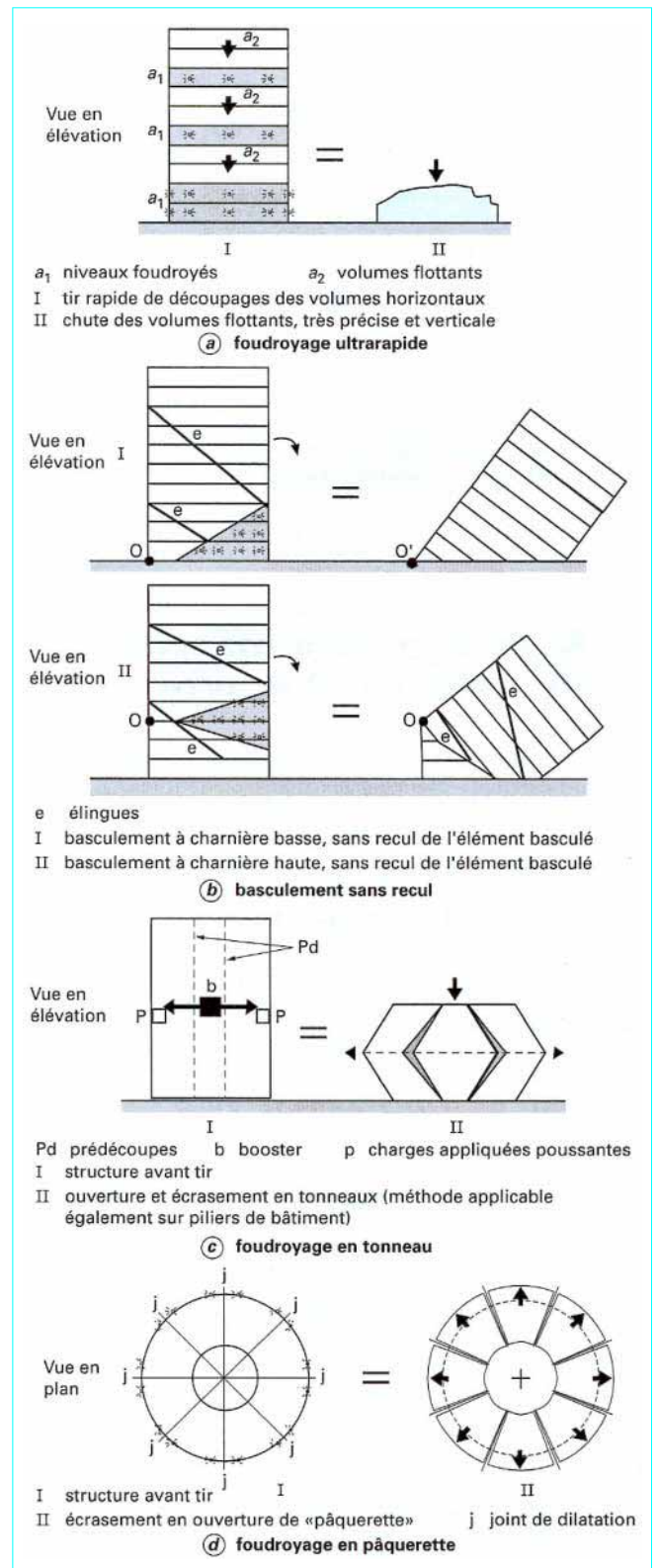


Figure 2 – Méthodes de démolition après 1986

Dans ce type de démolition, la rapidité des amorçages est telle qu'il devient possible de diviser, instantanément (exemple : 2 500 charges explosives amorcées en 450 ms) un bâtiment en volumes horizontaux flottants qui chutent, indépendamment les uns des autres, avec une verticalité parfaite.

Une image de cette verticalité de chute est donnée par le cliché d'un enfant qui frappe et coupe sèchement une tige d'herbe avec un bâton. La tige rapidement fauchée par l'enfant tombe au sol avec une verticalité parfaite. Si, par contre, la tige est coupée par un coup de bâton lent de l'enfant, sa chute se réalise avec des inclinaisons de descente très aléatoires (comme le font les morceaux d'un bâtiment découpé par des tirs lents).

On pourrait penser que l'inconvénient d'une découpe rapide de bâtiment, qui demande une quantité importante d'explosifs initiés en un temps extrêmement court, se caractérise par l'émission de surpressions aériennes extrêmes.

De plus, les découpes rapides font que les volumes flottants s'écrasent les uns sur les autres. D'où, une faible amplitude des vibrations induites sur le site puisque celle-ci ne dépend plus que de l'écrasement du premier volume sur le sol qui, en cours de disloquement, joue un rôle de matelas pour les autres.

Le dernier atout de la méthode française découle de la conséquence suivante : les protections périphériques des niveaux minés du bâtiment foudroyé n'ont pas le temps de se désorganiser entre chaque tir (contrairement à ce qui se passe dans le cas de tirs lents).

1.2.3 Pour les méthodes du basculement à charnière haute développées par le CEMEREX

Le principe du **basculement à charnière haute** épouse le même processus que le basculement à charnière basse, mais avec une ouverture située en hauteur. L'avantage de ce type de démolition réside dans le fait que l'on peut coucher la partie supérieure d'un bâtiment dans un espace restreint, le bas étant achevé soit mécaniquement, soit par un foudroyage.

Toutefois, il faut savoir que pour réaliser un tel basculement, il est nécessaire :

- de réduire au minimum le temps qui s'écoule entre la fin de l'ouverture du coin et le début du basculement ; durée qui est liée à l'inertie de l'élément basculé. Car, plus cette durée est grande, plus la charnière souffre de la surcharge qu'elle encaisse après l'ouverture du coin avant.

Cette durée est également fonction de la distance d définie par la projection, sur un plan horizontal, du centre de gravité du volume basculé et du centre de gravité de la section charnière ;

- de s'affranchir de la composante horizontale de réaction qui se développe sur la charnière du basculement ; sachant que cette force est :

- de direction opposée à celle du basculement pendant les 47 premiers degrés de rotation ;
- maximale à 27° avec pour valeur 0,2 fois le poids de l'élément basculé (figure 3).

Dans toutes les opérations de basculements délicats, il est donc nécessaire de calculer :

- la résistance mécanique d'un talon antirecul qui aura pour rôle de contrer la composante de recul qui se crée dans les 47 premiers degrés du basculement ;

- la dimension de l'espace libre de l'aire devant recevoir l'abattage, sachant que de 47° à 90° de rotation, la composante en question change de sens (donc dirigée dans le sens du basculement) du fait de l'augmentation de la force centrifuge qui se développe sur l'élément basculé.

Le **semi-foudroyage**, ou méthode mixte, met en jeu simultanément le foudroyage et le basculement.

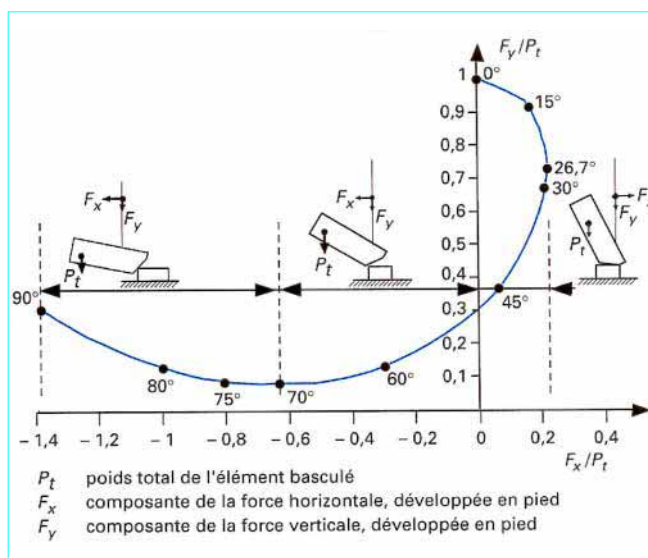


Figure 3 – Valeurs des réactions en pied du basculement par rapport au poids total de la partie basculée

L'application de cette méthode CEBTP-CEMEREX, réalisée à Alençon en septembre 1988 et le 3 juillet 1989 sur la démolition de la tour Bertrand à Lille, démontra, une fois pour toutes, l'excellente précision que donnaient les tirs rapides et les basculements maîtrisés à charnière haute.

On trouvera au paragraphe 3.8, les détails de cette démolition.

L'étude de cette démolition contient la prise en compte de tous les facteurs liés aux semi-foudroyages. C'est-à-dire :

- la dépression qui se crée à l'avant du basculement par la descente de la partie foudroyée ; dépression qui favorise (par aspiration) le début du basculement ;
- la temporisation du tir de basculement en fonction du temps qui s'écoule entre l'ouverture du coin et le début du basculement, lui-même dépendant de la distance d citée plus haut ;
- la force de la composante maximale de recul (qui se développe en pied du basculement).

Ce sont ces facteurs que tous les entrepreneurs doivent maîtriser lorsqu'une démolition délicate par semi-foudroyage leur est posée.

2. Montage d'un marché de maîtrise d'œuvre

Les montages administratifs qui précèdent les démolitions à l'explosif diffèrent suivant que le maître d'ouvrage est :

- privé ;
- public.

2.1 Maîtres d'ouvrages privés

Le choix du montage de la passation des marchés est libre ; c'est-à-dire qu'il n'y a pas obligation d'appels d'offres pour désigner le maître d'œuvre de la démolition (ou les autres intervenants).

2.2 Maîtres d'ouvrages publics

Marché de maîtrise d'œuvre inférieur à 300 000 F TTC.

Le choix du montage de la passation des marchés est également libre.

Marché de maîtrise d'œuvre supérieur à 300 000 F TTC.

Lorsque le montant du marché appliqué à chaque intervenant dépasse la somme de 300 000 F TTC, le maître d'ouvrage doit choisir le maître d'œuvre (par appels d'offres publiés).

Il en est de même pour le choix du :

- bureau d'étude ;
- bureau de contrôle ;
- coordonnateur ;
- organisme chargé du diagnostic d'amiante ;
- entreprise mandataire.

Les organigrammes représentatifs des montages de démolitions diffèrent suivant que le maître d'œuvre prend en charge ou non l'étude du projet.

Dans le cas où le maître d'œuvre n'a pas l'étude du projet, celle-ci est laissée à la charge de l'entreprise.

Les organigrammes correspondant aux deux montages cités sont schématisés sur la figure 4.

Il faut savoir que le dossier de consultation des entreprises devra comprendre la rédaction :

- de l'acte d'engagement ;
- du cahier des clauses administratives particulières ;
- du cahier des clauses techniques particulières ;
- du calendrier prévisionnel des travaux ;
- du cadre de décomposition du prix global et forfaitaire ;
- du plan particulier de sécurité ;
- du plan général de coordination en matière de sécurité et de prévention de la santé ;
- du règlement de consultation.

Pour plus de détails, on se reportera aux articles *Marchés et concessions de travaux publics* [C 71] et *Marchés de travaux privés* [C 74] dans ce traité.

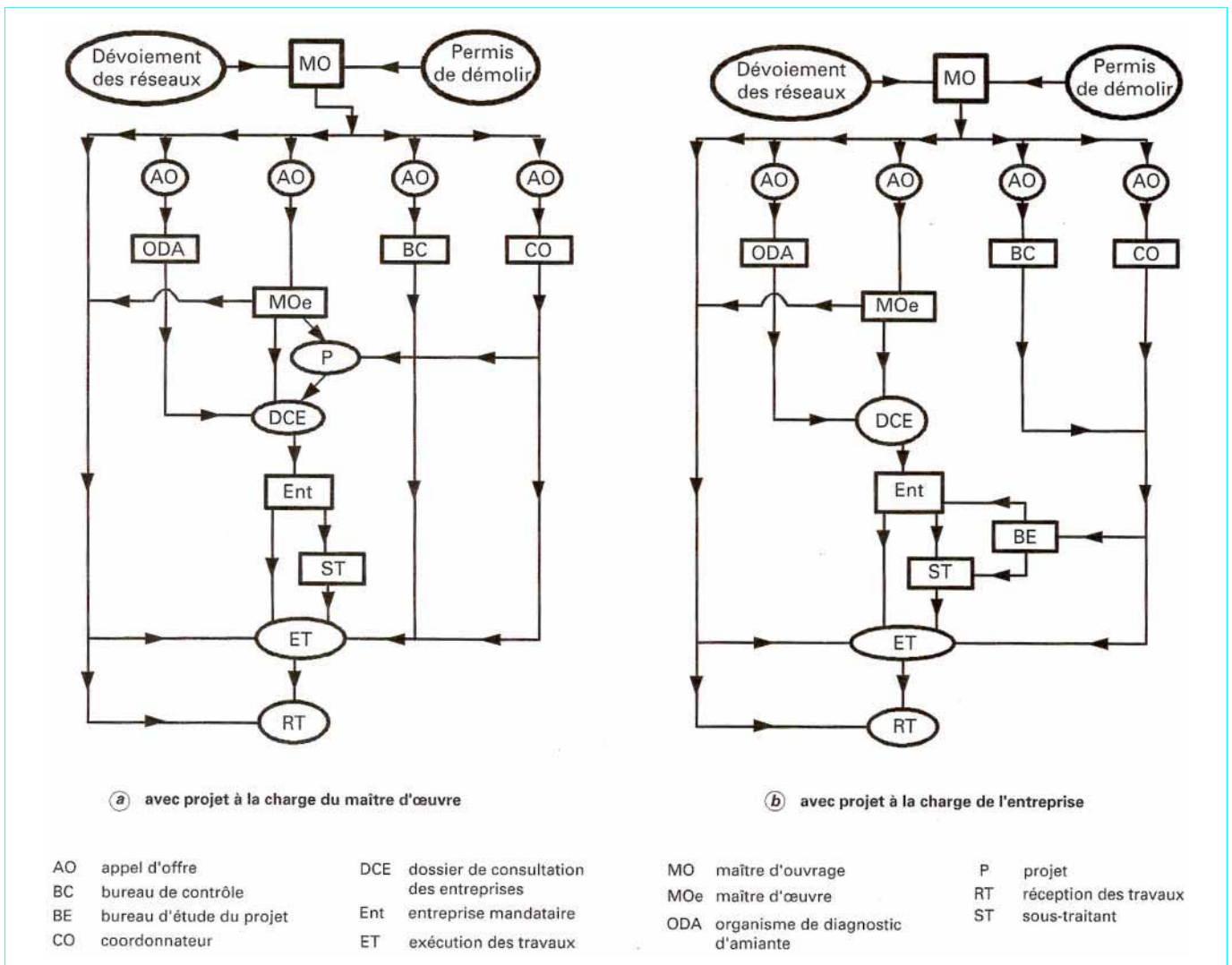


Figure 4 - Organigramme des montages de démolitions

3. Démolitions suivant les méthodes françaises

3.1 Types de démolitions

3.1.1 Foudroyage intégral (souvent appelé à tort : implosion)

Le foudroyage intégral à la française consiste à écrouler le bâtiment sur lui-même au moyen d'une rafale de tirs rapides après allègements mécaniques importants des niveaux dynamités par bandes horizontales (démolition mécanique des escaliers, cloisons et d'une partie des murs porteurs), pour ne laisser que des piliers trumeaux à miner.

Le processus est le suivant :

- choix de la division de la construction à démolir suivant plusieurs volumes flottants et indépendants (figure 5) qui prendront chacun une vitesse de chute importante.

Il est bon de savoir à ce sujet que la vitesse de chute croît avec le nombre d'étages supérieurs dynamités (résultats expérimentaux qui divergent de la théorie de la chute libre d'un corps) ;

- choix du nombre des niveaux bas à dynamiter en fonction des difficultés (figure 5). Pour cela, il faut savoir que plus les bâtiments hauts à foudroyer sont résistants ou moins le bâtiment est élevé (manque de masse pour rupture des cellules basses), plus la hauteur de descente doit être grande ; cela de façon à augmenter l'énergie cinétique qui commande la fragmentation de la construction.

Ceci est obtenu par le dynamitage de 1, 2 ou 1, 2, 3 niveaux bas adjacents ;

- la structure interne ainsi que les éléments des volumes flottants ne sont pas touchés ;

- dans les niveaux minés, les équipements et cloisons sont enlevés alors que les porteurs sont affaiblis en forme de trumeaux. Ces derniers sont dynamités en commençant les tirs par les niveaux bas pour terminer par le haut. Les explosions dans chaque niveau sont réalisées en ouverture d'éventail à partir de leur centre.

Le résultat de la conjugaison de ces deux combinaisons d'amorçage de la rafale peut être représenté par les isochrones des tirs de la figure 6.

3.1.2 Basculement

Le basculement d'une construction est obtenu en dynamitant, en forme de coin, une partie basse (un ou plusieurs niveaux contigus) de celui-ci. Après ouverture, la partie supérieure, située au-dessus des explosions, bascule vers l'avant en s'appuyant sur un talon arrière appelé « charnière » (figure 7).

Dans ce genre de démolition, le centre d'inertie et le centre de gravité de la charnière doivent être bien définis.

La résistance du talon, dont la ligne haute se brisera au cours du basculement, doit être soigneusement étudiée afin que le bas de l'élément basculé ne parte pas vers l'arrière. À ce sujet, il est bon de rappeler que (figure 3) :

- la composante horizontale de la force développée sur le talon est maximale pour un angle de 27° formé avec la verticale ;

- la valeur maximale de la force pour 27° est égale (presque toujours) à 0,2 fois le poids de l'élément basculé.

Dans les parties dynamitées, les affaiblissements sont du même type que ceux des foudroyages.

Dans le talon, il est souvent nécessaire de renforcer sa résistance mécanique afin qu'il ne cède pas à la poussée du basculement.

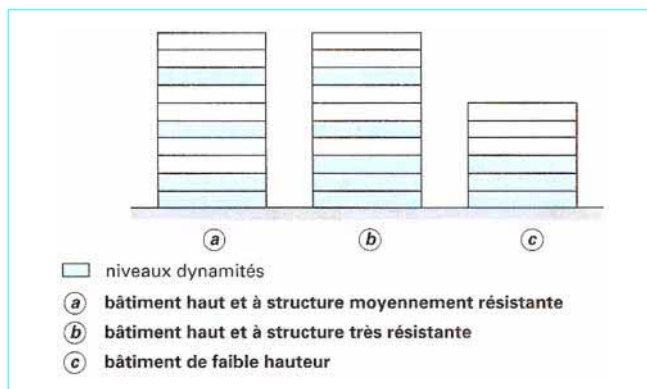


Figure 5 – Exemples de niveaux à dynamiter

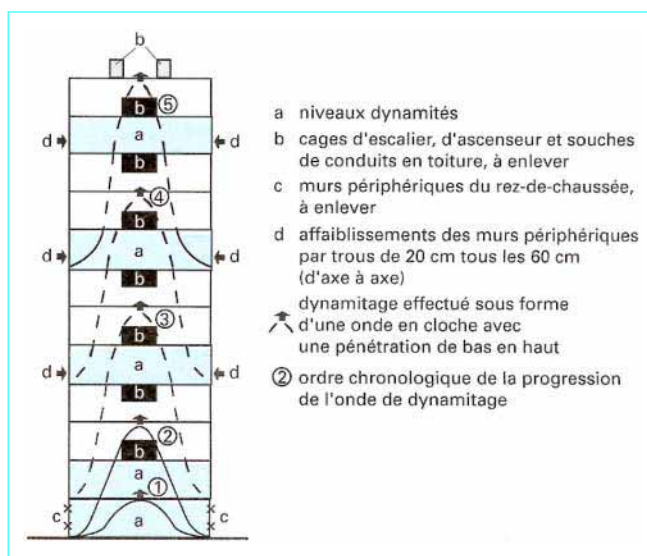


Figure 6 – Isochrones des explosions

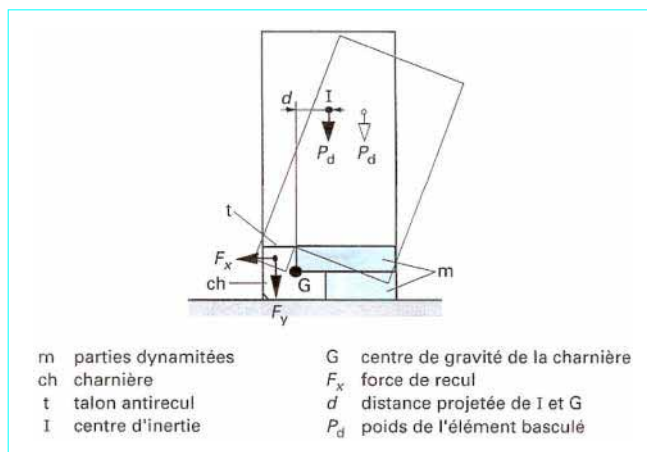


Figure 7 – Démolition par basculement

3.1.3 Type mixte ou semi-foudroyage

Le type mixte est une combinaison et une conjugaison simultanées des démolitions par foudroyage et par basculement (figure 8), avec les contraintes propres aux deux méthodes déjà décrites.

3.2 Préparation des niveaux minés

3.2.1 Affaiblissements mécaniques des niveaux minés et dégraissages

3.2.1.1 Équipements et parois légères

Tous les niveaux (ou parties de niveaux) à dynamiter seront vidés des cloisons, portes, sanitaires, etc. La démolition de ces éléments sera réalisée à la masse, au chalumeau et si nécessaire avec des marteaux piqueurs, des tronçonneuses, etc.

Les ascenseurs seront descendus au rez-de-chaussée et évacués du bâtiment.

Les gravois seront jetés au sol par les fenêtres ou des trémies du type cage d'ascenseur.

3.2.1.2 Parois lourdes (porteurs)

Dans les niveaux à miner débarrassés des cloisons, etc., il sera procédé à l'affaiblissement des murs porteurs (figure 9a) suivant les plans du bureau d'étude. Ceci, afin de réduire les parois lourdes en piliers trumeaux de largeurs 55, 115, 165 ou 215 cm qui seront ensuite forés de 2 ou 3 trous pour le dynamitage.

Ces affaiblissements sont réalisés au moyen de pelles « job » (ou équivalentes) de 1,3 t équipées de marteaux piqueurs hydrauliques (BRH). Le travail au BRH ne devra pas se faire avec flexion de la pointe. De plus, le béton sera cassé par petites plaques.

Le rendement moyen de tels engins est voisin de :

8 à 12 m²/j et par pelle

(25 à 30 m²/j par pelle BRH de 2,5 t utilisable en rez-de-chaussée)

Si les parois lourdes sont constituées de piliers et de remplissages, ces derniers seront cassés par les moyens déjà décrits. **En aucun cas, les piliers porteurs ne devront être détruits.**

Les engins motorisés seront montés en étage au moyen d'une grue mobile et entrés par une ouverture réalisée en façade.

De plus, si les calculs de l'étude ont montré que la tenue au vent du bâtiment n'est pas assurée après les affaiblissements, le contreventement devra être assuré par des madriers en croix de St-André disposés dans les ouvertures critiques (figure 9b).

Ces croix de St-André devront être implantées au fur et à mesure des travaux d'affaiblissements, et non après ces derniers.

3.2.2 Nettoyage des niveaux affaiblis

Le nettoyage du niveau sera réalisé afin de faciliter la perforation et le minage.

Les moyens à mettre en œuvre pour le nettoyage de 200 m² de plancher seront :

- un Bobcat pour pousser les gravois vers : soit une ouverture réalisée en façade ou une trémie, soit, exceptionnellement, une ouverture en milieu de plancher. Les gravois poussés en façade tomberont sur le sol de l'aire du chantier alors que ceux poussés dans le trou du plancher pourront rester dans l'étage inférieur du niveau préparé à condition d'être bien répartis sur le plancher récepteur ;
- un chalumiste pour la découpe des aciers des affaiblissements ;
- un balayeur.

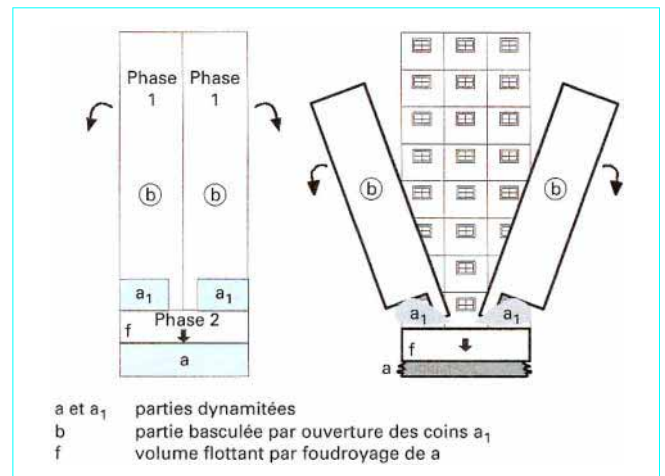


Figure 8 – Démolition par semi-foudroyage

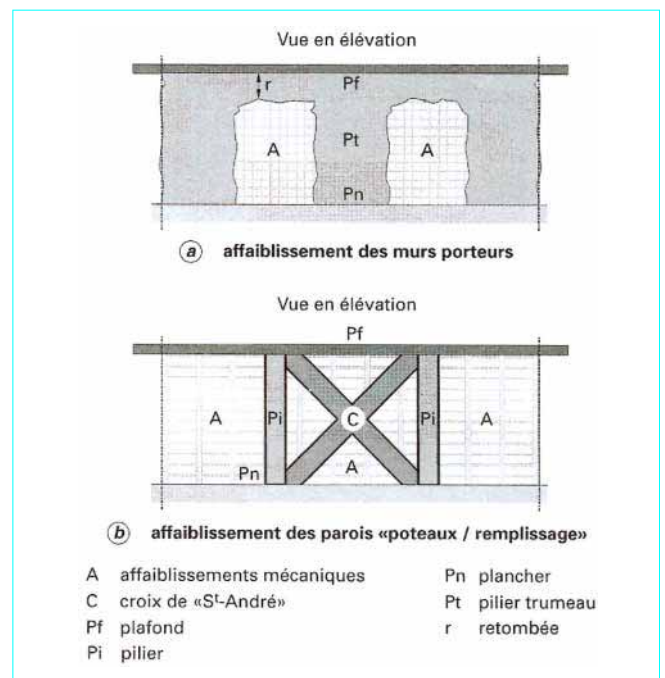


Figure 9 – Affaiblissement des niveaux minés

3.2.3 Perforation

3.2.3.1 Piliers trumeaux

Les poteaux trumeaux des voiles porteurs affaiblis seront forés de 2 trous dans les étages à dynamiter et en 3 points au rez-de-chaussée ainsi que dans les endroits à forte densité de voiles.

Les trous seront horizontaux, réalisés dans le plus grand plan médian de l'élément à miner.

Leur profondeur sera égale à la largeur L du trumeau moins 7 cm (figure 10).

Les appareils de perforation seront soit des perforateurs électriques, soit des marteaux perforateurs pneumatiques du type T11 ou T18. Pour ces derniers, leur niveau d'huile sera rétabli 2 fois par jour s'ils ne possèdent pas de graisseurs en ligne.

Il sera utile de vérifier que :

- les barres de 80 cm de longueur ont un taillant faisant un trou d'attaque voisin de $\varnothing 34$ mm ;
- les barres de 120 cm de longueur ont un taillant faisant un trou d'attaque voisin de $\varnothing 33$ mm ;
- les barres de 160 cm ou plus de longueur ont un taillant faisant un trou d'attaque voisin de $\varnothing 32$ mm.

Il sera donc nécessaire de contrôler régulièrement l'usure des taillants.

Pour les marteaux perforateurs pneumatiques, il sera utile d'installer sur le chantier des compresseurs de 5 000 L/min qui alimenteront 3 ou 4 perforateurs sous des pressions de 5,5 à 6 bar (consommation du T18 voisine de 1 800 L/min et 1 000 L/min pour le T11), car des pressions $\leq 4,5$ bar ne permettent pas la frappe et des pressions > 6 bar abîment les pistons.

Le rendement moyen de foration avec les T11 et T18 est d'environ :
12m/j à 15 m/j par perforateur et 2 ouvriers

3.2.3.2 Piliers porteurs

Ils seront perforés en utilisant le même matériel que celui de la perforation des piliers trumeaux.

Toutefois :

- pour le rez-de-chaussée et le 1^{er} étage, le nombre de trous dépendra de la hauteur minée H (figure 11) :
 - la profondeur des trous p égalera $2/3$ de la largeur L du poteau,
 - l'écartement des trous e égalera 2 fois l'épaisseur ℓ du poteau,
 - la hauteur minée H égalera au moins 4 à 8 fois l'épaisseur ℓ ;
- pour les étages médians, 2 trous seront suffisants, espacés de 1 m ;
- pour les niveaux hauts, 1 seul trou pourra suffire.

3.2.4 Types de protections

3.2.4.1 Protections sur les éléments minés

Les différentes protections à mettre en œuvre sur les éléments forés sont représentées sur la figure 12.

Il faut noter que :

- les cerclages des protections devront passer à plus de 20 cm des entrées des perforations ; ceci, afin qu'ils ne soient pas cisailés dès l'explosion des charges ;
- le type de protection à mettre en place sur chaque élément miné sera dicté par la sensibilité de l'environnement.

3.2.4.2 Protection en périphérie des niveaux minés

En complément des protections décrites au paragraphe 3.2.4.1, il sera placé en périphérie des niveaux minés :

- **autour des niveaux supérieurs au 1^{er} étage**, une protection de façade simple PFS constituée d'un géotextile ≥ 450 g/m² ;
- **autour des niveaux 1^{er} étage et rez-de-chaussée**, une protection de façade renforcée PFR constituée d'une protection PFS + grillage simple torsion, maille 5×5 cm, fil acier de $\varnothing \geq 2,5$ mm .

Si les 2 niveaux sont protégés par plusieurs longueurs de bande, celles-ci devront se chevaucher et être attachées entre elles ;

- **souvent, autour du rez-de-chaussée**, une protection de façade à renforcement amélioré par merlon PFRAM constituée d'une protection PR + un merlon de terre et gravois disposé en cordon continu éloigné des PFRAM d'au plus de 4 à 6 m.

3.2.4.3 Choix de la distribution des protections à mettre en œuvre en fonction des risques du site

Les types de protections à mettre en œuvre sur le bâtiment à démolir doivent être choisies en fonction de la sensibilité des zones du site.

La figure 13 donne un exemple de solution d'un problème.

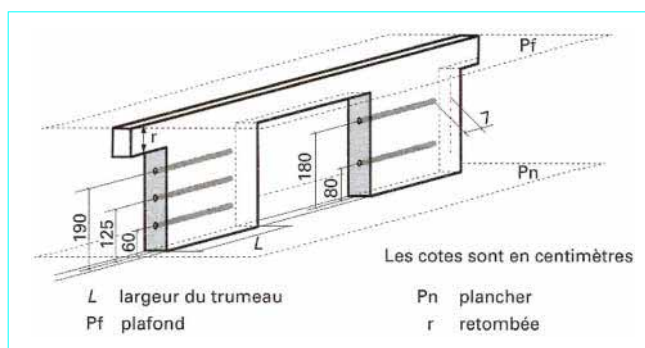


Figure 10 – Pilier trumeau

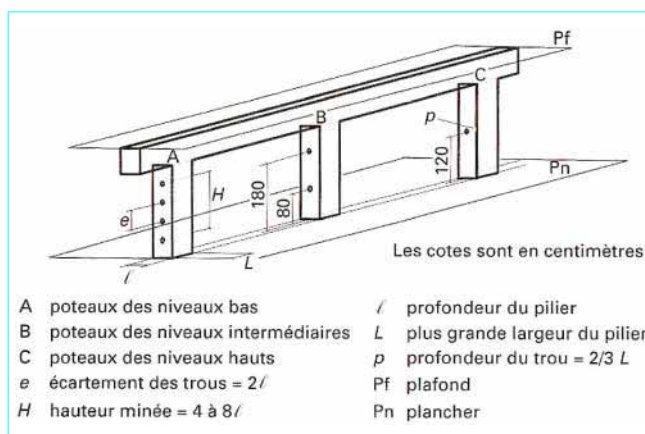


Figure 11 – Pilier porteur

3.2.5 Contraintes liées au minage des éléments à dynamiter

3.2.5.1 Contrôle qualité de la mise en œuvre des explosifs

Le chargement en explosifs des parties minées devra être effectué par des mineurs confirmés de l'entreprise et sous la surveillance d'un ingénieur des mines extérieur à l'entreprise (et non sous la surveillance de l'entreprise ou d'un bureau de contrôle car cette mise en œuvre est trop lourde de conséquences).

Le responsable de qualité (**externe à l'entreprise et non bureau de contrôle**) se limitera au suivi et à la vérification de :

- la préparation des charges en dehors des trous (explosifs + amorces) ;
- la mise en place des charges dans les trous ;
- les bourrages des trous après mise en place de l'explosif ;
- la qualité de la mise en œuvre des cosses relais du circuit électrique de mise à feu ;
- la résistance électrique des lignes des détonateurs et cela jusqu'à l'exploseur ;
- l'utilisation de l'exploseur.

3.2.5.2 Préparation des charges

En fonction du type d'explosif préconisé par le bureau d'études, l'aide de l'artificier confectionnera les charges et leur détonateur sous la responsabilité directe de l'artificier.

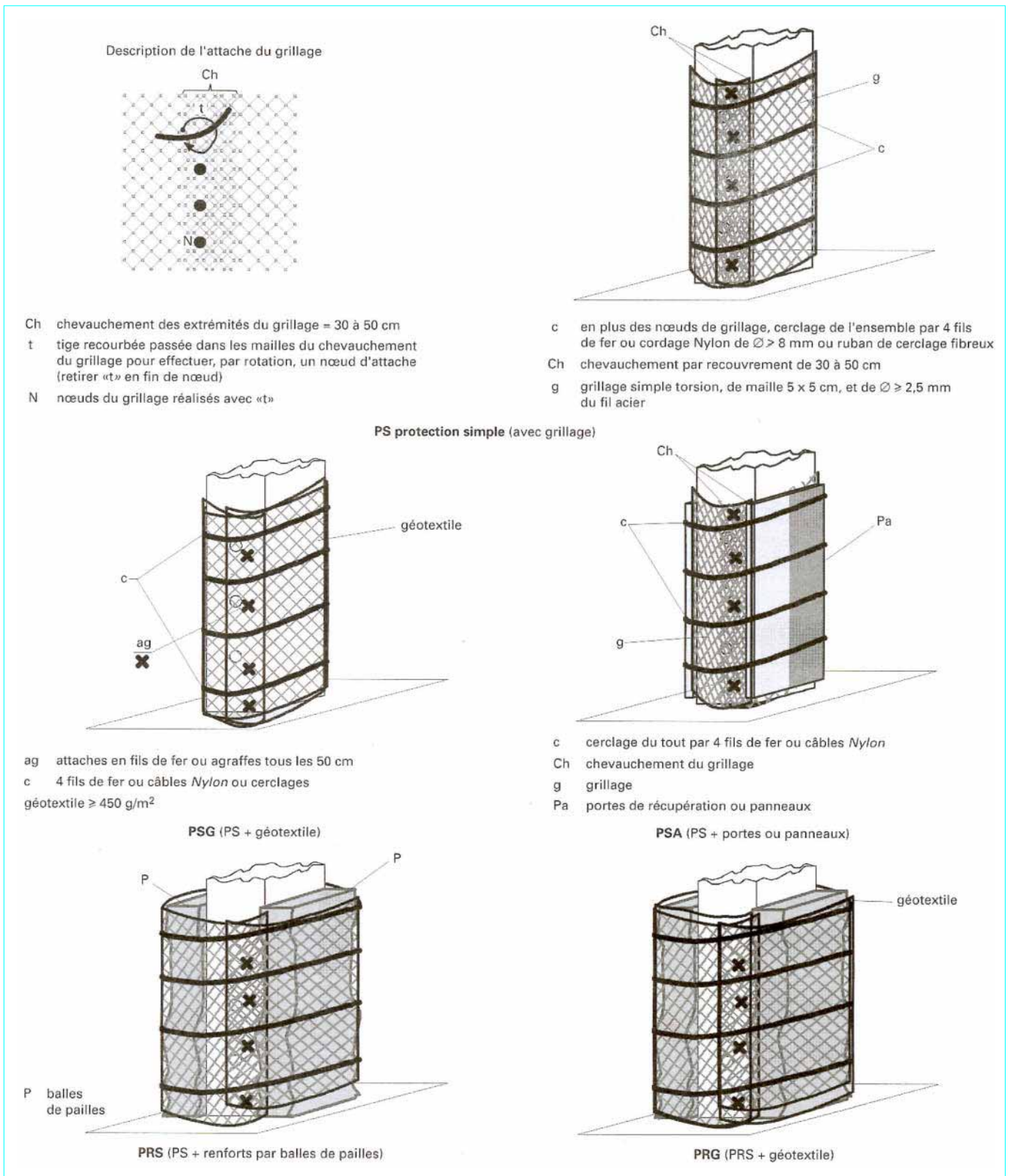


Figure 12 - Protections sur éléments minés

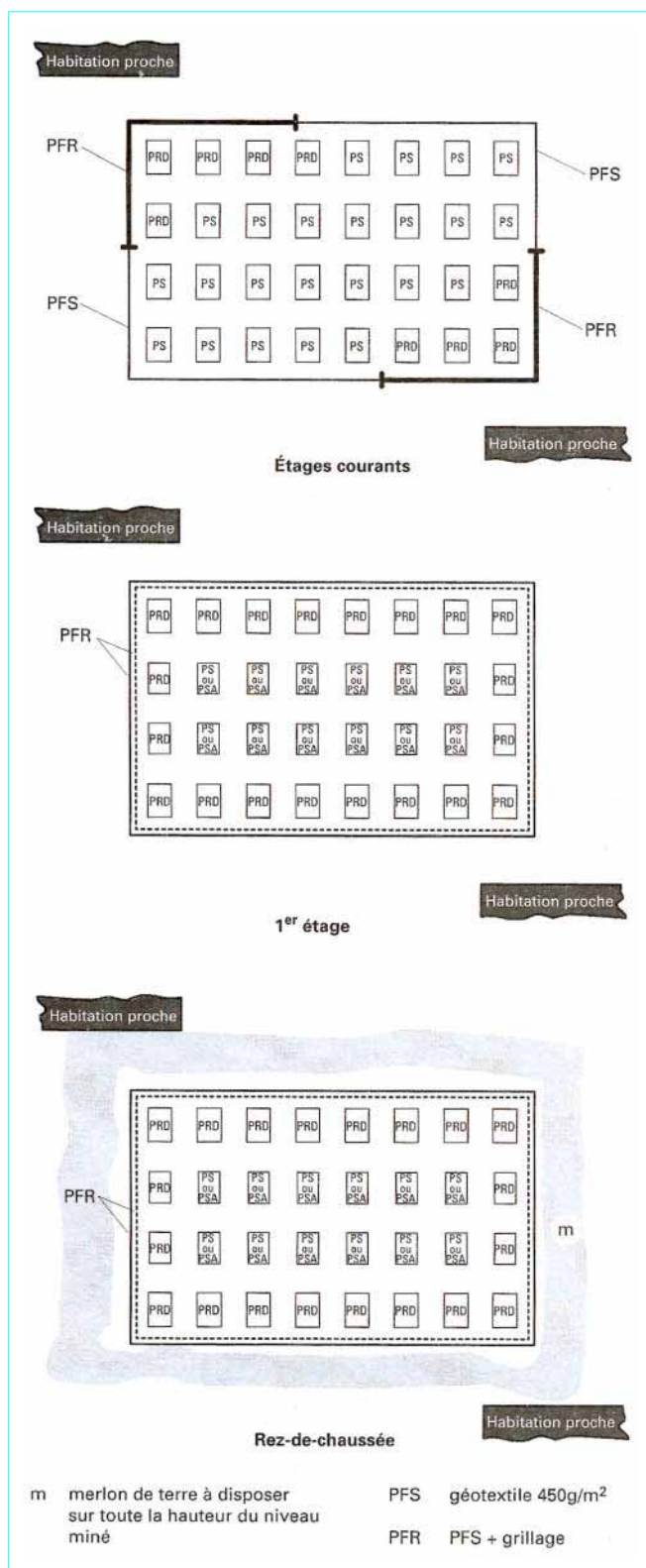


Figure 13 – Protections en périphérie des niveaux minés

3.2.5.3 Mise en place des charges

Les charges avec leurs détonateurs seront placées de façon à ce qu'une extrémité touche le fond du trou. Seules les charges du type dynamite seront légèrement tassées au moyen d'un bourroir non métallique.

En aucun cas les tiges des détonateurs ainsi que les lignes de tirs ne devront toucher des objectifs métalliques (grillage, fers à béton, conduites, etc.).

3.2.5.4 Bourrages des trous

L'espace compris entre la charge et l'entrée du trou sera rempli d'argile bien comprimée. Cette opération se fera avec précaution pour ne pas blesser soit le cordeau détonant, soit les fils des détonateurs sortant du trou.

3.2.5.5 Rendement global des chargements + bourrages + établissements de lignes jusqu'à l'exploseur

10 à 15 trous par mineur et par heure

3.2.5.6 Réglementation

Toutes les réglementations en vigueur devront être respectées.

3.3 Recommandations et détail des éléments des boucles pyrotechniques

3.3.1 Principe général et conseils relatifs à la boucle

La démolition des bâtiments par explosifs demande une mise en œuvre des tirs rigoureuse et sûre. Car un raté des tirs (même partiel) peut avoir des conséquences très dangereuses pour la suite des travaux et très graves sur les environnements urbanisés.

C'est à ce titre qu'il faut **écarter des démolitions tous les systèmes qui présentent** :

— des incertitudes :

- de bon fonctionnement si la vérification de la continuité des circuits de mise à feu est impossible à réaliser,
- de risque de claquages électriques de ligne. À ce sujet, l'emploi des explosifs à très haut voltage de sortie (≥ 2000 V) est à proscrire car la vérification des isolants des fils par rapport à la masse est ici dangereuse à faire sous fortes tensions (figure 14) ;

— des impossibilités de multiplication des initiations des détonateurs comme cela se passe avec les explosifs 1000 V à ligne unique, qui ne permettent pas un fractionnement de la charge globale supérieur à 20.

Les séquentiels électroniques sont les explosifs qui répondent le mieux à ces conseils, c'est-à-dire qu'ils ont :

- 10 lignes de sortie (beaucoup plus avec esclaves) électriques dont la continuité électrique de chacune est facile à vérifier (figure 15) ;
- une tension de ligne de 400 à 500 V.

Les entreprises qui utilisent ces séquentiels doivent :

- posséder un certificat d'étalonnage de l'appareil avec courbes et une attestation de vérification des câbles. L'étalonnage considéré ne doit pas, le jour du tir, être âgé de plus de 15 jours ;
- avoir un appareil (également étalonné) et un jeu de câbles de secours le jour du tir.

Les différentes façons de couplage des charges et détonateurs à mettre en œuvre pour les démolitions sont schématisées par les croquis de la figure 16.

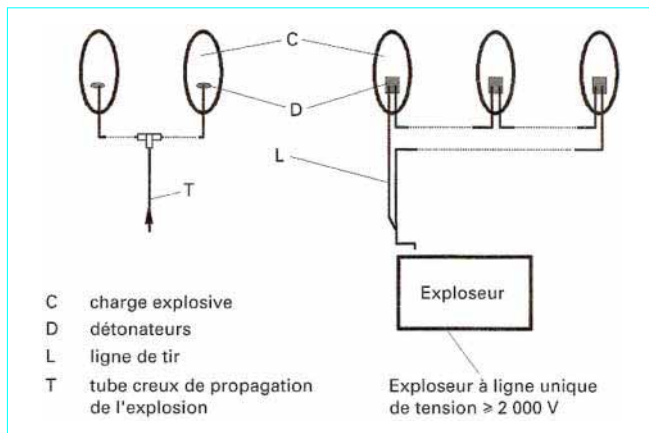


Figure 14 - Boucle pyrotechnique à proscrire

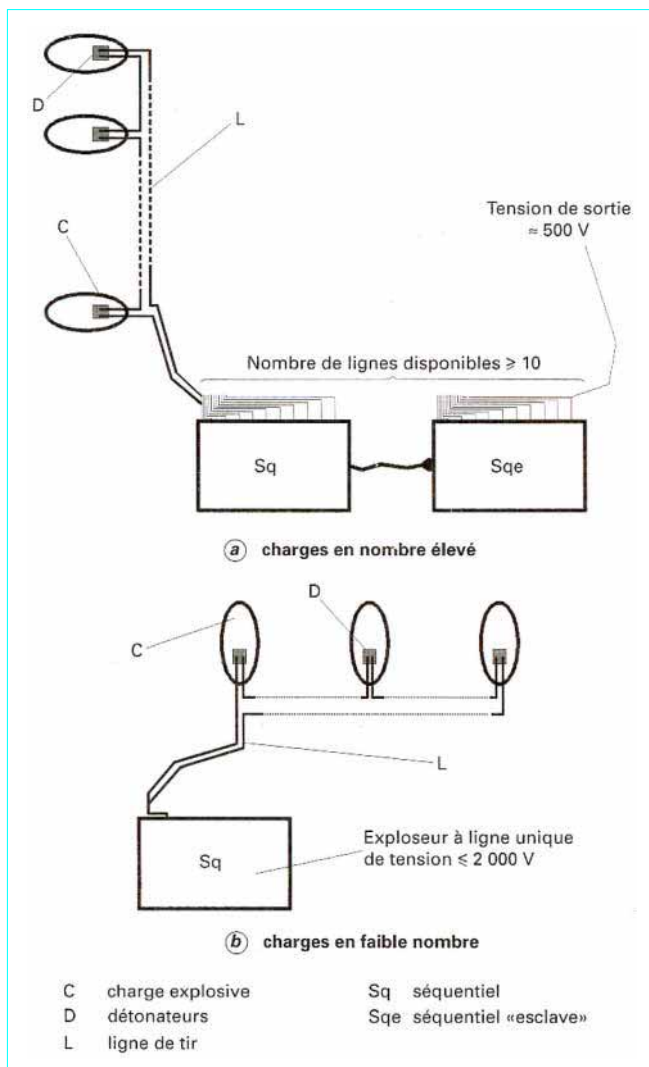


Figure 15 - Boucles pyrotechniques préconisées

3.3.2 Précautions à prendre contre toutes interférences électriques

3.3.2.1 Isolement des lignes de tir par rapport aux éléments de structures

Nous rappelons qu'en aucun cas les lignes électriques reliant les courts retards au séquentiel (y compris les fils des détonateurs) ne devront toucher des éléments conducteurs comme : le grillage de protection, les aciers de béton, les conduites métalliques restantes des niveaux, etc.

3.3.2.2 Types de boucles à réaliser lorsque des courants électriques de fuites ou d'induction sont à craindre

En général, la zone dangereuse engendrée par les courants de fuite est assez limitée. En ce qui concerne les effets de self-induction, il est utile de réduire au minimum la surface *S* délimitée par le circuit. L'exemple de la figure 17 montre ce qu'il faut éviter de faire et ce qu'il est souhaitable de réaliser.

3.3.2.3 Distances minimales à respecter entre lignes de tirs/réseaux électriques et surfaces minimales *S'* recommandées par détonateur

Elles sont données dans le tableau 1.

3.3.2.4 Distances minimales de sécurité pour les détonateurs MI par rapport aux émetteurs radios

Elles sont indiquées dans le tableau 2.

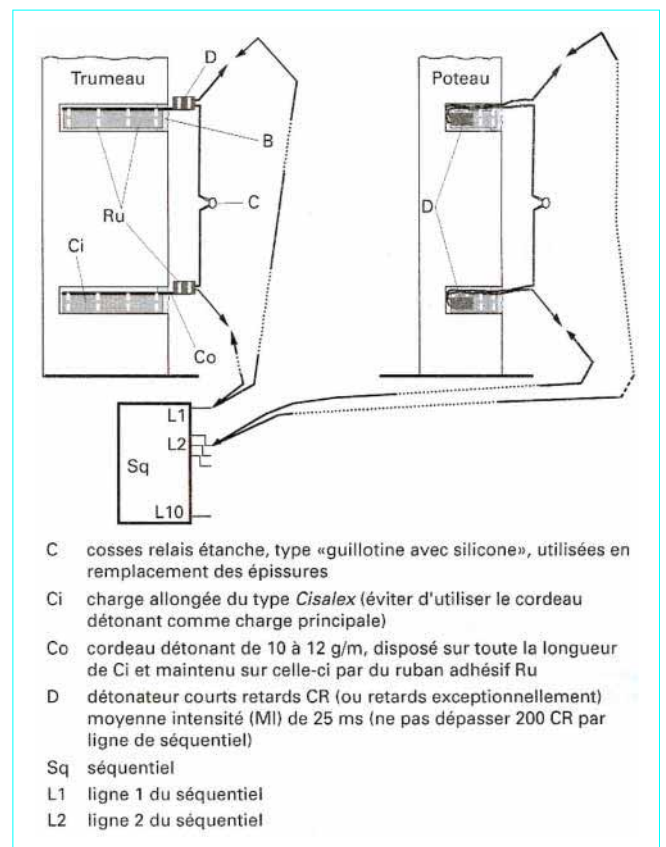


Figure 16 - Couplage des charges et des détonateurs

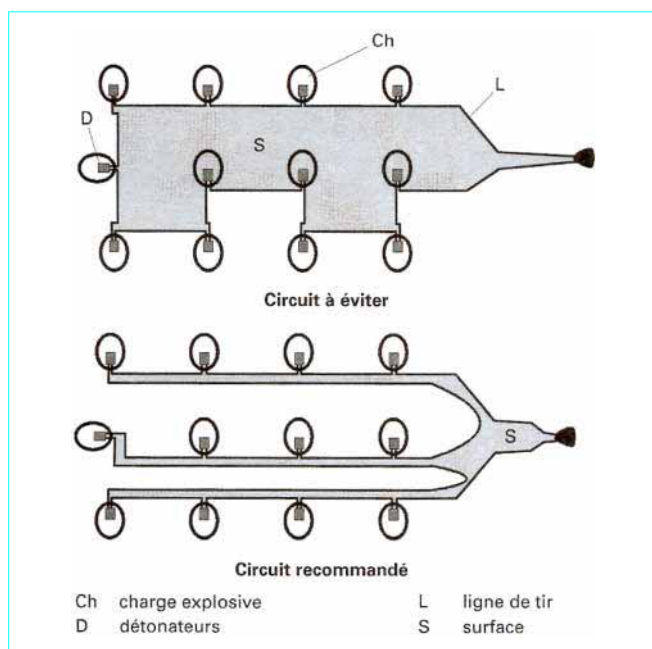


Figure 17 – Boucles à réaliser en cas de courants de fuite ou d'auto-induction

3.3.3 Éléments pyrotechniques de la boucle de mise à feu

3.3.3.1 Explosif

De préférence utiliser, quand cela est possible, les charges allongées type *Cisalex 13* ou *Cisalex 17* car les cartouches non explosées qui resteraient dans le tas des gravois après les tirs sont sans danger (si toutefois les amorces ont explosé) pour le déblaiement, contrairement aux types *NC4* ou *F16*.

Toutes les charges devront être mises en place le jour de leur arrivée sur le chantier. Dans le cas contraire, le surplus doit être retourné au dépôt.

Les principales caractéristiques de ces explosifs sont données dans le tableau 3.

3.3.3.2 Cordeaux détonants

Les plus utilisés pour les démolitions de bâtiments en béton sont les suivants :

- type : 10 à 12 ;
- charge de pentrite : 10 à 12 g/m ;
- vitesse de détonation : 7 000 m/s ;
- utilisation : initialisation du *Cisalex* ou, dans certains cas, des dynamites.

3.3.3.3 Amorces (détonateurs électriques)

Elles sont utilisées pour amorcer les explosifs brisants et contiennent en général 0,6 g de pentrite comprimée. Elles sont dotées de tiges (fils électriques) de longueur soit 2,5 m ; ou 3,5 m ; ou 5, 6, 7, 8, 10, 12, 20, 30, 50 et 100 m. Ces tiges pourront être coupées afin de diminuer la résistance électrique des lignes.

Tableau 1 – Distance minimale d entre lignes de tir et réseaux électriques, et surface minimale S' par détonateur

Détonateur MI (moyenne intensité)	Type de réseaux			
	≤ 100 kV	> 100 kV	Voies ferrées courant alternatif	Voies ferrées courant continu
d (en m)	25	25	3	2
S' (en m ²)	3	4	0,5	1
$S' = S/n$				
avec S surface totale de la boucle ligne de tir				
n nombre de détonateurs de la ligne de tir.				

Tableau 2 – Distance minimale entre détonateurs MI et émetteurs radio

Puissance des émetteurs (W)	Distance minimale (m)
Mobiles	
1 à 10	1,5
10 à 30	3
30 à 60	4,9
60 à 250	9,15
Fixes	
5 à 25	30
25 à 50	45
50 à 100	66
100 à 250	105
250 à 500	135
500 à 1 000	195
1 000 à 2 500	300
2 500 à 5 000	450
5 000 à 10 000	660
10 000 à 25 000	1 050
25 000 à 50 000	1 500
50 000 à 100 000	2 100

Tableau 3 – Principales caractéristiques des explosifs

Type d'explosif	Cisalex nitraté		NC4 (dynamite)			F16 (dynamite)		
	13	17	290	380	155	380	360	260
Longueur de la cartouche (mm)	500	500	290	380	155	380	360	260
Ø extérieur (mm)	13	17	40	25	25	60	50	30
Charge (en g)	52	95	500	250	100	1 560	1 000	250
Vitesse de détonations (m/s)	4 150	4 350	5 000 à 5 600				5 700	5 600

Elles sont disponibles :

— en **courts retards (CR)**, c'est-à-dire que le retard entre deux numéros successifs est en général de 25 ms pour les amorces numéros 0 à 20, et en :

- moyenne intensité (MI),
- haute intensité (HI),
- très haute intensité (super HI) ;

— en **retard (R)**, c'est-à-dire que le retard entre deux numéros successifs est en général de 500 ms pour les amorces numéros 0 à 12 et sont disponibles en :

- moyenne intensité (MI),
- haute intensité (HI),
- très haute intensité (super HI).

Toutefois, nous rappelons que seuls les MI sont utilisés pour les tirs de bâtiments effectués au moyen d'un séquentiel car le nombre de courts retards par ligne est toujours très important.

Remarque importante

Pour les tirs de bâtiments où seuls les MI seront utilisés, le premier numéro de court retard utilisé sur les lignes du séquentiel devra présenter, par rapport au zéro d'initiation du séquentiel, un retard d'explosion supérieur au temps du balayage électrique de toutes les lignes de l'exploseur. Cela afin d'éviter un raté de tir par coupure précoce des lignes en attente de courant.

3.3.3.4 Exploseur séquentiel

Les démolitions de bâtiments à l'explosif sont réalisées avec un nombre important de points de chargements.

Pour des raisons de sécurité du tir, chaque charge de trou doit être amorcée par un détonateur, l'emploi de cordeau détonant reliant plusieurs points de chargements étant à proscrire.

De plus, les détonations de la rafale des tirs doivent être bien réparties afin que les surpressions de l'onde aérienne n'engendrent pas de bris de vitres.

L'expérience montre que les retards nécessaires entre amorces doivent s'échelonner entre 4 ms et 500 ms. Il est évident que les explosions présentant des écarts d'initiations $dt < 17$ ms doivent être éloignées les unes des autres à cause de la fourchette de précision des détonateurs.

Exemple : deux mini-explosions à $dt = 6$ ms sont à situer, dans le bâtiment à démolir, l'une côté pignon gauche, l'autre côté pignon de droite, et non l'une à côté de l'autre. Car, dans ce dernier cas, il serait impossible d'assurer, avec certitude, que les détonateurs courants (précis à ± 10 ms, suivant les numéros) explosent avec la chronologie d'amorçage donnée par le bureau d'étude.

Nous savons également que les détonateurs MI sont disponibles sur le marché sous un conditionnement de 20 numéros, c'est-à-dire que la charge totale d'explosif d'une démolition ne peut être fractionnée qu'en 20 parties si les amorces sont mises à feu au moyen d'un exploseur à 1 seule ligne de sortie. Ceci ne serait pas raisonnable. Il est donc nécessaire de tirer l'explosif d'un bâtiment avec un exploseur à plusieurs lignes dont le retard du passage de courant entre elles peut être modifié. C'est ce type d'appareil, appelé **séquentiel**, qui devra être retenu pour l'abattage des bâtiments par explosif, sachant que le fractionnement de la charge totale de la démolition sera égale à :

$$20 \times \text{nombre de lignes du séquentiel}$$

Les séquentiels utilisés dans les foudroyages comportent 10 lignes de sortie. Le découpage est donc égal à 200.

Depuis 2 ans, Nobel France dispose d'esclaves également à 10 lignes de sortie qui se jumellent au séquentiel. Le découpage de la charge totale de la démolition devient alors égale à :

$$20 \times 10 (1 + \text{nombre d'esclaves})$$

La solution n'est pas infinie car en pratique, pour les démolitions, le nombre de numéros de détonateurs utilisables diminue quand le nombre des exploseurs mis en œuvre augmente.

En effet, pour qu'un tir présente toute la fiabilité recherchée, il est impératif que la première explosion se fasse après le passage du courant dans toutes les lignes des exploseurs. Cela restreint la série des détonateurs à mettre en œuvre. Si cette façon de faire est respectée, tous les détonateurs du tir sont alors déjà initiés au moment de la première explosion. Il s'ensuit que les éventuelles coupures de lignes électriques (qui seraient faites par les projections de la première explosion) n'auraient aucune conséquence sur la suite du tir puisque la poudre retard de chaque amorce serait en phase de combustion.

Exemple : mise en œuvre d'un séquentiel de 10 lignes de sortie, avec pas de retard entre ligne réglé à 10 ms :

- courant dans ligne 1, temps 0 ;
- courant dans ligne 2, temps 10 ms ;
- courant dans ligne 3, temps 20 ms ;
- courant dans ligne 10, temps 90 ms.

Le numéro le plus bas des détonateurs à retard de 25 ms utilisable avec sécurité sera donc le **numéro 4**.

Dans ces conditions, la 1^{re} explosion a lieu à : 4×25 ms = **100 ms** de l'initiation de la 1^{re} ligne du séquentiel, c'est-à-dire après le parcours du courant dans les 10 lignes du séquentiel qui, lui, ne dure que **90 ms**.

Précaution à prendre

Lorsqu'une ligne du séquentiel ne contient que peu de détonateurs et présente donc une résistance électrique inférieure à 15 Ω , il est prudent d'insérer une résistance de 50 Ω dans la ligne concernée.

Mais attention, cette résistance ne doit pas être placée sur les bornes reliées au fil commun du séquentiel.

3.4 Surveillance du chantier

Avant le commencement des travaux de la préparation du bâtiment, il sera important d'établir un plan de surveillance efficace du chantier et de renforcer cette surveillance dès l'arrivée des explosifs sur le site.

Le premier plan prendra en compte la mise en place d'une clôture du chantier réalisée en bas acier de 2 m de hauteur qui passera à plus de 2 m de tout élément pouvant être escaladé (arbre ou banc contre clôture, cabine téléphonique, etc.). Ceci limitera les idées de vandalisme.

Un espace minimal de 20 m sera laissé entre le bâtiment et la clôture.

Une sonnette sera installée à l'entrée de la clôture. Elle sera reliée au bureau de chantier où se tiendra :

- un responsable de l'entreprise le jour ;
- un vigile avec chien la nuit.

Dès l'arrivée des explosifs sur site, le gardiennage sera renforcé de la façon suivante :

- **le jour** : 1 vigile avec chien assisté de 2 gardiens de l'entreprise ;
- **la nuit** : au moins 2 vigiles avec chiens accompagnés de 2 gardiens de l'entreprise.

Les personnes qui assureront les gardes devront être reliées à un poste de police au moyen d'un téléphone. De plus, ces personnes devront disposer d'un éclairage de toutes les façades et pignons du bâtiment lorsque ce dernier commence à être chargé d'explosifs (figure 18).

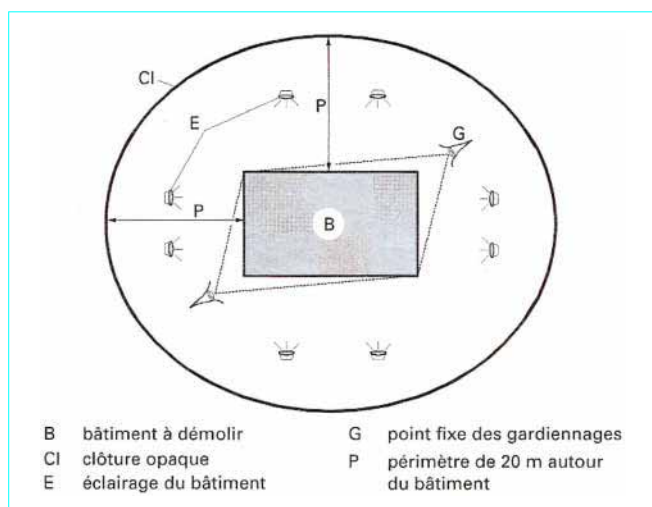


Figure 18 – Surveillance du chantier

3.5 Traitement des gravois de la démolition

3.5.1 Mise en décharge des gravois

Les matériaux de la démolition seront :

— si le bâtiment ne contient pas de l'amiante :

- soit amené en décharge de classe 3 à condition qu'il n'y ait pas des éléments de classe 2 et 1 (plâtre, bois, etc.) dans les gravois,
- soit recyclés après enlèvement de tout élément autre que le béton ;

— si le bâtiment contient de l'amiante, celle-ci sera retirée avant tous travaux et apportée en décharge de :

- classe 2, si l'amiante est du type en plaque,
- classe 1, si l'amiante est du type pulvérulente.

Remarque : il faut signaler toutefois aux entreprises que beaucoup de décharges de classe 2 ne prennent plus les produits amiantés du type en plaque.

Ensuite, les matériaux de la démolition seront :

- soit mis en décharge de classe 2 ou 3 ;
- soit recyclés après enlèvements de tout élément autre que le béton.

La définition générale des décharges est la suivante :

- classe 1 : déchets hautement polluants (amiante pulvérulente, hydrocarbures, etc.) ;
- classe 2 : plâtre, bois, amiante en plaque, etc. ;
- classe 3 : béton déferpillé.

3.5.2 Moyens d'évacuations

L'évacuation des gravois à enlever peut être faite en considérant que :

- les matériaux à transporter ont un foisonnement compris entre 1,3 et 1,7 fois le volume réel du béton en place ;
- les capacités des engins de transport sont de :
 - 9,5 m³ par semi-remorque,
 - 5 à 6 m³ par 6 × 4.

3.5.3 Recyclage du béton

Le béton des bâtiments ne contenant pas du plâtre peut être recyclé après enlèvement du bois, des recouvrements de sol plastique, des éléments ferreux, des éléments textiles, etc. Cet enlèvement peut être fait avant démolition ou par tri, après démolition.

Le coût moyen du recyclage par une centrale mobile est de (en 1997) :

$$100 \text{ à } 120 \text{ F/m}^3 + \text{ amenée-repli de la centrale} = 10\,000 \text{ F}$$

Le rendement moyen du concassage est de :

- 150 m³/j pour béton préparé au BRH sur le chantier ;
- jusqu'à 400 m³/j pour le béton préparé au BRH + pince à broyer.

3.5.4 Bâtiments à ossatures métalliques

Pour ces bâtiments, rencontrés surtout en industrie, il faut prévoir un rendement moyen de 30 t/j et maxi de 50 à 60 t/j pour 1 personne, 1 pince mobile et des bâtiments de hauteur inférieure à 35 m.

3.6 Principales nuisances

3.6.1 Poussière

Le volume de celle-ci est très important. Il est donc recommandé de tenir les fenêtres des habitations voisines de la démolition fermées, car les assureurs préfèrent payer le remplacement des vitres cassées qu'un dépoussiérage des appartements.

La vague de poussière ne déferle que pendant les cinq minutes qui suivent l'écrasement de l'ouvrage. Son parcours peut atteindre 300 m (ou plus suivant le vent), mais seuls les 100 premiers mètres de sol sont recouverts de 2 à 5 mm de particules lourdes. Au-delà de 200 m, le nuage poussiéreux a l'aspect d'un voile de fumée.

3.6.2 Onde de choc aérienne

Dans les tirs bien étudiés, cette onde de choc reste faible au-delà de 30 m (pression toujours inférieure à 5 kPa).

Un calcul de la pression aérienne conditionnera donc le choix de la charge explosive unitaire (plus forte charge pour une unité de micro-retard) à mettre en œuvre afin que les vitres des fenêtres les plus proches ne soient pas brisées. Dans le cas où un doute subsisterait, il serait nécessaire de procéder au bâchage des façades exposées et distantes de moins de 50 m du tir.

La pression à craindre en fonction de la charge unitaire Q et de la distance d peut être estimée par la formule CEBTP-Cemerex suivante :

$$P_s = 46,3 (d/Q^{1/3})^{-1,2}$$

avec P_s en kPa, Q en kgf, d en m.

Sachant que, généralement, pour :

- 14 kPa, toutes les vitres se cassent ;
- 5 kPa, quelques panneaux de vitres mal montés se brisent ;
- 1 kPa, les panneaux de vitres précontraints ou mal montés se cassent ;
- 0,2 kPa, les vitres et les assiettes vibrent.

3.6.3 Bruit

Le bruit est important et mal ressenti par les personnes situées sur un rayon de 150 m si celles-ci sont surprises par l'explosion (d'où la nécessité d'une diffusion par haut-parleur du décompte du tir).

Pour les distances proches de l'explosion (inférieures à une cinquantaine de mètres), le bruit ressenti est assimilable au bruit d'un coup de fusil perçu par l'oreille d'un chasseur tirant sur un gibier.

3.6.4 Projections de matériaux

Les projections de matériaux sont principalement de deux types :

— **projections inhérentes aux parties minées** (type 1). Ces projections de matériaux dépendent du sérieux des protections mises en place, c'est-à-dire, du savoir-faire de l'entreprise qui exécute les travaux.

La meilleure protection actuelle est réalisée à l'aide de balles de paille + grillage + géotextile autour des parties dynamitées et à la pose, extérieurement sur les ouvertures périphériques des niveaux minés, d'un grillage recouvert de géotextile. **Ce type de projection reste donc maîtrisable ;**

— **projections inhérentes à l'éclatement au sol du béton des cellules non dynamitées** (type 2). Ces projections de faibles volumes peuvent aller jusqu'à 150 m et leurs directions restent imprévisibles ; c'est pourquoi, au moment du tir, une zone de 150 à 200 m autour de la démolition devra être neutralisée, c'est-à-dire, évacuée avant le tir.

3.6.5 Vibrations solidiennes engendrées dans le sol

Ces vibrations restent faibles et l'amplitude ne dépasse guère, à 20 m, les 30 mm/s pour les basculements et 10 mm/s pour les foudroyages du type intégral.

3.7 Inventaire et évaluation des difficultés des démolitions

■ Classification de la difficulté d'une démolition

Cette classification, que l'on peut faire par les lettres et les chiffres que l'on propose dans les tableaux qui suivent, considère les difficultés de la démolition en fonction :

- du site de construction, situation : A, B, C (tableau 4) ;
- des éléments de construction (brique, béton, etc.) (tableau 5) ;
- du nombre de niveaux du bâtiment (cas 1, 2, 3, 4) (tableau 6) ;
- de la position des noyaux durs de la construction (catégorie : a, b, c, d) (tableau 7) ;
- de l'orientation principale des murs porteurs de la construction par rapport à une éventuelle charnière (type r, p ou n) (tableau 8).

Une classification des difficultés des démolitions est nécessaire pour diriger le démolisseur vers le choix judicieux du type de démolition qu'il aura à proposer.

Tableau 4 – Classification des difficultés de démolition en fonction des sites

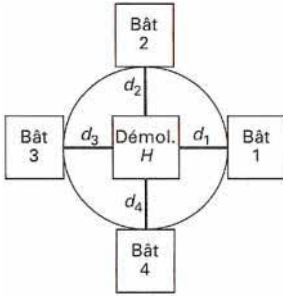
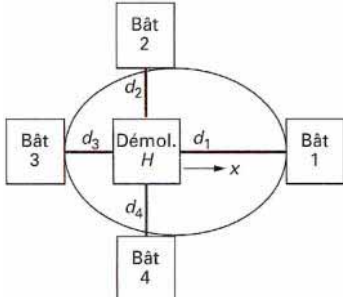
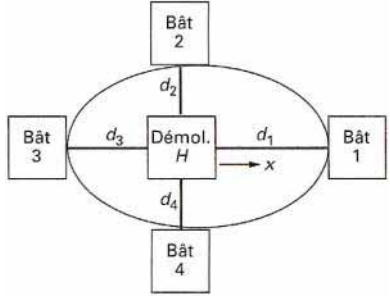
Situation A	Situation B	Situation C
 <p>$d_1 = d_2 = d_3 = d_4 \geq \frac{H}{3 \text{ à } 4}$</p> <p>Foudroyage</p>	 <p>$d_4 = d_2 \geq 20 \text{ m}$</p> <p>$d_3 \geq 5 \text{ m}$</p> <p>$d_1 \geq H + \text{largeur du toit}$</p> <p>x = direction du basculement</p>	 <p>$d_4 = d_2 \geq 20 \text{ m}$</p> <p>$d_3 \geq 15 \text{ m}$</p> <p>$d_1 \geq H/1,8$</p> <p>x = direction du basculement</p>
CHOISIR	CHOISIR	CHOISIR
— foudroyage rapide à la française (<i>très précis si tir bien équilibré et nombres de niveaux dynamités suffisants</i>).	— basculement vers x avec charnière au niveau du rez-de-chaussé (<i>ce type de basculement peut avoir un recul très faible</i>).	— basculement vers x avec charnière sur niveau haut pour rendre la partie basculée compatible avec la place disponible d sur le site (<i>ce type de basculement a un recul d'autant plus important que la charnière est haute</i>).
	— ou foudroyage lent (à l'américaine) avec direction privilégiée vers x.	— ou foudroyage lent (à l'américaine) avec direction privilégiée vers x.

Tableau 6 – Classifications des difficultés de démolition des habitations en béton en fonction du nombre des niveaux et du choix d'abattage

		Foudroyage			
Types rencontrés		Vues en élévation		Vues de la distribution des cellules par niveaux	
		<p>Cas 1</p>	<p>Cas 2</p>	<p>Type "a"</p>	<p>Type "b"</p>
Difficulté d'un démantèlement	Mécanique	Facile	Très difficile sauf si l'emploi de boule est autorisé	Facile en cas 1	Facile en cas 1
	Explosions	Difficile même après affaiblissement mécanique	Facile après affaiblissement mécanique	Facile après affaiblissement mécanique	Moyennement difficile après affaiblissement mécanique
		Basculement			
Types rencontrés		Vues en élévation		Vues des différentes distributions des cellules par niveaux	
		<p>Cas 3</p>	<p>Cas 4</p>	<p>Type "b"</p>	<p>Type "c"</p>
Difficulté d'un démantèlement	Mécanique	Déconseillé	Déconseillé		
	Explosions	Moyennement conseillé si les bâtiments sont dégagés	Fortement conseillé si les bâtiments sont dégagés	Facile pour le cas 4, difficulté pour le cas 3	Très difficile pour les cas 3 et 4

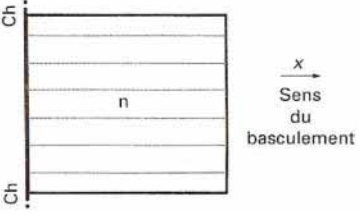
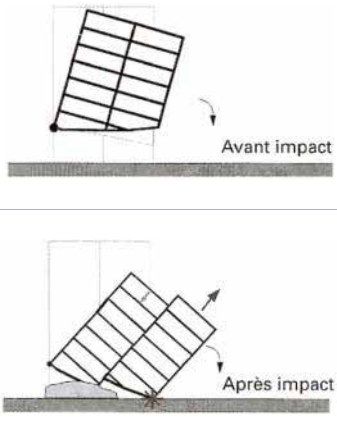
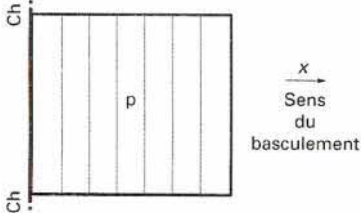
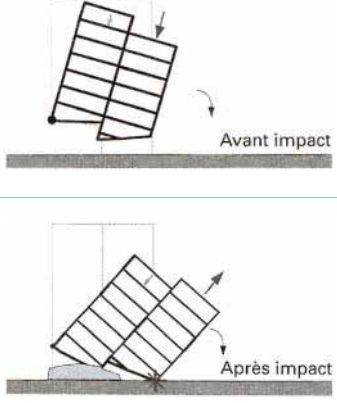
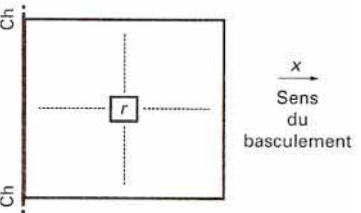
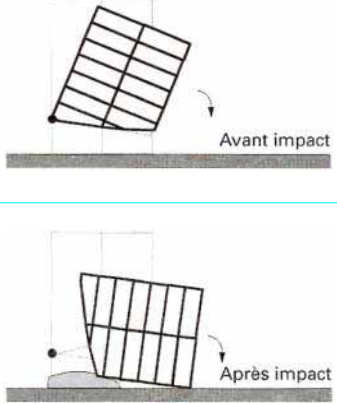
Tableau 7 – Classifications des catégories et des types de difficultés en fonction de la distribution interne des parois porteuses et des points durs

Distribution des noyaux durs et des voiles intérieurs	Foudroyage				Basculement à charnière basse	
	Catégorie	Type	Facilité	Aspect des gravois	Facilité	Aspect des gravois
	a	r	facile		Moyennement difficile pour bâtiment $H \geq R + 8$	
					Très difficile pour bâtiment $H < R + 8$	
	b	p	moyen		Facile pour bâtiment $H \geq R + 8$	
					Moyennement difficile pour bâtiment $H < R + 8$	
	b	n	moyen		Très facile pour bâtiment $H \geq R + 8$	
					Assez facile pour bâtiment $H < R + 8$	
	c	p	moyen		Difficile pour bâtiment $H \geq R + 8$	
					Très difficile et déconseillé pour bâtiment $H < R + 8$	
	c	n	moyen		Moyennement difficile pour bâtiment $H \geq R + 8$	
					Très difficile pour bâtiment $H < R + 8$	
	d	p	moyen		Difficile pour bâtiment $H \geq R + 8$	
					Très difficile pour bâtiment $H < R + 8$	
	d	n	moyen		Moyennement difficile pour bâtiment $H \geq R + 8$	
					Très difficile pour bâtiment $H < R + 8$	

GH bâtiment de grande hauteur x direction éventuelle du basculement n distribution parallèle r distribution rayonnante Ch charnière
 FH bâtiment de faible hauteur d°r degré relatif de recul avec Ch basse p distribution perpendiculaire H hauteur du bâtiment

Remarque : degré relatif de recul, si les charnières sont bien renforcées : $d°r = 0$; pour les charnières non renforcées hautes : $4 m \leq d°r \leq H$

Tableau 8 – Aspect particulier des cisaillements des bâtiments en cours de basculement

Type de distribution des murs porteurs	Facilité	Aspect du basculement
<p>Distribution type « n » (normale à la charnière)</p>  <p>Ch charnière</p> <p>Basculement assez sûr, sans nécessité d'un important élingage de la façade arrière sur les planchers avant</p>	<p>Peu d'effet de cisaillement du bâtiment en début de basculement</p> <p>Cisaillement à l'impact avec écrasement arrière plus rapide que celui de la partie avant cisailée</p>	
<p>Distribution type « p » (parallèle à la charnière)</p>  <p>Basculement très difficile nécessitant un important élingage</p>	<p>Cisaillement du bâtiment avant l'impact, suivi d'une descente rapide de la partie cisailée qui peut se planter et bloquer le basculement</p> <p>L'écrasement de la partie avant cisailée diminue alors que celle de la partie arrière augmente</p>	
<p>Distribution type « r » (rayonnante)</p>  <p>Basculement facile pour les bâtiments de grande hauteur et très difficile pour les basculements de hauteur $\leq R + 8$</p>	<p>Presque pas de cisaillement avant l'impact</p> <p>Si le bâtiment est de faible hauteur, celui-ci peut carrément se coucher (et non planter) sur le sol</p>	

Ainsi, d'après les repères des tableaux qui suivent, l'évaluation des difficultés de la démolition sera à étudier et à définir simplement par 5 termes.

Exemple : une construction à démolir de hauteur H :

- entourée de bâtiment à des distances $d \geq H/4$ (situation A) ;
- à murs ou poteaux en béton (béton) ;
- à hauteur $H >$ à 8 niveaux (cas 2) ;
- à noyau dur côté arrière (catégorie b) ;
- à distribution des murs porteurs parallèles à l'arrière (type p) sera définie pour l'étude par la classification suivante :

A, béton, 2, b, p

Remarque importante : il ne faudra jamais perdre de vue que :

- a) pour les foudroyages (et souvent les basculements) : **les noyaux durs devront être plus fortement minés** ;
- b) pour les basculements sans renforcement de charnière et sans câbles antirecul :
 - le bâtiment va, presque toujours, reculer de quelques mètres au cours du basculement ;
 - dans la plupart des cas, des cellules entières de logements se retrouveront couchées et entières (mais très fissurées) sur les gravois. Et cela, d'autant plus que le bâtiment serait de faible hauteur.

3.8 Exemple de la démolition de la tour Bertrand à Lille

3.8.1 Caractéristiques de la tour

Elles sont les suivantes (figure 19) :

- hauteur : 63 m ;
- surface au sol : 39 m × 15 m ;
- un pignon entrant de 2,5 m dans une école R + 2 ;
- l'autre pignon situé à 20 m du métro aérien Val ;
- les façades éloignées des habitations d'une distance voisine de 30 m.

3.8.2 Impératifs de la démolition

Ce sont :

- ne pas toucher l'école ;
- ne pas endommager le métro aérien Val ;
- ne pas créer des désordres sur les habitations voisines.

3.8.3 Choix de la démolition et des exécutants

Les différentes phases du problème et du choix de la démolition retenue sont résumées dans cet exemple.

Pour exécuter cette démolition, mise au point par le laboratoire de Vitrolles, ont été réalisés :

- 2 foudroyages ultra-rapides à la française, côté métro Val, où les gravois pouvaient s'étaler sans problème ;
- 1 basculement à charnière haute sans recul, côté école, de façon à ce que la partie basculée tombe sur les gravois des foudroyages et non sur l'école.

3.8.4 Détail de la démolition, de sa préparation et des simulations

La figure 20 montre :

- les parties A et B foudroyées par explosif ;
- la partie C basculée par explosif (dont la tête du basculement passait à 6 m du métro Val aérien) ;
- la partie D démolie mécaniquement après le tir.

La figure 21 donne le détail de l'aménagement de la charnière. Les figures 22, 23 et 24 indiquent les renforcements locaux réalisés.

Il est évident que la définition de ces préparations découle d'une étude très pointue de simulations analysées par ordinateur.

Les principaux résultats en sont représentés sous forme de courbes et d'images, sur la figure 25, où l'on trouve :

- les courbes de la vitesse de chute du foudroyage et de la dépression créée par la descente des éléments foudroyés. De ces courbes, nous avons déduit la date optimale du tir de l'ouverture du coin nécessaire au basculement, compte tenu :
 - du retard existant entre l'amorce du basculement et la création de cette ouverture (temps d'inertie, lié à la position du centre de gravité de l'élément à basculer, du poids de cet élément et du centre de gravité de la charnière du basculement),
 - de la dépression fugitive créée par la descente du volume foudroyé ; sachant que cette dépression participe, d'une façon non négligeable, à l'aspiration de l'élément basculé ;
 - la courbe des forces composantes qui se développent en pied du basculement en fonction de l'angle que fait ce dernier avec la verticale.

C'est la valeur négative de la composante horizontale maximale de cette courbe qui a permis de dimensionner les éléments antirecul à mettre en place sur la rotule de la charnière pour que la partie basculée ne s'affaisse pas ou ne recule pas sur l'école.

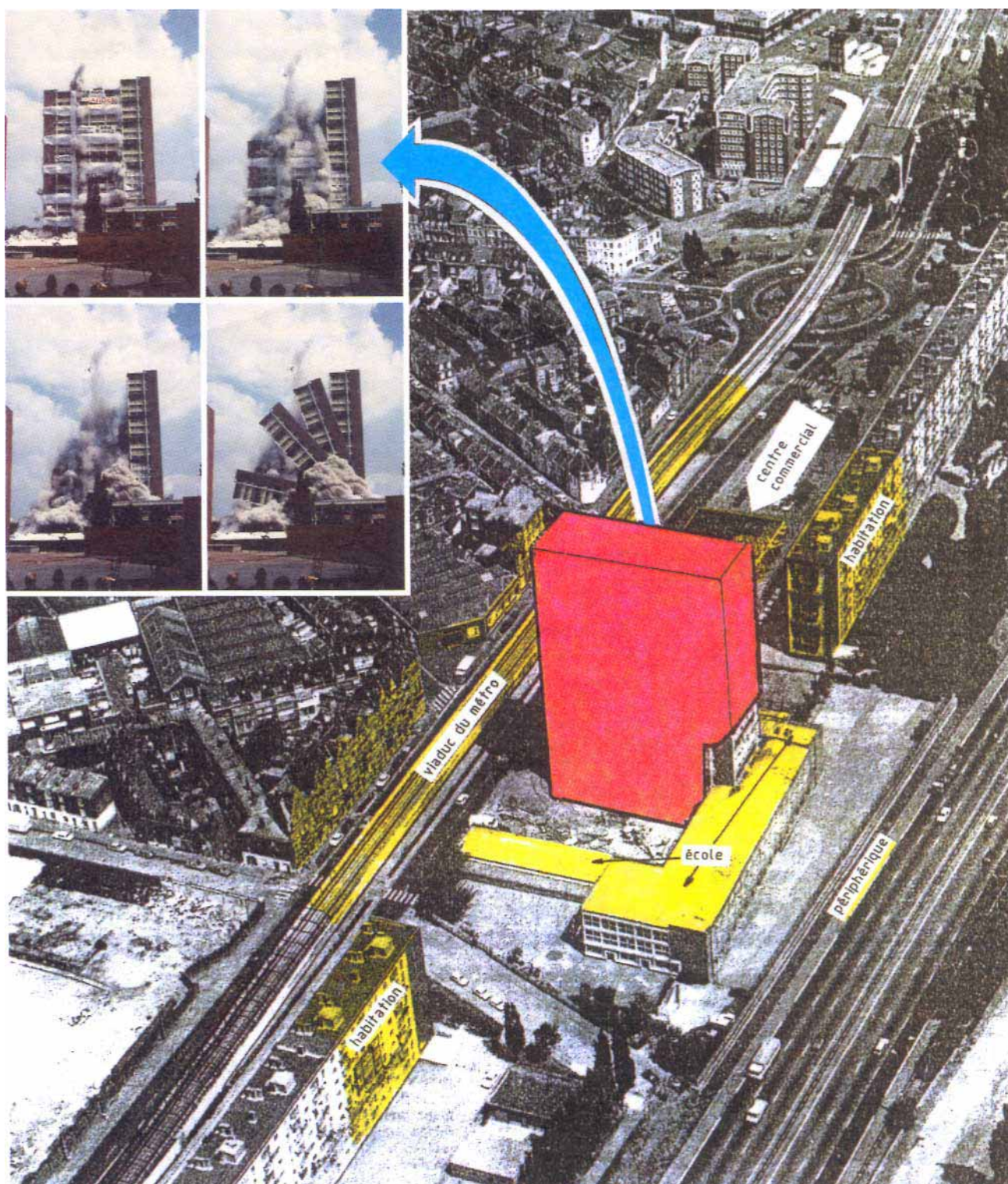


Figure 19 – Situation de la tour et mode de démolition retenu

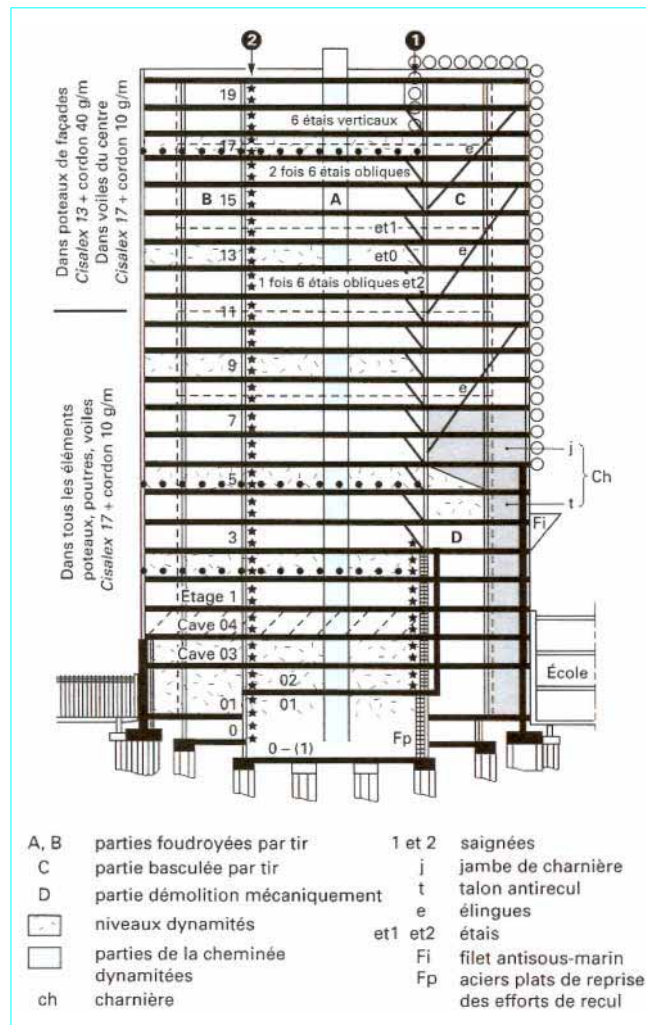


Figure 20 - Préparation de la tour

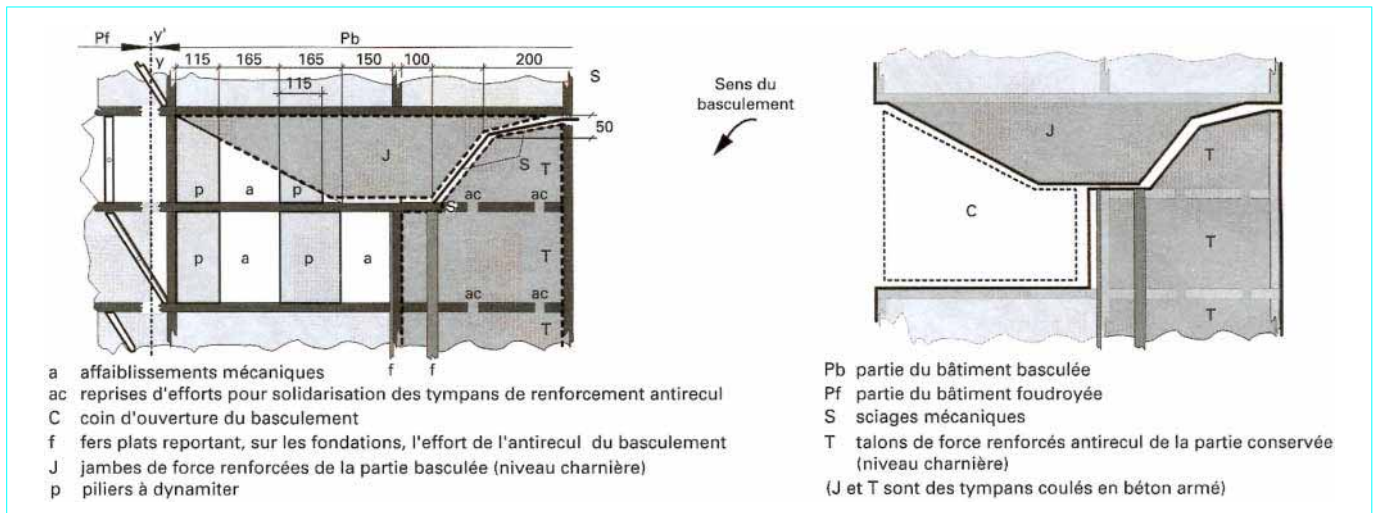


Figure 21 - Détail de la charnière du 4° et du 5° étage

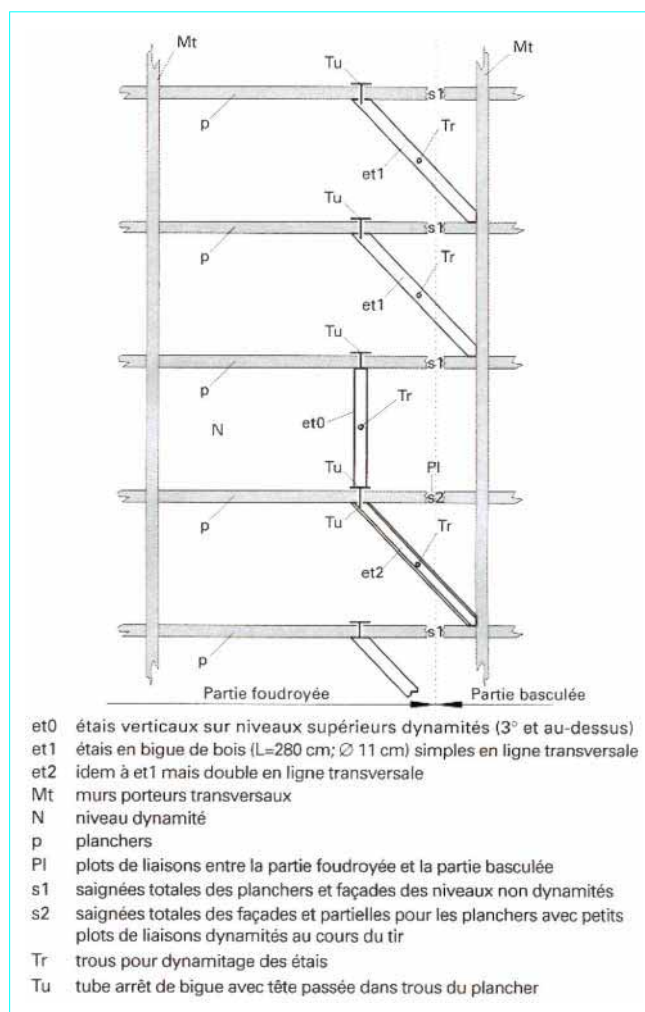


Figure 22 – Disposition des étais au voisinage de la saignée 1 du 3° au 19° étage

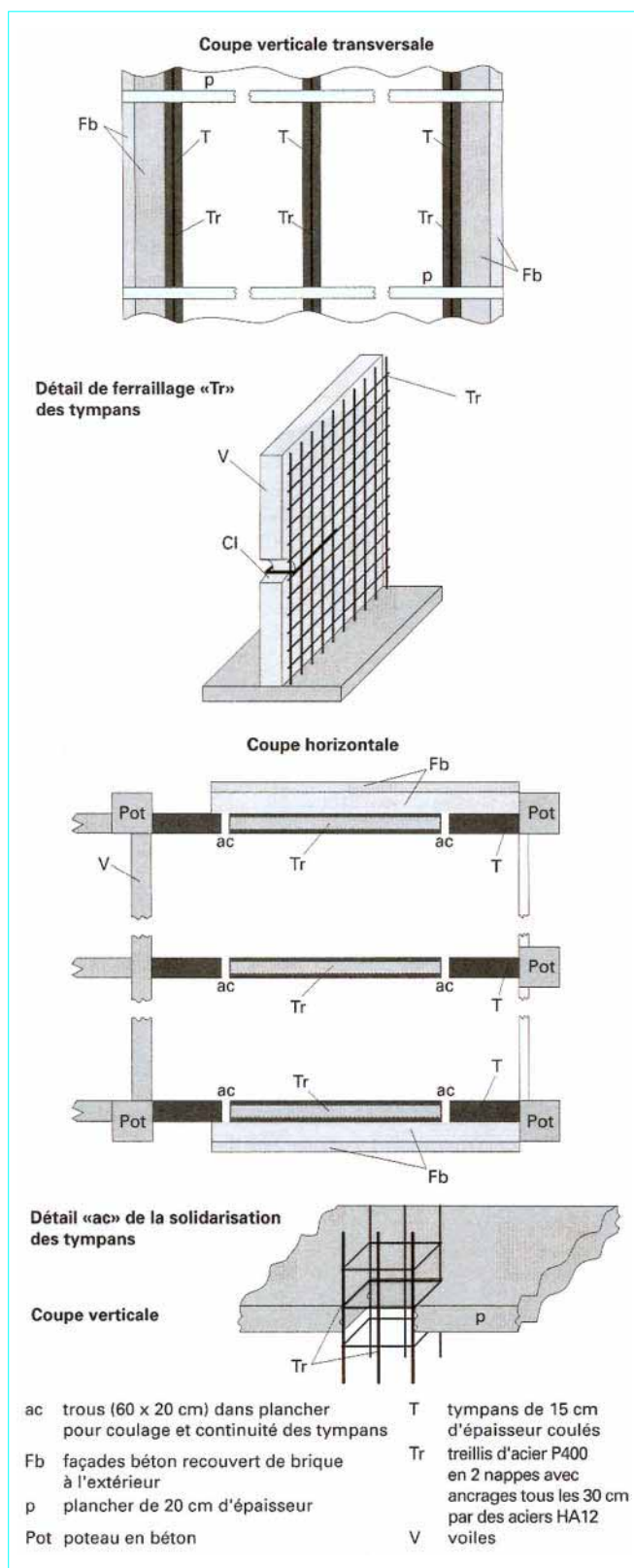


Figure 23 – Détail du ferrillage des 3 tympans coulés en béton armé

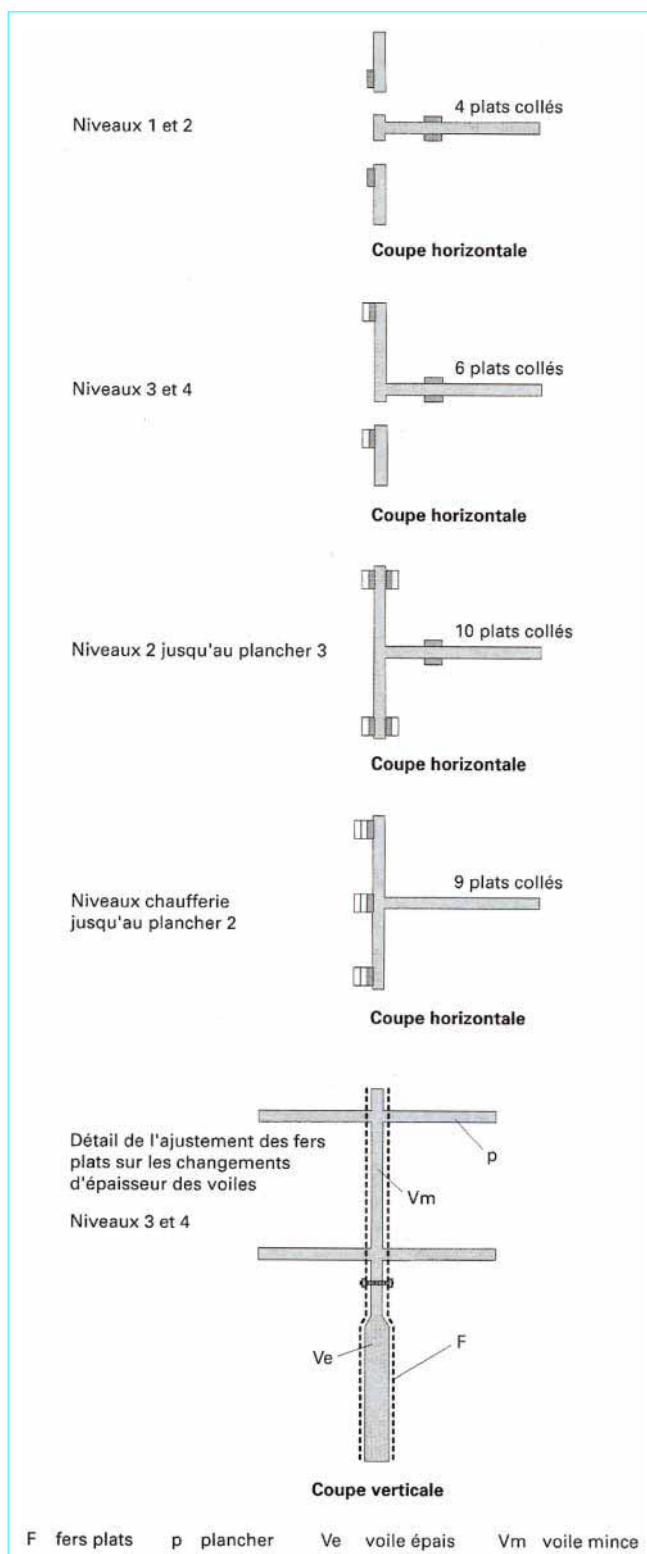
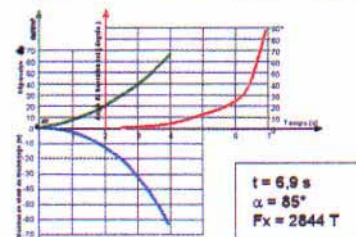
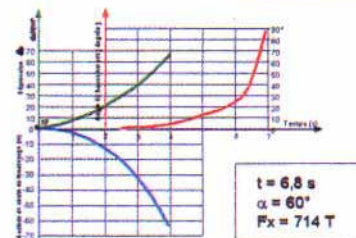
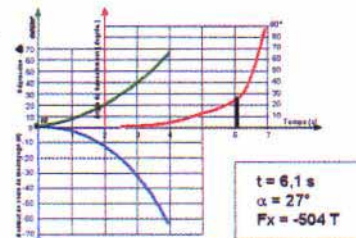
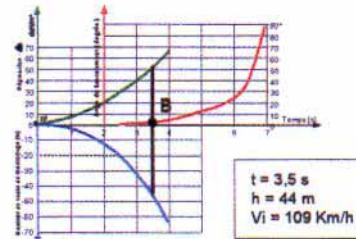
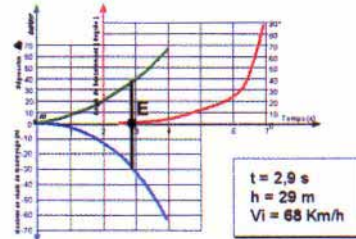
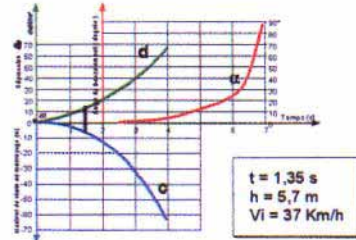


Figure 24 – Pose des fers plats reportant les efforts de recul du basculement sur les fondations

Résumé des valeurs lors du foudroyage



- c hauteur de la chute de la partie foudroyée en fonction du temps
- d dépression créée par la chute du foudroyage en fonction du temps
- α angle du basculement en fonction du temps
- E date de l'ouverture par explosions du coin de basculement
- B début physique du basculement

Valeurs des réactions en pied du basculement par rapport au poids total de la partie basculée et de l'angle de basculement

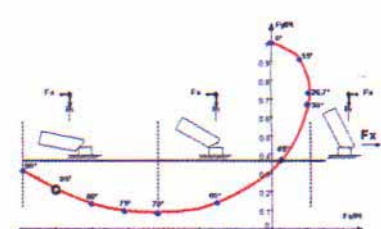
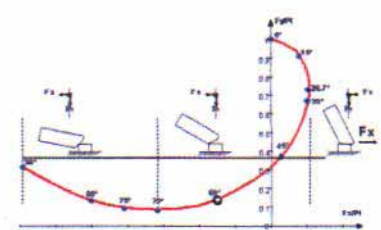
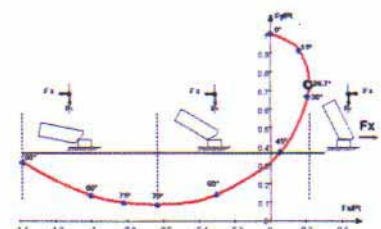
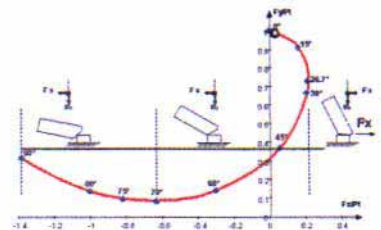
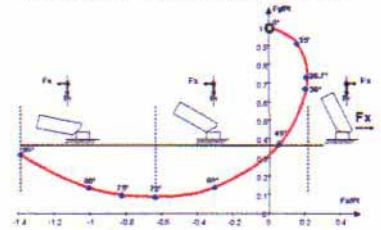


Figure 25 - Résultats des simulations de la démolition de la tour Bertrand à Lille