
Effondrement des tours du WTC : les conclusions scientifiques...

Jérôme Quirant

Laboratoire de Mécanique et Génie Civil

UMR CNRS 5508

Université Montpellier II

CC048

Place Eugène Bataillon

34095 MONTPELLIER CEDEX 5

Jerome.Quirant@univ-montp2.fr

RÉSUMÉ.

L'effondrement des tours du World Trade Center le 11 septembre 2001 a été, comme la rupture du pont de Tacoma en 1940, une image qui a marqué les esprits du public et des ingénieurs. De nombreuses études ont été menées pour expliquer les raisons et le processus d'effondrement. Le but de cette communication est de présenter les conclusions qui ont été apportées par les scientifiques de divers horizons : d'abord celles ayant été expertisées par la communauté du génie civil dans des revues spécialisées à comité de lecture, ensuite celles sujettes à caution et qui sont diffusées sur internet sans contrôle.

ABSTRACT. As the collapse of Tacoma Bridge in 1940, the collapse of the World Trade Center towers on September 11th, 2001 was an event that impressed the public and engineers' consciousness. Many studies were led to explain reasons and process of the collapse. The aim of this communication is to present conclusions which were given by different scientists: first those presented by the community of civil engineering through peer-reviewed papers, and then those unreliable which are broadcast on Internet without valuation.

MOTS-CLÉS: WTC, incendie, acier, comportement au feu, flambement, effondrement.

KEYWORDS: WTC, fire, steel, behaviour under fire conditions, buckling, collapse.

1. Introduction

L'effondrement des tours du World Trade Center le 11 septembre 2001 a été, comme la rupture du pont de Tacoma en 1940, une image qui a marqué l'esprit non seulement des architectes, ingénieurs ou scientifiques mais aussi et surtout des citoyens. Des ruines de bâtiment avaient pu être observées par le passé, mais jamais d'une telle ampleur et en direct sur les télévisions du monde entier.

De nombreuses études ont été réalisées pour déterminer quels avaient pu être les éléments déclencheurs d'une telle catastrophe. Certaines ont été menées par des agences fédérales américaines (NIST, FEMA), d'autres l'ont été par des scientifiques ou ingénieurs indépendants (Bazant, Levy, Usmani...).

Le but de cette communication est de présenter les conclusions de ces différentes études qui font consensus au sein de la communauté scientifique.

Cette mise au point s'avère nécessaire devant le nombre de théories qui fleurissent sur internet et ailleurs, et qui remettent en question ces conclusions. Nous verrons notamment quels sont les points qui peuvent interroger ou choquer un observateur et parfois nourrir l'imaginaire collectif.

2. L'analyse de l'effondrement des tours 1, 2 et 7

Il faut souligner en préambule que ce ne sont pas deux buildings qui se sont effondrés mais trois. Les plus connus sont bien sûr les tours jumelles (1 et 2) mais un autre de taille plus modeste (7) s'est écroulé quelques heures après.

Les trois effondrements ont été assez différents et méritent donc un traitement séparé.

2.1. Les tours jumelles

Les tours jumelles ont été conçues à la fin des années 60 et terminées en 1972 pour la tour Nord (1) et 1973 pour la tour Sud (2). Pour bien appréhender le processus qui a mené à l'effondrement et les mécanismes mis en jeu, il faut dans un premier temps détailler la structure porteuse des tours.

2.1.1. Description des tours

Les tours jumelles faisaient 417 et 415 mètres de hauteur pour une surface au sol de 4000 m² (63,5 m x 63,5m). Elles comportaient toutes les deux 110 étages, la tour Nord supportait en plus une antenne de 110 mètres de haut.

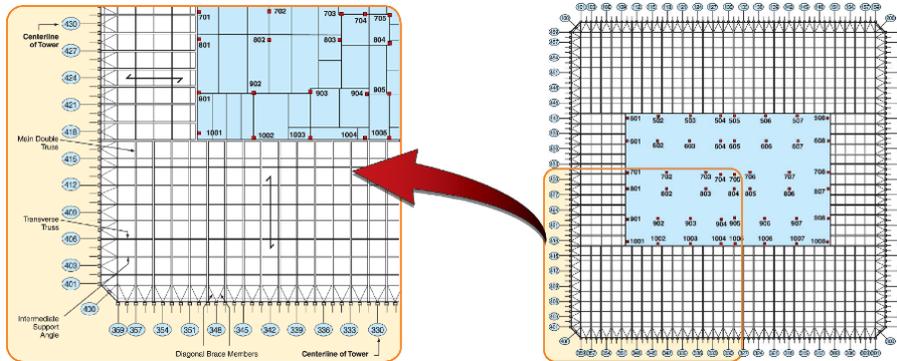


Figure 1. Structure porteuse. Source FEMA, Chapitre 2, 2002.

La structure porteuse était en acier, que ce soit les poutres ou les poteaux. Ces derniers étaient répartis en un réseau périphérique situé sur les quatre façades et un réseau interne constituant le noyau central du bâtiment (Figures 1 et 3). Les poutres soutenant les planchers étaient des poutres treillis reliées d'un côté à une façade, de l'autre au cœur de la tour. Des poutres étaient aussi mises en place transversalement pour stabiliser et rigidifier l'ensemble. Les planchers étaient constitués de dalles en béton léger de 1500 kg à 1700 kg/m³ selon les zones, coulé directement en place sur des bacs acier (Figure 2). Il n'y avait pas de connecteur, les dalles faisaient 10 cm d'épaisseur et étaient armées de treillis soudés.

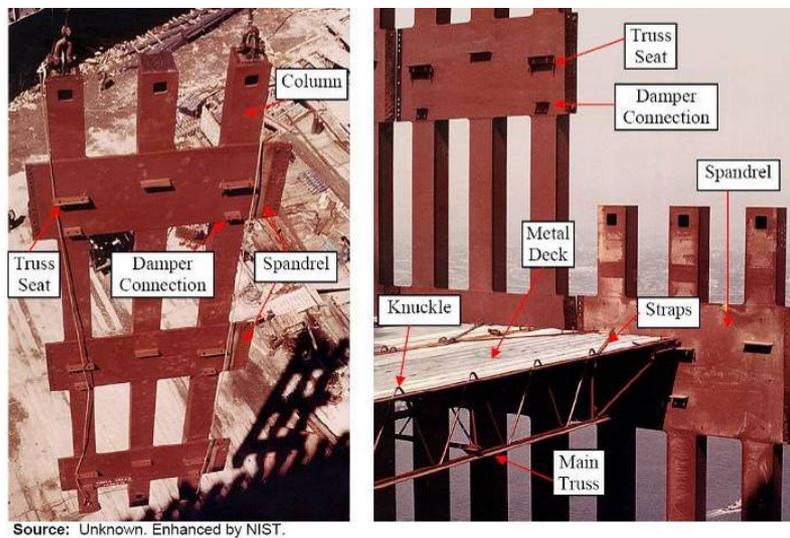


Figure 2. Structure de façade et plancher. Source NIST, Rapport 1, 2005



Figure 3. *Vue des colonnes du cœur de la tour. Source inconnue.*

2.1.2. *L'impact*

Les premiers facteurs ayant affaibli la structure des tours, ce sont bien sûr les crashes des deux avions qui ont été filmés par de nombreuses caméras. C'est la moitié d'une façade qui a été endommagée (dégâts visibles – Figure 4) mais aussi quelques colonnes du cœur (dégâts supposés, évalués par simulation des impacts).



Figure 4. *Dégâts produits par l'impact du premier avion sur la tour Nord. Source NIST, Rapport 1-5A, 2005.*

Des modélisations ont été réalisées pour évaluer ces dégâts sur la façade et au cœur (Wierzbicki *et al.*, 2002, Abboud *et al.*, 2003, Karim *et al.*, 2005). Divers cas plus ou moins défavorables pour la structure ont été envisagés dans les simulations du NIST (NIST, Rapport 1-2B, 2005).

Indépendamment de la structure, ce qui a été aussi fortement endommagé lors de l'explosion du kérosène contenu dans les ailes de l'avion (30 000 litres environ) ce sont les protections incendies passives. Les poutres treillis soutenant les planchers étaient floquées, les colonnes étaient soit floquées, soit revêtues de plaques de plâtre (NIST, Rapport 1-6A, 2005). Les protections situées à l'étage de l'explosion et dans l'axe de la trajectoire de l'avion ont donc dû être détruites ou sévèrement endommagées.

2.1.3. L'incendie

Suite au crash des avions, un violent incendie s'est déclaré dans les deux tours. L'incendie dans la tour 1, qui a été touchée par le premier avion, a duré 102 minutes. La deuxième tour, elle, s'est effondrée après avoir été la proie des flammes pendant 56 minutes.

Pour la modélisation de la montée en température des étages touchés par l'incendie, le NIST a reconstitué des cellules simples correspondant à une unité de travail rencontrée classiquement dans l'*open space* des différents étages des tours (NIST, Rapport 1-5C, 2005). Plusieurs unités de travail en feu ont aussi été testées (NIST, Rapport 1-5E, 2005). Cela a permis d'évaluer la quantité de combustible disponible et de simuler la propagation de l'incendie après une observation minutieuse des différentes photos et vidéos (NIST, Rapport 1-5A3 et 1-5A4, 2005). Les flammes s'étaient dans certaines zones sur 6 à 7 étages (Figure 5).



Figure 5. Des flammes sur 6 à 7 étages sur la tour Nord. Source inconnue.

Plusieurs cas ont été étudiés, les températures ambiantes maximales atteignaient des pics de 1000°C sur des durées de 15 à 20 minutes (NIST, Rapport 1-5, 2005). D'après la simulation de l'ambiance d'exposition, de la géométrie et de la protection

des différents éléments, l'acier a pu monter selon les endroits jusqu'à 700, 800 ou 900°C (NIST, Rapport 1-5G, 2005), des températures pour lesquelles l'acier perd, bien sûr, la majeure partie de sa résistance et de sa rigidité.

2.1.4. L'effondrement

Ce qui a été observé au travers des photos et des vidéos, c'est une rupture des liaisons de certains planchers sous l'effet de la chaleur (NIST, Rapport 1-5A2).

Cette perte de stabilisation latérale conjuguée à un effet funiculaire des planchers encore arrimés sur les façades, a causé le flambement des poteaux périphériques comme ce fut visible sur plusieurs vidéos (Figures 6 et 7).

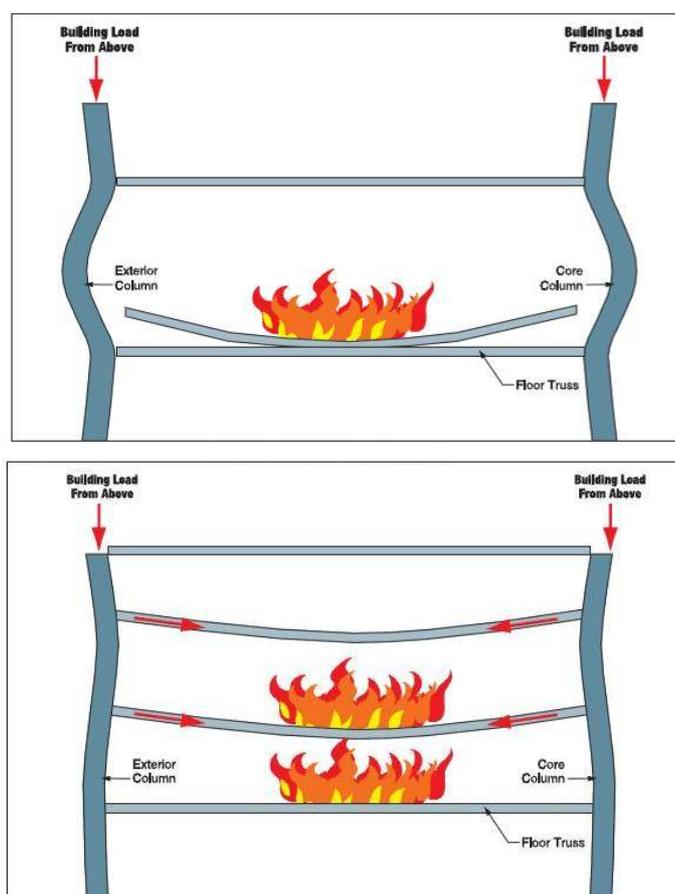


Figure 6. Le premier schéma montre la perte de stabilité latérale des poteaux suite à la rupture de certains planchers. Le deuxième présente l'effet funiculaire pour ceux encore accrochés : des efforts de traction parasite sont induits. Source FEMA, Chapitre 2, 2002.



Figure 7. Rupture des liaisons des planchers et flambement des poteaux en façade. Source NIST, Rapport 1-5A2, 2005.

La recherche des causes plus précises et détaillées de l'effondrement a donné lieu à plusieurs théories, suivant la prise en compte ou non des dilatations thermiques, d'une présence résiduelle ou non du flocage au niveau de l'étage du crash, etc...

Je citerai ici quelques articles, par ordre de parution : Bazant *et al.*, 2002, Quintiere *et al.*, 2002, FEMA, 2002, Usmani *et al.*, 2003, Abboud *et al.*, 2003, NIST, 2005, Flint 2005, Flint *et al.*, 2006, Usmani, 2006, Suzuki 2007. A lire aussi le livre plus généraliste de Levy *et al.*, 1994.

Assez logiquement, même si nous pouvons trouver quelques différences sur les facteurs les plus influents, toutes ces études concluent qu'entre les redistributions de charges induites par le crash des avions et la perte de rigidité de l'acier en raison de sa montée en température, ces facteurs étaient suffisants pour qu'un (ou plusieurs) étage(s) cède(nt) complètement.

Nous présenterons un peu plus loin comment certains auteurs ont pu montrer qu'une fois l'effondrement d'un étage amorcé, la chute du bloc ne pouvait s'interrompre.

2.2. Le bâtiment 7

Comme pour les tours jumelles, nous allons voir que la structure particulière du bâtiment est un élément à prendre en compte pour comprendre les détails de son effondrement.

2.2.1. La constitution du bâtiment

Le WTC7 était un bâtiment nettement moins élancé que les tours jumelles, il a été terminé en 1980. Il faisait 173 mètres de haut (47 étages) et il était de forme trapézoïdale.

L'édifice a été construit au dessus d'un bâtiment réalisé au préalable (*Con Ed substation*) ce qui a nécessité une descente de charge non conventionnelle pour pouvoir transférer les efforts vers les fondations existantes.

La modification en cours de projet de l'emprise au sol et le franchissement de grandes portées ont compliqué également le report des charges. Cette redistribution s'est faite au travers de portiques et de poutres de grande portée (Figure 8).

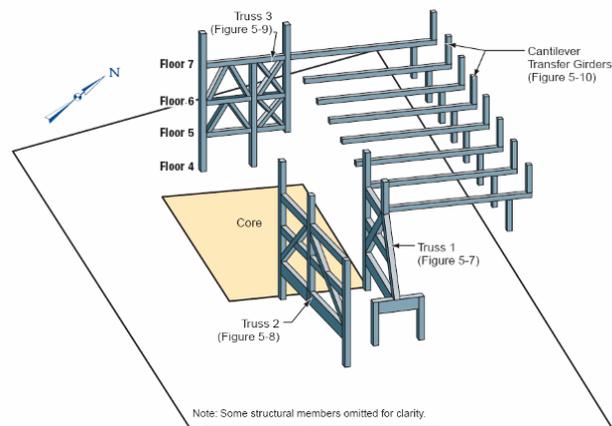


Figure 8. Report des charges au cœur du bâtiment 7. Source FEMA, Chapitre 5, 2002.

2.2.2. Les dégâts dus à l'effondrement du WTC1

Suite à l'effondrement de la tour 1, les débris ont fortement endommagé les façades des immeubles environnants (Figure 9).



Figure 9. Des dégâts sur des bâtiments situés à 175 mètres des tours. Source inconnue.

La tour 7 se trouvait à seulement 110 mètres de la tour Nord. Avec la poussière qui a été produite par les effondrements et la fumée des incendies sur d'autres bâtiments (4, 5, 6) il n'a pas été possible d'avoir une vue d'ensemble donnant l'état général de la façade du bâtiment 7 située du côté de l'effondrement. Néanmoins les dégâts ont pu être recensés par recoupement des témoignages et des photos (Figure 10) ou vidéos donnant des vues partielles du bâtiment (NIST, Rapport 1A, 2008).



Figure 10. Dégâts causés par la chute de la tour 1 sur l'angle sud-ouest du bâtiment 7. Source NIST, Rapport 1-9-1, 2008.

2.2.3. L'incendie

Suite à la chute des débris du WTC1 sur et dans le bâtiment 7, un incendie s'est déclaré. Plusieurs étages ont été touchés. La fumée produite se dégageait sur toute la hauteur du bâtiment, parfois à des vitesses très élevées comme on a pu le voir sur certaines vidéos (Figure 11).



Figure 11. La fumée sortant du WTC7 filmée lors d'un reportage de CBS. Source NIST, Rapport 1-9-1, 2008.

Ce qu'il faut souligner, c'est que les pompiers ont été évacués très vite du bâtiment. Suite à l'effondrement des deux premières tours, les autorités ne voulaient pas de nouvelles pertes humaines et souhaitaient concentrer les secours sur les décombres encore fumants des tours jumelles. Les protections actives (*sprinklers*) étant inopérantes suite à la rupture de certains réseaux après l'effondrement des deux premières tours (FEMA, Chapitre 5, 2002), l'incendie s'est rapidement propagé.

2.2.4. *L'effondrement*

L'effondrement du WTC7 s'est produit 7 heures environ après le début des incendies. Il a été très différent de celui des tours jumelles dans la mesure où c'est le bas du bâtiment qui a cédé en premier.

Aucune vidéo n'a pu filmer malheureusement le pied de la tour au moment de la chute. Cela n'a pas facilité la compréhension du processus ayant conduit à l'effondrement.

Néanmoins, les simulations du NIST ont montré que la dilatation thermique de certaines poutres a conduit à solliciter au-delà de leur capacité des liaisons affaiblies par la montée en température (NIST, Rapport 1A, 2008). Avec cette rupture des liaisons, les poteaux ont perdu leur stabilité horizontale et se sont affaissés.

Il a pu être remarqué également sur les vidéos que le bâtiment s'est écroulé en deux temps. Une partie de la toiture s'est effondrée, laissant penser à une défaillance importante de la structure interne, puis 7 secondes après, c'est l'autre partie de toiture et les façades qui sont tombées.

3. Des questions d'un observateur non-averti aux hypothèses hasardeuses...

Malgré ces nombreuses études, reconnues par les pairs, une partie du public et quelques scientifiques sont restés sceptiques devant les explications avancées par le NIST ou d'autres.

Des questions liées au caractère exceptionnel et soudain de ces effondrements, ou à des observations pointilleuses de vidéos ont été soulevées. Nous allons voir dans un premier temps quelles sont ces interrogations et ensuite quelles ont été les réponses apportées sur le plan scientifique.

3.1. Des images marquantes, des questions légitimes

Une structure massive

Une question récurrente pour l'observateur non-averti est la défaillance des poteaux : comment des éléments aussi 'massifs' ont-ils pu se rompre ? Il est vrai que certains avaient des épaisseurs de semelle de 7 à 8 centimètres... Pour quelqu'un de non initié qui voit les photos et qui ne connaît ni le phénomène de

flambement, ni le comportement au feu de l'acier, il est effectivement difficile d'imaginer comment une telle structure a pu céder.

Un effondrement total

Au vu de la structure massive et intacte en dessous des incendies, pourquoi le processus d'effondrement ne s'est-il pas interrompu ? Il est vrai après tout, qu'un ou deux étages en dessous du foyer, la structure avait conservé toute sa capacité portante.

Une chute verticale de la tour sur sa base

Pourquoi cet effondrement s'est-il produit de façon parfaitement verticale et rectiligne alors qu'au moins l'une des tours s'est fortement inclinée au départ ? Compte tenu de la hauteur des tours, c'est un élément qui peut surprendre.

Un temps de chute très rapide

Une fois l'effondrement amorcé, il a été très rapide, comment cela se fait-il ? Non seulement la chute s'est faite symétriquement pour les deux tours mais avec une accélération proche de celle de la pesanteur. Pour la tour 7, ce fut pire puisque la façade extérieure a chuté dans un premier temps comme si elle était en chute libre.

Des « explosions » sur les façades

Sur les vidéos des deux tours jumelles, au moment de la chute, on a pu observer de violentes ruptures de vitrages sur les façades avec de puissants jets de matière. Les anglophones ont appelé cela des 'squibs'. Qu'est ce qui a pu provoquer ce phénomène ?

Un béton pulvérisé

Très peu de béton était visible dans les décombres et le nuage de poussière a été immense lors de l'effondrement des tours. Comment le béton a-t-il pu être pulvérisé à ce point ?

3.2. D'autres explications ?

Devant un tel amoncellement de questions qui heurtent le bon sens populaire, bon nombre de personnes, et parmi elles des scientifiques, ont échafaudé de nouvelles théories pour expliquer ces phénomènes.

Les scientifiques ou ingénieurs qui ont proposé ces thèses ont à peu près tous soutenu (et soutiennent encore) que les observations qui ont pu être faites sont *des preuves de l'utilisation d'explosifs*. Pour eux, les tours ne se seraient donc pas effondrées du seul fait des incendies et de la gravité, mais en raison d'un acte conscient et volontaire de *démolition contrôlée*.

Aucun article soutenant la théorie des démolitions contrôlées n'a été publié dans des revues à comité de lecture à l'exception de celui de Jones (Jones *et al.*, 2008) mais qui est plus une demande d'explication complémentaire sur les phénomènes observés que l'exposé d'une nouvelle théorie. Cette non-diffusion dans des revues spécialisées tient sans doute à la faiblesse de l'argumentation, nous y reviendrons. Mais ces insuffisances sont aussi probablement dues au fait qu'aucun des ingénieurs ou scientifiques qui ont essayé de soutenir leurs thèses au travers d'articles n'est spécialiste de génie civil. Mis à part un architecte (Gage), on trouve des physiciens (Jones, Ryan...), un mathématicien (Kuttler) ou des ingénieurs de mécanique (Ross, Szamboti...). Pour pouvoir diffuser leurs écrits, Jones a même dû créer un site internet : www.journalof911studies.com. Des philosophes ou des théologiens ont également rejoint le mouvement et proposent aussi leurs articles sur le site.

Nous passerons ici sur les motivations qui auraient guidé de tels actes (les démolitions contrôlées) et leurs auteurs, cela n'a aucun intérêt sur le plan scientifique.

Dans ce qui suit, nous nous intéresserons donc à ces théories alternatives sur un plan purement technique.

Des explosifs pour saper les colonnes...

Compte tenu de la structure assez résistante des tours, puisqu'elles ont quand même résisté au crash d'un avion, il a été suggéré que des explosifs avaient été mis en place pour saper les colonnes. Des produits incendiaires destinés à faire fondre l'acier rapidement, 'thermite' ou 'thermate', auraient également pu être utilisés.

Jones est l'un des plus ardents défenseurs de cette théorie. Il a pour cela analysé de la poussière et de l'acier recueillis sur les lieux de l'effondrement pour essayer de trouver des résidus de ces produits dans les débris. D'autres scientifiques ont fortement remis en question ses conclusions (Greening, 2006).

Ce qui est incontestable, c'est que l'acier n'avait pas besoin de fondre pour que les poteaux cèdent. Les études du comportement de l'acier au feu montrent que des poutres sollicitées initialement à 50% de leur limite élastique peuvent flamber même si l'élévation de température est très faible : 250 à 300° C à peine, même pour de faibles élancements (Huang *et al.*, 2006, Tan *et al.*, 2009). Compte tenu de la redistribution de charges et de la détérioration des protections incendies causées par le crash des avions, il est évident que certains éléments se sont retrouvés à un tel niveau de sollicitation (mécanique et thermique) qu'ils ne pouvaient plus résister suffisamment.

L'effet système et la coiffe de la tour (heat-truss) qui rigidifiait la tour en solidarissant le cœur et la structure périphérique (NIST, Rapport 1-6D, 2005) ont permis de transférer progressivement la charge des colonnes défailantes vers celles encore résistantes, évitant ainsi un effondrement partiel. C'est lorsqu'un nombre trop important de poteaux ont été sollicités à leur limite de résistance que l'effondrement global d'un ou plusieurs étages s'est produit.

L'effondrement aurait dû s'arrêter...

Beaucoup d'auteurs ont essayé de démontrer que même amorcé, l'effondrement aurait dû s'arrêter du fait que la structure était intacte en dessous des crashes. C'est notamment le cas de Ross (Ross, 2006) qui a publié un article sur le site internet de Jones.

Que les auteurs souhaitent démontrer l'arrêt ou la poursuite de l'effondrement, tous passent par une première étape où ils considèrent qu'un bloc de plusieurs étages chute sur une structure intacte située juste en dessous. La distance de chute est prise égale à 3,75 m, la hauteur d'un étage. Il est possible alors de calculer l'énergie cinétique acquise par le bloc supérieur supposé en chute libre.

Le processus d'effondrement peut être considéré stoppé si la structure impactée est capable d'absorber l'énergie acquise par le bloc supérieur. Pour cela, plusieurs possibilités sont offertes : énergie de déformation élastique, plastique, pulvérisation et éjection des matériaux. Bazant a montré (Bazant *et al.*, 2002, Bazant *et al.*, 2007) que même en prenant un cas extrêmement favorable (les colonnes chutent sur celles d'en dessous et transmettent directement l'effort dynamique correspondant) l'énergie élastique et la formation de trois rotules plastiques n'étaient pas suffisantes pour stopper le bloc supérieur (Figure 12).

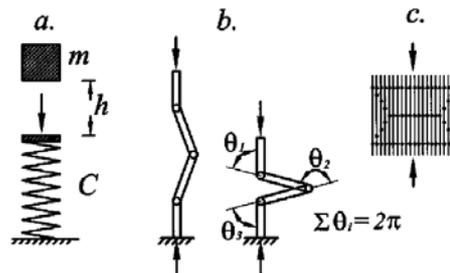


Fig. 2. (a) Model for impact of upper part on lower part of building; (b) Plastic buckling mechanism on one column line; (c) Combination of plastic hinges creating a buckle in the tube wall

Figure 12. *Modèle utilisé par Bazant pour expliquer la rupture successive des poteaux.*

Pour arriver à stopper l'effondrement, Ross propose, lui, que toutes les colonnes de l'étage impacté présentent des déformations plastiques de 3 % en compression sur toute leur hauteur (!) et ce **avant** qu'apparaissent les rotules plastiques dues au flambement. Ses autres calculs sont tout aussi nébuleux avec la prise en compte, en plus, d'une dissipation d'énergie identique sur le bloc supérieur.

Un effondrement ne peut pas se produire de façon aussi ‘propre’ et aussi rapidement...

La façon dont les chutes des tours 1 et 2 se sont produites a été aussi beaucoup commentée. La vitesse de l’effondrement a été évaluée. D’une accélération équivalente à la chute libre, les thèses alternatives sont progressivement passées à 70 % (Mc Queen *et al.*, 2009). Dans leurs calculs, les auteurs ont corrigé légèrement les hypothèses de Ross en abaissant la déformation plastique avant flambement à 1,5 %, mais comme lui, considèrent que la même énergie est dissipée dans le bloc supérieur. Cela mériterait une explication et un schéma pour montrer comment se forment, entre autres, les rotules plastiques au dessus de l’impact...

Notons que cette accélération inférieure à celle de la pesanteur montre bien que les étages en dessous ne se sont pas ‘effacés’ sous l’action d’explosifs et qu’ils ont effectivement résisté.

Pour expliquer l’effondrement suivant l’axe de la tour, la constitution du building avec un noyau central rigide peut être une piste. La chute semble s’être produite comme les pièces d’un jeu d’enfant que l’on empile sur un axe. Cela rejoint la théorie du ‘*pancake*’ qui a été avancée par la FEMA pour l’effondrement (FEMA, Chapitre 2, 2002).

Concernant la tour 2 qui s’est assez fortement inclinée lors de l’amorce de l’effondrement en raison de l’impact excentré de l’avion et de feux concentrés sur un côté du bâtiment, il faut souligner que même pour la plus forte déviation observée, l’aplomb du centre de gravité du bloc supérieur n’a jamais quitté la base de la tour. Il est donc resté à l’intérieur de la ceinture constituée par les colonnes périphériques. L’inclinaison de ce bloc était semblable à celle d’un basculement à charnière haute utilisé en démolition contrôlé. Le basculement ne s’est probablement pas produit complètement en raison de la rupture de la charnière sous l’effet de l’action dynamique horizontale liée à ce processus d’effondrement (Bénazet, 1997, Bazant *et al.*, 2002, 2008).

Quant à la tour 7, la vitesse de chute observée fut encore plus rapide, au moins pour la façade. En effet, comme précisé plus haut, l’effondrement de ce bâtiment s’est produit en deux temps avec d’abord un effondrement interne, puis la façade n’étant plus tenue, un flambement des colonnes extérieures sur une grande hauteur. Il est probable que l’énergie plastique dissipée dans la déformation des colonnes était faible, ce qui n’a pas permis de consommer une quantité significative de l’énergie potentielle totale disponible (NIST, Rapport 1-9, 2008). D’où cette chute initiale extrêmement rapide.

Des signes d’ « explosions » sur les façades...

L’expulsion de matériaux sur les façades lors de la chute des tours 1 et 2 (Figure 13) est avancée par les partisans de cette thèse comme une autre preuve de l’utilisation d’explosifs.



Figure 13. Les ‘squibs’ observés lors de l’effondrement des tours 1 et 2. Source inconnue.

En fait, sans aller chercher si loin, ces ‘squibs’ ont été interprétés par beaucoup de personnes ayant étudié le cas, comme un effet de la chute successive des planchers les uns sur les autres et qui ont mis en surpression le bâtiment. Comme les vitrages étaient intacts en dessous des incendies, l’air ne pouvait s’évacuer et la surpression s’est communiquée au travers des circulations verticales à tout le bâtiment.

Bazant a même proposé une évaluation de cette surpression et de la vitesse de l’air éjecté dans son dernier article (Bazant *et al.*, 2008).

Il faut également noter que ces ‘squibs’ apparaissent au cours de la chute de manière totalement anarchique, tantôt très près du front de l’effondrement, tantôt très loin. C’est totalement incohérent avec une démolition contrôlée où le déclenchement des explosions se gère de manière très précise avec des retards de quelques fractions de secondes.

Le béton ne peut être totalement pulvérisé du seul fait d’un effondrement gravitaire...

Le gigantesque nuage de poussière généré lors de la chute des tours est aussi un élément qui est utilisé pour attester de la présence d’explosifs dans les bâtiments. En fait, si se on rappelle que le béton utilisé n’avait pas vraiment de rôle structurel (pas de connecteur avec les poutres treillis) et qu’il était très léger (1500 kg/m^3), on comprend bien que sa résistance ne devait pas être exceptionnelle.

L’énergie de fracturation d’un béton a été chiffrée par différents auteurs (Telford, 1991, Bazant *et al.*, 2002b) et a servi de base pour l’évaluation de l’énergie nécessaire pour sa pulvérisation. Ce chiffrage a fait couler beaucoup d’encre, mais ce débat traduisait surtout une mauvaise connaissance par certains auteurs des différences de comportement du béton en fonction du type de sollicitation appliquée.

Il faut surtout souligner que le nuage de poussière n'était pas constitué que de béton mais aussi de bon nombre d'autres matériaux bien moins résistants, et notamment de plâtre, présent en quantité dans les tours.

En outre, compte tenu de l'énorme énergie potentielle liée à la masse des tours (près de 300 000 tonnes) et leur hauteur, il a été montré que l'énergie nécessaire à la pulvérisation de ce béton était une fraction assez faible de l'énergie totale disponible (Bazant et al, 2008, Greening 2006).

3.3. Bilan du questionnement sur les effondrements

Finalement, après avoir passé en revue les différentes questions posées par l'effondrement des tours, nous avons vu que la thèse (séduisante ?) des explosifs n'était absolument pas nécessaire pour y répondre. Jusqu'à preuve du contraire, c'est plus un déficit d'explication de la part des scientifiques et une mauvaise connaissance des propriétés des matériaux ou de la mécanique des structures qui ont conduit des personnes mal informées à les avancer.

4. Conclusion

Cette étude bibliographique doit permettre, à ceux qui le souhaitent, de trouver rapidement les références d'éléments fiables et reconnus sur ce qui a pu être observé lors de la chute des tours du World Trade Center le 11 septembre 2001.

Nous avons vu que l'intérêt des scientifiques pour l'étude et la modélisation du '*progressive collapse*' s'est fortement accru après la catastrophe. Actuellement, des recommandations techniques sont en phase finale d'élaboration pour éviter que de tels drames se reproduisent (NIST 2009).

Mais sur un plan plus général, la propagation grandissante des théories alternatives, sans aucune base scientifique, sur internet ou ailleurs (distribution récente de films en salle ou en DVD comme '*Loose change*' ou '*Zéro*'), doit amener notre communauté à s'interroger. N'y aurait-il pas un manque de vulgarisation scientifique de notre part ? Un déficit dans notre communication qui ne permettrait pas au plus grand nombre de faire le tri entre ce qui relève de la science et ce qui n'en relève pas ? Il est certes bien plus facile et accrocheur de faire dans le sensationnel que de proposer des articles scientifiques ou techniques...

Néanmoins, la recherche documentaire personnelle ayant conduit à cette communication a aussi permis la création en parallèle d'un site internet pour le grand public (Quirant, 2009). Le but était justement de rendre abordables des notions techniques parfois inaccessibles pour les non-initiés. C'est déjà un point de repère, mais d'autres initiatives de ce genre ou sous d'autres formes sont

souhaitables, pour que cesse vraiment l'échafaudage de ces théories pseudo-scientifiques.

5. Bibliographie

- Abboud N., Levy M., Tennant D., Mould J., Levine H., King S., Ekwueme C., Jain A., Hart G., "Anatomy of a disaster : a structural investigation of the World Trade Center collapses". *Proceedings of the Third Congress on Forensic Engineering*, San Diego, American Society of Civil Engineers, pp. 360-370, 2003.
- Bazant Z. P., Zhou Y., "Why did the World Trade Center collapse? - Simple Analysis", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 128 (1), pp. 2-6, 2002.
- Bazant Z. P., Becq-Giraudon E., "Statistical prediction of fracture parameters of concrete and implications for choice of testing standard", *Cement and Concrete Research*, pp. 529-556, 2002.
- Bazant Z. P., Verdure M., "Mechanics of progressive collapse: learning from world trade center and building demolitions", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 133(3), pp. 308-319, 2007
- Bazant Z. P., Le J.-L., Greening F.G., Benson D.B., "What did and did not cause collapse of WTC Twin Towers in New-York", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 134, pp. 893-906, 2008.
- Bénazet J., "Techniques des démolitions à l'explosif", *Techniques de l'Ingénieur*, 1997
- FEMA, Federal Emergency Management Agency, "World Trade Center building performance study", <http://www.fema.gov/rebuild/mat/wtcstudy.shtm> , 2002.
- Flint G., Fire induced collapse of tall buildings, Thèse, University of Edinburgh, 2005.
- Flint G., Usmani A.S., Lamont S., Torero J., Lane B. "Effect of fire on composite long span truss floor systems", *Journal of Constructional Steel Research*, 62 (4), pp. 303-315, 2006.
- Greening F.G., Sulfur and the World Trade Center Disaster <http://www.911myths.com/Sulfur.pdf>, 2006.
- Greening F.G., Energy transfer in the WTC collapse, <http://www.911myths.com/WTCREPORT.pdf>, 2006.
- Jones S. E., Legge F. M., Ryan K. R., Szamboti A. F., Gourley J. R., "Fourteen points of agreement with official government reports on the World Trade Center destruction", *The open civil engineering journal*, Volume 2, 2008 .
- Huang Z.-F., Tan K.-H.i, Ting S.-K., "Heating rate and boundary restraint effects on fire resistance of steel columns with creep", *Engineering Structures*, 28, pp. 805-817, 2006.
- Karim M. R, Hoo Fatt M. S., "Impact of the Boeing 767 aircraft into the World Trade Center", *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 131 Issue 10, p1066-1072, 2005.
- Levy M. et Salvadori M., *Why buildings fall down*, ISBN 0393033562, 1994.

- Mac Queen G., Szamboti T., "The missing jolt: a simple refutation of the NIST-Bazant collapse hypothesis", <http://www.journalof911studies.com/>, 2009.
- NIST, National Institute of Standards and Technology, NIST and the World Trade Center, <http://wtc.nist.gov/>, Rappports WTC 1 et 2, 2005.
- NIST, National Institute of Standards and Technology, NIST and the World Trade Center, <http://wtc.nist.gov/>, Rappports WTC 7, 2008.
- NIST, National Institute of Standards and Technology, NIST and the World Trade Center, <http://wtc.nist.gov/media/StructuralFireResistance.htm>, Best practice guidelines for structural fire resistance design of concrete and steel buildings - Draft - (NISTIR 7563), 2009.
- Quintiere J. G., di Marzo M., Becker R., "A suggested cause of the fire-induced collapse of the World Trade Towers", *Fire Safety Journal*, Vol. 37, No. 7, 2002.
- Quirant J., Attentats du 11/09 : Mythes et Légendes, www.bastison.net, 2009.
- Ross G., "Momentum transfer analysis of the collapse of the upper storeys of WTC1", <http://www.journalof911studies.com/>, 2006.
- Suzuki J., "Structural redundancy and effect of seismic design on ultimate temperature of steel frames exposed to fire", *Fire Science and Technology*, Vol.26 No.3, pp. 93-296, 2007.
- Tan K.H., Yuan W.F., "Inelastic buckling of pin-ended steel columns under longitudinal non-uniform temperature distribution", *Journal of Constructional Steel Research*, 65, pp. 132-141, 2009.
- Telford T., CEB-FIP Model Code 1990, Comité Euro-International du Béton, 1991.
- Usmani A. S., Chi Chung Y., Torero J. L., "How did the WTC towers collapse? A new theory", *Fire Safety Journal*, Vol. 38, No. 6, 2003.
- Usmani A. S., "Stability of the World Trade Center Twin Towers structural frame in multiple floor fires", *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 131, No. 6, 2006.
- Wierzbicki T., Xue L., Hendry-Brogan M., "The Towers Lost and Beyond - Aircraft impact damage", <http://web.mit.edu/civenv/wtc/>, Massachusetts Institute of Technology, 2002.