

Effondrement et reconstruction du Terminal 2E de l'aéroport Roissy-Charles de Gaulle

Culture Sciences
de l'Ingénieur

Aurore GIRIER-TIMSIT - Xavier JOURDAIN - Hélène HORSIN MOLINARO

Édité le
01/03/2021

école
normale
supérieure
paris-saclay

Élève de l'ENS Paris-Saclay, Aurore Girier-Timsit, lors de sa première année en Sciences pour l'Ingénieur (année SAPHIRE) a suivi le parcours « Ingénierie civile ». Dans ce cadre les élèves ont, sur un thème imposé, à réaliser un état de l'art, un mémoire et à présenter une courte leçon. Cette ressource est issue de ce dossier.

L'aéroport Roissy-Charles de Gaulle a été inauguré en 1974, 10 ans après la décision du Président Charles de Gaulle de le construire. Les terminaux 2A, 2B, 2C, 2D et 2F sont construits au fur et à mesure pour accueillir de plus en plus de voyageurs, et en 2019, ce sont plus de 76 millions de voyageurs qui sont passés par Roissy. C'est 25 ans après l'inauguration de l'aéroport que la construction du terminal 2E commence, en 1999 et il est inauguré en 2003 [1].

Pour la construction de ce terminal, l'aéroport Roissy-Charles de Gaulle jouait le rôle de maître d'œuvre et maîtrise d'ouvrage, ce qui est très rare. En effet, alors que la maîtrise d'ouvrage définit les objectifs, le calendrier et le budget en tant que client, le maître d'œuvre conduit les travaux en tant qu'architecte. Ils avaient choisi la filiale GTM de Vinci pour construire cet ouvrage, le bureau d'étude Ingerop pour dimensionner la structure et le groupe d'inspection et de certification Bureau Veritas pour contrôler entre autres le dimensionnement de la structure. Le budget était de 150 millions d'euros pour la jetée d'embarquement, et de 650 millions pour le terminal tout entier [2].

Moins d'un an après l'inauguration du terminal, une partie de la voûte de la jetée, salle d'embarquement du terminal ouvrant sur 14 passerelles d'accès aux avions, s'effondre en mai 2004 faisant quatre morts. L'enquête menée pour déterminer les possibles causes de l'effondrement est d'autant plus importante que l'aéroport est un établissement recevant du public (ERP) et subit donc une législation plus stricte que d'autres bâtiments.



Figure 1 : Vue d'ensemble du terminal 2E et zone de l'effondrement, source [7][3]

Cette ressource commence par étudier la structure initiale puis se penche sur les causes probables de l'effondrement, et enfin, s'intéresse à la reconstruction de la jetée d'embarquement.

1 – Effondrement du Terminal

1.1 - Localisation de la zone

Le terminal 2E ne figurait pas dans l'aéroport lors de son inauguration en 1974. Ce terminal a été construit en 4 ans, entre 1999 et juin 2003. En janvier 2021, l'aéroport Roissy-Charles de Gaulle comporte 9 terminaux, le Terminal 1, 2A, 2C, 2D, 2E, 2F, 2 (Gare SNCF TGV), 2G et 3 (figure 2).

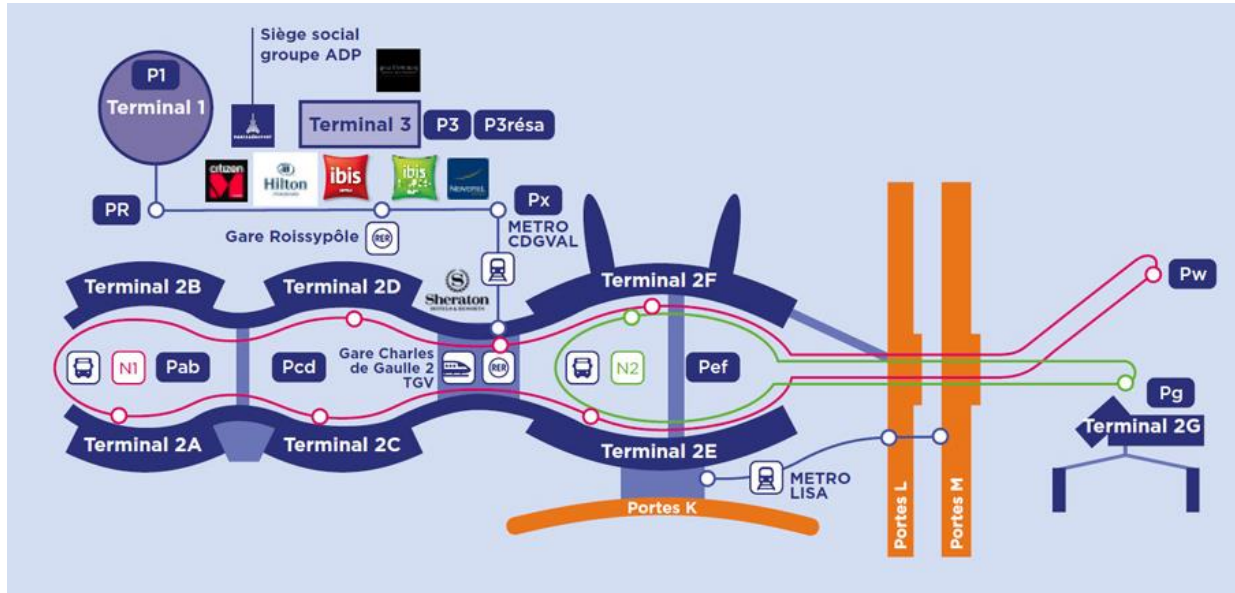


Figure 2 : Plan de l'aéroport Charles de Gaulle, source [4]

Le terminal 2E, construit afin d'accueillir près de 10 millions de passagers par an, est un long cylindre dont la structure initiale est en béton (figure 1). La zone qui s'est effondrée le 23 mai 2004 se situe au niveau de la salle d'embarquement [5]. L'effondrement du toit s'est produit là où trois passerelles le rejoignent [6].

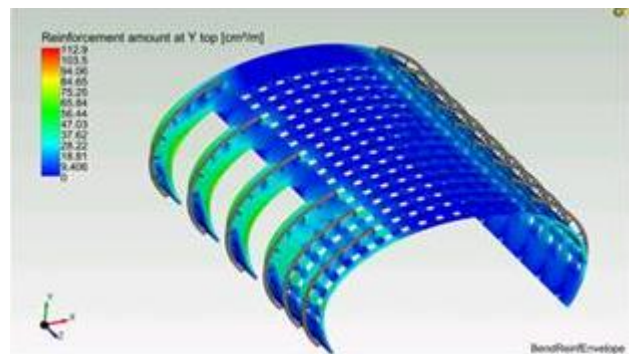


Figure 3 : Effondrement du toit dans la zone des 3 passerelles, et modélisation de la zone, sources [7] [8]

1.2 - Structure initiale

La voûte du terminal était en forme d'ellipse (figure 4). L'architecture de Paul Andreu, alors Directeur de l'architecture et de l'ingénierie à Aéroport de Paris, était originale pour un ouvrage en béton [9]. Les dimensions de la jetée d'embarquement sont récapitulées dans le tableau 1.

Longueur [m]	Largeur [m]	Hauteur [m]	Épaisseur de voûte [cm]
680	30	12,5	30

Tableau 1 : Dimensions de la jetée d'embarquement

La structure était composée d'arcs en **béton** sur lesquels s'appuyaient des **butons supports de tirants**, ensuite recouverte de **verre**, (figures 4 et 5). La jetée a été construite en assemblant 10 portions de voûte, chaque portion était composée de 17 **arcs** préfabriqués de 4 m de largeur, soit $10 \times 17 \times 4\text{m} = 480\text{ m}$ de long. Les voûtes étaient ajourées afin de laisser passer la lumière.

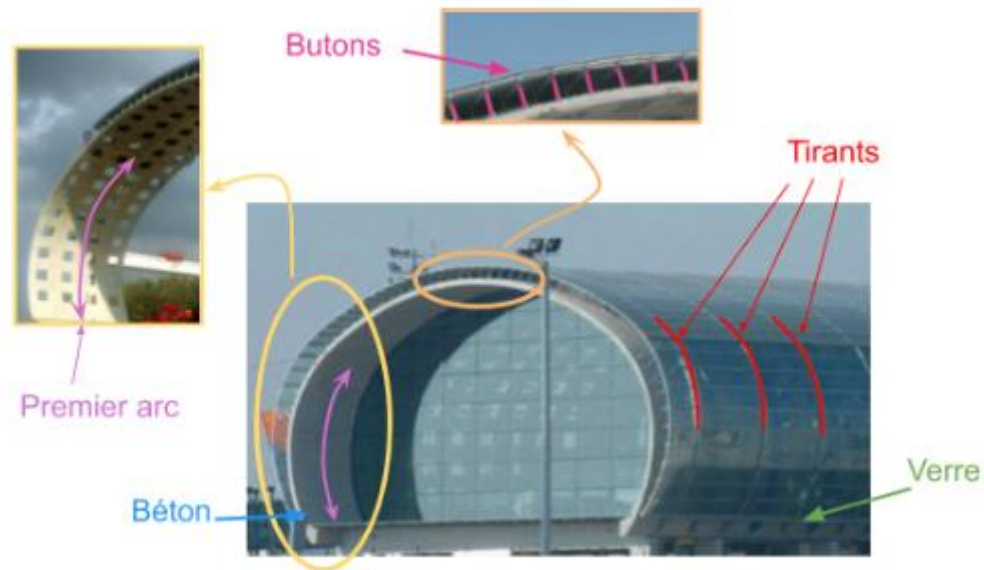


Figure 4 : Éléments de la structure initiale, source [10]

Chaque **arc** de 4 mètres de largeur, étaient composés de trois parties d'**arc** [11], l'arc central prenant appui sur les deux arcs latéraux (figure 5). Ils étaient raidis par des **tirants métalliques** qui prenaient appui dans le béton grâce aux **butons** (barres métalliques) (figure 5). Les **butons** pénétraient la voûte en **béton** de 11 centimètres [12]. Ces pièces reprenaient des efforts très importants d'environ 9,5 kN, principalement dus au poids des éléments en **verre**. La structure reposait sur des **poutres sablières** en appui sur les **piles**.

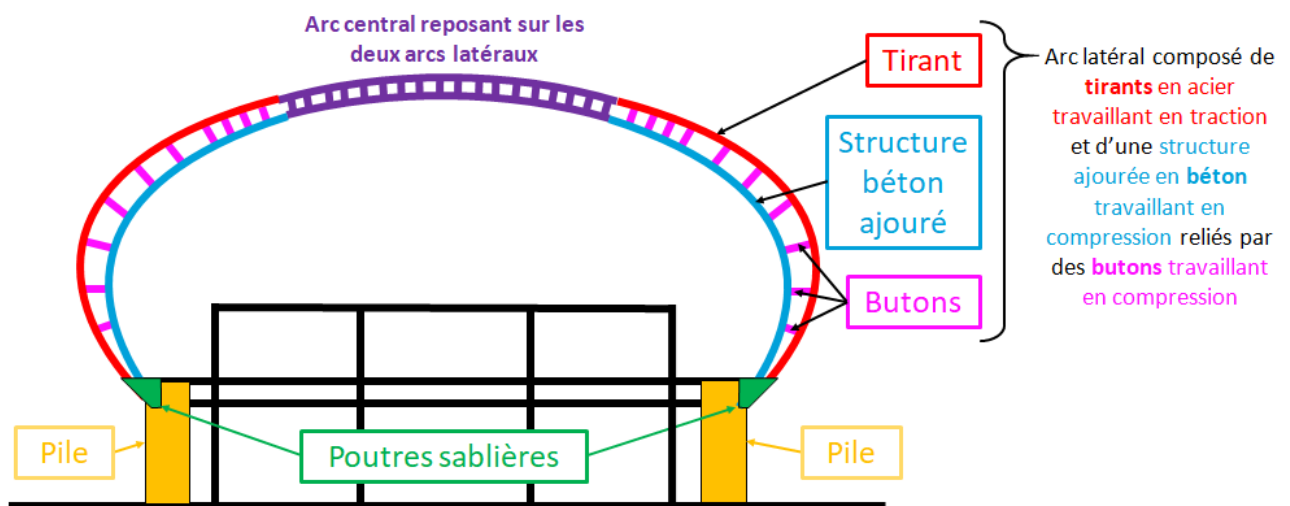


Figure 5 : Schéma des éléments structuraux

L'ouvrage était original par sa forme ovale, mais aussi en ayant une structure composée de trois arcs articulés. Pour les arcs latéraux, les éléments de structure de la partie externe travaillent en traction et ceux de la partie interne travaillent en compression. La figure 6 schématise en couleur la position déformée amplifiée, la position non déformée est représentée en noire. Sur le schéma position déformée, on remarque que les arcs latéraux fonctionnent comme une « macro » poutre :

- En rouge, les tirants en acier travaillant principalement en traction longitudinale ;
- En vert, la structure béton travaillant principalement en compression longitudinale.

L'arc central en bleu doit, pour les principaux cas de charge, avoir sa partie supérieure en compression et sa partie inférieure en traction.

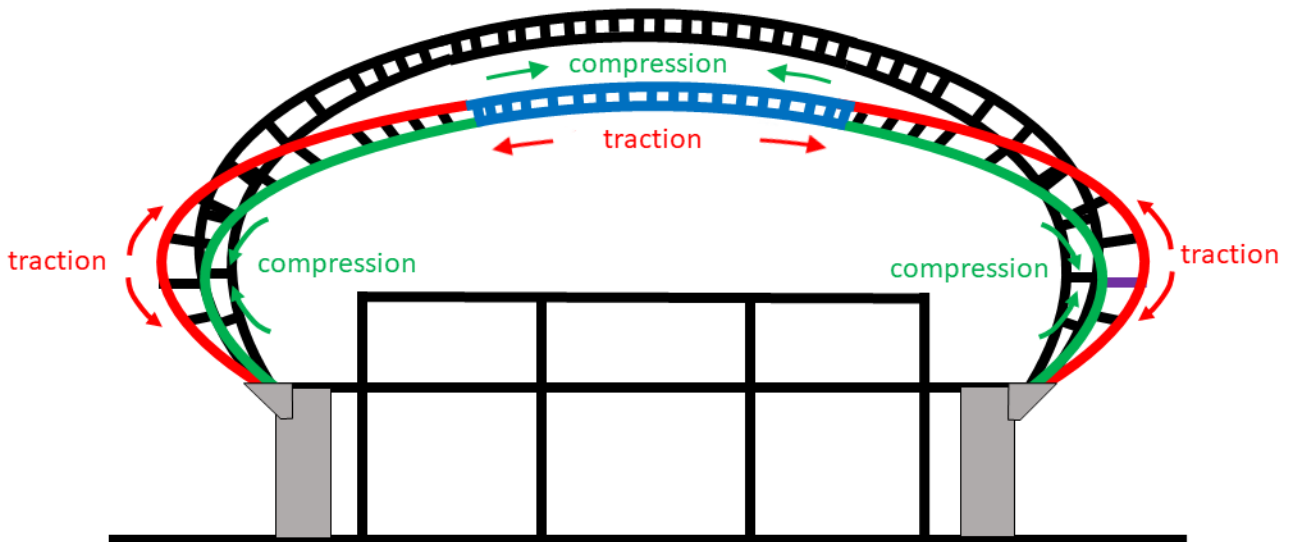


Figure 6 : Schéma de la structure non déformée (noire) et déformée amplifiée (couleur)

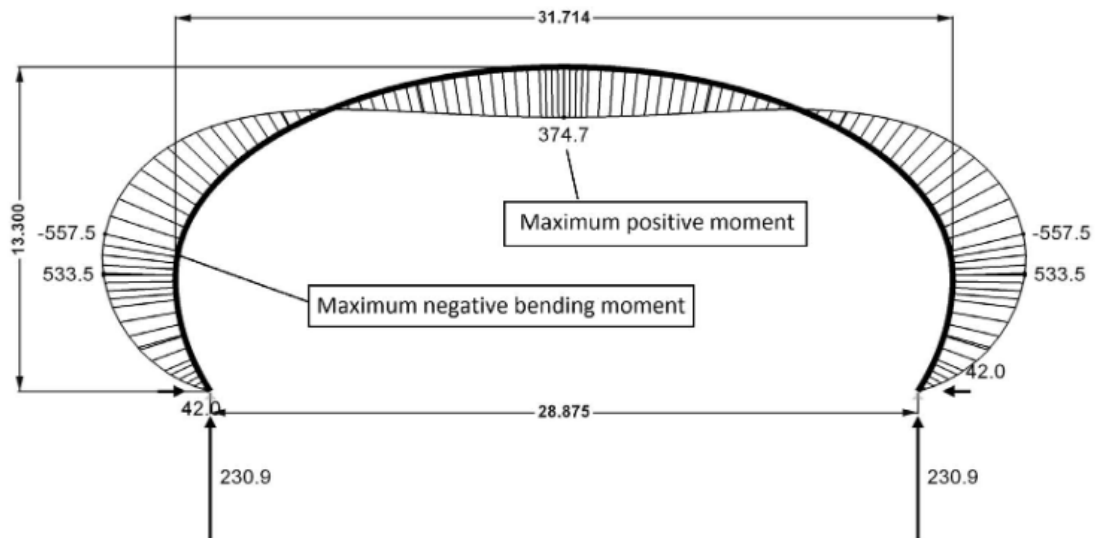


Figure 7 : Géométrie de la structure en béton ajourée, répartition des moments de flexion et réactions d'appui dues au poids propre, source [13]

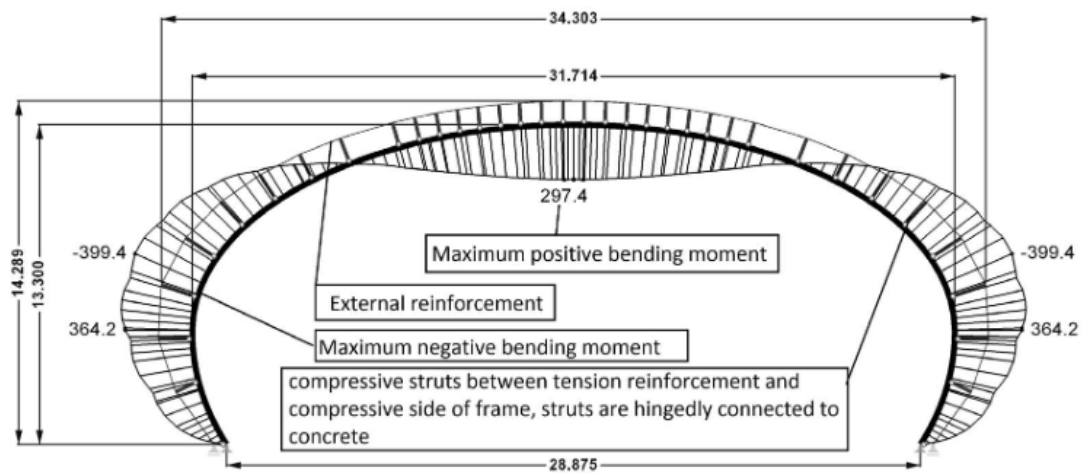


Figure 8 : Géométrie de la structure interne en béton ajourée avec la structure interne en acier, répartition des moments de flexion due au poids propre, source [13]

1.3 - Six arcs s'effondrent

Le 23 mai 2004, quelques craquements ont été entendus par des agents qui ont de suite alerté et empêché le passage [11]. Mais quelques minutes après, six arcs en béton (soit 24 mètres de longueur) et quatre passerelles se sont effondrées entraînant une partie du toit de la voûte [14]. Il n'y aurait pas eu de signes dans les jours précédant l'effondrement.



Figure 9 : Voûte effondrée, source [15]

2 – Enquête

2.1 - État des matériaux et impact de choix structuraux

Comme nous l'avons vu, la voûte était composée de béton, de métal et de verre, ce dernier n'avait pas de rôle structurel.

Durant l'enquête, plusieurs constats ont pu être faits à propos de l'état des matériaux :

- Provoquer moins d'une année après la mise en service l'effondrement d'une partie de la voûte, serait dû à une augmentation d'effort ou une diminution de résistance des matériaux, sinon l'effondrement aurait eu lieu soit beaucoup plus tôt soit beaucoup plus tard [6] ;
- Il a été dit que des fissurations existaient à l'origine et que la structure présentait des réserves de sécurité faibles. La coque se serait progressivement endommagée et donc fragilisée [16] ;
- La zone effondrée correspond à la zone d'accroche de trois passerelles, ce qui pouvait fragiliser localement la structure ;
- L'évolution de la structure sous l'effet des déformations liées au fluage du béton, ont accentué ces fragilités [17] ;
- Des changements importants de température dans les jours précédents ont pu engendrer des contraintes internes et être un des éléments déclencheur. La veille, il avait fait très froid pour un mois de mai ;

- La fissuration importante dans certaines zones laisse penser à un ferrailage insuffisant ou mal positionné. Les charges paraissent alors trop importantes pour l'ouvrage [17] ;
- Les poutres sablières étaient percées tous les 4 mètres pour les gaines de ventilations, elles avaient donc une faiblesse structurelle.

2.2 - Possibles causes de l'effondrement

Dans la synthèse du rapport Berthier¹, il est constaté qu'il n'y avait pas la possibilité de transférer les efforts vers d'autres zones si un problème survenait quelque part, ce qui est qualifié de manque de redondance mécanique [12].

Selon la commission d'enquête administrative présidée par Jean Berthier, l'effondrement ferait suite à deux événements quasi simultanés et interdépendants. D'une part, le pliage et la perforation de la coque en béton armé par les butons qui devaient la soutenir, et d'autre part, la rupture et la chute de la poutre sablière qui supportait la structure [9]. À partir du moment où la poutre sablière a chuté, les éléments de la structure côté Sud sont tombés à terre, et sous l'effet de la flexion, les éléments côté Nord sont tombés eux aussi. Finalement, le toit, sans élément pour le soutenir s'est effondré sur le niveau départ (figure 10).

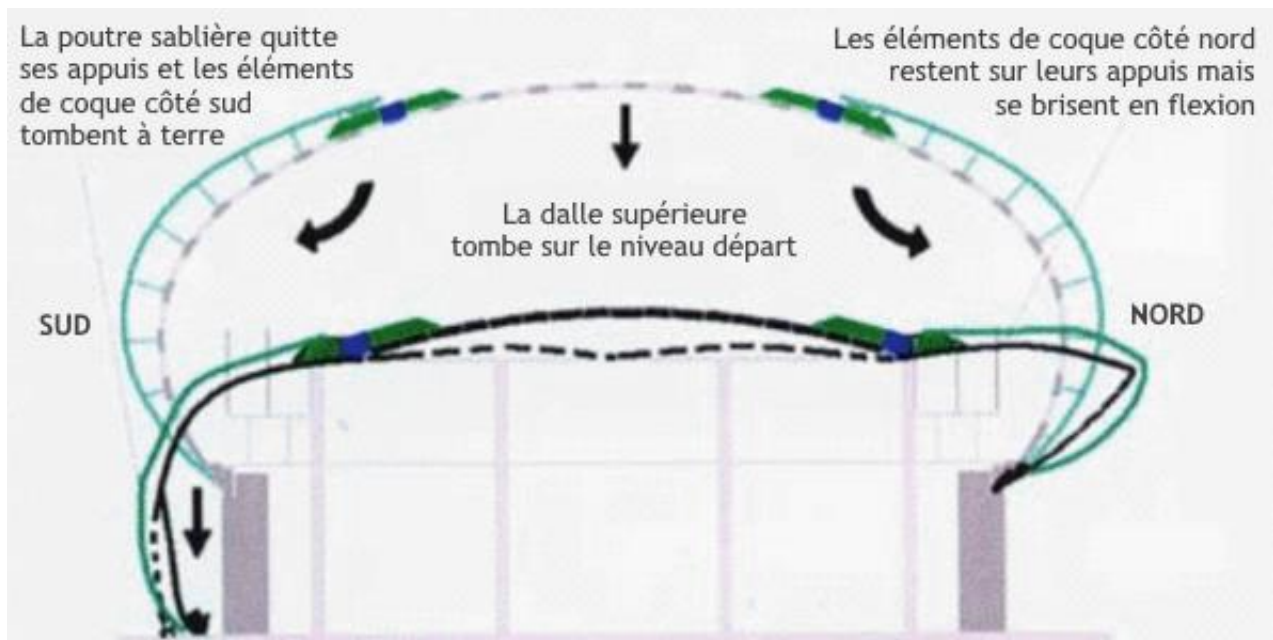


Figure 10 : Poutre sablière, source batiactu.com

Les enquêteurs ont également pu constater que la structure de la zone effondrée n'avait pas été conçue comme les autres zones du terminal. En effet, le béton est réparti de manière équilibrée sur toute la longueur de la jetée or la zone effondrée comportait trois arcs tronqués portant les passerelles. Ainsi tous les efforts de cette zone étaient reportés sur seulement trois éléments pleins de la coque en béton [18].

Un élément d'explication vient également de la forme en ellipse de la structure. Pour prévenir sa tendance à l'affaissement, la coque en béton était retenue par des tirants métalliques, tirants et coque solidarisés par des butons perpendiculaires à la voûte en béton. Ces pièces de soutien métalliques supportaient un effort important d'environ 9,5 kN. Or, des fissures ont été observées sur les lignes des butons des trois éléments pleins de la structure dans la zone effondrée.

¹ Rapport d'enquête des experts encadrés par Jean Berthier alors Président du Conseil national des ingénieurs et scientifiques de France

Le poinçonnement des butons dans le béton (figures 12 et 13), consiste à l'enfoncement des butons sous l'effet d'une charge localisée. La perforation de la voûte par les butons a provoqué un phénomène qualifié de **pliure en portefeuille** (la coque s'est pliée sur elle-même) [6].

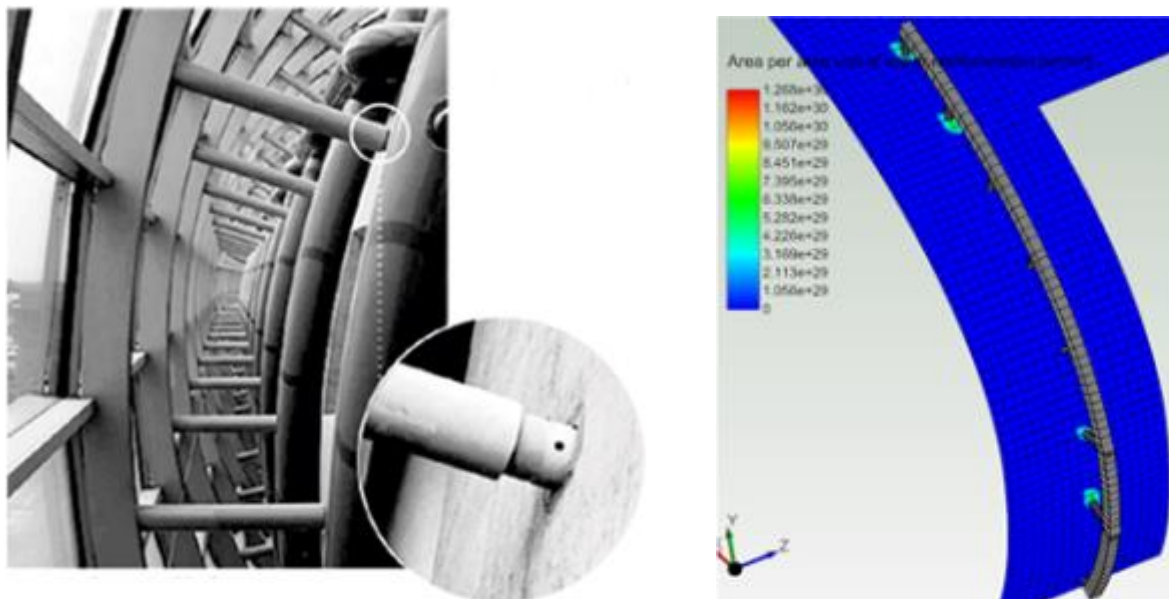


Figure 11 : Butons dans leur configuration initiale et simulation des contraintes, source [8]



Figure 12 : Localisation des butons dans la voûte, source expertiseSetec



Figure 13 : Dislocation du béton autour des butons, source expertiseSetec

Les enquêteurs ont également constaté que la forme en ellipse a empêché les bureaux d'étude de réaliser des calculs classiques sur les contraintes et les efforts liés à la structure. Jean Berthier explique : « Il a fallu passer par une modélisation. Dans le cas d'ouvrage d'art, on procède à deux modélisations différentes pour comparer les résultats. Mais les bureaux d'études se contentent la plupart du temps des résultats d'un seul modèle pour les bâtiments. C'est ce qui s'est produit dans ce cas » [18].

Toujours selon le président de la commission d'enquête : « La coque était le 23 mai dernier au bord de la mort. Et nous avons deux hypothèses pour savoir quel événement est à l'origine du coup de grâce ». La première cause envisagée est la température extrêmement basse enregistrée pour un mois de mai. Les jours précédents atteignaient 20°C, or au matin de l'effondrement, il faisait environ 4°C. Cette variation brutale de température aurait entraîné des efforts

supplémentaires sur la coque en béton. La seconde cause envisagée est le décrochage de l'étrier de la partie Sud [18].

2.3 - Condamnations

En décembre 2018, 14 ans après l'effondrement de terminal 2E, commencent les procès. Le groupe ADP, la filiale GTM de Vinci, le bureau d'étude Ingerop et le groupe d'inspection et de certification Bureau Veritas sont tous jugés coupables. En effet, la faute est répartie entre les quatre acteurs du projet. La forme compliquée de la jetée a empêché de confronter plusieurs modélisations [19]. Les trois entreprises ont regretté de n'avoir pas eu une vue d'ensemble sur le projet soumises à la pression des délais de mises en œuvre [15].

Finalement, les condamnations tombent le 13 mars 2019 [14] :

- ADP (MOE et MOA) : 225 000 euros ;
- GTM : 100 000 euros ;
- Ingerop : 100 000 euros ;
- Bureau Veritas : 150 000 euros.

Même si ADP a été condamné à la plus grosse peine encourue, cette somme est à relativiser avec le bénéfice de 610 millions d'euros qu'ADP a enregistré en 2018.

3 – Reconstruction

3.1 - Réutilisation des matériaux

Après l'effondrement, il a fallu réfléchir à la reconstruction de la jetée. Des solutions de réparation, c'est-à-dire de confortement de la jetée ont été écartées faute de garanties suffisantes et pour éviter tout effet subjectif négatif sur les futurs utilisateurs. Ainsi, il a été choisi de détruire puis reconstruire la totalité de la jetée, solution plus coûteuse que les solutions de réparation [2].

La solution retenue, qui reprend la géométrie initiale, a permis de conserver les 33 000 m² de couverture composée de vitrages sérigraphiés et de panneaux inox replacée sur la nouvelle voûte, ainsi que le système de ventilation [20]. Les étages inférieurs ne présentant aucun problème, ont été conservés. Pendant les travaux de déconstruction de la jetée, il a fallu être vigilant pour conserver la verrière et ne pas abîmer ou sur-contraindre les étages d'en-dessous.

3.2 - Choix de l'acier

La solution a alors été de remplacer la voûte structurelle en béton par une nouvelle structure composée de 152 arches métalliques, supportant la verrière. Un parement intérieur de bois reproduisant le volume intérieur du projet initial a été suspendu aux arches. Les 2 800 tonnes de la nouvelle structure en acier ont l'avantage d'être 6,5 fois inférieures à l'ancienne structure en béton [20]. Le poids propre de l'ouvrage est alors diminué et les contraintes diminuent.

Les 152 arches sont des treillis en acier disposés régulièrement entre la verrière et la voûte de bois qui sont éloignés de 1,5 m d'épaisseur. L'air chauffé par le soleil via la verrière est extrait pour maintenir la température intérieure [21].



Figure 14 : Reconstruction du Terminal, source [15]

La voûte intérieure présente une surface développée de 30 000 m². Elle est constituée de coques en bois préfabriquées, entre lesquelles sont intercalées des lattes de bois moulé disposées à claire-voie (figure 15) qui diffusent la lumière et permettent une vue sur les pistes. Chaque coque est constituée de panneaux multiplis cintrés, collés sur des raidisseurs courbes en bois lamellé-collé. Les coques de bois sont des éléments de très grandes dimensions, amenés préfabriqués et raboutés sur site sans joint. Le parement intérieur de ces panneaux est en lamelles de bouleau, jointives et ignifugées.

Les 18 000 m² de la coque en bois est suspendue aux 152 poutres treillis par des fixations articulées et réglables, invisibles depuis la salle, qui permettent d'absorber les mouvements de la structure métallique. Avant installation, des essais de vieillissement accéléré et de résistance au feu ont été réalisés, par le FCBA². Un tri des 160 000 lamelles de bouleau a été fait afin d'obtenir un aspect homogène du parement de bois [21].

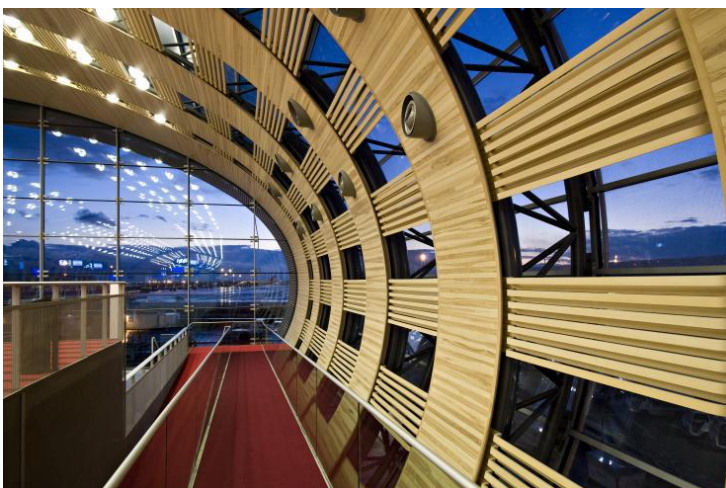


Figure 15 : Parement intérieur et couverture de la nouvelle jetée, source [21]

² Institut technologique FCBA, né de la fusion de l'AFOCEL (Association Forêt Cellulose) et du CTBA (Centre Techniques du Bois et de l'Ameublement)

Quatre ans après son effondrement et après moins de deux ans de travaux, la jetée a pu être ouverte à nouveau au printemps 2008, permettant d'accueillir 9 millions de passagers par an sur 45 000 m². Le coût de la destruction et de la reconstruction se monte à 130 millions d'euros dont 112 millions des assurances. Plusieurs entreprises ont été impliquées dans ces travaux : Finnforest GmbH (habillage bois) ; Groupement solidaire Genier-Deforge (mandataire), Brunel Démolition, Mills (étalement) et Mediaco Levage (déconstruction de la voûte) ; Groupement solidaire Laubeuf (mandataire)/Castel et Fromaget (reconstruction charpente dépose/repose verrière) ; Groupement solidaire Eiffage TP (mandataire), Eiffel Construction métallique, Delair Navarra (gros œuvre et maçonneries) [20].

4 – Conclusion

L'effondrement d'une partie de la jetée d'embarquement du terminal 2E a été provoqué par un ensemble de phénomènes dont on peut retenir une structure insuffisamment résistante dès l'origine dont l'évolution des sollicitations a été mal anticipée : fluage et changements de température. La zone qui s'est effondrée, en quelques minutes, concentrait de fortes contraintes dues aux ouvertures nécessaires aux les passerelles d'embarquement. Le choix de l'acier semble plus pertinent que le béton pour la forme en ellipse très aérée de cette longue jetée.

Lors de l'enquête et du procès, il a été souligné à de nombreuses reprises que l'esthétisme avait pris plus d'importance que l'humain. Les entreprises que l'aéroport avait engagées ont insisté sur le manque de liens entre les acteurs du projet et une trop grande pression mise pour les échéances impossibles à tenir.

Références :

[1]: Aéroport de Paris-Charles-de-Gaulle, Wikipédia,

https://fr.wikipedia.org/wiki/A%C3%A9roport_de_Paris-Charles-de-Gaulle

[2]: Le terminal 2E de Roissy sera détruit puis reconstruction totalement, Le Monde, mars 2005,

https://www.lemonde.fr/societe/article/2005/03/17/le-terminal-2e-de-roissy-sera-detruit-puis-reconstruit-totalement_401876_3224.html

[3]: Effondrement mortel d'un terminal à Roissy en 2004 : ADP condamné à 225 000 euros d'amende, la peine maximale, France Info, mars 2019,

https://www.francetvinfo.fr/societe/justice/effondrement-mortel-d-un-terminal-a-roissy-en-2004-adp-condamne-a-225-000-euros-d-amende-la-peine-maximale_3231263.html

[4]: Plans et Liste des Terminaux à Paris-Charles de Gaulle, Paris Aéroport, consulté janvier 2021,

<https://www.parisaeroport.fr/passagers/acces/paris-charles-de-gaulle/plans-terminaux>

[5]: Un terminal terminé à toute allure, Tonino Serafini, Libération, 24 mai 2004,

https://www.liberation.fr/evenement/2004/05/24/un-terminal-termine-a-toute-allure_480517

[6]: L'effondrement du terminal 2E de Roissy est dû à une perforation de sa voûte en béton, Thierry Devige-Stewart, Le Moniteur, juillet 2004, <https://www.lemoniteur.fr/article/l-effondrement-du-terminal-2e-de-roissy-est-du-a-une-perforation-de-sa-voute-en-beton.404209>

[7]: Explanation of the collapse of Terminal 2E at Roissy - CDG Airport by nonlinear deterministic and reliability analyses, H. Daou, W. Abou Salha, W. Raphael, A. Chateaufneuf, ScienceDirect, juin 2019, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509518303607>

- [8]: Charles de Gaulle, el colapso de un aeropuerto, civilFEM, avril 2017, <https://www.prontubeam.com/articulos/07-04-2017-Derrumbe-aeropuerto-Charles-de-Gaulle>
- [9]: Terminal 2E : les raisons de l'effondrement, Claire Avignon, Journal de l'environnement, février 2005, <https://www.journaldelenvironnement.net/article/terminal-2e-les-raisons-de-l-effondrement,11169>
- [10]: Aéroport Charles de Gaulle - Aérogare 2E, J. Mossot, Structurae, <https://structurae.net/fr/medias/16962-aeroport-charles-de-gaulle-roissy-aerogare-2e-exterieur>
- [11]: Terminal 2E : les hypothèses de l'effondrement, Dominique Errard, Le Moniteur, mai 2004, <https://www.lemoniteur.fr/article/terminal-2e-de-roissy-charles-de-gaulle-les-hypotheses-de-l-effondrement.390594>
- [12]: Rapport Berthier le scénario de la catastrophe Roissy Terminal 2E une structure trop fragile, D. Errard, février 2005, <https://www.lemoniteur.fr/article/rapport-berthier-le-scenario-de-la-catastrophe-roissy-terminal-2e-une-structure-trop-fragile.359824>
- [13]: Reasons for Charles de Gaulle Airport Collapse, T. Kaljas, Journal of Civil Engineering and Architecture 11 (2017) 411-419, <https://pdfs.semanticscholar.org/096c/eb80cdaa2c0f5f0d3c3c7075c04975d3937a.pdf>
- [14]: Aéroports de paris condamné à 225 000 euros d'amende pour l'effondrement du terminal 2E de Roissy, 20 minutes, mars 2019, <https://www.20minutes.fr/justice/2471819-20190313-aeroports-paris-condamne-225000-euros-amende-effondrement-terminal-2e-roissy>
- [15]: Effondrement du terminal 2E à Roissy-Charles-de-Gaulle : 225 000 euros d'amende requis contre ADP, Le Monde, décembre 2018, https://www.lemonde.fr/police-justice/article/2018/12/13/effondrement-du-terminal-2e-a-roissy-charles-de-gaulle-225-000-euros-d-amende-requis-contre-adp_5397081_1653578.html
- [16]: Effondrement d'un terminal à Roissy : ADP et trois sociétés devant le tribunal, Batiactu, octobre 2017, <https://www.batiactu.com/edito/effondrement-un-terminal-a-roissy-adp-et-trois-societes-50865.php>
- [17]: La structure du terminal 2E présentait plusieurs faiblesses, J-P. Defawe, Batiactu, février 2005, <https://www.batiactu.com/edito/structure-terminal-2e-presentait-plusieurs-faiblesses-18748.php>
- [18]: Terminal 2E : les raisons de l'effondrement, C. Avignon, février 2005, journal de l'environnement <https://www.journaldelenvironnement.net/article/terminal-2e-les-raisons-de-l-effondrement.11169>
- [19]: Les bâtiments complexes doivent s'inspirer des ouvrages d'art, Jean-Pierre Defawe, Batiactu, février 2005, <https://www.batiactu.com/edito/batiments-complexes-doivent-s-inspirer-ouvrages-art-18755.php>
- [20]: Reconstruction à Roissy, le terminal 2E se coiffe de sa nouvelle voûte en acier, Le Moniteur, décembre 2007, <https://www.lemoniteur.fr/article/reconstruction-a-roissy-le-terminal-2e-se-coiffe-de-sa-nouvelle-voute-en-acier.1856024>
- [21]: Reconstruction du Terminal 2E, TESS, 2008, <https://www.tess.fr/projet/reconstruction-du-terminal-2e>