

BENCH MARK

Think Big



THE MAGAZINE FOR THE MODELLING & SIMULATION COMMUNITY

APRIL 2025





A 3000-Meter Tower:

From a Year of Crisis to a Vision of Possibility

Sébastien Besse | Compagnie Générale de l'Industrie

For me, 2024 was a terrible year. Business in the engineering sector was slow due to the sluggish construction market in France, French elections and politics were mired in uncertainty, there was the war in Ukraine, and steel prices, which had been rising since the COVID-19 pandemic, continued to rise. January was marked by a family crisis: my mother-in-law was diagnosed with Alzheimer's disease and my wife, who is Canadian, had to return to Toronto.

In the midst of striving to reconnect with clients to boost sales and keep the business running, the idea of a 3000-meter tower took root in my mind on February 1, 2024. After years of calculating steel structures, pressurized pipelines, pressure vessels, and shell-and-tube heat exchangers, I woke up one morning with the image of this tower vividly present in my imagination. Although I hadn't yet done the mathematics, I was convinced it was possible to design a steel structure of this height. At first, I envisioned a 2000-meter tower. But as I began researching other tower projects worldwide, it quickly became clear that 2000 meters would soon no longer be a remarkable feat. Therefore, I decided I needed to calculate a 3000-meter tower instead. I started putting ideas on paper, one after another, sketching the outlines of the columns and pondering the equations for both the external and internal panels. From the outset, I imagined the 3000-meter tower as a hollow cylindrical shape, like a concentric reduction pipe fitting. It was a balance between a slender structure rising into the sky and a hollow, inviting form, embodying harmony between convexity, concavity, and flexibility. Very early on, I integrated an analogy with the Eiffel Tower, the French prototype by Gustave Eiffel, which has stood for 135 years.

Where to Build the 3000-Meter Tower? Balancing Geology and Urban Planning Challenges

I began to consider where a tower of this magnitude could be built in France. I even went as far as speaking with a geologist for several hours. Together, we examined the geological maps of southeastern France, searching for sites with diverse geological layers and soils of various types, including limestone rocks on the northern side of the Sainte-Victoire massif. We also discussed the granite soils of Brittany. We agreed that, ideally, the tower should be as lightweight as possible to reduce the load on the soil, which provides a reactive force. Soils are permeable poroelastic structures through which rainwater and groundwater flow. Their level of hydration is correlated with soil-bearing capacity. The weight of any structure must remain below the soil's bearing capacity under all circumstances, including seismic events. In France, Brittany's granite soil offers one of the best structural bearing capacities. To minimize the shadow cast by the tower on the ground, I concluded that the Sologne region south of Paris would be a good candidate. However, according to an urban planning specialist, such a tower would ideally be built in the heart of a densely populated city.

A Hub for Social and Practical Purposes

What would be the purpose of the tower? The tower must have a social utility, but what exactly? A firefighting observation centre? an astronomical observatory at 3000 meters? a population gathering area in the event of flooding? a space dedicated to agricultural purposes and food production? There are lots of possibilities. I have even read about large construction projects, including district heating and energy networks, where the building itself is a source of power. In the end, I decided that the tower, as designed, would see 70% of the floor space used for commercial purposes and the remaining 30 % for tourism. The floor area at $z=1000$ m, 2000 m, and 3000 m is respectively 95270 m², 47000 m², and 21130 m², not including the ground floor.

Future Giants: Towers That Will Redefine the Global Skyline

To date, the tallest building ever is the Burj Khalifa in the United Arab Emirates. Completed in 2009, it measures 828 meters. Other tower projects around the world, both realized and those still on paper, include the Jeddah Tower, Saudi Arabia (1007 meters), currently under construction; the Obilisco Capitale Tower, Egypt (1000 meters), approved for construction; and the Sky Mile Tower, Japan (1700 meters), a future development envisioned for Tokyo. Another interesting research and development design came out of Japan in 1995. Published in the Journal of Urban Technology, the X-Seed 4000 was a design concept for a 4000-meter tower with 800 floors that could accommodate up to a million inhabitants. These towers are massive. A fun fact about our 3000-meter tower is that the 240 hinged supports that would anchor the tower to its foundation weigh the same as about 6500 elephants.

The 3000-Meter Tower: Too Bold and Perhaps Science Fiction?

Early on, I shared the idea of the tower with people around me to observe social reactions. "Impossible," "It's not a good idea," "But where would it go?" "Do you realize the cost? the environmental impact?" and "Madness"; these were some of the reactions I got. I conducted brainstorming sessions with scientists, engineers, and people from various backgrounds to sketch out a preliminary design brief. A banker called the project an "engineer's dream." An urban planning specialist remarked, "This project seems straight out of a science fiction novel." My banker, a tower enthusiast who had travelled the world with his wife to visit iconic skyscrapers, spent an hour with me browsing innovative tower designs on Google. My posts on LinkedIn about the tower quickly accumulated over 100,000 views; in 2024, these LinkedIn posts had 1,142,228 impressions and reached 274,152 members.

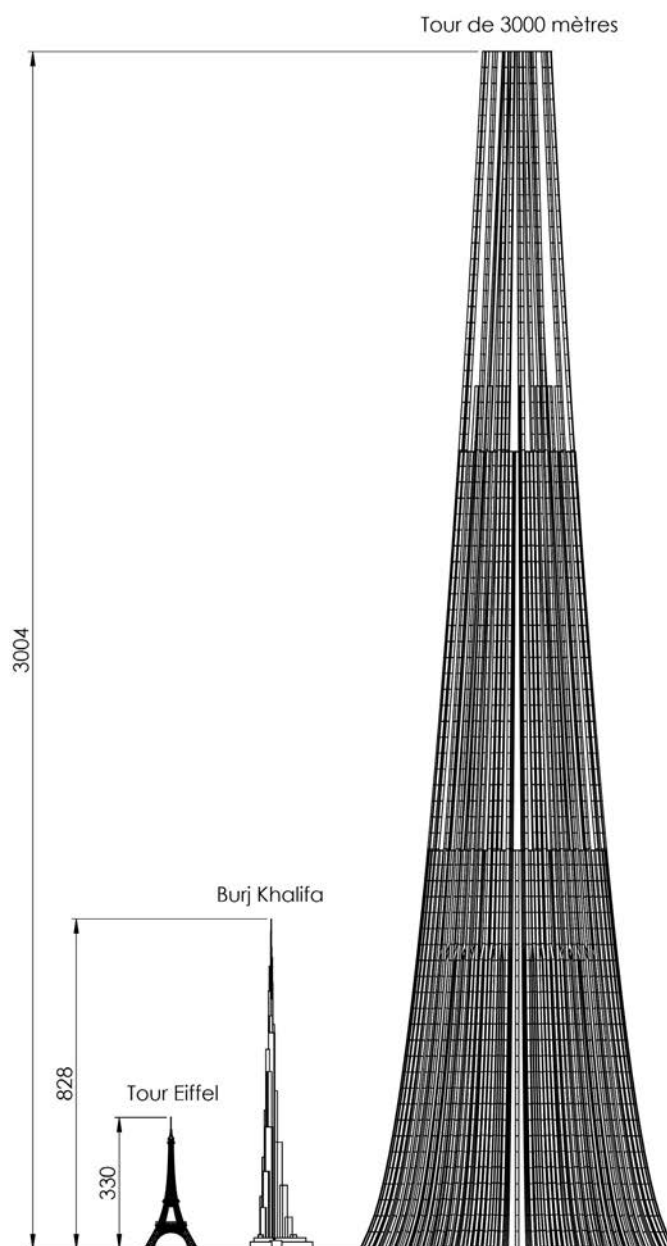
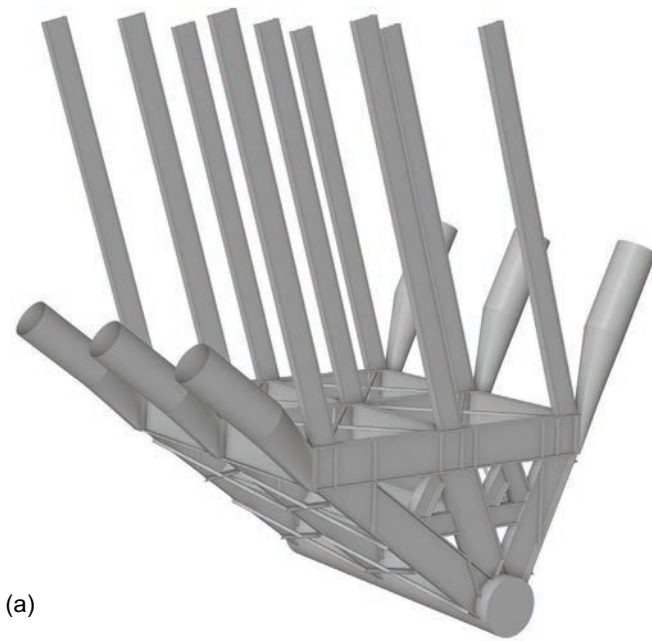
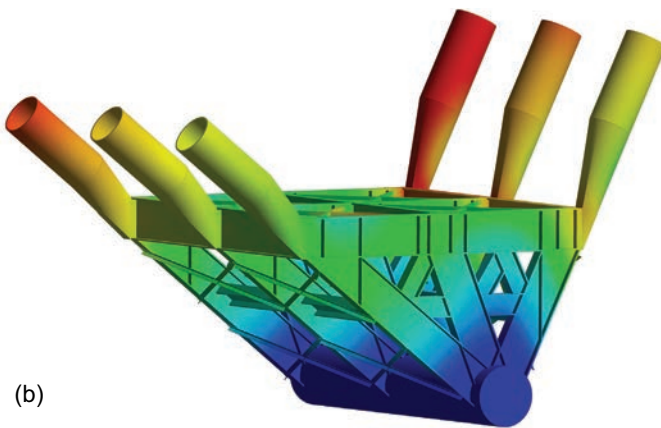


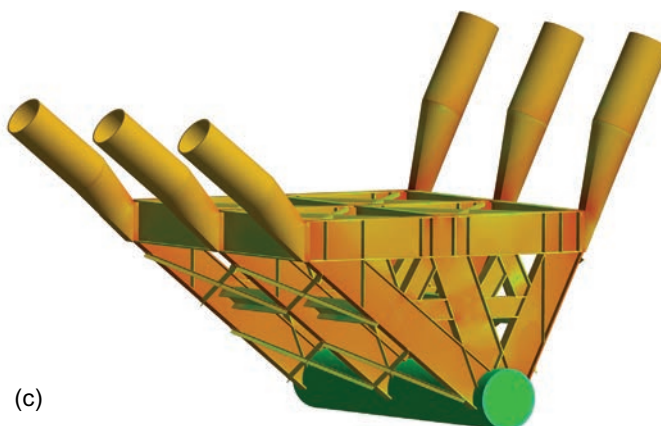
Figure 1: Visual comparison of the height of the Eiffel Tower, Burj Khalifa and the 3000-meter tower.



(a)



(b)



(c)

Figure 2: (a) Geometry of the hinged support of one macro-column; (b) 3D map of displacement; (c) 3D map of Von Mises stress.

Understandably, I received a lot of criticism regarding the 3000-meter tower. The risks involved are enormous and— in 2024— the financing would come to 20 billion euros and require 10,000 workers dedicated daily over 15 years. However, undeterred, I started formalizing the initial calculations. I convinced myself that, like the Eiffel Tower, the 3000-meter tower needed to be lattice-like to allow wind to pass through, thereby significantly reducing horizontal wind loads on the structure. Early calculations showed that a uniform wind load from 0 to 3000 meters could locally increase compression on the ground-level columns by 50%. By late February 2024, it became essential to design a column system capable of bearing the weight of the upper levels. Columns equate to compression, and compression means buckling. Therefore, a column system capable of withstanding heavy compression loads had to be designed.

My first inspiration came from construction cranes, typically consisting of four-square tubular columns connected by welded lattice beams. This proven system, with heights of a few dozen meters, is commonly used in construction and civil engineering. However, instead of four columns, a macro-column composed of nine columns connected by lattice beams was envisioned. It soon became apparent that not every floor could be used due to the risk of overloading. Decisions would need to be made about which levels would be developed and which would not. In parallel, the cumulative weight from level to level was considered. To manage this, the weight of the structure had to decrease with altitude. Since the tower is slender, parabolic or hyperbolic profiles emerged to define the shape of the inner and outer panels. Parabolic equations turned out to be more convenient to model and aesthetically pleasing.

The 3000-meter tower presented here is, therefore, a hollow paraboloid in the mathematical sense. I quickly wrote the equations for the internal and external parabolas and coded them in MATLAB®. By sampling points every 40 meters in altitude, a text output containing the coordinates of all points along a parabola from 0 to 3000 meters, with a step size of $dz = 40$ meters was generated. The very first computational model involved importing this text file into Autodesk Robot Structural Analysis software. By connecting the points with beam elements, it was possible to represent a "section" from 0 to 3000 meters. This was the starting point.

Transitioning from a 2D section to a 3D model required a fruitful iteration. After some trial and error with our draftsman using SolidWorks, they succeeded in producing a wireframe 3D representation, but the interior of the tower was closed off at 1000 meters, which didn't meet my expectations. It was eventually revised and the 3D model produced an overall plan of the tower with the series of columns— fantastic!

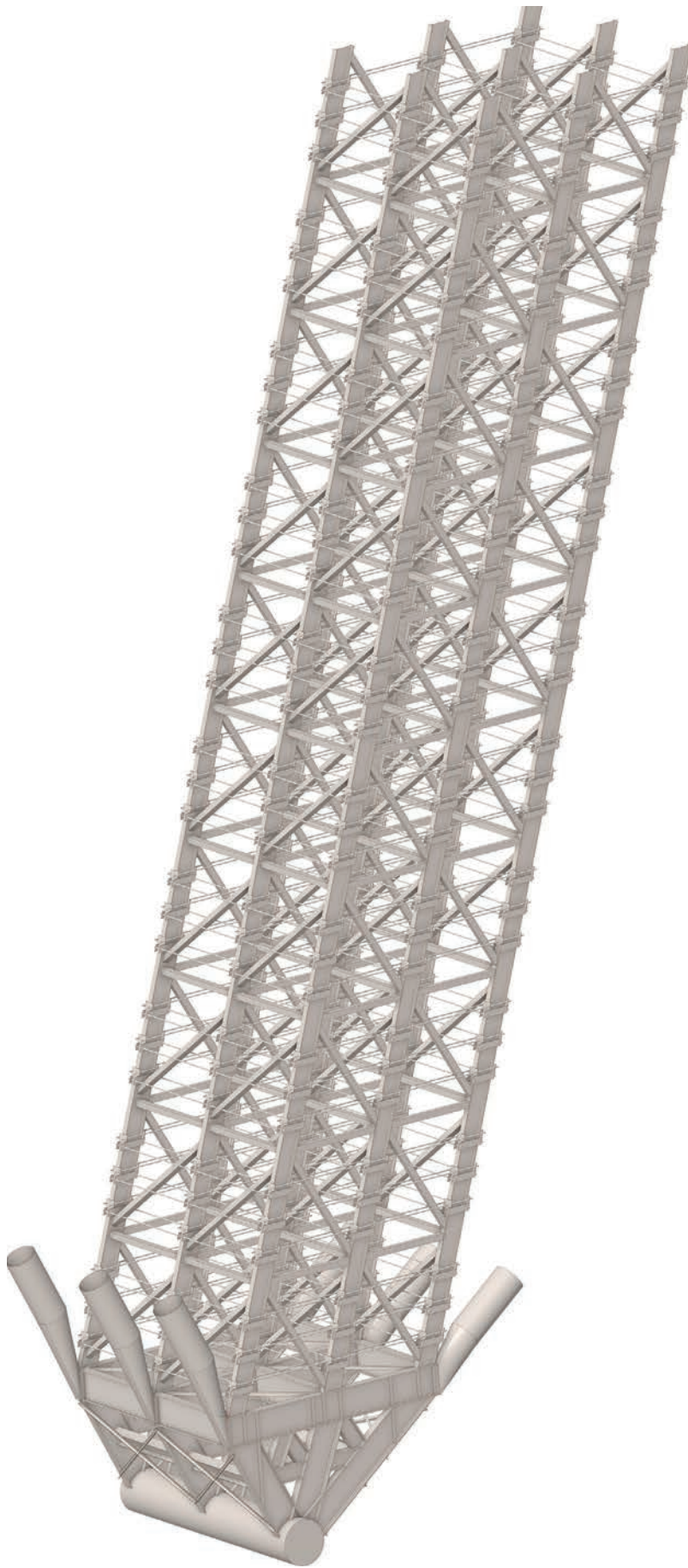


Figure 3 : One macro-column from the base of the tower $z = 0$ to $z = 40$ meters, including the hinged support.

The tower was then divided into 75 segments, each 40 meters high. At each 40-meter level, the average diameter of the tower decreased, as did its thickness. It was imperative to slim down the tower because the weight of each level added to the one below. Unfortunately, in all such cases, it's the ground-level columns that bear the brunt; designing a 3000-meter tower primarily means designing ground-level columns capable of withstanding immense compression forces. A column system was developed to support 3000 tons at the column tops. This system is called a macro-column. At the ground level, each cross-section contains four macro-columns, connected by large 'Saint Andrew's' crosses, providing stability to handle wind loads.

Drawing Inspiration from The Eiffel Tower to Design a Self-Stable 3000-Meter Structure

Initial calculations indicated excessive combined compression and bending due to an overly curved parabolic arc near the base. Consequently, the first four points of the external and internal parabola were adjusted to achieve a curvature similar to the Eiffel Tower's base arches. The Eiffel Tower's plans, conveniently available in electronic form on the Bibliothèque Nationale de France website, proved invaluable. After adjusting the initial nodes, a compatible geometry was achieved, capable of supporting an unweighted load of 3000 tons at the head of each macro-column, totalling 12000 tons at the section of crosses of the ground floor. High-elasticity steel of grade S460, widely available in Europe in 2024, was chosen for this project. With a yield strength of 460 MPa, S460 steel is superior to standard grades like S235 or S355. To avoid labelling and procurement errors, it was decided that the entire structure would use S460 steel exclusively.

To consolidate these initial calculations, the weight of the entire structure above the ground floor needed to be determined. So, how does one calculate the weight of something not yet represented in 3D? By making reasonable assumptions, which must be verified throughout the project. A mathematical recurrence relation was established between the weight of level N and the weight of level $N+1$. Each 40-meter level reduces in weight. This reduction occurs because the tower's average diameter decreases with altitude, and the structure's thickness also diminishes.

This geometric choice, inspired partly by the Eiffel Tower, is crucial. Upon reflecting on the Eiffel Tower's technical design, it became clear that the curvature of its base columns is a key mechanical feature. Why are these columns curved? How does this differ from linear columns? I came to the realisation that just as bends in piping introduce flexibility to accommodate axial forces from thermal expansion, the curvature in the Eiffel Tower serves a similar purpose for axial forces caused by its own weight, Eureka!

This means that the tower's weight causes it to settle naturally onto its foundations. The design is appropriate because this curvature ensures that the natural settlement under its weight is stable against buckling risks. It helps maintain the tower's alignment with its vertical neutral axis. This principle needed to be applied to the 3000-meter tower to ensure that during assembly, from one segment to the next, the structure would remain self-stable under its own weight once complete.

Weight Reduction, CO₂ Savings: Path to Sustainability

A formula for the tower's weight was finally proved mathematically. After a few calibrations of the formula

from the 3D model of the ground floor, the reasoning held strong. We could now see 75 levels of 40 meters, each with its own weight, ensuring that the total weight at the top of each macro-column of the ground floor did not exceed 3000 tons. The day we halved the tower's weight came after two weeks of studying the tower's overall plan. It became clear that we needed to reduce the number of column series at the ground floor and continue to decrease them as the tower rises. By doing this, the weight of the tower's structure was nearly halved, while still ensuring the mechanical stability of the structure. Keep in mind that each ton of steel saved corresponds to a reduction of approximately 1.8 tons of CO₂ emissions. We went from an initial steel structure of around 1.5 million tons to a more sustainable 747 320 tons.

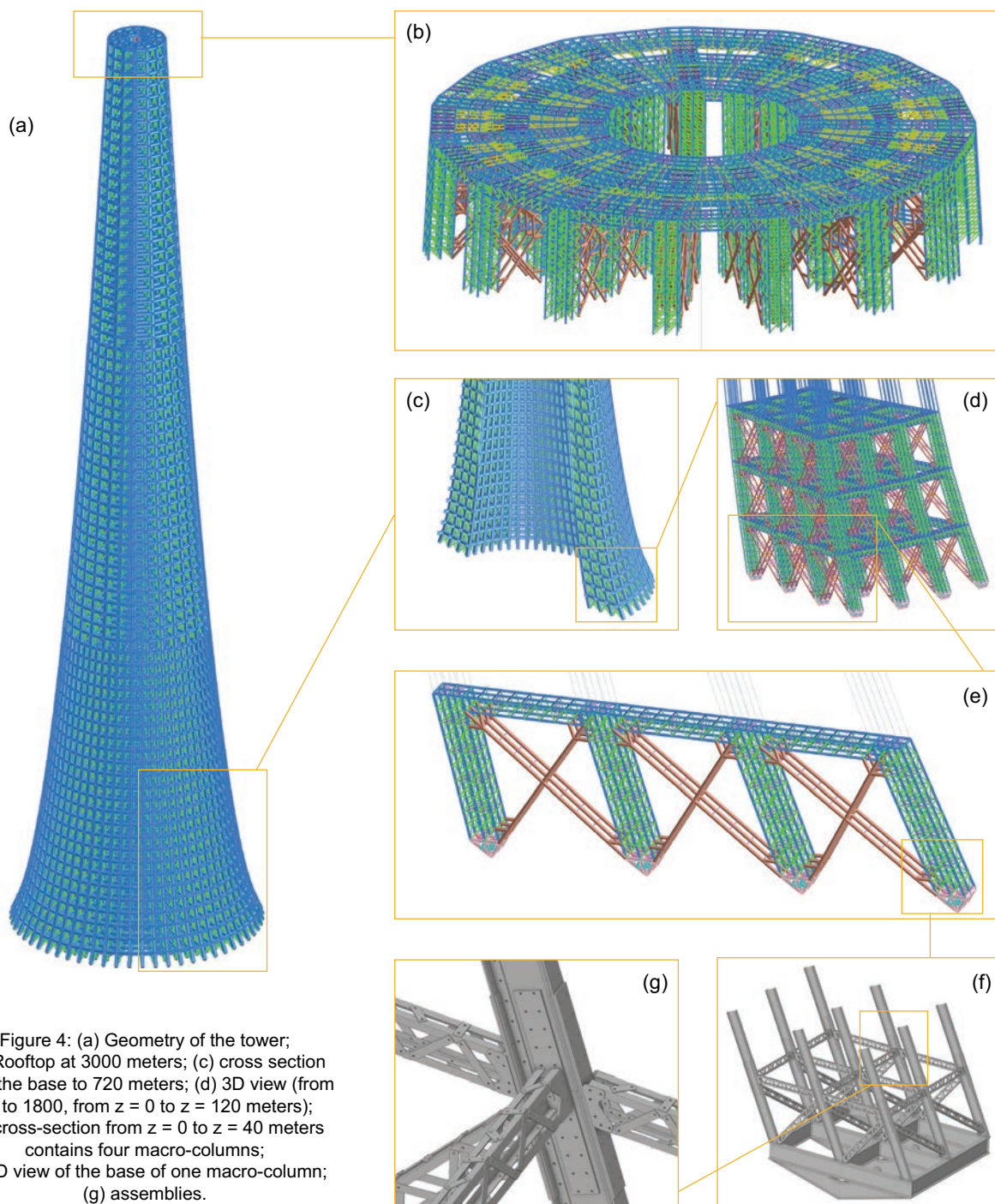


Figure 4: (a) Geometry of the tower; (b) Rooftop at 3000 meters; (c) cross section from the base to 720 meters; (d) 3D view (from 00 to 1800, from $z = 0$ to $z = 120$ meters); (e) cross-section from $z = 0$ to $z = 40$ meters contains four macro-columns; (f) 3D view of the base of one macro-column; (g) assemblies.

This was great news for both the foundation of the tower and the environment. The tower's base diameter, at 800 meters, would be five to six times wider than the base of the Eiffel Tower. The Eiffel Tower, once known as the 300-meter tower, is ten times smaller than our 3000-meter tower. If we applied simple proportional math to the Eiffel Tower, the 3000-meter tower would end up with a base diameter of 1434 meters - far too wide. Therefore, an exterior diameter of 800 meters was decided, which is much more reasonable. Note that I hold great respect for the Eiffel Tower and the legacy of Gustave Eiffel, a legacy that is well-known in France and around the world.

The Technical Challenges: The Art of Mastering Wind and Bending Stress

In 2024, it was impossible to represent the millions of components necessary for a 3000-meter tower in 3D, despite advances in computing technology, servers, clusters, and supercomputers. This presented both hardware and software challenges. It's remarkable that the Eiffel Tower was built a year before electricity arrived in Paris, and long before the existence of computers and software like AutoCAD, SolidWorks, and Ansys. Finite element method-based calculation software now allows for the solving of mechanical equations on meshes containing billions of nodes. Scientific research is producing thousands of publications every week globally, with the discovery of new equations in numerous fields. However, the field of metal construction still relies on tried-and-tested traditional methods. Years can be spent on a single element, for example, determining the precise velocity profiles and dynamic pressure fields around steel subjected to horizontal wind loads.

Fortunately, scientific committees have come together and created standards, such as the Eurocodes and ASCE, which allow for the analytical modelling of wind loads based on the altitude of the construction. Wind loads in a 3D model using Autodesk Robot Structural Analysis software can be applied with ease. Depending on the wind zone, the following parameters are calculated: reference wind speed, direction coefficient, and seasonal coefficient. The reference wind speed and dynamic reference pressure are then deduced. The height of the building is considered, taking into account the category, terrain roughness, roughness length, terrain factor, roughness coefficient and orographic coefficient. The average wind speed can then be calculated. A turbulence coefficient and turbulence intensity are also computed and the peak dynamic pressure deduced. Each steel profile, with its specific shape, has its slenderness, filling rate, end effect factor, and force coefficient calculated to deduce the linear effective pressure on the beams and columns of the structure, considering the envelope values between the normal and tangential directions of the profiles. For example, for IPE 600 columns, the wind load considered is 61 daN/m of lateral wind force. Ultimately, a homogenized global model allows for the calculation of the horizontal deflection due to wind at the top of the tower, applying a peak dynamic pressure of 300 daN/m².

Two major technical arguments for wind resistance are, first, the flared shape of the tower at the base compared to the perfectly tapered top, which is well-suited for absorbing the bending moment caused by wind. The second argument is that the cylindrical shape of the tower ensures an invariant moment of inertia through rotation, giving the tower a

bending stress at the base that is independent of the wind direction. This design is inspired by trees with circular cross-sections, which can withstand years of cycles of combined bending and torsion moments due to swirling wind transients. The tower's design ensures a wind-induced lateral displacement of 55 mm at the top of the 3000-meter tower. The tower's geometry has been meticulously planned to handle wind loads, the primary load case determining the size of beams and joints, along with the dead load. The wind loads, according to Eurocode 1 (§4.3.2), are based on a logarithmic wind speed profile, with data available from $z = 0$ to $z = 200$ meters. The logarithmic wind speed relationship is a semi-empirical formula commonly used to model the vertical distribution of the average wind speed in the lower part of the atmospheric boundary layer. This law typically applies to the first 100 meters of the atmosphere, corresponding to the surface layer of the boundary layer. Beyond that, the atmosphere divides into two main zones: the remainder of the boundary layer, extending to about 1000 meters, and the troposphere.

3000 Meters to the Sky: When Mathematics and Technology Redesign the Impossible

With the materials available in 2024, it was structurally impossible to equip every level at 40-meter intervals. Development of only the levels at $z=0$, $z=1000$, $z=2000$, and $z=3000$ meters was planned. This would mean that we could construct steel floors, including joists, and use steel decking, upon which floor load surcharges of 250 daN/m² could be applied in accordance with the Eurocodes. Thus, these three developed floors would bring a reasonable weight to the structure. The transmission of the mechanical forces of the tower to the foundations was designed as a set of articulated column bases. This articulation consists of a welded frame, a steel bar with a diameter of 1500 mm, HEM1000 beams—among the most resistant on the market—and a cross-braced frame. It can withstand the loads of nine IPE600 columns, including the 3000 tons of unweighted load, as well as the forces from large St. Andrew's crosses on each side, which carry several hundred tons of axial forces in tension/compression. By modelling the frame in Ansys Mechanical using surface elements, we meshed and then applied the mechanical loads. The calculated stresses were below the yield limit of steel, and the displacements minimal. The mechanical performance of the frame was verified in accordance with the Eurocodes.

After imagining the main structure, it was necessary to consider access systems, particularly the walkways with stairs. This is required by French regulations ITGH (very high-rise building). The design sees the stairs positioned on the outer panel to avoid overloading the inner panel, which bears the most load. They are fixed to the three IPE600 columns by creating a walkway with angle braces that allows the stairs to be received through the shafts, using floors that work with slotted plates.

By chance, the Eiffel Tower was built in a "very low seismic" zone according to the French seismic risk zoning. At the time it was built, seismic analysis was not regulatory. It is evident that the 3000-meter tower must be built in a very low seismic zone to minimize the risk of failure caused by seismic inertial forces. However, seismicity was taken into account in the mechanical calculations, even though it is not critical

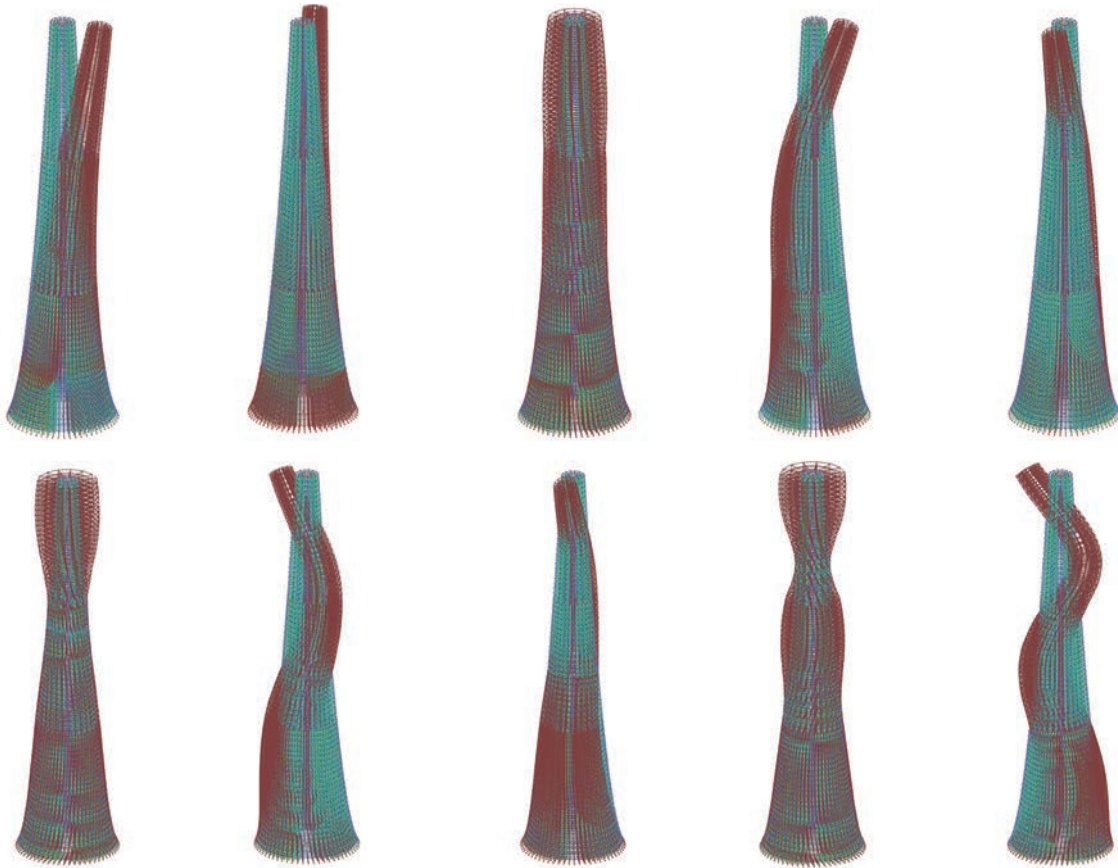


Figure 5: (a) Geometry of the modal analysis of the tower.

compared to dead-load and wind forces. A modal analysis determined the tower's natural modes, including the first 10 modes distributed between 0.05 Hz and 0.28 Hz preliminarily, with bending modes, torsion modes, and combined torsion/bending modes.

Early on, the risk of civil or terrorist aircraft impact was considered in the design of the steel frame. The major advantage of a tower of this size is that a commercial airliner remains small compared to the tower. It is likely that such an impact would not compromise the global mechanical integrity of the structure, although resulting debris ejected at high speed over several hundred meters could potentially injure people on the access stairs of the outer panel or passengers in the elevators. The most critical aircraft impact would be one occurring at a developed floor at $z = 1000$ m, 2000 m, or 3000 meters. Rapid dynamic explicit calculations, including quasi-static approaches and various scenarios, would help consolidate the data regarding aircraft crashes on the tower. The construction of very tall towers remains a current topic globally, despite the terrorist act of September 11, 2001, in the United States.

Building a 3000-meter tower is no longer a matter of mathematics or technology, as the technical challenges have been overcome. Thanks to precise calculations and the use of highly elastic materials such as commercial steel S460, the structure has been designed to withstand immense loads and wind effects. The parabolic design, inspired by the Eiffel Tower, ensures optimal stability. This project is now a matter of optimization, cost management, and urban integration, transforming a technical dream into a feasible project.

I will leave you with this question, how can this structure be integrated into socio-ecological needs and sustainability of the future? ■

A little background...The story of an extraordinary year: between research and personal challenges

Now, I love maths and industrial mechanics, and I have been lucky enough to make it my career and work independently across multiple sectors. But finding myself suddenly inundated with requests for emergency engineering needs and receiving what was, at that point, an unprecedented amount of work for my company, right when the cost of software licenses had skyrocketed for the second consecutive year, could not have come at a worse time for me. All this was happening while my wife and I were being tested by co-occurring family crises and I was in Toronto helping her with one of those family crises; 2024 was the worst year of my life.

Fortunately, around that same time, I was invited by my supplier, Ansys software partner 4CAD, to submit a topic for a NAFEMS scientific conference at CETIM in Senlis in November 2024 and was selected to present the concept of the 3000-meter tower. I finally had the chance to express myself on the topic in front of a dozen experts in numerical mechanics and dynamic simulation with neurodiverse perspectives like mine. I know I excited the imagination of many of my peers. Without intending to advertise, I recommend NAFEMS conferences, they are of the highest technical level.

Sébastien Besse, engineer and PhD

Mr. Besse is a physics engineer and completed a PhD on fluid mechanics studies in brain tumors. After carrying out various missions in the industry as a mechanical calculation engineer and project manager, he now develops the activities of Compagnie Générale de l'Industrie (CGI) in the structural calculation office for its clients. CGI has successfully completed over 100 projects for a multi-sectoral client base.

Study funding: This study is funded from the own funds of Compagnie Générale de l'Industrie (CGI). CGI is supported by the Public Investment Bank (BPI), Région Sud Investissement (RSI), and the European Union.

Acknowledgments:

Kathryn Pringle Besse, Christophe Bocquillon. The author wishes to take this opportunity to thank the NAFEMS team members for their help and support in the preparation of this article, including David Quinn and Didier Large.

Bibliography:

1. Baker, W.F., Korista, S., & Novak, L., Structural Design and Construction of the Burj Khalifa. Council on Tall Buildings and Urban Habitat, 2007.
2. Ali, M.M., & Moon, K. S., The Role of Structural Engineering in the Design of Tall Buildings. Architectural Science Review, 2007. 50(3): p. 205-223.
3. Smith, B.S., & Coull, A., Case Study: The Structural Design of the Jin Mao Tower. International Journal of High-Rise Buildings, 1991.
4. Charnish, B., & McNamara, R., Seismic Design of High-Rise Steel Buildings: A Case Study of the Petronas Towers. Structural Design of Tall and Special Buildings, 2002. 11(4): p. 243-260.
5. Slavid, R. Structural Challenges in the Design of the Shard, London. in Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings. 2012.
6. Smith, R.J., & Gill, P., Design and Construction of the Kingdom Tower. Structural Design of Tall and Special Buildings, 2014. 23(12): p. 897-911.
7. Klemencic, R., & Fry, J., Advanced Structural Systems for Tall Buildings: A Case Study of the Willis Tower. Journal of Structural Engineering, 2001. 127(5): p. 573-582.
8. Thornton, C.H., & DeCastro, F., Innovative Design and Construction Techniques for the Shanghai World Financial Center. CTBUH Journal, 2008. 3: p. 34-41.
9. Imai, K., & Yoshimoto, S., Structural Analysis and Design of the Tokyo Skytree. Journal of Structural Engineering, 2011. 137(12): p. 1529-1539.
10. Irwin, P., & Kilpatrick, J., Wind Engineering Challenges in the Design of the Guangzhou International Finance Center. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2010. 98(12): p. 863-876.
11. Salmon, C.G., Johnson, J. E., Steel Structures: Design and Behavior. 1996: Prentice Hall.
12. Chen, W.F., Toma, S., Advanced Analysis and Design of Steel Frames. 1994: CRC Press.
13. McCormac, J.C., Nelson, J. K., Structural Steel Design: A Practice-Oriented Approach. 2006: Prentice Hall.
14. (CEN), C.E.d.N., Eurocode 3: Design of Steel Structures. EN 1993-1-1. 2005.
15. André, J., Simões da Silva, L., Guide des Eurocodes : Introduction aux Eurocodes structurels et utilisation en France. 2010: Eyrolles.
16. Bouchair, A., Godart, B. , Application des Eurocodes aux Structures en Acier. 2012: Presses des Ponts.
17. Martin, L., Leblois, T., Conception et Calcul des Structures Métalliques selon l'Eurocode 3. 2014: Dunod.
18. Zienkiewicz, O.C., Taylor, R. L., Zhu, J. Z., The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals. 2005: Butterworth-Heinemann.
19. Gallagher, R.H., Zienkiewicz, O. C., The Finite Element Method in Engineering Science. 1973: McGraw-Hill.
20. Ghali, A., Neville, A. M., Brown, T. G., Structural Analysis: A Unified Classical and Matrix Approach. 2009: CRC Press.
21. Bathe, K.J., Finite Element Procedures. 1996: Prentice Hall.
22. Chandrupatla, T.R., Belegundu, A. D., Introduction to Finite Elements in Engineering. 2011: Prentice Hall.
23. Cook, R.D., Malkus, D. S., Plesha, M. E., Witt, R. J., Concepts and Applications of Finite Element Analysis. 2002: John Wiley & Sons.
24. Lagaros, N.D., Tsompanakis, Y. Structural Optimization: Proceedings of the International Conference on Engineering Optimization. 2007.
25. Arora, J.S., Introduction to Optimum Design. 2011: Academic Press.
26. Grama, L., & Saka, M. P., Design Optimization of Steel Structures. 2016: CRC Press.
27. Bendsoe, M.P., Sigmund, O., Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications. 2004: Springer.
28. Timoshenko, S.P., Gere, J. M., Theory of Elastic Stability. 1961: McGraw-Hill.
29. Bazant, Z.P., Cedolin, L., Stability of Structures: Elastic, Inelastic, Fracture, and Damage Theories. 1991: Oxford University Press.
30. Galambos, T.V., Structural Stability of Steel: Concepts and Applications for Structural Engineers. 1998: John Wiley & Sons.
31. Singer, J., Arbocz, J., Weller, T., Buckling Experiments: Experimental Methods in Buckling of Thin-Walled Structures, Volume 1: Basic Concepts, Columns, Beams, and Plates. 2002: John Wiley & Sons.
32. Besse, S., Note de calculs de la tour de 3000 mètres, C.G.d.I.I. (CGI), Editor. 2024.
33. Al-Kodmany, K., Tall Buildings, Design, and Technology: Visions for the Twenty-First Century City, Journal of Urban Technology, 2011. 18 (3): p. 115– 140



We are NAFEMS



The International Association for the Engineering Modelling, Analysis and Simulation Community

nafems.org

De l'année de crise à la vision de possibilité : une tour de 3000 mètres

Pour moi, 2024 a été une année merdique. Les ventes de notes de calculs au premier semestre étaient en baisse en lien avec le contexte économique en berne de la construction en France, aux incertitudes électorales et politiques françaises et à la guerre en Ukraine, incluant une augmentation des prix de l'acier depuis la Covid-19. Le mois de janvier avait été marqué par une crise familiale, la mère de mon épouse était en train d'être diagnostiquée avec la maladie d'Alzheimer. Mon épouse est Canadienne et elle avait dû rentrer à Toronto.

Alors que je m'efforçais de relancer mes clients pour faciliter les ventes et faire tourner la boutique, l'idée d'une tour de 3000 mètres a germé dans mon esprit le 1^{er} février 2024. A force de calculer des charpentes en acier, des tuyauteries sous pression, des réacteurs sous pression et des échangeurs thermiques à faisceaux tubulaires, je me suis levé un matin avec cette tour dans mon imaginaire. Sans en avoir encore fait les mathématiques, j'avais acquis la conviction qu'il est possible de concevoir une structure en acier de cette hauteur. J'ai tout d'abord imaginé une tour de 2000 mètres. Puis en commençant à chercher dans la bibliographie des projets de tour dans le monde, j'ai vite compris que 2000 mètres ne serait bientôt plus un exploit. J'ai eu besoin de calculer une tour de 3000 mètres. J'ai commencé à mettre sur papier des idées les unes après les autres, à dessiner les contours des poteaux, à réfléchir aux équations des panneaux extérieurs et intérieurs. Dès le départ, j'ai imaginé la tour de 3000 mètres de forme cylindrique creuse, comme un raccord de tuyauterie de type réduction concentrique. Un équilibre entre une structure élancée s'élevant dans le ciel et une forme creuse et accueillante, illustrant une harmonie entre convexité, concavité et flexibilité. Très tôt j'ai intégré dans mes réflexions des analogies avec la Tour Eiffel, prototype Français de Gustave Eiffel, toujours debout depuis 135 années.

Où ériger la tour de 3000 mètres ? Entre géologie et urbanisme, le défi d'un équilibre. J'ai commencé à réfléchir à l'endroit où une tour de cette ampleur pourrait être construite en France. J'ai discuté avec un docteur en géologie plusieurs heures. Nous avons examiné ensemble les cartes géologiques du Sud-Est de la France à la recherche de terrains présentant diverses couches géologiques, et des sols de plusieurs natures, incluant les roches calcaires au côté nord du massif de Sainte-Victoire. Nous avons aussi évoqué les sols granitiques de Bretagne. Nous avons discuté qu'il faut idéalement qu'une tour soit la plus légère possible afin de réduire le poids sur le sol qui oppose une réaction. Les sols sont des structures poroélastiques perméables dans lesquels circule l'eau de pluie et des nappes phréatiques. Leur degré d'hydratation et la portance du sol sont corrélés. Le poids de la structure doit rester inférieur à la portance du sol en toute circonstance incluant dans un cas sismique. En France, c'est le sol granitique de Bretagne qui présente la meilleure portance structurale. Pour limiter l'ombrage au sol de la tour, j'ai conclu que la Sologne au Sud de Paris serait un bon candidat. Toutefois, il est souhaitable d'après une spécialiste en aménagement urbain qu'une telle tour soit construite au cœur d'une grande ville à forte densité.

Un hub à des fins sociales et pratiques

Quel serait le but de la tour ? La tour doit avoir une utilité sociale, mais laquelle exactement ? Un centre d'observation pour la lutte contre les incendies, un observatoire astronomique à 3000 mètres, une zone de rassemblement pour la population en cas d'inondation, un espace dédié à des objectifs agricoles et à la production alimentaire ? Les possibilités sont nombreuses. J'ai lu des articles sur de grands projets de construction intégrant des réseaux de chauffage urbain et d'énergie, où le bâtiment lui-même devient une source d'énergie. J'ai décidé que la tour, telle que conçue, est à usage commercial pour 70 % de la surface au sol et à usage touristique pour 30 %. Les surfaces aux altitudes de $z = 1000$ m, 2000 m et 3000 m sont respectivement de 95 270 m², 47 000 m² et 21 130 m², sans compter le rez-de-chaussée.

Géants du futur : des tours qui redéfiniront l'horizon mondial

A ce jour le plus haut bâtiment jamais construit est le Burj Khalifa aux Émirats arabes unis. Sa construction était achevée en 2009, il mesure 828 mètres. Parmi les projets de tours à travers le monde, ceux en cours de réalisation et ceux encore sur papier, on peut citer la Jeddah Tower (1007 mètres, Arabie Saoudite) dont elle est actuellement en construction. La construction de la tour Oblisco Capitale (1 000 mètres, Égypte) a été approuvée. La Sky Mile Tower (1 700 mètres, Japon) a été imaginée pour Tokyo. Un autre projet de recherche et développement intéressant est venu du Japon en 1995 avec X-Seed 4000, un concept de tour de 4 000 mètres de haut avec 800 étages pouvant accueillir jusqu'à un million d'habitants. Il a été publié dans le Journal of Urban Technology. Ces tours sont massives. Un fait amusant à propos de notre tour de 3 000 mètres est que les 240 supports articulés qui l'ancreraient à ses fondations pèsent environ 6 500 éléphants.

La tour de 3000 mètres : trop audacieuse et peut-être de la science-fiction ?

Très tôt, j'ai confronté l'idée d'une tour autour de moi pour observer les réactions sociales. « Impossible », « ce n'est pas une bonne idée », « mais où ça ? », « tu te rends compte du coût ? Des conséquences environnementales ? », « une folie ». J'enchainais les brainstorming avec des personnes scientifiques, techniques, et de divers horizons pour essayer d'esquisser un cahier des charges préliminaire. Une banquière qualifiait le projet de « rêve d'ingénieur ». Une spécialiste en urbanisme déclarait : « ce projet semble tout droit sortir d'un roman de science-fiction ». Mon banquier était passionné de tours, il avait parcouru le monde avec sa femme pour visiter les plus grandes tours, j'avais passé une heure de réunion avec lui à browser les tours innovantes sur Google. Mes publications sur LinkedIn concernant la tour ont rapidement accumulé plus de 100 000 vues ; en 2024, ces publications LinkedIn ont eu 1 142 228 impressions et ont atteint 274 152 membres.

Naturellement, j'ai reçu de nombreuses critiques concernant la tour de 3 000 mètres. Les risques encourus sont énormes et, en 2024, le financement s'élèverait à 20 milliards d'euros et nécessiterait l'engagement quotidien de 10 000 travailleurs pendant 15 ans. Cependant, sans se laisser décourager, je commençais à formaliser les premiers calculs. Je m'étais convaincu que comme pour la Tour Eiffel, il fallait que la tour de 3000 mètres soit en dentelle, afin de laisser circuler le vent, pour réduire massivement les charges horizontales de vent sur la structure. Les premiers calculs ont montré qu'une charge homogène de vent de 0 à 3000 mètres est susceptible d'augmenter localement la compression sur les poteaux du rez-de-chaussée d'un facteur 50%. En fait, fin février 2024, il fallait absolument concevoir un système de poteaux capables de reprendre les charges de poids des étages supérieurs. Qui dit poteau dit compression, qui dit compression dit flambement. Il fallait donc réfléchir à un système de poteau qui reprenne une forte charge de compression.

La première inspiration est venue des poteaux des grues de chantiers, constitué généralement de 4 poteaux en tubes carrés avec des poutres en treillis soudées. C'est un système éprouvé, d'une hauteur de quelques dizaines de mètres, qui est quotidiennement utilisé dans la construction et en génie civil. Un macro-poteau a été imaginé. Il est constitué de 9 poteaux avec des poutres en treillis. Il est devenu évident que chaque étage ne pouvait pas être aménagé pour des raisons de surcharges d'exploitation des planchers. Il faudra donc décider de quels niveaux seront aménagés et lesquels ne le seront pas. En parallèle de cette réflexion, il fallait penser au poids qui s'accumule de niveau en niveau et absolument qu'à chaque niveau, le poids la structure diminue avec l'altitude. Comme la tour est élancée, des profilés soit paraboliques soit hyperboliques ont émergé pour décrire l'allure des panneaux extérieurs et intérieurs de la tour. Finalement, il s'avérait plus commode à modéliser des équations paraboliques et plus esthétique.

La tour de 3000 mètres présentée ici est donc un paraboloïde creux au sens mathématique. Je me suis empressé d'écrire les équations des paraboles interne et externe puis de les coder dans le logiciel Matlab. En échantillonnant tous les 40 mètres d'altitude les points, une sortie texte dans laquelle était inscrite toutes les coordonnées des points d'une parabole de 0 à 3000 mètres, avec un pas $\Delta z = 40$ mètres était générée. Le tout premier modèle informatique a été d'utiliser le logiciel de calculs de poutres Robot Structural Analysis pour importer ce fichier texte. En reliant les points par des éléments poutres, il était ainsi possible de représenter une « coupe » de 0 à 3000 mètres. C'était le point de départ.

Passer d'une coupe 2D à une 3D a nécessité une itération fructueuse. Après avoir tâtonné avec notre dessinateur-projeteur avec le logiciel Solidworks, nous avons réussi à produire une représentation 3D filaire, mais l'intérieur de la tour était fermé à partir de 1000 mètres ce qui n'était pas anticipé. Finalement le modèle 3D a produit un plan d'ensemble de la tour avec les séries de poteaux. Super !

La tour était alors découpée en 75 tronçons de 40 mètres de haut. A chaque niveau de 40 mètres, le diamètre moyen de la tour se réduisait, de même que son épaisseur. Il fallait impérativement donner une cure de minceur à la tour car le poids de chaque niveau s'additionne avec le précédent. Malheureusement dans ce cas c'est les poteaux du rez-de-chaussée qui trinquent ! Concevoir une tour de 3000 mètres, c'est premièrement concevoir des poteaux du rez-de-chaussée capables de résister à une forte charge de compression. Un système de poteaux a été conçu pour reprendre 3000 tonnes en tête de poteaux. Cet ensemble s'appelle un macro-poteaux. Au rez-de chaussée, sur une coupe, il y a 4 macropoteaux. Ces macropoteaux sont reliés entre eux par de grandes croix de « Saint-André » assurant une stabilité pour la reprise des charges de vent.

S'inspirer de la tour Eiffel pour concevoir une structure auto-stable de 3000 mètres

Les premiers calculs montraient un peu trop de compression et flexion combinés en raison d'un arc parabolique trop courbé à proximité du sol, il était donc décidé de corriger les 4 premiers points des paraboles externes et internes afin d'avoir une courbure proche de l'arc de pieds de la Tour Eiffel. Les plans de la Tour Eiffel avait été utiles, grâce à la version électronique disponibles sur le site de la Bibliothèque Nationale de France. Ainsi après avoir corrigé les premiers nœuds, une géométrie compatible était obtenue avec une reprise de charge de 3000 tonnes non pondérée en tête de chaque macro-poteau, soit 12 000 tonnes sur une coupe du rez-de-chaussée. Il faut tout de même recourir à des aciers à haute élasticité de nuance S460 que l'on trouve assez bien en Europe en 2024, mais dont la limite élastique est de 460 MPa, soit une valeur supérieure aux aciers courants comme le S235 ou le S355. Pour un ouvrage comme une tour de 3000 mètres, mieux vaut avoir tous les

aciers dans la même nuance afin d'éviter les erreurs d'étiquetage et d'approvisionnement. La structure de la tour serait donc entièrement approvisionnée en acier S460.

Il fallait consolider ces premiers calculs en calculant le poids de tout ce qu'il y avait au-dessus du rez-de-chaussée. Donc comment calculer le poids de ce qui n'est pas encore représenté en 3D ? En faisant des hypothèses raisonnables, dont on s'assurera qu'elles restent vérifiées tout au long du projet. Une relation mathématique de récurrence a été établie entre le poids d'un étage N avec le poids d'un étage N+1. Chaque niveau de 40 mètres maigrit en poids. D'une part car le diamètre moyen de la tour diminue avec l'altitude, et d'autre part car l'épaisseur de la tour diminue aussi avec l'altitude.

Ce choix géométrique est très important. Il est en partie inspiré de la forme de la Tour Eiffel. En réfléchissant longuement aux choix techniques faits pour la Tour Eiffel, je me suis convaincu que la courbure de pieds était un point mécanique clé. Mais pourquoi donc ces poteaux sont-ils courbes ? Qu'est-ce que cela change par rapport à des poteaux linéaires ? J'ai réalisé que comme en tuyauterie les coudes introduisent de la souplesse dans la tuyauterie pour reprendre les efforts axiaux de dilatation thermique. Sauf que pour une tour, l'effort axial provient du poids propre de la tour elle-même, *Eurêka !*

Ça signifie que le poids fait que la structure s'affaisse naturellement sur ses ancrages. Cette conception est appropriée puisque cette courbure garantit que cet affaissement au poids propre soit stable en termes de risque de flambement, c'est-à-dire qu'il facilite le centrage de la tour par rapport à sa fibre neutre verticale. Il fallait donc absolument transposer ce principe à la tour de 3000 mètres, afin d'être certain qu'au montage, de tronçon en tronçon, et puis une fois finie, l'ouvrage soit auto-stable au poids propre.

Réduction de poids, économie de CO₂ : la tour de 3000 mètres en route vers la durabilité

Une formule est enfin prouvée mathématiquement pour le poids de la tour. Quelques calibrations de la formule sont effectuées à partir du modèle 3D du rez-de-chaussée. Le raisonnement tient la route. On sait imaginer 75 niveaux de 40 mètres, ayant 75 poids dont la somme ne ramène pas plus de 3000 tonnes au sommet de chaque macro-poteaux du rez-de-chaussée.

Le jour on l'on a divisé par 2 le poids de la tour : après deux semaines d'études du plan d'ensemble de la tour, il apparaît comme une évidence qu'il faut réduire le nombre de séries de poteaux au rez-de-chaussée, et aussi et fur et à mesure de l'élévation. Ce faisant le poids de la structure de la tour a été pratiquement divisé par deux, tout en garantissant la tenue mécanique de l'ouvrage. Gardons en tête que chaque tonne d'acier économisée représente une économie de 1.8 tonnes de CO₂. On passait d'une structure d'environ 1 500 000 tonnes d'acier, à une structure d'environ 747 320 tonnes. Une bonne nouvelle pour les fondations et pour l'environnement.

Le diamètre de la tour au sol serait de 800 mètres, c'est entre cinq à six fois plus large que le cercle qui passe par les pieds de la Tour Eiffel. La Tour Eiffel, appelée autrefois la tour de 300 mètres, est dix fois plus petite que notre tour de 3000 mètres. Si l'on applique un simple produit en croix, on trouverait une largeur de tour de 1434 mètres, c'est beaucoup trop large. Un diamètre extérieur de 800 mètres a été retenu, ce qui est plus raisonnable. Notez que j'ai un grand respect pour la Tour Eiffel et l'héritage de Gustave Eiffel. Son héritage est bien connu en France et dans le monde.

Les défis techniques d'une tour de 3000 mètres : l'art de maîtriser le vent et la contrainte de flexion

En 2024, il était impossible de représenter les millions de pièces nécessaires pour une tour de 3000 mètres en 3D, malgré les progrès liés aux avancées technologiques en matière de processeurs informatiques, de serveurs de calcul, de clusters et de super-calculateurs. Cela pose à la fois des soucis de hardware et de software. C'est remarquable que la Tour Eiffel ait été construite un an avant l'arrivée de l'électricité à Paris, et bien longtemps avant l'existence des ordinateurs et des logiciels comme AutoCAD, SolidWorks et Ansys. Les logiciels de calculs suivant la méthode des éléments finis permettent en 2024 de résoudre des équations de mécanique sur des maillages de plusieurs milliards de nœuds. La recherche scientifique fait émerger des milliers de publications chaque semaine dans le monde, avec la découverte de nouvelles équations dans de multiples domaines. Pourtant, le domaine de la construction mécanique métallique industrielle conserve des méthodes traditionnelles éprouvées. Des années peuvent s'écouler pour un simple élément, par exemple, pour déterminer avec précision les profils de vitesse et de champ de pression dynamique de pointe autour d'un profilé acier soumis à une charge horizontale de vent.

Heureusement, des comités scientifiques se sont réunis et ont créé des normes comme les Eurocodes et l'ASCE qui permettent de modéliser de manière analytique les charges de vent en fonction de l'altitude de la construction. Des charges de vent dans un modèle 3D de calcul avec le logiciel Robot Structural Analysis sont appliqués sans difficultés. En fonction de la zone de vent, les paramètres suivants sont calculés : la vitesse du vent de référence, le coefficient de direction, le coefficient de saisonnalité. La vitesse de référence du vent et la pression dynamique de référence en sont déduites. La hauteur de la construction est prise en compte en fonction de la catégorie, de la rugosité du terrain, de la longueur de rugosité, d'un facteur de terrain, d'un coefficient de rugosité, et d'un coefficient d'orographie. La vitesse moyenne du vent peut alors être calculée. Un coefficient de turbulence et l'intensité de la turbulence sont calculés et la pression dynamique de pointe est déduite. Chaque profilé en acier ayant une forme spécifique, on calcule l'élancement des profilés, le taux de remplissage, le facteur d'effet d'extrémité et un coefficient de force pour en déduire la pression effective linéique sur les poutres et les poteaux de la structure, en retenant les valeurs enveloppes entre la direction normale et la direction tangentielle des profilés. Par exemple pour les poteaux en section IPE 600, la charge de vent prise en compte est de 61 daN/m d'effort latéral de vent. Finalement un modèle global homogénéisé permet le calcul de la déflexion horizontale au vent au sommet de la tour en appliquant une pression dynamique de pointe de 300 daN/m².

Deux arguments techniques absolument majeurs pour la résistance au vent sont d'une part la forme évasée de la tour en pied par rapport au sommet parfaitement adaptée pour la reprise du moment de flexion lié au vent. Le second argument est que la forme cylindrique de la tour assure un moment quadratique invariant par rotation, ce qui confère à la tour une contrainte de flexion en pied indépendant de la direction au vent. Cette conception est inspirée des arbres de section circulaire capables de reprendre pendant des années de cycles de moments de flexion et de torsion combinés liés aux transitoires de vent tourbillonnants. La conception de la tour est assurée pour avoir un déplacement latéral lié au vent de 55 mm au sommet de la tour à 3000 mètres. La géométrie de la tour a été minutieusement pensée pour reprendre les charges de vent, principal cas de charge dimensionnant les sections de fers et des assemblages, avec le poids propre. Les charges de vent, d'après l'Eurocode 1 (§4.3.2), sont basées sur un profil logarithmique de vitesse du vent et les données sont disponibles de $z = 0$ à $z = 200$ mètres. La relation logarithmique de la vitesse du vent est une formule semi-empirique couramment employée pour modéliser la répartition verticale de la vitesse moyenne du vent dans la partie inférieure de la couche limite atmosphérique. En général,

cette loi s'applique aux 100 premiers mètres de l'atmosphère, correspondant à la sous-couche de surface de la couche limite. Au-delà, l'atmosphère se divise en deux principales zones : le reste de la couche limite, qui s'étend jusqu'à environ 1 000 mètres, et la troposphère.

3000 mètres vers le ciel : quand mathématiques et technologie redessinent l'impossible

Avec les matériaux disponibles en 2024, il n'est pas structurellement possible d'aménager chaque niveau de 40 mètres. Seul l'aménagement des niveaux $z=0$, $z=1000$, $z=2000$, $z=3000$ m était prévu. Cela signifie qu'on pourrait construire des planchers en structure acier incluant le solivage et l'emploi de bacs aciers sur lesquels on appliquerait des surcharges d'exploitation de planchers de 250 daN/m^2 conformément aux Eurocodes. Les 3 planchers aménagés ramènent ainsi un poids raisonnable à l'édifice. La transmission des efforts mécaniques de la tour aux fondations est prévue comme un ensemble de pieds de poteaux articulés. Cette articulation est constituée d'un châssis mécano-soudé, d'un rond d'acier de diamètre 1500 mm, de poutres de section HEM1000 parmi les plus résistants sur le marché, ainsi que de cornières de contreventement. Il est capable de résister aux chargements de 9 poteaux IPE 600, incluant les 3000 tonnes non pondérés, mais aussi de reprendre les efforts des grandes croix de St-André de part et d'autre, ramenant plusieurs centaines de tonnes d'efforts axiaux en traction/compression. En modélisant avec Ansys Mechanical le châssis en éléments surfaciques, nous avons maillé puis appliqué les chargements mécaniques. Les contraintes calculées étaient inférieures à la limite élastique de l'acier. Les déplacements sont faibles. La tenue mécanique du châssis était vérifiée conformément aux Eurocodes.

Après avoir imaginé l'ossature principale, il était nécessaire de réfléchir aux moyens d'accès en particulier aux passerelles avec escaliers. Ceci est imposé par la réglementation ITGH (immeuble de très grande hauteur). La conception inclut des escaliers positionnés sur le panneau extérieur afin de ne pas alourdir le panneau intérieur le plus chargé. Ils sont fixés sur les 3 poteaux en IPE 600 en créant une passerelle avec bracons qui permet de recevoir les escaliers par les trémies, en utilisant des planchers collaborant avec des tôles à larme.

Comme par hasard, la tour Eiffel avait été construite en zone « très faiblement sismique » d'après le zonage Français du risque de sismicité. A l'époque où elle a été construite, l'analyse sismique n'était pas réglementaire. C'est évident que la tour de 3000 mètres doit être construite en zone très faiblement sismique afin de minimiser le risque de défaillance induit par les forces inertielles d'origine sismique. Toutefois, le séisme a été pris en compte dans la note de calculs mécaniques, même s'il n'est pas dimensionnant en comparaison avec le poids propre et le vent. Une analyse modale a permis de déterminer les modes propres de la tour incluant les 10 premiers modes répartis entre 0.05 Hz et 0.28 Hz de manière préliminaire, avec des modes de flexion simple ou combinée ou multiple, des modes de torsion et des modes de torsion/flexion combinés.

Très tôt, le risque d'impact d'avion civil ou terroriste a été pris en compte dans l'imagination de l'ossature en acier. L'avantage majeur d'une tour de cette taille, c'est qu'un avion de ligne commercial reste petit en dimensions comparé à la tour. Il est probable qu'un impact de ce type ne remette pas en cause la tenue mécanique de l'ouvrage, bien que résultant en des débris à haute vitesse sur plusieurs centaines de mètres qui pourraient potentiellement causer des dommages à des personnes situés sur les escaliers d'accès du panneau extérieur, aux personnes en transit dans les ascenseurs. Un impact d'avion le plus critique serait celui ayant lieu au niveau d'un plancher exploité à $z = 1000$ m, 2000 m ou 3000 mètres. Des calculs de dynamique rapide explicite, incluant des

approches quasi-statiques et divers scénarios permettrait de consolider les données concernant l'étude des crash d'avions sur la tour. La construction de tours de très grande hauteur dans le monde reste un sujet d'actualité malgré l'acte terroriste du 11/09/2001 aux Etats-Unis.

Construire une tour de 3000 mètres n'est plus une question de mathématiques ou de technologie, car les défis techniques ont été surmontés. Grâce à des calculs précis et l'utilisation de matériaux à haute élasticité comme l'acier commercial S460, la structure a été conçue pour supporter les immenses charges et les effets du vent. Le design parabolique, inspiré de la Tour Eiffel, assure une stabilité optimale. Ce projet est désormais une question d'optimisation, de gestion des coûts et d'intégration urbaine, transformant ainsi un rêve technique en un projet réalisable.

Je vous laisse avec cette question : comment cette structure peut-elle être intégrée aux besoins socio-écologiques et à la durabilité du futur ?

Un peu de contexte... Le récit d'une année extraordinaire : entre recherche et défis personnels.

J'adore les mathématiques et la mécanique industrielle, et j'ai eu la chance d'en faire mon métier et de travailler de manière indépendante dans de nombreux secteurs. Mais me retrouver soudainement submergé de demandes urgentes d'ingénierie et recevoir ce qui était, à l'époque, une quantité de travail sans précédent pour mon entreprise, au moment même où le prix des licences logicielles explosait pour la deuxième année consécutive, n'aurait pas pu tomber à un pire moment. Tout cela se produisait alors que ma femme et moi étions mis à rude épreuve par des crises familiales concomitantes, et j'étais à Toronto pour l'aider à gérer l'une d'elles ; 2024 a été la pire année de ma vie.

Par chance, à la même époque, j'ai été invité par mon fournisseur, 4CAD, partenaire logiciel d'Ansys, à soumettre un sujet pour une conférence scientifique de la NAFEMS au CETIM de Senlis en novembre 2024 et j'ai été sélectionné pour présenter le concept de la tour de 3 000 mètres. J'ai enfin eu l'occasion de m'exprimer sur le sujet devant une douzaine d'experts en mécanique numérique et en simulation dynamique, partageant les mêmes perspectives neurodiverses que moi. J'ai su éveiller l'imagination de nombre de mes pairs. Sans vouloir faire de publicité, je recommande les conférences NAFEMS, qui offrent un niveau technique exceptionnel.