



→ Terrell

-  was created in 1982
- is a leading international engineering firm
- has contributed extensively to the development of building technology
- gives creative freedom to its engineers within the framework of a coordinated multi-disciplinary team
- delivers optimised, holistic solutions while respecting the budgetary envelope
- offers quality at all levels through the full commitment of highly qualified individuals



STRUCTURAL
ENGINEERING



Structural Engineering

**MECHANICAL
& ELECTRICAL**
ENGINEERING



Multidisciplinary Engineering

FAÇADE
ENGINEERING



Façade Engineering

**SUSTAINABLE
DEVELOPMENT**

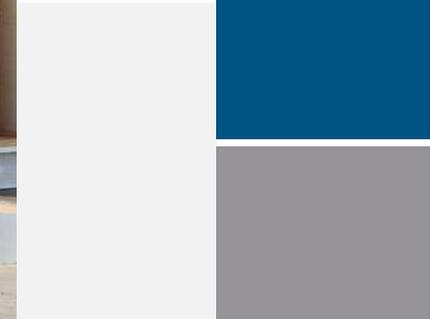


Sustainable Development

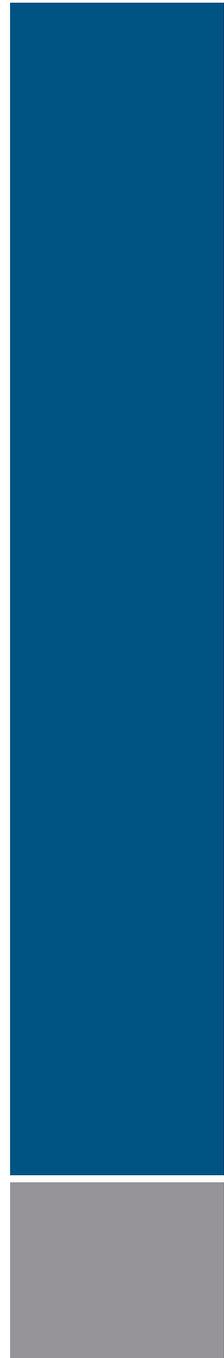
- Pavillon Camper / Alicante, ESPAGNE



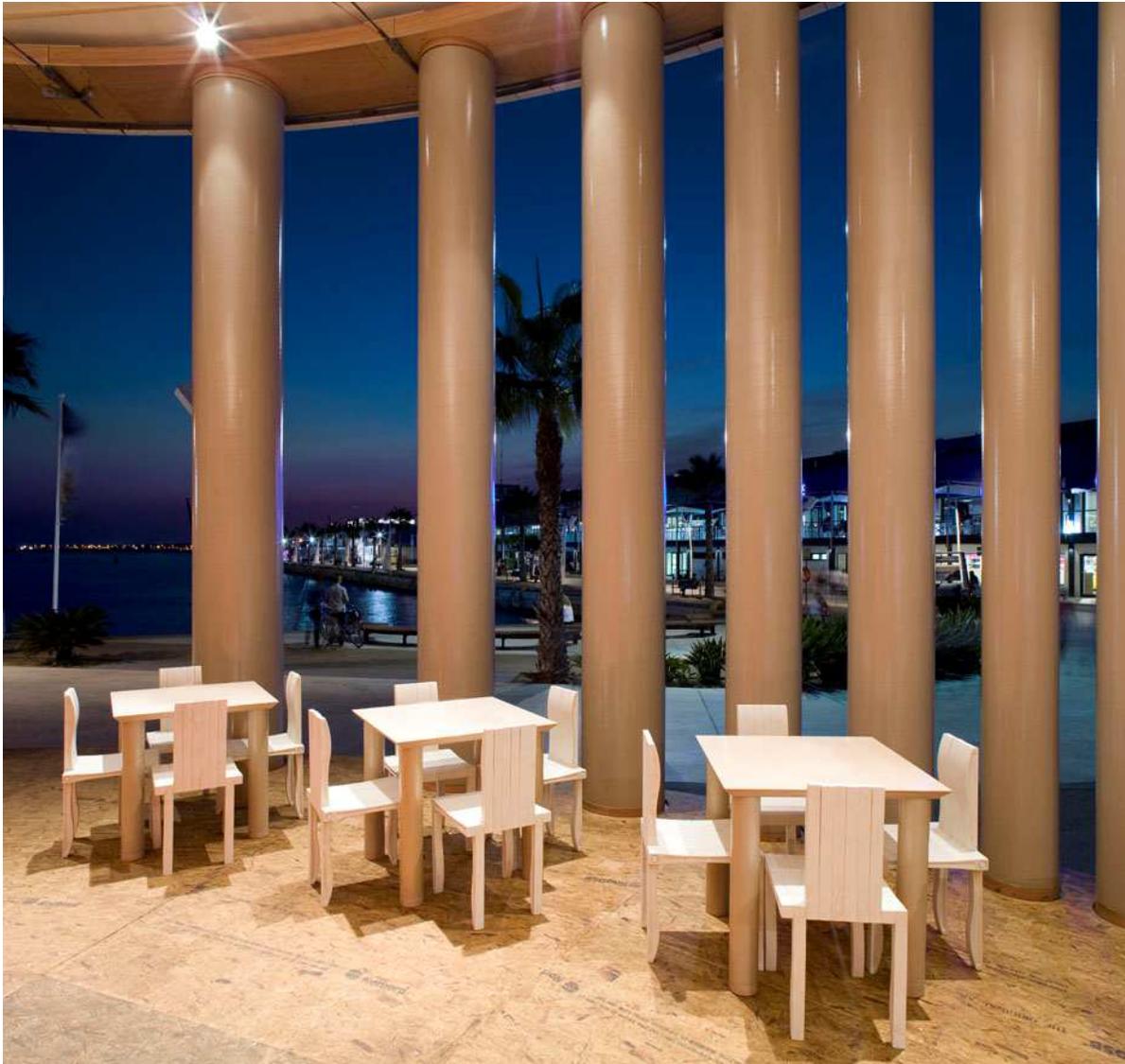
- Pavillon Camper / Alicante, ESPAGNE



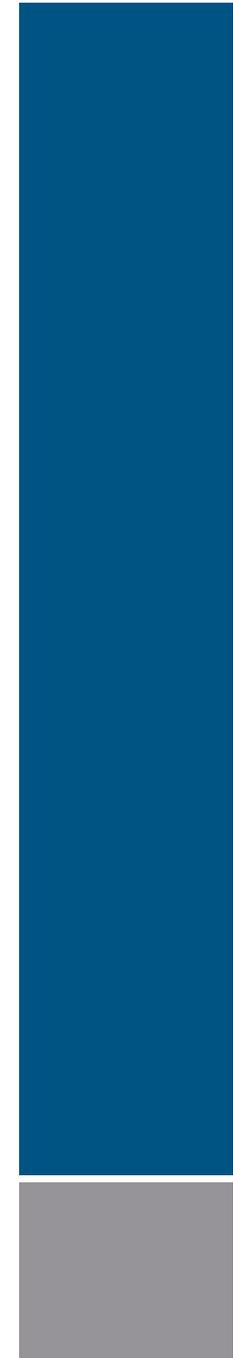
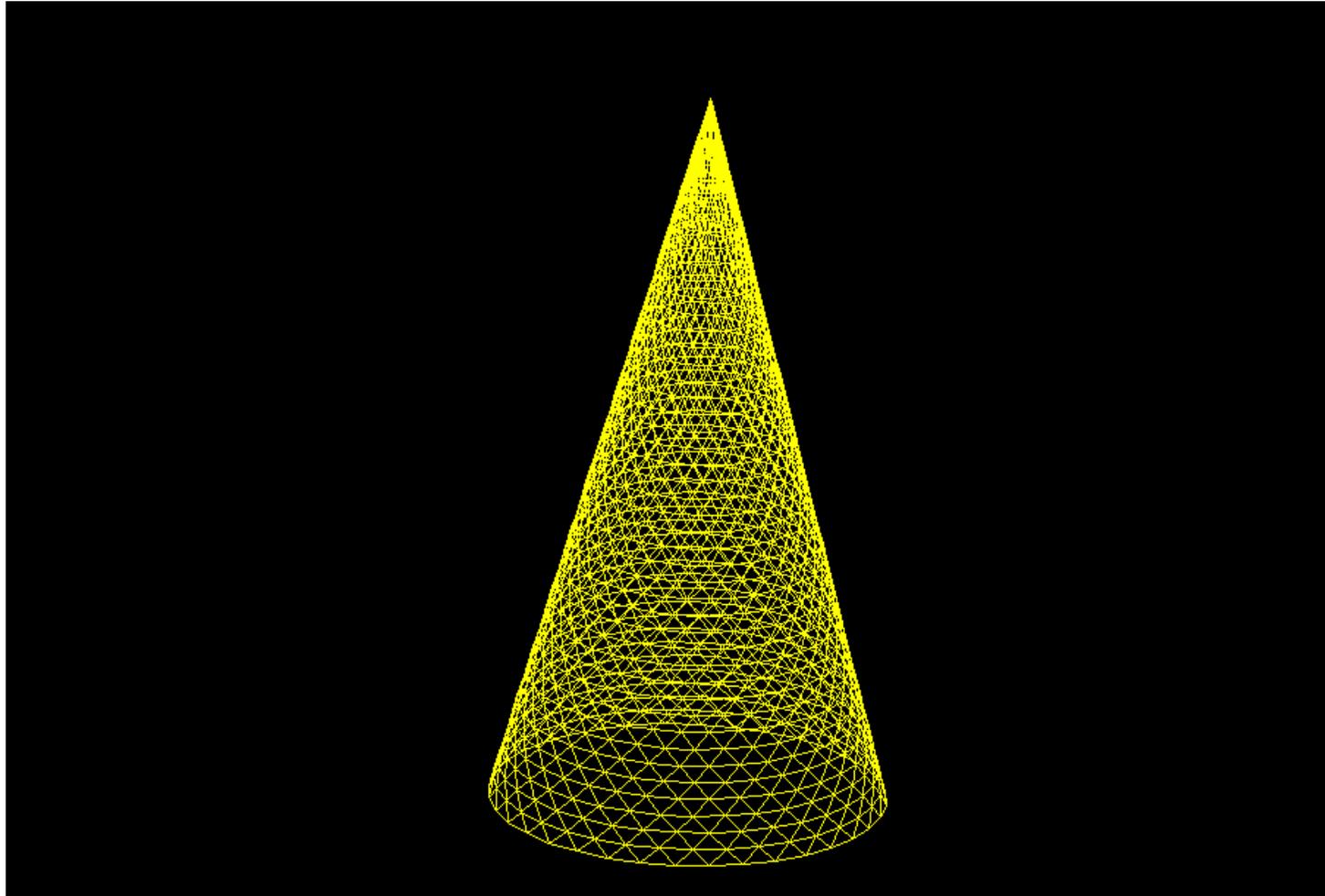
- Pavillon Camper / Alicante, ESPAGNE



- Pavillon Camper / Alicante, ESPAGNE



- Concours de l'Usine Renault / Lyon, FRANCE



- Pont du Gard / Avignon, FRANCE



- Passerelle du Pont de Gard / Gard, FRANCE



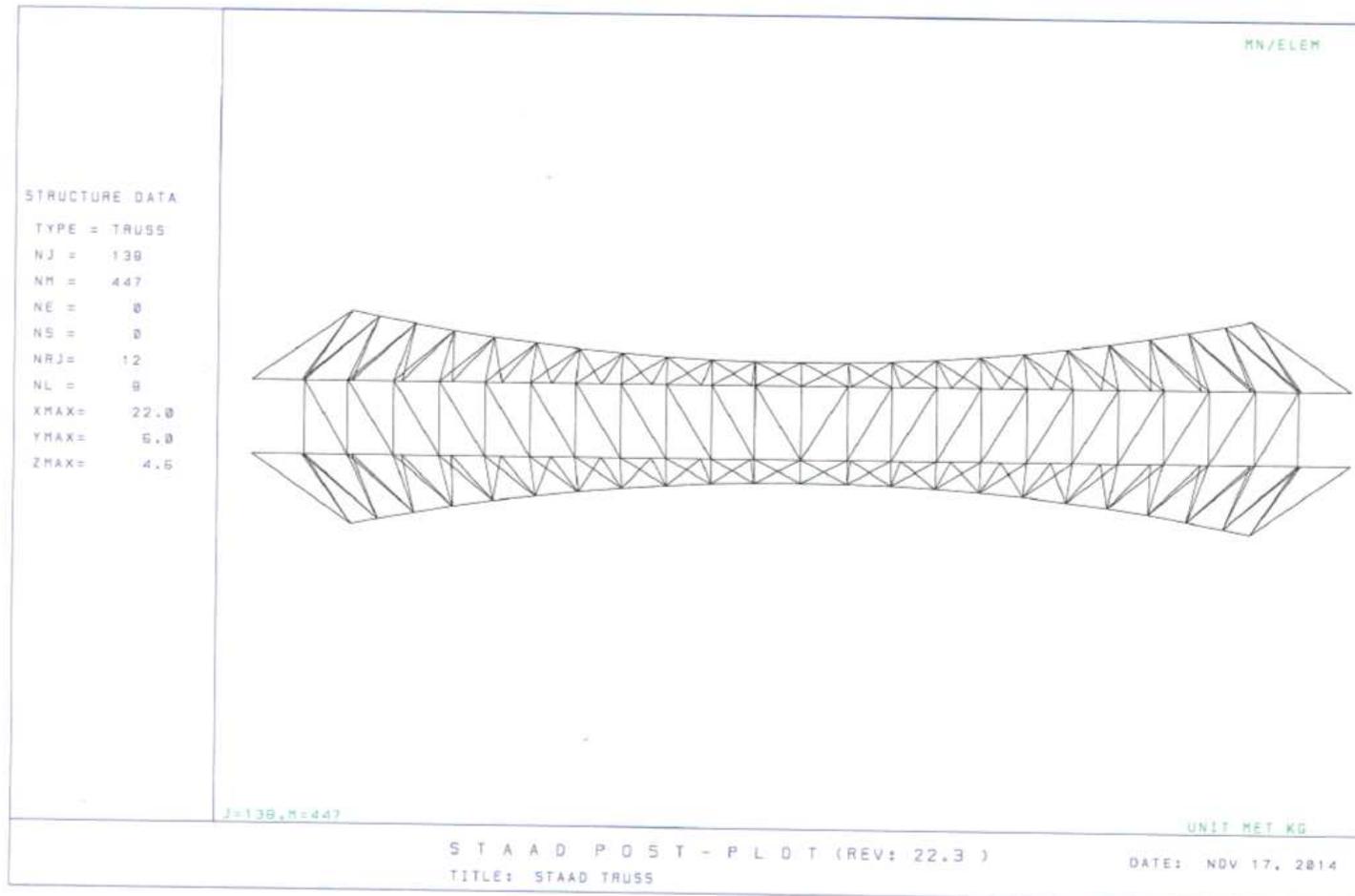
- Passerelle du Pont de Gard / Gard, FRANCE



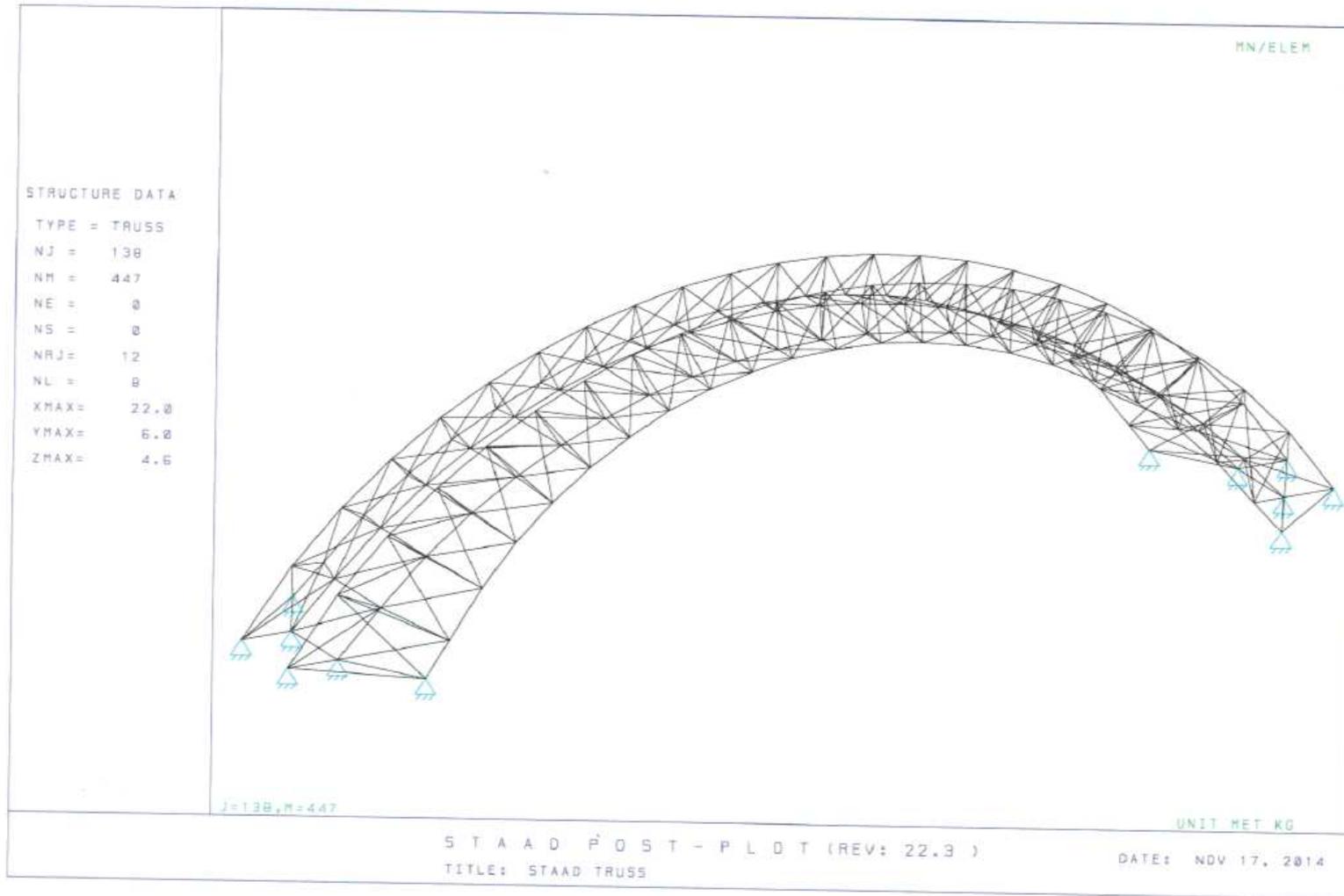
- Passerelle du Pont de Gard / Gard, FRANCE



- Passerelle du Pont de Gard / Gard, FRANCE



- Passerelle du Pont de Gard / Gard, FRANCE



- Passerelle du Pont de Gard / Gard, FRANCE



- Passerelle du Pont de Gard / Gard, FRANCE



- Passerelle du Pont de Gard / Gard, FRANCE



- Passerelle du Pont de Gard / Gard, FRANCE



- Halle du Toueur / Bourgogne, FRANCE



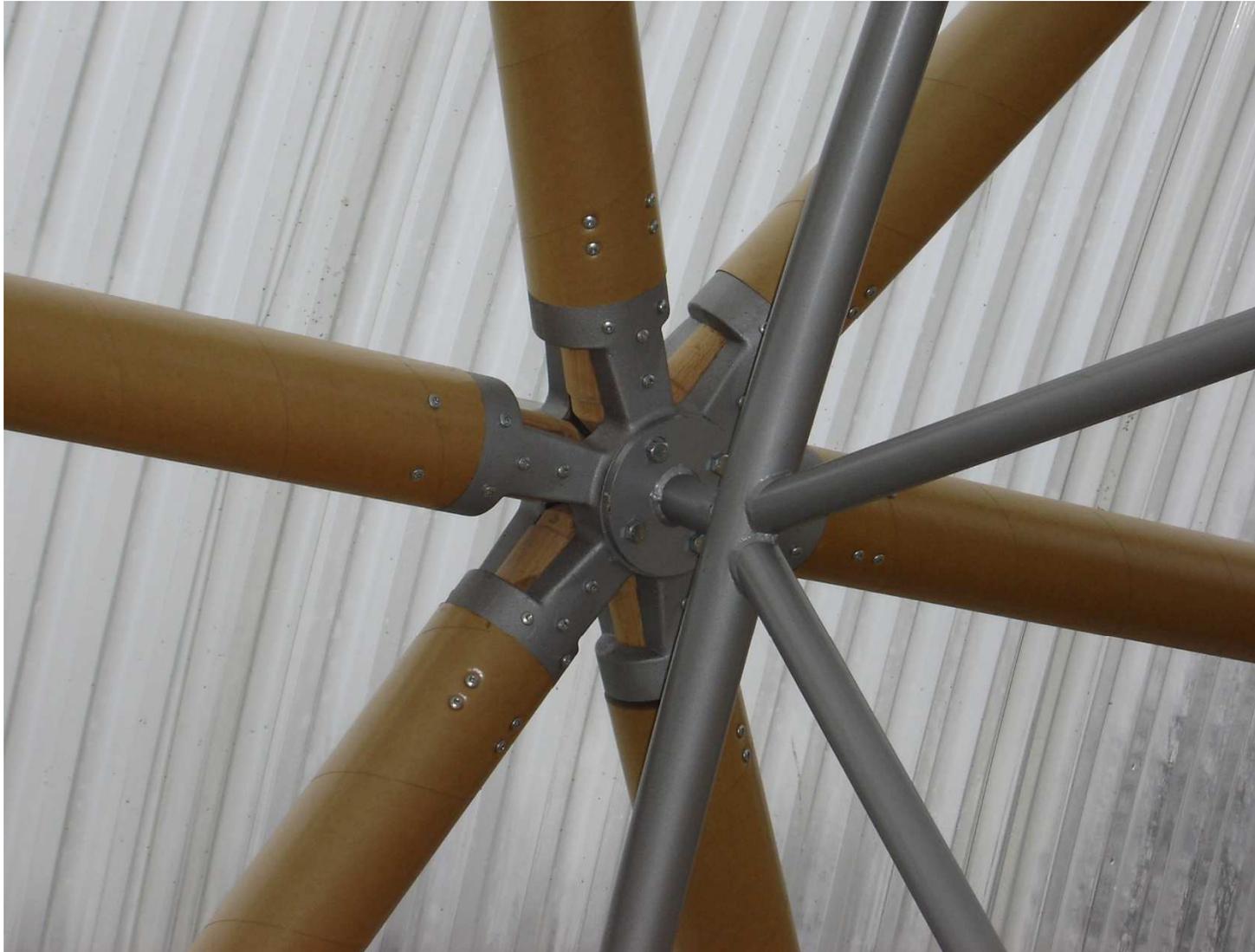
- Halle du Toueur / Bourgogne, FRANCE



- Halle du Toueur / Bourgogne, FRANCE



- Halle du Toueur / Bourgogne, FRANCE

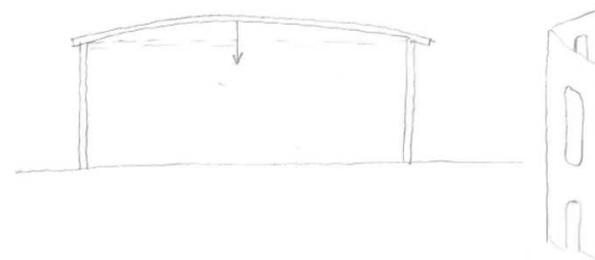


• Institute, Centre d'Interpretation du Canal de Bourgogne / Pouilly-en-Auxois, FRANCE

WORKS - Others

INSTITUTE, CENTRE D'INTERPRETATION DU CANAL DE BOURGOGNE - Pouilly-en-Auxois, FRANCE, 2005

ブルゴーニュ運河博物館 資料館



The boathouse is the 1st phase of a large cultural complex dedicated to the history of the "Canal de Bourgogne" that also includes a small museum. It has been conceived as a paper tube structure and will shelter an old boat to present it to the public.
 The small museum is a place for viewing exhibitions and holding pedagogical activities. Its building is a transparent glass box, open to the surrounding landscape. Its structure relies on light metallic shelf angles used throughout the building, thus providing flexible partitions and display in the exhibition area.
 The boathouse and the museum are located near each other in a rural area, on the border of the canal where it forms a pool.

ここでは「家具の家」のアイデアをもとに収納ユニットをメインの構造部材としている。各ユニットはどこでも手に入る既製品のパンチングスチールのシェルフレームでつづられ、これは同時に展示スペース内のディスプレイユニット、収納キャビネット、およびウォールパーティションといったさまざまな機能的役割を果たしている。

Maison de carton/Dôme de papier: 77

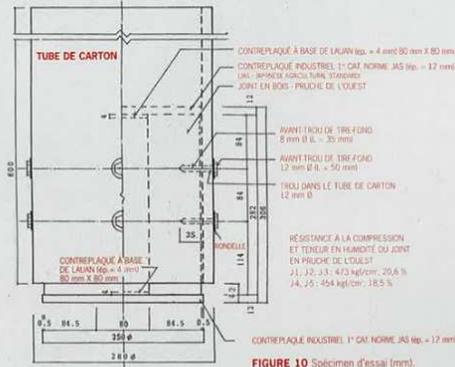


FIGURE 10 Spécimen d'essai (mm).

Essai de résistance au cisaillement
Procédures de l'essai

3-2

La méthode est la même que celle suivie pour l'essai de compression. Le déplacement relatif entre le tube et le joint en bois était supposé être le même que cela entre le banc d'essai et la plaque de chargement. La vitesse de chargement était de 1,5-2,5 kg/cm²/min.

Essai de résistance au cisaillement
Résultats de l'essai

3-3

État de rupture : la figure 11 montre la déformation du tube sous basse pression. La figure 12 montre l'état de rupture du spécimen. Le tube était fortement déformé à l'endroit de la tête du tire-fond, car, avec l'augmentation de la charge, elle n'était plus perpendiculaire au tube de carton.



FIGURE 11 (à gauche) État du spécimen au début de l'expérimentation.

FIGURE 12 (au milieu) État du spécimen après l'expérimentation.

FIGURE 13 (à droite) État de défaillance du joint en bois après l'expérimentation.



FIGURE 14 Rapport charge/déplacement.

SPÉCIMEN N°	J - 1	J - 2	J - 3	J - 4	J - 5
CHARGE MAXIMALE	4625	4395	4500	4865	4865
	MOYENNE = 4650				
CHARGE À 2 mm DE DÉPLACEMENT	1611	1424	1561	1483	1785
	MOYENNE = 1573				
TENEUR EN HUMIDITÉ DU TUBE DE CARTON	9,5	9,4	9,1	8,8	9,3
	MOYENNE = 9,2				

TABLEAU 3 Résultat de l'essai de résistance au cisaillement simple.

La résistance au cisaillement simple était de 581 kgf par tire-fond.

■ DÔME DE CARTON

Date de l'expérimentation : Juillet 1997
Lieu : Collège universitaire polytechnique de Chiba, Département du logement et de l'environnement
Réalisée par : D' Minoru Tezuka, chargé d'enseignement

Profil du rapport d'essai

Les tubes de carton sont utilisés comme membres en arc dans le Dôme de carton. Le but de l'expérimentation était d'examiner la résistance à court terme du tube grâce à des essais de compression, de flexion et de compression à des teneurs en humidité différentes, et de déterminer la résistance du raccordement grâce à des essais de cisaillement et de flexion.

Les tubes de carton sont fabriqués selon un processus de production constant de façon à obtenir une haute résistance. Chaque tube de carton est composé de papier recyclé, enroulé à 74,5° à un intervalle de 2 mm en utilisant un liant en polyvinyle composé. Ce liant représente 7-10 % du poids total du tube. Les données du tableau 1. proviennent de l'entreprise de fabrication des tubes de carton.

TABLEAU 1 Propriétés mécaniques du papier d'origine.

Désignation	Résultats	Méthodes d'essai
Poids de base (g/m ²)	321	JIS P 8124-1976
Épaisseur (mm)	0,728	JIS P 8118-1976
Masse volumique apparente (g/cm ³)	0,72	JIS P 8127-1979
Humidité (%)	6,5	JIS P 8127-1979
Résistance à la traction (kgf/cm ²)	DM * 800 DT ** 253	JIS P 8113-1976
Résistance à la compression (kgf/cm ²)	DM * 232 DT ** 142	JIS P 8126-1987
Degré de collage Stockigt (°)	4545	JIS P 8122-1976
Module de Young (x 10 ⁹ kgf/cm ²)	DM * 70-80 DT ** 30-25	JIS P 8113-1998

Note : DM* : direction de la machine. DT* : direction transversale.
Articles associés : Méthode d'échantillonnage du papier destiné aux essais (JIS P 8110-1965). Conditionnement du papier et du carton pour les essais (JIS P 8111-1976). JIS : Japanese Industrial Standard

- 1 Essai de compression du tube de carton
- 2 Essai de flexion du tube de carton
- 3 Essai de compression du tube de carton à différentes teneurs en humidité
- 4 Essai de résistance au cisaillement du raccordement
- 5 Essai de flexion du raccordement

Diamètres extérieur/intérieur de tous les tubes de carton : 280 mm/250 mm

76 **CARTON : ESSAIS DE MATERIAU**

Dans la mesure où la teneur en humidité avait une grande influence sur la résistance du spécimen, un échantillon provenant du centre de chaque spécimen a été découpé et pesé après l'essai. Chacun de ces échantillons fut ultérieurement séché dans une enceinte thermostatique à une température de 105 °C pendant 7 jours, puis fut de nouveau pesé. La formule suivante a été utilisée pour mesurer la teneur en humidité :

$$\text{Teneur en humidité (\%)} = \frac{W1 - W2}{W2} \times 100$$

W1 : poids de l'échantillon après l'essai de compression
W2 : poids de l'échantillon après séchage à une température de 105 °C pendant 7 jours

2-1 Essai de flexion du tube de carton
Spécimens soumis à l'essai

Cinq tubes de carton de 4 m de longueur ont été utilisés, ayant tous des diamètres identiques, comme précédemment. Dans l'essai de flexion, la portée a été augmentée de façon à minimiser la déformation partielle du tube aux points d'appui et au point de chargement.

2-2 Essai de flexion du tube de carton
Procédures de l'essai

Un bloc de bois a été placé de chaque côté du tube, à 1 860 mm du centre du point de chargement. Le spécimen a été contraint à une force verticale (P) au point médian de sa longueur. La figure 5 montre l'essai de flexion en détail. La vitesse de chargement était fixée à 3-7 kgf/cm/min à la contrainte de fibre extrême. La machine d'essai était une REH-200T.

Un petit échantillon a été découpé afin d'enregistrer la teneur en humidité de chaque spécimen de la même façon que pour les spécimens soumis à l'essai de compression.

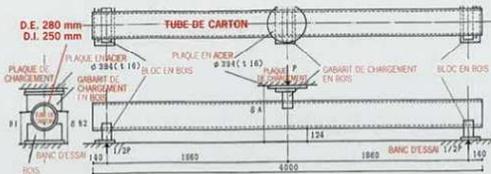


FIGURE 5 Procédures d'essai de flexion (mm).

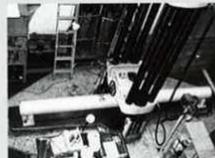


FIGURE 6 Vue d'ensemble de l'essai de flexion.

2-3 Essai de flexion du tube de carton
Résultats de l'essai

État de rupture : la figure 8 montre le tube de carton soumis à une contrainte maximale touchant tout juste le banc d'essai au centre de la portée. La force verticale (P) appliquée sur le spécimen a été augmentée jusqu'à ce qu'elle soit déchargée à ce point de contrainte maximale. Cependant, à l'examen des résultats du test, la contrainte maximale sous la charge se trouve à un déplacement vertical de 124 mm du centre de la portée. Les résultats ont montré que les plis se situent le long de la bordure en forme de spirale des couches de carton enroulé à la machine, et se limitent ensuite à la partie supérieure du centre de la portée.

Les plis sont limités à la partie supérieure du centre de la portée.



FIGURE 7 (à gauche) Point de chargement au centre de la portée.
FIGURE 8 (à droite) Résultats de l'essai de flexion : le tube de carton touche tout juste le banc d'essai au centre de la portée.

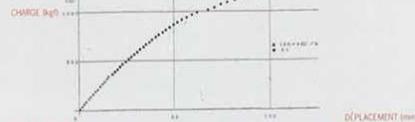


FIGURE 9 Résultats de l'essai de flexion : rapport entre la charge et le déplacement.

Résistance à la flexion, module de Young : le rapport de déplacement central a été obtenu à partir de la moyenne de 6B1 et 6B2 (entre le gabarit de chargement en bois et le banc d'essai) et 6A (entre la plaque de chargement et le banc d'essai), comme le montre la figure 5. La différence entre 6A et 6B est négligeable. La valeur de 6B est plus précise. La gamme de mesures 6B se situant au-dessous du déplacement maximum de 20 mm, c'est donc la valeur de 6A qui a été utilisée.

fb > 1,42 × fc

TABLEAU 2 Résultats des essais de flexion.

SPÉCIMEN N°	B - 1	B - 2	B - 3	B - 4	B - 5
RÉSISTANCE À LA FLEXION σ b (kg/cm²)	172,4	151,3	158,4	158,8	165,7
	MOYENNE = 161,3				
MODULE DE YOUNG (× 10⁴ kg/cm²)	2,18	2,15	2,26	2,20	2,29
	MOYENNE = 2,22				
TENEUR EN HUMIDITÉ (%)	9,3	9,3	8,6	8,7	8,5
	MOYENNE = 8,9				

En raison de la déformation partielle, le module de Young était équivalent à 92 % du résultat obtenu dans l'essai de compression.

La résistance à la flexion est égale à plus de 1,42 fois la résistance à la compression.

3 Essai de résistance au cisaillement

Dans la Maison de carton, les tubes agissent comme des colonnes en porte-à-faux en cas de tremblements de terre ou de vents forts. Quand cela se produit, le raccordement au plancher, à la base de la colonne, est soumis à un moment de flexion. Le but de cet essai était d'obtenir l'effet des raccords à cisaillement simple du bois au carton sur la résistance des tire-fonds.

3-1 Spécimens soumis à l'essai

Des tubes de carton coupés en tronçons d'une longueur de 600 mm ont été utilisés comme spécimens. Des joints en bois (pruche de l'Ouest) ont été raccordés aux tubes avec des tire-fonds. Huit tire-fonds de 12 mm (D = 12 mm) ont été utilisés pour chaque spécimen. L'espacement entre les tire-fonds et à partir de la bordure du tube de carton était de 7 D. De la cire fut appliquée aux points de contact entre le tube et le joint en bois.

Des tire-fonds ont servi dans le raccordement à cisaillement simple bois/carton.

Essai de compression du tube de carton

1-1 Spécimens soumis à l'essai
Cinq spécimens de 600 mm de longueur ont été fournis. Une jauge extensométrique a été utilisée pour relever le module de Young et le coefficient de Poisson, comme cela a été fait pour les expérimentations de la Maison de carton. En raison du grand diamètre des spécimens et de leur épaisseur relative, les bords n'ont pas pu être coupés nettement. Les extrémités de chaque tube ont donc été obturées en appliquant de la colle époxyde sur chaque surface coupée et en y appuyant une plaque d'acier.



FIGURE 1 (à gauche) Application de colle époxyde sur les surfaces coupées du tube de carton. **FIGURE 2** (à droite) Obturation du tube de carton par une plaque d'acier.

De la colle époxyde a été utilisée pour obturer les surfaces coupées des tubes de carton.

Essai de compression du tube de carton

1-2 Procédures de l'essai
Les mêmes procédures que celles suivies pour la Maison de carton ont été appliquées, à l'exception de la vitesse de chargement qui était de 5-7 kg/cm²/min.

Essai de compression du tube de carton

1-3 Résultats de l'essai
Les aspects relatifs à la rupture sont similaires à ceux de l'essai de compression pour la Maison de carton. La détérioration locale aux deux extrémités du tube a été réduite grâce à l'obturation assurée par la colle époxyde. Le module de Young et le coefficient de Poisson ont été calculés de la même façon que pour l'essai de compression de la Maison de carton. Les résultats sont présentés au tableau 2.

TABEAU 2 Résultats des essais de compression

Spécimens	D = 291		d = 250	
	σ _{0.2} **	E	ν	W
C-1	97,9	21,8	0,134	10,2
C-2	101,6	20,9	0,138	9,9
C-3	101,4	21,3	0,140	9,9
C-4	97,7	19,8	0,142	9,8
C-5	97,7	21,6	0,151	10,2
Moyennes	99,3	21,1	0,141	10,0

La résistance à la compression s'élevait à 99,3 kgf/cm².

D: diamètre extérieur (mm)
d: diamètre intérieur (mm)
*σ*_{0.2}: résistance à la compression (kgf/cm²)
E: module de Young (× 10³ kgf/cm²)
ν: coefficient de Poisson
W: teneur en eau en pourcentage du poids total (%)
*σ*_{0.2}: densité (g/cm³)

Essai de flexion du tube de carton

2-1 Spécimens soumis à l'essai
Cinq tubes de 1 758 mm ont été utilisés comme spécimens. Des raidisseurs ont été insérés aux points de chargement et de support de chacun d'eux afin d'empêcher toute déformation locale.

Des raidisseurs ont été insérés afin d'empêcher toute déformation locale.

Essai de flexion du tube de carton

2-2 Procédures de l'essai
Les déplacements verticaux ont été mesurés aux 2 points de chargement et au centre de la portée, ce qui représente une condition presque identique au chargement sur 3 points équidistants, limitant la portée du spécimen à 1 708 mm.

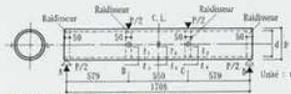


FIGURE 3 Procédures d'essai de flexion.

Essai de flexion du tube de carton

2-3 Résultats de l'essai
Le centre du spécimen touchait le banc d'essai et des plis se sont formés sur la partie supérieure du spécimen à proximité du centre de la portée, avant que la rupture ne se produise, comme dans le test de la Maison de carton. Les valeurs pour le module de Young étaient similaires aux résultats de l'essai de compression.

TABEAU 3 Résultats de l'essai de flexion.

Spécimens	D = 291		d = 250	
	σ _{0.2} **	E	W	ρ
B-1	149,2	22,0	10,5	
B-2	150,7	21,0	10,4	
B-3	157,5	20,1	10,0	
B-4	155,5	19,7	10,1	
B-5	147,0	22,7	10,1	
Moyennes	152,0	21,5	10,2	

Le module de Young, dans l'essai de flexion, était égal à celui de l'essai de compression.

D: diamètre extérieur (mm)
d: diamètre intérieur (mm)
*σ*_{0.2}: résistance à la compression à δ = 124mm (kgf/cm²)
*σ*_{0.2}: résistance à la compression à δ = 26mm (kgf/cm²)
E: module de Young (× 10³ kgf/cm²)
W: teneur en eau en pourcentage du poids total (%)

La résistance à la flexion était plus de 1,53 fois plus grande que la résistance à la compression.

Essai de compression du tube de carton à différentes teneurs en humidité

3-1 Spécimens soumis à l'essai
Quarante-cinq tubes de carton plus petits, de diamètres extérieur/intérieur de 95 mm/85 mm et d'une longueur de 259 mm, ont été utilisés. Ces tubes ont été fabriqués à partir du même papier que celui utilisé pour les spécimens des essais précédents, mais ils ont été produits par une machine à enrouler différente et avec un angle d'enroulement différent.

Les spécimens ont été divisés en 9 groupes selon leur poids à l'état sec absolu. Deux des 9 groupes furent enduits avec de la résine uréthane, un agent imperméabilisant. La résine fut diluée avec un fluide qui correspondait à 40 % du poids total de l'agent dilué. Chaque surface coupée était plongée dans l'agent dilué à une profondeur de 15 mm à partir du bord pendant 5 minutes. De plus, les parois extérieure et intérieure du tube ont été enduites avec le même agent. Une deuxième couche, composée cette fois avec un agent dilué à 10 %, a été appliquée en utilisant la même méthode, après le séchage de la première couche. Ces 2 groupes de tubes de carton enduits indiquaient une variation de leur teneur en humidité allant de 0,2 % à 19,2 %, après le processus d'enduit.

Essai de compression du tube de carton à différentes teneurs en humidité

3-2 Procédures de l'essai
Des essais de compression ont été effectués avec une vitesse de chargement fixée à 7-8 kg/cm²/min. Le déplacement entre les tubes de carton et le banc d'essai a été enregistré. La teneur en humidité des spécimens enduits avec l'agent imperméabilisant a été calculée grâce à la formule suivante :

$$\text{Teneur en humidité (\%)} = \frac{W1 - W2}{W2} \times 100$$

*W*₁: POIDS DU SPÉCIMEN ENCHÔT AVEC L'AGENT IMPERMÉABILISANT AU MOMENT DE L'ESSAI
*W*₂: POIDS DU SPÉCIMEN ENCHÔT AVEC L'AGENT IMPERMÉABILISANT À L'ÉTAT SEC ABSOLU
*W*₂: POIDS DES SPÉCIMENS À L'ÉTAT SEC ABSOLU AVANT D'ÊTRE ENDUITS AVEC L'AGENT IMPERMÉABILISANT

Essai de compression du tube de carton à différentes teneurs en humidité

3-3 Résultats de l'essai

NOS BUREAUX

TERRELL - Paris, FRANCE

11 rue Heinrich 92100 Boulogne-Billancourt France
T +33 1 46 21 07 46 F +33 1 46 21 03 48
paris@terrellgroup.net

TERRELL - Toulouse

35-37 rue Lancefoc 31000 Toulouse France
T +33 5 61 22 05 00 F +33 5 61 22 80 48
toulouse@terrellgroup.net

TERRELL - London

Arthur's Mission 30 Snowsfields London SE1 3SU UK
T +44 20 7403 6111 F +44 20 7378 0378
london@terrellgroup.net

TERRELL - Moscow

1st Spasonalivkovski str Building 3/5 Office N° 15
119049 Moscow Russia
T +7499 2382445
moscow@terrellgroup.net

TERRELL - Qatar

c/o Global Operations
PO Box 22117 Doha Qatar
doha@terrellgroup.net

TERRELL - Dubaï

Unit 310 Level 3 Bldg 4 Emaar Business Park
Sheikh Zayed Road PO Box 71431 Dubai UAE
T +971 4 321 10 12 F +971 4 321 26 55
dubai@terrellgroup.net

TERRELL - Brisbane

Suite 4, Darin Professional Centre 631 Logan Road
Greenslopes Queensland 4169 Australia
T +61 7 3414 1471
brisbane@terrellgroup.net