

EN-C2A 24.25099 C-V1

**Etude du comportement au vent de différents
lestages utilisés en isolation inversée sur toiture
terrasse**

Jérôme VINET & Baptiste BOUYER

Direction Climatologie – Aérodynamique – Pollution – Epuration

Version	Date	Objet
0	15/02/2024	Edition initiale
1	19/04/2024	Edition V1 – compléments après relecture client

Etude du comportement au vent de différents lestages utilisés en isolation inversée sur toiture terrasse

Jérôme VINET & Baptiste Bouyer

**Direction Climatologie – Aérodynamique
Pollution – Epuration**

*Cette étude a été réalisée
à la demande de JACKON
suivant devis signé AL23JACKOD-25099
en date du 23/11/2023
Offre n° 13716*

Nantes, le 19/04/2024

Jérôme VINET
Ingénieur Recherche et Expertise
Division Vent, Aéraulique et Confort
Direction Opérationnelle CAPE
Climatologie-Aérodynamique-Pollution-Epuration

Stéphane SANQUER
Chef de Pôle Recherche et Expertise
Division Vent, Aéraulique et Confort
Direction Opérationnelle CAPE
Climatologie-Aérodynamique-Pollution-Epuration

Mots clés : essai échelle 1, mesure pression, toiture terrasse, tenue au vent

Nbre de pages : 20

Version n° : 0

CSTB
le futur en construction

CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BÂTIMENT

11 rue Henri Picherit – BP 82341 – 44323 Nantes cedex 3

Tél. : +33 (0)2 40 37 20 00 – Siret 775 688 229 00035 – www.cstb.fr

Siège social > 84 avenue Jean Jaurès – Champs-sur-Marne – 77447 Marne-la-Vallée cedex 2

Établissement public à caractère industriel et commercial – RCS Meaux 775 688 229 – TVA FR 70 775 688 229

MARNE-LA-VALLÉE / PARIS / GRENOBLE / NANTES / SOPHIA ANTIPOLIS

TABLE DES MATIERES

1. INTRODUCTION	2
2. APPROCHE EXPERIMENTALE.....	3
2.1 DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET CONFIGURATIONS ETUDIEES	3
2.2 VENT DE REFERENCE.....	5
3. RESULTATS D'ESSAIS.....	6
3.1 MESURES DE PRESSION	6
3.2 CONFIGURATION 4 : DSP 50 MM, PLOTS 50 MM ET ISOLANTS 2*160MM	10
3.3 CONFIGURATION 3 : DSP 40 MM, PLOTS 60 MM ET ISOLANTS 2*160MM	11
3.4 CONFIGURATION 1 : GRAVIERS 50 MM AVEC RETENTIO, ACROTERE 40 MM, ISOLANTS 2*160MM	12
3.5 CONFIGURATION 2 : GRAVIERS 50 MM, ACROTERE 40 MM, ISOLANTS 2*160MM	13
3.6 CONFIGURATION 8A : CERAM 20 MM (60*60), PLOTS 80 MM + 2*160MM.....	13
3.7 CONFIGURATION 8B : CERAM 20 MM (60*60 ET 30*30 EN RIVES), PLOTS 80 MM, ISOLANTS 2*160MM	14
3.8 CONFIGURATION 6 : DSP 50 MM, PLOTS 210 MM PLOTS 210 ET ISOLANTS 160MM	15
3.9 CONFIGURATION 7 : DSP 50 MM, PLOTS 90 MM, ISOLANTS 120 ET 160 MM	16
4. CONCLUSION.....	18
5. ANNEXE : LA SOUFFLERIE CLIMATIQUE JULES VERNE.....	19

1. INTRODUCTION

A la demande de la société d'Exiba France, association professionnelle de promotion du polystyrène extrudé regroupant 4 acteurs majeurs du secteur (Jackon Insulation, Ravago Building Solutions, Soprema, Ursa), le CSTB a réalisé l'analyse du comportement au vent de différents lestages utilisés en isolation inversée sur toiture terrasse. Ces lestages, positionnés au-dessus des panneaux d'isolation pour en permettre le maintien sous l'effet du vent, sont généralement assurés par une couche de gravier d'épaisseur adaptée uniformément répartie sur la totalité de la toiture terrasse. Des dalles en béton, céramique ou gravillonnées posées sur plots, peuvent se substituer au lit de gravier.

La démarche proposée consiste à compléter les données obtenues lors d'une première campagne d'essais en 2017 dans le cadre de l'établissement des règles pour le lestage selon l'Eurocode pour les isolations inversées dans les avis techniques délivrées par le GS 5.2 (Produits et procédés d'étanchéité de toitures-terrasses, de parois enterrées et cuvelage) de la CCFAT. Données qui ont été reprises dans les règles professionnelles Isolation inversée de toiture-terrasse éditées le 30 juin par la Chambre Syndicale Française de l'Etanchéité et acceptées par la C2P (Commission Prévention Produit).

Elle s'articule autour d'une approche expérimentale à échelle 1 en soufflerie climatique sur une maquette représentative d'une petite toiture terrasse d'environ 4x4m et équipée d'acrotères périphériques.

Au travers de l'approche expérimentale menée, il s'agit en particulier de :

- Vérifier le comportement au vent des différents éléments de lestage, en fonction de leurs caractéristiques et de leur mise en œuvre,
- Déterminer les valeurs seuils des vitesses de vent avant le soulèvement et l'envol des lestages dans les différentes configurations retenues,

Les tests ont été réalisés en vraie grandeur en soufflerie climatique Jules Verne les 30 et 31 janvier 2024, en présence de nombreux collaborateurs d'Exiba (Jackon Insulation, Ravago Building Solutions, Soprema, Ursa).

La mise en œuvre des configurations a été conjointement réalisée par les équipes présentes selon les règles de l'art. Les dalles en bordure d'acrotère, soumises à l'incidence du vent, ont été recoupées comme c'est généralement observé sur les ouvrages. L'élançement des dalles respecte les dispositions du DTU 43.1 ou les règles professionnelles pour les dalles céramiques sur plots sur étanchéité (CSFE-2019).

Les matériaux sont listés ci-dessous :

- Mousse isolante en polystyrène extrudé XPS (panneaux de 1250mm x 600mm), 30 kg/m³ soit 9,6 kg/m² en deux lits de 160 mm, 4,8 kg/m² en un lit et 8,4 kg/m² en deux lits pour 280 mm ;
- Graviers de type 8/20 mm ~1450 kg/m³ ;
- Types de dalles :
 - Dalles céramiques 60 X 60 cm : 46 kg/m², soit 16,56 kg/dalle
 - Dalles béton 40 X 40 cm : 82 kg/m², soit 13,12 kg la dalle
 - Dalles béton 50 x 50 cm : 120 kg/m², soit 30 kg la dalle

Détail des étapes de mise en œuvre des différentes configurations de gauche à droite et de haut en bas :

- Pose de l'isolant dans le banc d'essais,
- Pose du film de protection non tissé sur l'isolant
- Mise en place des plots à la bonne hauteur
- Alignement des dalles avec le haut de l'acrotère et mise en place des prises de pression
- Configuration lestage par dalles bétons sur plots
- Configuration lestage par dalles gravillonnées sur plots
- Configuration lestage par gravillons sur retentio dans les rives
- Configuration lestage par dalles céramiques sur plots

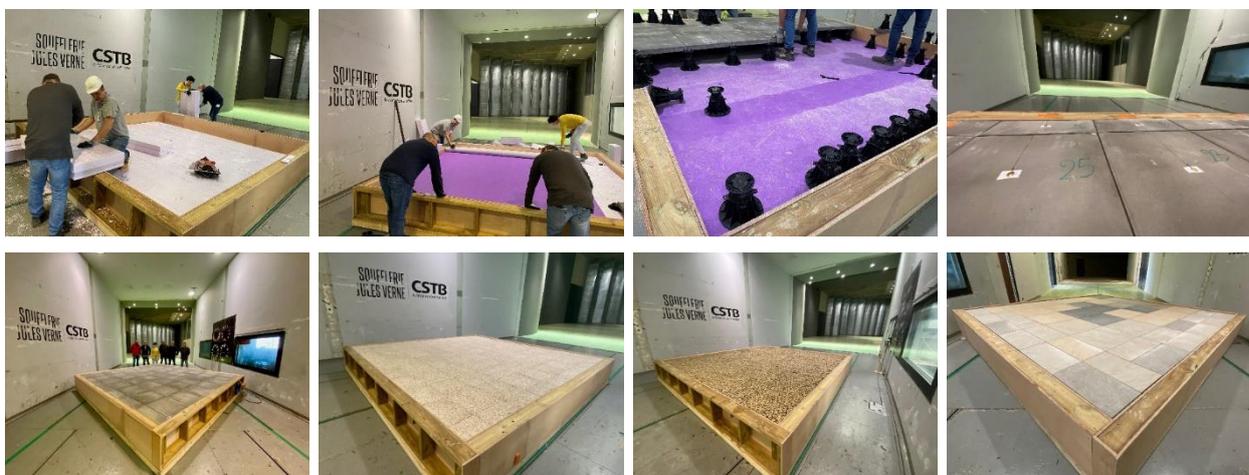


Figure 3 : Mise en place des différentes configurations de lestage, dans la soufflerie climatique Jules Verne du CSTB de Nantes

2.2 Vent de référence

Le prototype a été testé à l'échelle 1 dans la veine haute vitesse de la soufflerie Jules Verne du CSTB Nantes offrant une section (6mx5m) suffisante pour éviter un problème de blocage aérodynamique important.

La vitesse du vent reproduite lors des essais est acquise durant les essais. Elle est évaluée au travers de la pression dynamique ($P_{dyn} = \frac{1}{2}\rho V^2$) mesurée par un tube de Pitot placé à 70 cm du plafond de la veine haute vitesse juste à l'aplomb du prototype de toit terrasse, comme illustré figure ci-dessous.



Figure 4 : Mesure de la vitesse du vent grâce au Pitot de référence au-dessus du banc d'essai

Les configurations de mise en œuvre testées par ordre chronologique sont décrites, illustrées et analysées ci-après (DSP correspond à Dalles béton Sur Plots).

3. RESULTATS D'ESSAIS

Les vitesses d'envol des systèmes de lestages sont présentées pour 2 incidences de vent, à savoir 0° (bord du banc face au vent) et à 45° (pointe du banc face au vent), les résultats sont présentés pour les différentes configurations testées, accompagnées de photos précisant la mise en œuvre.

Les valeurs des pressions externes et internes mesurées sont fournies sous deux formats :

- sous forme de différentiels de dépression de pointe (en Pa), correspondant alors à la valeur minimale du signal temporel de 2 voies de mesure ($P_{ext-Pint}$),
- sous forme adimensionnelle de coefficient de différentiels de pression $C_{\Delta P_{e,1}}$ de pointe (division de la pression statique de pointe mesurée par la pression dynamique de pointe correspondant à chaque vitesse d'épreuve).

Dans les synthèses fournies, seules les différentiels des dépressions les plus sévères et les dalles concernées sont indiquées. L'ensemble des traitements statistiques, pour chaque voie de mesure, est disponible sous forme de fichier Excel.

Par ailleurs de nombreuses vidéos (1280x 720 pixels) au format AVI (*.avi) et photos ont été réalisées durant les séquences de vent principales pour chacune des configurations testées. Elles ont été transmises à M. Dhenin, par lien WeTransfer le 05/02/2024.

3.1 Mesures de pression

Pour la première configuration, le prototype intègre des capteurs de pression répartis spatialement en différents points de la toiture, au centre des dalles, essentiellement en périphérie de sorte à couvrir le zonage proposé dans l'Eurocode Vent, notamment les zones à fortes dépressions (de largeur $e/10$). Le positionnement des voies de pression est indiqué sur les figures ci-dessous. Il s'agit de capteur PSI piézoélectrique multivoies. Les mesures de pression ont été acquises à la fréquence de 35Hz durant 60sec, de manière synchrone sur l'ensemble des voies. Pour chaque essai, on récolte ainsi les signaux temporels de chacune des voies de pression, qui sont ensuite traités statistiquement pour déterminer dans chaque cas, les valeurs moyennes, de pointe (max ou min) et contrôler les écarts-types.



Figure 5 : Configuration 4 en soufflerie orientée à 0° (gauche) et à 45° (droite) zoom sur les voies de pression

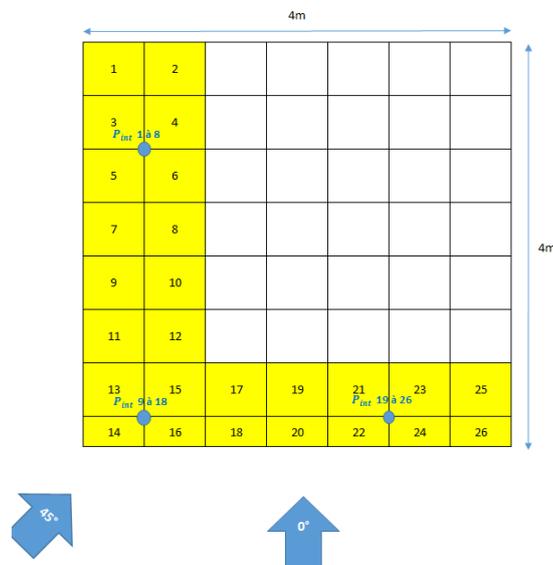


Figure 6 : Position et numérotation des voies de pression sur les dalles

Les mesures de pression permettent de déterminer la pression extérieure agissant au centre des dalles ainsi que la pression intérieure en sous face des dalles pour 2 positions afin d'obtenir un différentiel de pression ($P_{ext}-P_{int}$) pour les dalles équipées en rives. Les prises de pression sont reliées aux capteurs par des liaisons pneumatiques.

Les coefficients de pression fournis dans les différentes tables de synthèse sont des coefficients de différence de pression. Ils correspondent, pour chaque vitesse de vent, aux arrachements (dépression) instantanés maximums enregistrés sur l'ensemble des voies de pression.

Les mesures sont réalisées dans les deux directions de vent étudiées : 0° et 45°. Les résultats des mesures de pressions sont reportés dans les tableaux suivants. Les coefficients de différence de pression sont représentés sur la toiture terrasse sans acrotère à 0° et 45° sur la Figure 6.

Configuration testée					Arrachement max			Coefficient de différence de pression moyenne																									
Vitesse cible	Inci-dence	Rho [kg/m3]	Vitesse [km/h]	Pdyn [Pa]	Min DP	Min DCp	position	DCP1	DCP2	DCP3	DCP4	DCP5	DCP6	DCP7	DCP8	DCP9	DCP10	DCP11	DCP12	DCP13	DCP14	DCP15	DCP16	DCP17	DCP18	DCP19	DCP20	DCP21	DCP22	DCP23	DCP24	DCP25	DCP26
70	0	1.246	74	260	-139	-0.54	DP26	0.00	0.11	-0.25	0.06	-0.10	-0.06	0.04	-0.26	0.06	-0.02	-0.10	-0.24	-0.16	-0.46	-0.11	-0.13	-0.03	-0.07	-0.50	-0.20	-0.44	-0.48	-0.49	-0.27	-0.38	-0.54
90	0	1.243	95	432	-194	-0.45	DP26	0.01	0.09	-0.13	0.06	-0.06	-0.01	0.03	-0.17	0.05	-0.05	-0.16	-0.28	-0.28	-0.44	-0.20	-0.21	-0.13	-0.14	-0.41	-0.21	-0.36	-0.37	-0.40	-0.26	-0.36	-0.45
110	0	1.240	116	643	-271	-0.42	DP14	0.01	0.08	-0.06	0.07	-0.03	0.02	0.03	-0.12	0.03	-0.07	-0.20	-0.29	-0.32	-0.42	-0.24	-0.24	-0.17	-0.17	-0.35	-0.20	-0.32	-0.31	-0.36	-0.25	-0.35	-0.41
130	0	1.236	135	867	-351	-0.41	DP14	0.01	0.08	-0.03	0.07	-0.01	0.03	0.03	-0.12	0.02	-0.09	-0.21	-0.29	-0.33	-0.41	-0.26	-0.25	-0.19	-0.19	-0.33	-0.20	-0.30	-0.28	-0.34	-0.26	-0.35	-0.39
150	0	1.233	153	1116	-439	-0.39	DP14	0.00	0.07	-0.01	0.07	0.00	0.03	0.02	-0.10	0.02	-0.09	-0.23	-0.30	-0.34	-0.39	-0.27	-0.26	-0.20	-0.19	-0.31	-0.20	-0.28	-0.25	-0.33	-0.25	-0.34	-0.37
170	0	1.228	170	1370	-521	-0.38	DP14	0.01	0.07	0.00	0.07	0.01	0.03	0.02	-0.10	0.01	-0.10	-0.23	-0.29	-0.33	-0.38	-0.27	-0.26	-0.21	-0.19	-0.29	-0.19	-0.27	-0.23	-0.31	-0.24	-0.33	-0.35
190	0	1.217	201	1894	-714	-0.38	DP14	0.01	0.08	0.02	0.08	0.02	0.05	0.03	-0.08	0.02	-0.11	-0.24	-0.30	-0.35	-0.38	-0.28	-0.26	-0.22	-0.20	-0.26	-0.17	-0.33	-0.21	-0.29	-0.20	-0.32	-0.33
210	0	1.210	221	2278	-858	-0.38	DP21	0.01	0.07	0.04	0.08	0.03	0.05	0.03	-0.07	0.02	-0.10	-0.23	-0.29	-0.34	-0.36	-0.27	-0.24	-0.21	-0.17	-0.28	-0.19	-0.38	-0.24	-0.33	-0.25	-0.35	-0.35
70	45	1.243	71	240	-407	-1.70	DP23	-0.61	-0.73	-0.96	-0.88	-0.98	-0.41	-1.46	-0.39	-1.61	0.00	-0.03	-0.03	0.10	-0.30	0.11	-1.24	0.18	-1.25	-0.52	-0.73	-1.35	-1.00	-1.70	-0.74	-0.98	-0.71
90	45	1.241	91	398	-662	-1.66	DP23	-0.59	-0.80	-0.84	-0.92	-0.90	-0.35	-1.49	-0.29	-1.65	-0.04	-0.04	-0.07	-0.04	-0.32	-0.01	-1.40	0.06	-1.36	-0.45	-0.76	-1.32	-0.92	-1.66	-0.48	-0.98	-0.63
110	45	1.239	111	588	-961	-1.63	DP9	-0.58	-0.84	-0.78	-0.93	-0.90	-0.30	-1.52	-0.24	-1.63	-0.05	-0.10	-0.08	-0.11	-0.31	-0.06	-1.48	-0.02	-1.32	-0.56	-0.88	-1.31	-0.91	-1.61	-0.46	-0.90	-0.58
130	45	1.235	130	805	-1287	-1.60	DP16	-0.58	-0.89	-0.74	-0.91	-0.89	-0.19	-1.51	-0.20	-1.53	-0.06	-0.06	-0.09	-0.15	-0.32	-0.09	-1.60	-0.06	-1.16	-0.61	-0.86	-1.32	-0.87	-1.58	-0.48	-0.84	-0.54
150	45	1.232	148	1037	-1765	-1.70	DP16	-0.59	-0.90	-0.72	-0.92	-0.89	-0.18	-1.52	-0.19	-1.53	-0.07	-0.08	-0.09	-0.18	-0.32	-0.12	-1.70	-0.05	-1.15	-0.54	-0.64	-1.33	-0.73	-1.62	-0.49	-0.84	-0.52
170	45	1.243	163	1275	-2172	-1.70	DP16	-0.59	-0.90	-0.72	-0.92	-0.89	-0.18	-1.52	-0.19	-1.53	-0.07	-0.08	-0.09	-0.18	-0.32	-0.12	-1.70	-0.05	-1.15	-0.54	-0.64	-1.33	-0.73	-1.62	-0.49	-0.84	-0.52
expl.	45	1.237	137	894	-1522	-1.70	DP16	-0.59	-0.90	-0.72	-0.92	-0.89	-0.18	-1.52	-0.19	-1.53	-0.07	-0.08	-0.09	-0.18	-0.32	-0.12	-1.70	-0.05	-1.15	-0.54	-0.64	-1.33	-0.73	-1.62	-0.49	-0.84	-0.52
expl.	45	1.236	144	985	-1677	-1.70	DP16	-0.59	-0.90	-0.72	-0.92	-0.89	-0.18	-1.52	-0.19	-1.53	-0.07	-0.08	-0.09	-0.18	-0.32	-0.12	-1.70	-0.05	-1.15	-0.54	-0.64	-1.33	-0.73	-1.62	-0.49	-0.84	-0.52

Configuration testée					Arrachement max			Différence de pression moyenne																									
Vitesse cible	Inci-dence	Rho [kg/m3]	Vitesse [km/h]	Pdyn [Pa]	Min DP	Min DCp	position	DP1	DP2	DP3	DP4	DP5	DP6	DP7	DP8	DP9	DP10	DP11	DP12	DP13	DP14	DP15	DP16	DP17	DP18	DP19	DP20	DP21	DP22	DP23	DP24	DP25	DP26
70	0	1.246	74	260	-139	-0.54	DP26	0	29	-65	16	-26	-15	9	-68	15	-4	-25	-64	-43	-120	-28	-33	-8	-18	-130	-51	-114	-124	-127	-69	-98	-139
90	0	1.243	95	432	-194	-0.45	DP26	3	40	-57	27	-25	-5	14	-72	22	-21	-68	-120	-119	-190	-87	-89	-55	-63	-176	-89	-155	-159	-175	-112	-155	-194
110	0	1.240	116	643	-271	-0.42	DP14	5	55	-41	45	-17	13	21	-79	22	-44	-126	-188	-203	-271	-155	-154	-109	-112	-227	-129	-204	-198	-234	-162	-228	-266
130	0	1.236	135	867	-351	-0.41	DP14	10	69	-23	60	-5	24	26	-100	19	-76	-185	-251	-283	-351	-224	-218	-165	-161	-282	-174	-257	-239	-296	-221	-305	-341
150	0	1.233	153	1116	-439	-0.39	DP14	4	79	-13	73	-2	36	27	-117	24	-103	-251	-330	-374	-439	-303	-291	-228	-217	-344	-220	-314	-283	-363	-283	-384	-415
170	0	1.228	170	1370	-521	-0.38	DP14	7	99	6	90	7	47	28	-137	18	-137	-310	-395	-456	-521	-373	-358	-281	-262	-399	-262	-365	-320	-424	-330	-456	-484
190	0	1.217	201	1894	-714	-0.38	DP14	17	146	44	148	36	89	60	-154	37	-208	-460	-574	-666	-714	-529	-498	-408	-370	-487	-330	-620	-393	-541	-384	-602	-617
210	0	1.210	221	2278	-858	-0.38	DP21	32	171	84	186	71	123	74	-166	55	-235	-525	-658	-770	-811	-607	-552	-473	-397	-640	-435	-858	-556	-751	-572	-803	-786
70	45	1.243	71	240	-407	-1.70	DP23	-146	-176	-230	-210	-235	-99	-351	-93	-387	0	-6	-6	25	-73	26	-296	43	-300	-125	-175	-325	-239	-407	-177	-234	-171
90	45	1.241	91	398	-662	-1.66	DP23	-236	-318	-335	-364	-360	-140	-591	-115	-655	-17	-17	-29	-17	-125	-5	-555	23	-541	-179	-301	-527	-365	-662	-189	-391	-250
110	45	1.239	111	588	-961	-1.63	DP9	-344	-494	-460	-545	-528	-176	-896	-144	-961	-29	-60	-46	-66	-183	-36	-869	-14	-779	-330	-516	-769	-537	-950	-273	-529	-343
130	45	1.235	130	805	-1287	-1.60	DP16	-467	-718	-595	-734	-713	-152	-1213	-157	-1228	-52	-51	-69	-124	-254	-76	-1287	-51	-932	-489	-689	-1066	-703	-1272	-386	-677	-435
150	45	1.232	148	1037	-1765	-1.70	DP16	-610	-937	-747	-956	-921	-185	-1577	-194	-1586	-72	-85	-93	-188	-332	-123	-1765	-56	-1188	-558	-662	-1377	-759	-1683	-509	-868	-541
170	45	1.243	163	1275	-2172	-1.70	DP16	-751	-1153	-919	-1176	-1133	-227	-1941	-238	-1951	-88	-105	-115	-231	-409	-151	-2172	-69	-1462	-686	-814	-1694	-934	-2071	-626	-1068	-666
expl.	45	1.237	137	894	-1522	-1.70	DP16	-526	-808	-644	-824	-794	-159	-1360	-167	-1368	-62	-73	-81	-162	-287	-106	-1522	-48	-1025	-481	-571	-1187	-655	-1451	-439	-748	-467
expl.	45	1.236	144	985	-1677	-1.70	DP16	-580	-890	-710	-908	-875	-176	-1498	-184	-1507	-68	-81	-89	-178	-316	-117	-1677	-53	-1129	-530	-629	-1308	-721	-1599	-484	-824	-514

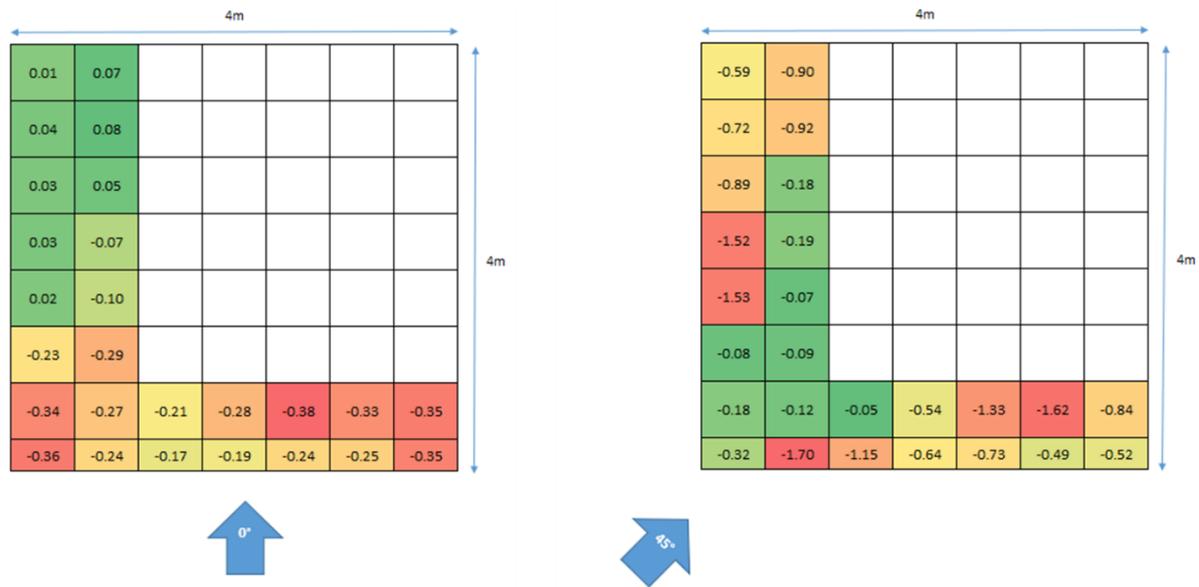


Figure 7 : Coefficients de pression obtenus à 0° et 45° (sans interpolation)

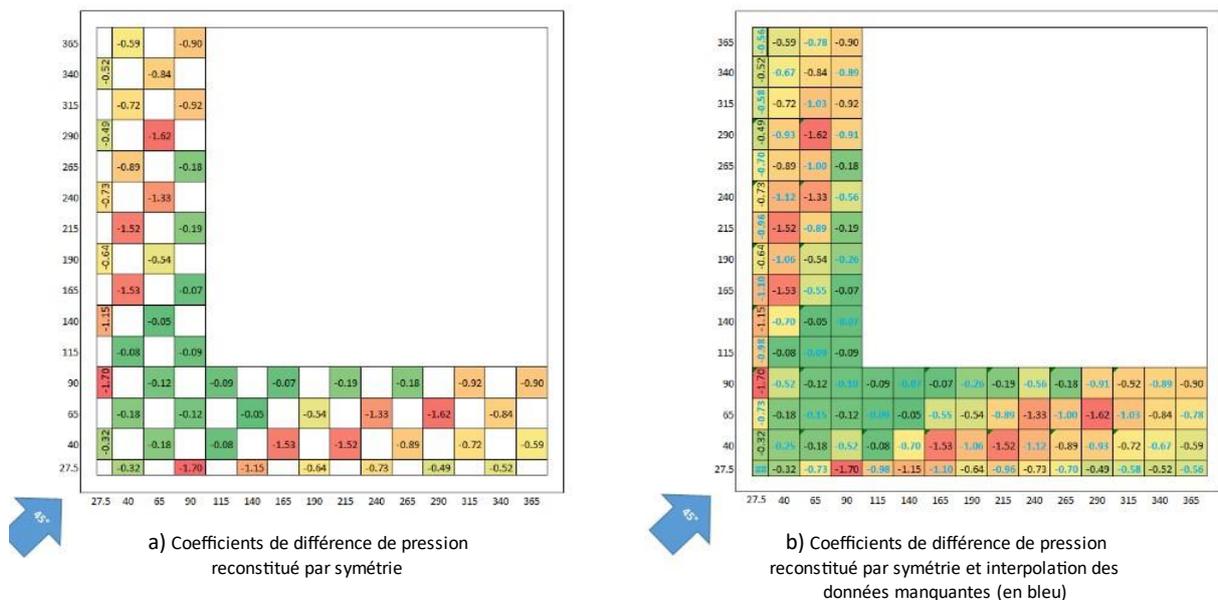


Figure 8 : Coefficients de pression à 45° reconstitué par symétrie (a) et interpolation des données manquantes (b)

On peut noter que la dépression peut être plus de quatre fois plus forte à 45° qu'à 0°. En effet, à 45° l'arrachement maximal est obtenu sur la dalle 16 avec un coefficient de différence de pression de -1,7. L'arrachement maximal à 0° est obtenu au niveau de la dalle 21 avec un coefficient de différence de pression de -0,4.

La configuration à 45° étant symétrique et les mesures de pression étant mesurées à 40 cm et 90 cm du bord gauche et à 27,5 cm et 65 cm du bord bas, le champ de différence de pression est reconstitué plus finement sur la Figure 8 a). Les données manquantes sont obtenues par interpolation (moyenne des valeurs adjacentes) et représentées sur la Figure 8 b) en bleu.

3.2 Configuration 4 : DSP 50 mm, plots 50 mm et isolants 2*160mm

Cette configuration correspond aux dalles bétons sur plots de 50 mm sur deux couches d'isolants de 160 mm avec interposition du non-tissé. Les dalles sont alignées avec le niveau haut de la dalle de sorte qu'il n'y ait pas d'acrotère. Les dalles en rive sont recoupées au format 170 x 500 mm des deux côtés les plus exposés au vent.

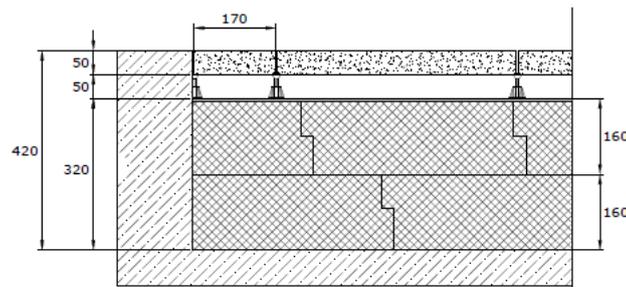


Figure 9 : Configuration 4 : DSP 50 mm, plots 50 mm, isolants 2*160mm

Pour étudier le comportement au vent des dalles béton, nous avons progressivement augmenté la vitesse dans la soufflerie, qui est caractérisée par 2 régimes de rotation des moteurs des 6 propulseurs : Petite Vitesse (PV) jusqu'à 160 km/h (turbulence d'environ 2%) et Grande Vitesse (GV) jusqu'à 280 km/h (turbulence d'environ 5%).

Les valeurs de vitesse (km/h) pour une incidence de 0° sont :

- En régime soufflerie PV (Petite Vitesse) : 70, 90, 110, 130, 150, 170
- En régime soufflerie GV (Grande Vitesse) : 190, 210 et 230

A 230 km/h le châssis vibre, commence à se soulever, les essais sont arrêtés.

Les valeurs de vitesse (km/h) pour une incidence de 45° sont :

- En PV : 70, 90, 110, 130, 150
- En GV : à 143 km/h la dalle n°18 a vibré et à 170 km/h les dalles 18, 22 et 24 se soulèvent

Nous considérons donc qu'à partir de 170 km/h (soit 47,2 m/s) environ certaines dalles en rive peuvent se soulever dans cette configuration 4.



Figure 10 : Soulèvement d'une demi-dalle en configuration 4 à 45° et à 170 km/h

3.3 Configuration 3 : DSP 40 mm, plots 60 mm et isolants 2*160mm

Cette configuration correspond aux dalles gravillonnées sur plots de 60 mm sur deux couches d'isolants de 160 mm avec interposition du non-tissé. Les dalles sont alignées avec le niveau haut de la dalle (pas d'acrotère). Les dalles en rive sont recoupées au formats 200 x 400 mm et 270 x 400 mm sur les deux côtés les plus exposés au vent.

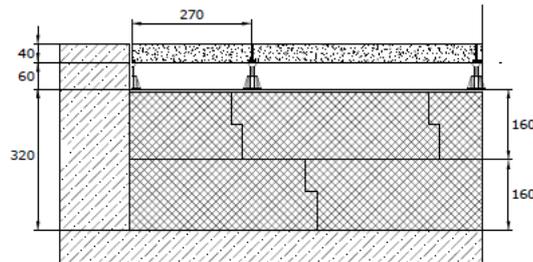


Figure 11 : Configuration 3 : DSP 40 mm, plots 60 mm, isolants 2*160mm



Figure 12 : Configuration 3 en soufflerie orientée à 0° (gauche) et à 45° (droite)

Pour étudier le comportement au vent des dalles gravillonnées, nous avons progressivement augmenté la vitesse dans la soufflerie.

Les valeurs de vitesse (km/h) pour une incidence de 0° sont :

- En GV : 70, 90, 110, 130, 150, 170, 190, 210 et à 230 le châssis vibre et commence à se soulever

Les valeurs de vitesse (km/h) pour une incidence de 45° sont :

- En GV : 70, 90, 110, 130 et à 145 une demi-dalle commence à se soulever. La dalle concernée était en 3^{ème} position en partant de l'angle. En la permutant en 2^{ème} position dans un deuxième essai, c'est elle encore qui a bougé.

Nous considérons donc qu'à partir de 145 km/h (soit 40,3 m/s) environ certaines dalles en rive peuvent se soulever dans cette configuration 3.



Figure 13 : Soulèvement d'une demi-dalle en configuration 3 à 45° et à 145 km/h

3.4 Configuration 1 : Graviers 50 mm avec retentio, acrotère 40 mm, isolants 2*160mm

Cette configuration correspond au lestage par graviers avec retentio en rives sur deux couches d'isolants de 160 mm avec interposition du non-tissé. Les graviers arrivent entre 35 et 45 mm du haut du banc (configuration avec acrotère).

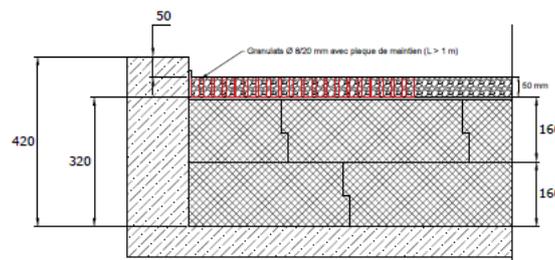


Figure 14 : Configuration 1 : Graviers 50 mm avec retentio, isolants 2*160mm



Figure 15 : Configuration 1 en soufflerie orientée à 0° (gauche) et à 45° (droite)

Pour étudier le comportement au vent des graviers, nous avons progressivement augmenté la vitesse dans la soufflerie.

Les valeurs de vitesse (km/h) pour une incidence de 0° sont :

- En GV : 70, 90, 110, 130, 150, 170, frétillement dès 130 km/h et début d'envol à 180 km/h

Les valeurs de vitesse (km/h) pour une incidence de 45° sont :

- En GV : 70, 90, 100, frétillement dès 90 km/h et envol des graviers au-dessus des retentios à 100 km/h

Nous considérons donc qu'à partir de 100 km/h (soit 27,8 m/s) environ les graviers peuvent s'envoler dans cette configuration 1.

3.5 Configuration 2 : Graviers 50 mm, acrotère 40 mm, isolants 2*160mm

Cette configuration correspond au lestage par gravier sans retentio sur deux couches d'isolants de 160 mm avec interposition du non-tissé. Les graviers arrivent entre 35 et 45 mm du haut du banc (configuration avec acrotère).

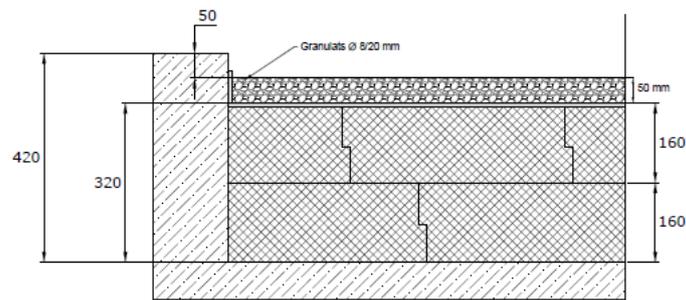


Figure 16 : Configuration 2 : Gravier 50 mm sans retentio, isolants 2*160mm



Figure 17 : Configuration 2 en soufflerie orientée à 0° (gauche) et à 45° (droite)

Pour étudier le comportement au vent des graviers, nous avons progressivement augmenté la vitesse dans la soufflerie.

Les valeurs de vitesse (km/h) pour une incidence de 45° sont :

- En GV : 70, 90, frétillement dès 80 km/h et début d'envol des graviers à 90 km/h

Nous considérons donc qu'à partir de 90 km/h (soit 25 m/s) environ les graviers peuvent s'envoler dans cette configuration 2.

3.6 Configuration 8a : Céram 20 mm (60*60), plots 80 mm + 2*160mm

Cette configuration correspond aux dalles cérames de 60 par 60 et d'épaisseur 20 mm, sur plots de 80 mm et sur deux couches d'isolants de 160 mm avec interposition du non-tissé. Les dalles sont alignées avec le niveau haut de la dalle (pas d'acrotère).

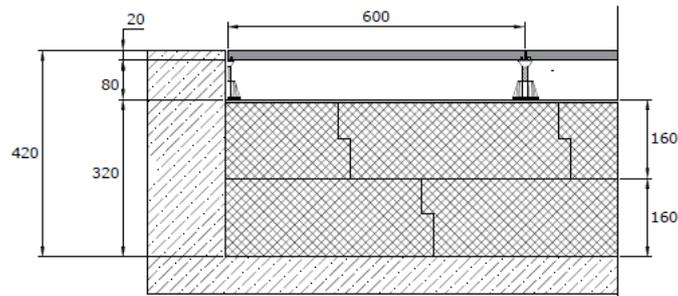


Figure 18 : Configuration 8a : Céram 20 mm, plots 80 mm, isolants 2*160mm



Figure 19 : Configuration 8a en soufflerie à 45°

Pour étudier le comportement au vent des dalles cérames, nous avons progressivement augmenté la vitesse dans la soufflerie en position 45° uniquement.

Les valeurs de vitesse (km/h) pour une incidence de 45° sont :

- En GV : 70, 90, 110 et à 120 km/h envol d'une plaque et soulèvement d'autres plaques

Nous considérons donc qu'à partir de 120 km/h (soit 33.3 m/s) environ certaines dalles peuvent se soulever dans cette configuration 8a.



Figure 20 : Soulèvement d'une plaque en configuration 8a à 45° et à 120 km/h

3.7 Configuration 8b : Céram 20 mm (60*60 et 30*30 en rives), plots 80 mm, isolants 2*160mm

Cette configuration correspond aux dalles cérames de 30 par 30 en rives et d'épaisseur 20 mm, sur plots de 80 mm et sur deux couches d'isolants de 160 mm avec interposition du non-tissé. Les dalles sont alignées avec le niveaux haut de la dalle (pas d'acrotère).

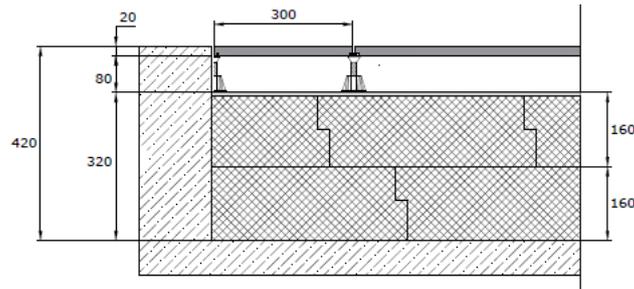


Figure 21 : Configuration 8b : Céram 20 mm, plots 80 mm, isolants 2*160mm



Figure 22 : Configuration 8b en soufflerie à 45°

Pour étudier le comportement au vent des dalles cérames, nous avons progressivement augmenté la vitesse dans la soufflerie en position 45° uniquement.

Les valeurs de vitesse (km/h) pour une incidence de 45° sont :

- En GV : 70, 90 et à 92 km/h soulèvement d'une demi plaque en rive

Nous considérons donc qu'à partir de 92 km/h (soit 25,6 m/s) environ certaines dalles peuvent se soulever dans cette configuration 8b.

3.8 Configuration 6 : DSP 50 mm, plots 210 mm plots 210 et isolants 160mm

Cette configuration correspond aux dalles bétons sur plots de 210 mm sur une couche d'isolant de 160 mm avec interposition du non-tissé. Les dalles sont alignées avec le niveau haut de la dalle de sorte qu'il n'y ait pas d'acrotère. Les dalles en rive sont recoupées au format 170 x 500 mm des deux côtés les plus exposés au vent.

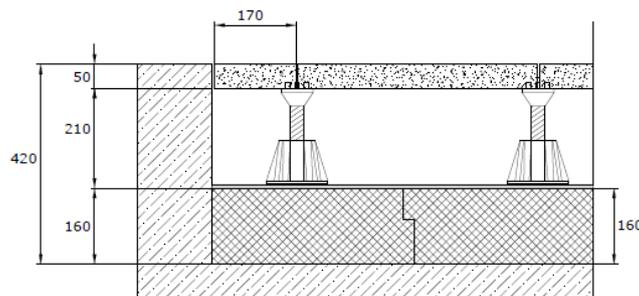


Figure 23 : Configuration 6 : DSP 50 mm, plots 210 mm, isolants 160mm



Figure 24 : Configuration 6 en soufflerie mise en œuvre (à gauche) et orientée à 45° (à droite)

Pour étudier le comportement au vent des dalles béton, nous avons progressivement augmenté la vitesse dans la soufflerie.

Les valeurs de vitesse (km/h) pour une incidence de 45° sont :

- En GV : 70, 90, 110, 130 et à 140 km/h soulèvement d'une demi-dalle en rive

Nous considérons donc qu'à partir de 140 km/h (soit 38,9 m/s) environ certaines dalles en rive peuvent se soulever dans cette configuration 6.



Figure 25 : Soulèvement d'une demi-dalle en configuration 6 à 45° et à 140 km/h

3.9 Configuration 7 : DSP 50 mm, plots 90 mm, isolants 120 et 160 mm

Cette configuration correspond aux dalles bétons sur plots de 210 mm sur une couche d'isolant de 160 mm avec interposition du non-tissé. Les dalles sont alignées avec le niveau haut de la dalle de sorte qu'il n'y ait pas d'acrotère. Les dalles en rive sont recoupées au format 170 x 500 mm des deux côtés les plus exposés au vent.

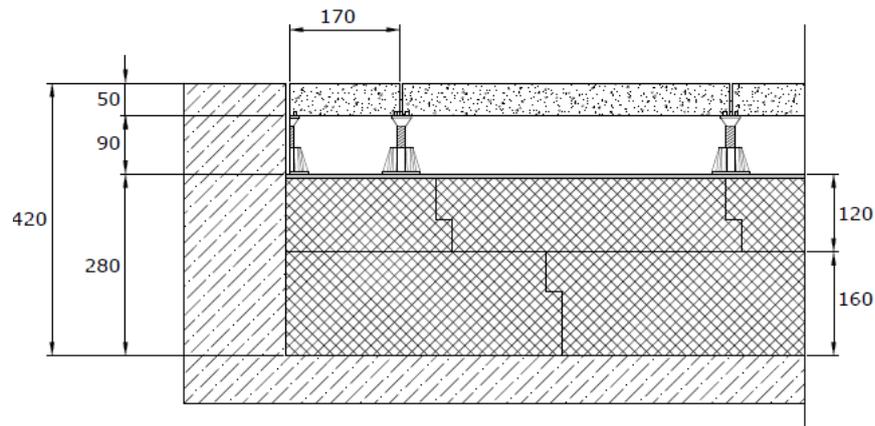


Figure 26 : Configuration 7 : DSP 50 mm, plots 9 mm, isolants 120 et 160mm



Figure 27 : Configuration 6 en soufflerie mise en œuvre (à gauche) et orientée à 45° (à droite)

Pour étudier le comportement au vent des dalles béton, nous avons progressivement augmenté la vitesse dans la soufflerie.

Les valeurs de vitesse (km/h) pour une incidence de 45° sont :

- En GV : 70, 90, 110, 130, 140 et à 155 km/h soulèvement d'une dalle mais pas envol

Nous considérons donc qu'à partir de 155 km/h (soit 43 m/s) environ certaines dalles en rive peuvent se soulever dans cette configuration 7.



Figure 28 : Soulèvement d'une demi-dalle en configuration 7 à 45° et à 155 km/h

4. CONCLUSION

L'étude réalisée sur un prototype à échelle 1 d'une toiture terrasse dans de nombreuses configurations de mise en œuvre de système de lestage (dalles béton, cérames et gravillonnées sur plot, graviers avec et sans rétention) ont permis de :

- Quantifier la dépression au bord de la toiture terrasse, à 0° et à 45°
- Définir les vitesses critique de soulèvement des dalles (généralement avant envol) :
 - La configuration 4 montre que certaines dalles béton de 50 mm sur plots de 50 mm peuvent se soulever en rive à partir de 170 km/h (soit 47,2 m/s) environ.
 - La configuration 3 montre que certaines dalles béton de 40 mm sur plots de 60 mm peuvent se soulever en rive à partir de 145 km/h (soit 40,3 m/s) environ.
 - La configuration 6 montre que certaines dalles béton de 50 mm sur plots de 210 mm peuvent se soulever en rive à partir de 140 km/h (soit 38,9 m/s).
 - La configuration 7 montre que certaines dalles béton de 50 mm sur plots de 90 mm peuvent se soulever en rive à partir de 155 km/h (soit 43 m/s).
 - La configuration 8a montre que certaines dalles cérame (60 cm * 60 cm) de 20 mm sur plots de 80 mm peuvent se soulever et s'envoler en rive à partir de 120 km/h (soit 33,3 m/s).
 - La configuration 8b montre que certaines dalles cérame (30 cm * 30 cm) de 20 mm sur plots de 80 mm peuvent se soulever en rive à partir de 92 km/h (soit 25,6 m/s).
- Définir les vitesses critiques d'envol des graviers, principalement dans la zone de coin ou de rive :
 - La configuration 1 montre que des graviers peuvent s'envoler au-dessus des retraits à partir de 180 km/h (soit 50 m/s) pour des vents de face (0°) et à partir de 100 km/h (soit 27.8 m/s) pour des vents obliques (45°) .
 - La configuration 2 montre que des graviers peuvent s'envoler au-dessus des retraits à partir de 90 km/h (soit 25 m/s) pour obliques (45°) .

5. ANNEXE : LA SOUFFLERIE CLIMATIQUE JULES VERNE

La soufflerie climatique Jules Verne a été conçue pour étudier à l'échelle de la vraie grandeur, les effets combinés du vent et des autres paramètres climatiques (pluie, sable, soleil, température, neige, ...) sur des éléments de construction, des véhicules ou du matériel de transport, ou sur tout système soumis à des conditions climatiques de type extrême.

La figure 1.1 présente les principales caractéristiques de la soufflerie. Deux anneaux indépendants ont été réalisés :

Le circuit dynamique comporte trois veines d'essais. L'équipement de ce circuit permet de reproduire la structure spatio-temporelle du vent, la pluie et les vents de sable jusqu'à 90 km/h en veine environnement. La veine haute vitesse est équipée d'une balance dynamométrique qui autorise la mesure des coefficients aérodynamiques de véhicules automobiles jusqu'à 280 km/h.

Le circuit thermique permet de reproduire un très large éventail de paramètres climatiques combinés à un écoulement d'air pouvant atteindre 140 km/h. La température ambiante et l'hygrométrie y sont contrôlées. Divers types de précipitations sont reproduits : la pluie, le brouillard, la neige. Le système à l'étude peut également être soumis à un flux radiatif intense provenant du simulateur solaire.

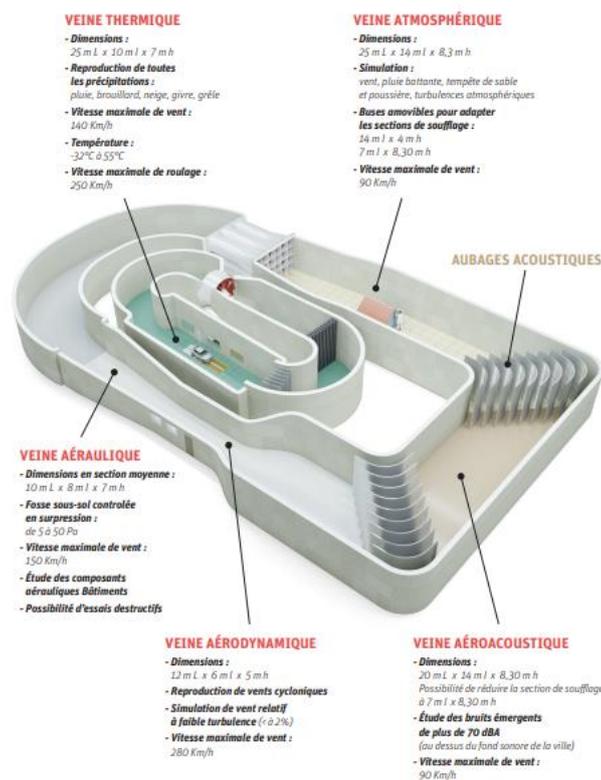


Figure 29 : Souffleries climatiques Jules Vernes du CSTB de Nantes