

Master thesis : Comparaison des impacts environnementaux d'une structure biomimétique et d'une structure en poteaux-poutres béton d'un bâtiment tertiaire

Auteur : Hanocq, Thi Mai

Promoteur(s) : Attia, Shady

Faculté : Faculté des Sciences appliquées

Diplôme : Master en ingénieur civil architecte, à finalité spécialisée en ingénierie architecturale et urbaine

Année académique : 2019-2020

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/9091>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

Annexe 1 : Scénarios tirés des FDES

Pour les profils reconstitués soudés en acier (CTICM, 2016) :

Tableau 1: scénarios des profils reconstitués soudés en acier (CTICM, 2016)

SCÉNARIOS	
ÉTAPE A1	Approvisionnement des matières premières Production d'acier, combustible, emballage et électricité 93 % d'acier primaire, 7 % d'acier secondaire
ÉTAPE A2	Production et combustion du diesel pour le transport de l'acier, combustible et emballages Informations fournies par les constructeurs participants. Si pas de données : transport de 24 tonnes sur 500 km, consommation 0,38 L/km
ÉTAPE A3	Émissions dues à la combustion énergétique des combustibles Production de déchets et fin de vie des chutes Chute d'acier : 0,081 kg/kg de produit fini (recyclé) Valorisation prise en compte mais mise en décharge négligeable
ÉTAPE A4	Production et combustion du diesel pour le transport jusqu'au chantier sur une distance de 296 km Consommation de 0,38 L/km 30 % de retour à vide
ÉTAPE A5	Grue : consommation de 5,4 E-03 L/kg de gasoil Production d'acier et produits supplémentaires : accessoires d'assemblages (5 % de la masse du produit) Transport jusqu'au chantier Fin de vie des chutes Fin de vie des emballages négligeable Chute d'acier : 5 % (recyclée)
ÉTAPE B1-B7	/
ÉTAPE C1	Grue
ÉTAPE C2	Production et combustion du diesel pour le transport : Distance de transport vers le centre de valorisation : 250 km Distance de transport vers la décharge : 50 km
ÉTAPE C3	Tri : séparation de l'acier et du béton 37,6 kWh de diesel par tonne de produit de déconstruction Nb : on considère une poutre supportant un plancher béton peu importe la fonction réelle de l'élément
ÉTAPE C4	La part d'acier (minime) éliminée est mise en centre d'enfouissement 98 % d'acier valorisé – 2 % mis en décharge
ÉTAPE D	Impacts dus à la production de l'acier secondaire ainsi que ceux évités lors de la production de l'acier primaire Valorisation des déchets d'emballage négligée

Pour les poutrelles en acier (CTICM, 2016) :

Tableau 2: scénarios des poutrelles en acier (CTICM, 2016)

SCÉNARIOS	
ÉTAPE A1	Approvisionnement des matières premières Production d'acier, combustible, emballage et électricité 33 % d'acier primaire, 67 % d'acier secondaire
ÉTAPE A2	Production et combustion du diesel pour le transport de l'acier, combustible et emballages Informations fournies par les constructeurs participants. Si pas de données : transport de 24 tonnes sur 500 km, consommation 0,38 L/km
ÉTAPE A3	Émissions dues à la combustion énergétique des combustibles Production de déchets et fin de vie des chutes Chute d'acier : 0,081 kg/kg de produit fini (recyclé) Valorisation prise en compte mais mise en décharge négligeable
ÉTAPE A4	Production et combustion du diesel pour le transport jusqu'au chantier sur une distance de 272 km Consommation de 0,38 L/km 30 % de retour à vide
ÉTAPE A5	Grue : consommation de 5,4 E-03 L/kg de gasoil Production d'acier et fabrication des produits supplémentaires : accessoires d'assemblages (5 % de la masse du produit) Transport jusqu'au chantier Fin de vie des chutes Fin de vie des emballages négligeable Chute d'acier : 5 % (recyclée)
ÉTAPE B1-B7	/
ÉTAPE C1	Grue
ÉTAPE C2	Production et combustion du diesel pour le transport : Distance de transport vers le centre de valorisation : 250 km Distance de transport vers la décharge : 50 km
ÉTAPE C3	Tri : séparation de l'acier et du béton 37,6 kWh de diesel par tonne de produit de déconstruction Nb : on considère une poutre supportant un plancher béton peu importe la fonction réelle de l'élément
ÉTAPE C4	La part d'acier (minime) éliminée est mise en centre d'enfouissement 98 % d'acier valorisé – 2 % mis en décharge
ÉTAPE D	Impacts dus à la production de l'acier secondaire ainsi que ceux évités lors de la production de l'acier primaire Valorisation des déchets d'emballage négligée

Pour le béton armé (SNBPE, 2019) :

Tableau 3: scénarios pour les éléments en béton (SNBPE, 2019)

SCÉNARIOS	
ÉTAPE A1 – A3	Fabrication du béton sur site Production des matières premières Transport Production d'énergie nécessaire à la production
ÉTAPE A4	Production et combustion du diesel pour le transport jusqu'au chantier sur une distance de 18,5 km Consommation de 0,08 L/km Capacité de 8 m³ 50 % de retour à vide
ÉTAPE A5	Grue et pompe : <ul style="list-style-type: none"> - 38,52 MJ colonne intérieure - 385,2 MJ pour la poutre intérieure et la dalle - 77,04 MJ pour le mur - 18 MJ pour le radier et les pieux Production d'acier et transport des produits supplémentaires : armatures et coffrage Production et transport des chutes : 3 % du béton (75 % des chutes valorisées et 25 % mises en décharge) Fin de vie des chutes
ÉTAPE B1-B7	Aucune maintenance Impact positif de la carbonatation
ÉTAPE C1	Démolition
ÉTAPE C2	Transport vers le lieu de fin de vie (75 % valorisé et 25 % mis en décharge) Distance vers le centre de valorisation : 30 km Distance vers la décharge : 30 km
ÉTAPE C3	Séparation des armatures métalliques (pour la poutre intérieure) Concassage
ÉTAPE C4	Mise en décharge Carbonatation : 75 % du produit mis en décharge
ÉTAPE D	Bénéfice dû à la revalorisation des graves pour les infrastructures routières et l'acier recyclé

Pour le plancher collaborant (L'enveloppe métallique du bâtiment, 2018) :

Tableau 4: scénarios pour le plancher collaborant (L'enveloppe métallique du bâtiment, 2018)

SCÉNARIOS	
ÉTAPE A1	Approvisionnement des matières premières Production d'acier, combustible, emballage et électricité
ÉTAPE A2	Production et combustion du diesel pour le transport de l'acier, combustible et emballages Informations fournies par les constructeurs participants. Si pas de données : transport de 20 tonnes sur 500 km, consommation 0,38 L/km
ÉTAPE A3	Fabrication du profil de coffrage en atelier Émissions dues à la combustion énergétique des combustibles Production de déchets et fin de vie des chutes La mise en décharge des déchets est négligée
ÉTAPE A4	Production et combustion du diesel pour le transport jusqu'au chantier sur une distance de 489 km pour l'acier et de 20 km pour le béton Consommation correspondant à une flotte de camions moyenne en Europe en 2005 30 % de retour à vide
ÉTAPE A5	Installation du produit Production d'acier et fabrication des produits supplémentaires : vis, connecteurs, tirefonds et armatures ainsi que les produits pour compenser les chutes Transport jusqu'au chantier Grue négligée Chute d'acier : 5 % (recyclée) Chute de béton : 1 % Fin de vie des emballages négligeable Fin de vie des chutes négligeable
ÉTAPE B1-B7	/
ÉTAPE C1	Grue négligeable Engin fonctionnant au diesel consommant 4,55 L/m³ démolé
ÉTAPE C2	Production et combustion du diesel pour le transport : Distance de transport vers le centre de valorisation : 250 km Distance de transport vers la décharge : 50 km Tri et concassage sur le chantier
ÉTAPE C3	Broyeur 3L de gasoil + 19 kWh par tonne de mélange ferraille/béton
ÉTAPE C4	La part d'acier éliminée est mise en centre d'enfouissement 98 % d'acier valorisé Acier : 85 % valorisés et 15 % mis en décharge Béton : 67 % valorisés et 33 % mis en décharge
ÉTAPE D	Impacts dus à la production de l'acier secondaire ainsi que ceux évités lors de la production de l'acier primaire Impacts bénéfiques dus à la production de granulats à partir des déchets de béton Valorisation des déchets d'emballage négligée

Finalement, pour les dalles alvéolées en béton précontraint (CERIB, 2019) :

Tableau 5: scénarios pour les dalles alvéolées (CERIB, 2019)

SCÉNARIOS (POUR 1 M² DE DALLE)	
ÉTAPE A1 – A3	Production des matières premières Transport Production d'énergie nécessaire à la production
ÉTAPE A4	Production et combustion du diesel pour le transport jusqu'au chantier sur une distance de 170 km Consommation de 38 L au 100 km à pleine charge et 25,3 L au 100 km à vide Utilisation de la capacité : 85 %
ÉTAPE A5	Clavetage des dalles avec un BPE (dont 4 % de pertes) Mise en œuvre : <ul style="list-style-type: none"> - 0,0224 kWh pour la mise en place de dalles - 0,0049 L de diesels pour la mise en place du béton Production et transport des chutes : 0,655 kg de béton, 64 g de bois et 15 g de PSE Traitement des déchets
ÉTAPE B1-B7	Aucune maintenance Impact positif de la carbonatation
ÉTAPE C1	Démolition
ÉTAPE C2	Transport vers le lieu de fin de vie <ul style="list-style-type: none"> - 70 % du béton valorisé et 30 % mis en décharge - 94 % de l'acier valorisé et 6 % mis en décharge Distance vers le centre de valorisation : <ul style="list-style-type: none"> - 30 km pour le béton - 100 km pour l'acier Distance vers la décharge : 30 km
ÉTAPE C3	Séparation des armatures métalliques (pour la poutre intérieure) Concassage
ÉTAPE C4	Mise en décharge Carbonatation : 75 % du produit mis en décharge
ÉTAPE D	Bénéfice dû à la revalorisation des graves pour les infrastructures routières Revalorisation de l'acier négligeable

Les FDES utilisées sont disponibles aux liens suivants :

CTICM. (2016). FICHE DE DECLARATION ENVIRONNEMENTALE ET SANITAIRE Profilé reconstitué soudé en acier utilisé comme élément d'ossature (poteau, poutre, portique...) Juin 2016 v2. Disponible à : <https://www.baseinies.fr/iniesV4/dist/consultation.html?id=9054>

CTICM. (2016). FICHE DE DECLARATION ENVIRONNEMENTALE ET SANITAIRE Poutrelle en acier utilisée comme élément d'ossature (poteau, poutre, lisse, solive, panne...) Juin 2016 v2. Disponible à : <https://www.base-inies.fr/iniesV4/dist/consultation.html?id=9055>

CERIB (2019). FICHE DE DÉCLARATION ENVIRONNEMENTALE ET SANITAIRE Dalle alvéolée en béton précontraint. Disponible à : <https://www.base-inies.fr/iniesV4/dist/consultation.html?id=12511>

L'enveloppe métallique du bâtiment. (2018). FICHE DE DÉCLARATION ENVIRONNEMENTALE ET SANITAIRE Plancher collaborant acier/béton (masse surfacique de béton comprise entre 120 kg/m² et 408 kg/m² et d'armatures en acier comprise entre 1,5 kg/m² et 26 kg/m²) Juin 2018. Disponible à : <https://www.base-inies.fr/iniesV4/dist/consultation.html?id=16379>

SNBPE. (2019). FICHE DE DÉCLARATION ENVIRONNEMENTALE ET SANITAIRE Béton armé pour dalle, C25/30 XC1/XC2 CEM II/A. Disponible à : <https://www.base-inies.fr/iniesV4/dist/consultation.html?id=12895>

SNBPE. (2019). FICHE DE DÉCLARATION ENVIRONNEMENTALE ET SANITAIRE Béton armé pour pieux, C25/30 XC1/XC2 CEM II/A. Disponible à : <https://www.base-inies.fr/iniesV4/dist/consultation.html?id=11070>

SNBPE. (2019). FICHE DE DÉCLARATION ENVIRONNEMENTALE ET SANITAIRE Béton armé pour poutre intérieure, C25/30 XC1/XC2 CEM II A L ou LL. Disponible à : <https://www.base-inies.fr/iniesV4/dist/consultation.html?id=11014>

SNBPE. (2019). FICHE DE DÉCLARATION ENVIRONNEMENTALE ET SANITAIRE Béton armé pour poteau intérieur, C25/30 XC1/XC2 CEM II A Poteau rectangulaire en béton de dimension 0.25x0.40 m, C25/30 XC2 CEM II/A-S. Disponible à : <https://www.base-inies.fr/iniesV4/dist/consultation.html?id=12512>

SNBPE. (2019). FICHE DE DÉCLARATION ENVIRONNEMENTALE ET SANITAIRE Béton Autoplaçant armé pour radier, C25/30 XF1 CEM II/A. Disponible à : <https://www.base-inies.fr/iniesV4/dist/consultation.html?id=11027>

SNBPE. (2019). FICHE DE DÉCLARATION ENVIRONNEMENTALE ET SANITAIRE Mur en béton d'épaisseur 0.20 m, C25/30 XC1CEM II/A-S. Disponible à : <https://www.base-inies.fr/iniesV4/dist/consultation.html?id=16422>

Annexe 2 : Plans et coupes - Matériaux utilisés - Note de calcul du prédimensionnement du cas 2

1 Cas 1

1.1 Plans et coupes

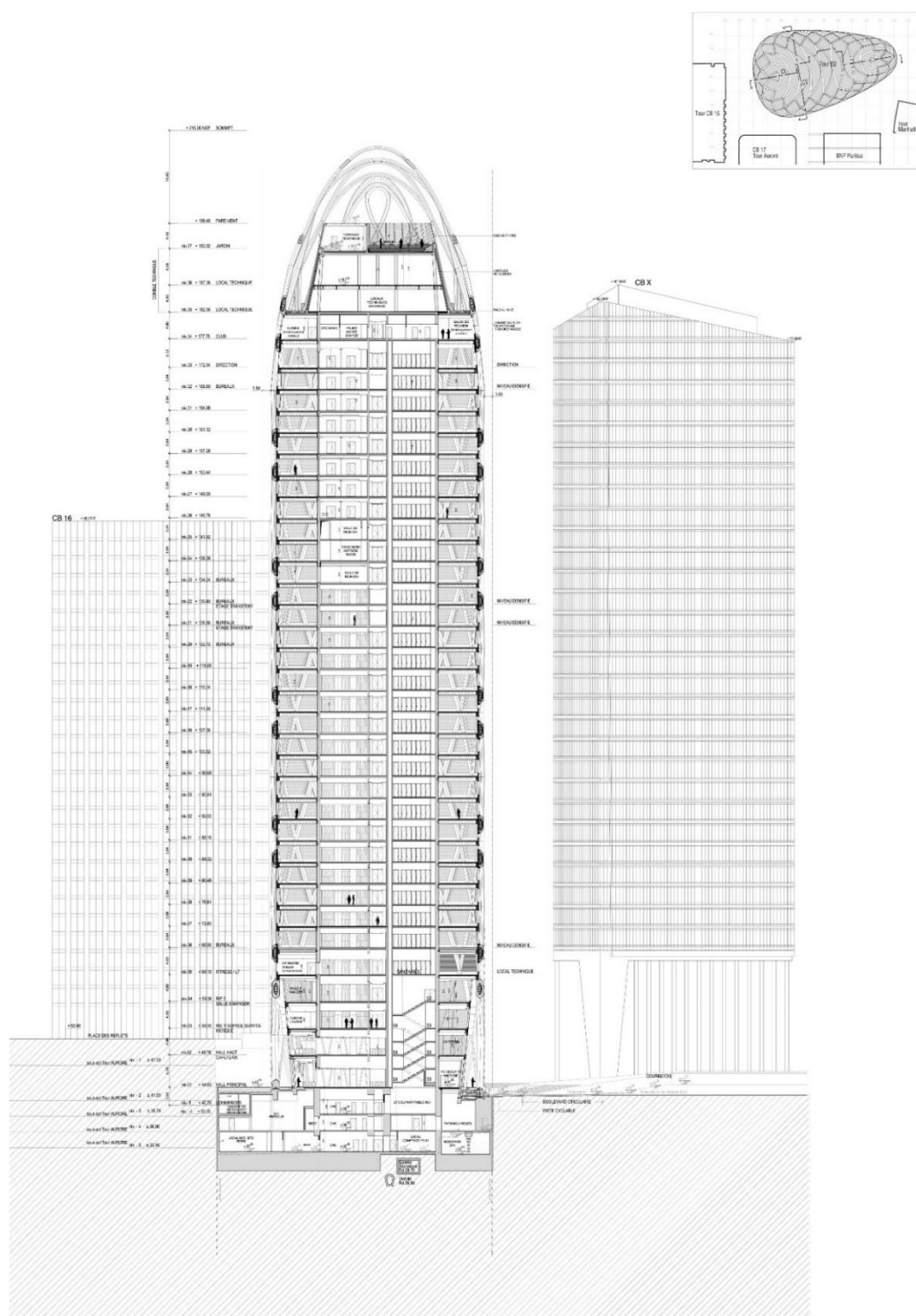


Figure 1 Tour D2 – coupe transversale

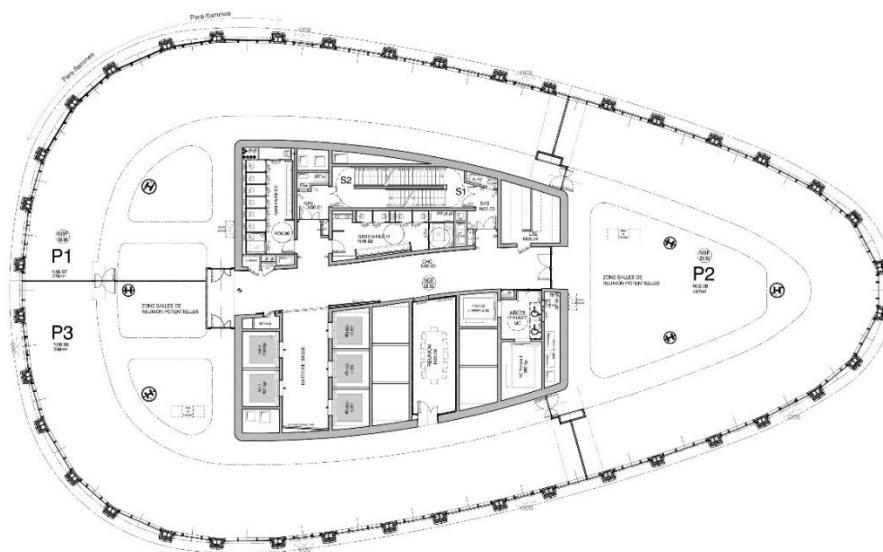


Figure 3 Tour D2 - plan type

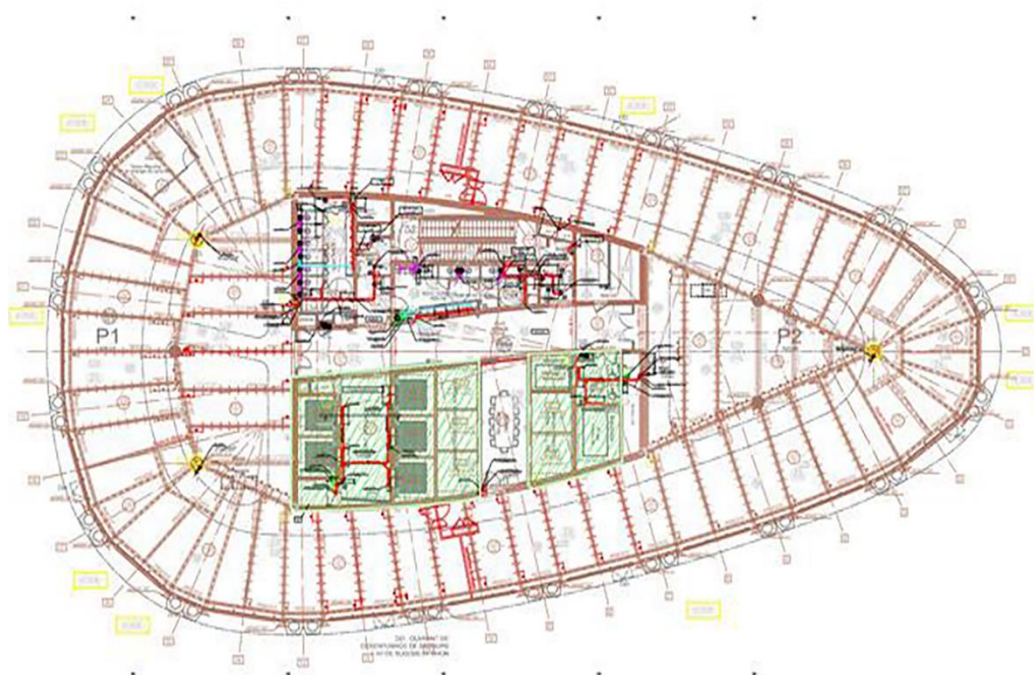


Figure 4 Tour D2 - plan structure

1.2 Matériaux utilisés

Il est à noter que les dimensions des éléments sont tirées des plans et coupes mis à disposition (quand l'information vient d'une autre source, celle-ci est précisée).

1.2.1 Exostructure

L'exostructure est composée de profilés HISTAR 460 MPa HD400 produits par ArcelorMittal dont les dimensions changent en fonction de la hauteur du bâtiment. La longueur totale de ces profilés est estimée à 6240 m. Sachant qu'un élément pèse environ 583 kg/m¹, j'ai fait l'**hypothèse** que tous les profilés utilisés sont des HD 400x551 (voir fiche

technique https://constructalia.arcelormittal.com/files/5_3_1_HISTAR_web--9ce0a38ece4828ee9792e01d74a38f48.pdf)

Désignation Designation Bezeichnung		Dimensions Abmessungen						Dimensions de construction Dimensions for detailing Konstruktionsmaße					Surface Oberfläche	
G kg/m	h mm	b mm	t _w mm	t _f mm	r mm	A mm ² x10 ²	h _i mm	d mm	Ø	p _{min} mm	p _{max} mm	A _L m ² /m	A _G m ² /t	
HD 400 x 187*	187	368	391	15,0	24,0	15	237,6	320,0	290,0	M 27	104	286	2,244	12,03
HD 400 x 216**	216	375	394	17,3	27,7	15	275,5	320,0	290,0	M 27	106	288	2,266	10,48
HD 400 x 237**	237	380	395	18,9	30,2	15	300,9	320,0	290,0	M 27	108	290	2,276	9,637
HD 400 x 262**	262	387	398	21,1	33,3	15	334,6	320,0	290,0	M 27	110	292	2,298	8,749
HD 400 x 287**	287	393	399	22,6	36,6	15	366,3	320,0	290,0	M 27	112	294	2,311	8,038
HD 400 x 314**	314	399	401	24,9	39,6	15	399,2	320,0	290,0	M 27	114	296	2,326	7,425
HD 400 x 347**	347	407	404	27,2	43,7	15	442,0	320,0	290,0	M 27	116	298	2,350	6,773
HD 400 x 382**	382	416	406	29,8	48,0	15	487,1	320,0	290,0	M 27	118	300	2,371	6,200
HD 400 x 421**	421	425	409	32,8	52,6	15	537,1	320,0	290,0	M 27	122	304	2,395	5,680
HD 400 x 463**	463	435	412	35,8	57,4	15	589,5	320,0	290,0	M 27	124	306	2,421	5,231
HD 400 x 509**	509	446	416	39,1	62,7	15	649,0	320,0	290,0	M 27	128	310	2,452	4,813
HD 400 x 551**	551	455	418	42,0	67,6	15	701,4	320,0	290,0	M 27	132	312	2,472	4,490
HD 400 x 592**	592	465	421	45,0	72,3	15	754,9	320,0	290,0	M 27	134	316	2,498	4,216
HD 400 x 634**	634	474	424	47,6	77,1	15	808,0	320,0	290,0	M 27	140	312	2,523	3,978
HD 400 x 677**	677	483	428	51,2	81,5	15	863,4	320,0	290,0	M 27	144	316	2,550	3,762
HD 400 x 744**	744	498	432	55,6	88,9	15	948,1	320,0	290,0	M 27	148	320	2,587	3,476

Figure 5 : Extrait de la fiche technique
d'ArcelorMittal <https://constructalia.arcelormittal.com/files/HD--9dc36b8ad1b7eca18d6dad22499036a4.pdf>

Au vu des coupes, on fait l'**hypothèse** que les charges reprises par l'exostructure sont transférées aux fondations grâce à des colonnes en béton situées aux niveaux en sous-sol. Celles-ci ont les dimensions suivantes (tirées des coupes) : 1,4 x 1,4 m. Ces colonnes se déploient sur une hauteur de 12 m et se comptent au nombre de 20.

1.2.2 Les poutres

Le plancher est un plancher collaborant Cofraplus 60 (ArcelorMittal) soutenu par des poutres ABC (ArcelorMittal) formées à partir d'IPE 450 et HEA450². N'ayant pas d'information sur la répartition de ces éléments dans le bâtiment, j'ai fait l'**hypothèse** que les poutres formées à partir d'IPE 450 sont utilisées partout pour supporter le plancher (sauf pour les poutres

¹ <https://constructalia.arcelormittal.com/en/67/70/107/language/IT>
Sections de 12m de long pesant environs 7 tonnes

² https://constructalia.arcelormittal.com/fr/galerie_des_etudes_de_cas/france/tour-d2

périphériques). En effet, selon la fiche technique des poutrelles ACB, les profilés formés à partir de HEA450 sont utilisés à partir d'une portée de 9 m, or les portées des poutres sont toutes inférieures à cette valeur. Fiche technique :

<https://construction.arcelormittal.com/myspace//medias/FT-Cofraplus-60-Ed.8-Novembre-zU3NDMxNjAzNTAucGRmfDlwMml5OTg3OTczZWNlZDBINGRkMDljZDMzYjQwMGY1Yzk0YzlhNDMyZDU1ZTU2M2RhNDRIOWVINGI3MzM3NjI>

Profilé	Dimensions (mm)				Charge ultime q_u (kN/m) en fonction de la portée (m)														
	a_0	w	e	H_t	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	18	20	22	24
(A) IPE 270	285	142,5	427,5	384	49,2	40,1	27,7												
(B) IPE 300	315	157,5	472,5	427	58,9	48,1	39,4	28,3	20,9										
(C) IPE 330	345	172,5	517,5	470	70,8	57,9	48,1	39,0	29,3	22,3									
(D) IPE 360	375	187,5	562,5	513	84,7	68,9	57,4	48,6	39,7	30,2	23,5								
(E) IPE 400	415	207,5	622,5	570	102,4	84,1	69,8	59,0	51,0	42,5	33,5	26,5	21,4						
(F) IPE 450	465	232,5	697,5	642	125,5	103,6	85,8	73,0	62,7	54,4	47,6	38,1	30,9	25,2	21,0				
(G) IPE 500	515	257,5	772,5	714		125,2	104,4	88,9	76,2	66,2	58,0	51,3	43,6	35,6	29,7	21,2			
(H) IPE 550	555	277,5	832,5	781			130,7	110,8	95,3	82,0	72,0	63,4	56,4	49,1	41,0	29,0	21,4		
(I) IPE 600	615	307,5	922,5	857				130,6	112,4	97,6	85,2	75,7	67,0	60,0	54,1	39,6	29,3	22,2	
(J) IPE 750 x 147	755	395	1150	1086					122,1	107,1	95,5	93,6	84,3	77,1	70,8	61,1	52,3	40,7	31,5
(K) IPE 750 x 173	765	397,5	1162,5	1097								126,5	111,9	100,7	90,2	74,1	61,3	49,9	38,7
(L) IPE 750 x 196	770	400	1170	1107									126,7	114,0	102,3	84,1	69,8	58,0	45,1
(M) IPE 750 x 220	780	402,5	1182,5	1118										126,3	113,9	93,8	78,2	65,8	52,1

Figure 6 : Extrait de la fiche technique <https://construction.arcelormittal.com/myspace//medias/FT-Cofraplus-60-Ed.8-Novembre-zU3NDMxNjAzNTAucGRmfDlwMml5OTg3OTczZWNlZDBINGRkMDljZDMzYjQwMGY1Yzk0YzlhNDMyZDU1ZTU2M2RhNDRIOWVINGI3MzM3NjI>

Profilé		Dimensions (mm)				Charge ultime q _u (kN/m) en fonction de la portée (m)															
		a ₀	w	e	H _t	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	18	20	22	24	
(A)	HE 300 A	270	135	405	398	55,1	47,5	39,9	35,7	31,3	28,6	25,2	20,1								
(B)	HE 320 A	290	145	435	426	116,2	101,7	79,7	71,0	53,1	40,7	31,6	25,2	20,4							
(C)	HE 340 A	300	150	450	451	123,1	105,7	92,1	82,4	63,1	48,0	37,6	29,9	24,2							
(D)	HE 360 A	320	160	480	479		119,3	102,8	90,4	74,9	57,4	44,9	35,8	28,9	23,7						
(E)	HE 400 A	360	180	540	537			129,3	109,6	93,8	77,2	61,0	48,5	39,2	32,2	26,7					
(F)	HE 450 A	410	205	615	608				128,7	110,5	95,7	84,0	68,2	55,1	45,1	37,6	26,9				
(G)	HE 500 A	460	230	690	680					128,3	111,6	98,0	86,7	74,7	61,1	51,2	36,5	26,9	20,4		
(H)	HE 550 A	500	250	750	747						127,0	111,6	98,7	87,6	77,6	64,2	46,3	34,2	25,9	20,1	
(I)	HE 600 A	550	275	825	819							125,0	110,2	98,3	88,1	79,3	58,0	43,0	32,6	25,4	
(J)	HE 650 A	600	300	900	891							138,9	123,1	109,4	98,4	88,6	71,6	53,2	40,3	31,4	
(K)	HE 700 A	650	325	975	962								138,8	123,4	110,7	99,7	82,0	64,8	49,4	38,5	
(L)	HE 800 A	740	370	1110	1101										133,1	119,8	98,6	81,9	68,7	53,4	
(M)	HE 900 A	840	420	1260	1244												118,7	98,9	83,5	71,3	

Figure 7 : Extrait de la fiche technique <https://construction.arcelormittal.com/myspace//medias/FT-Cofraplus-60-Ed.8-Novembre-zU3NDMxNjAzNTAucGRmfDIwMml5OTg3OTczZWNlZDBINGRkMDIjZDMzYjQwMGY1Yzk0YzlhNDMyZDU1ZTU2M2RhNDRIOWVINGI3MzM3NjI>

	G	h	b	t _w	t _f	r	A	h _i	d	Ø	P _{min}	P _{max}	A _L	A _G
	kg/m	mm	mm	mm	mm	mm	mm ²	mm	mm		mm	mm	m ² /m	m ² /t
							x10 ²							
IPE A 240*	26,2	237	120	5,2	8,3	15	33,3	220,4	190,4	M12	64	68	0,918	35,10
IPE 240	30,7	240	120	6,2	9,8	15	39,1	220,4	190,4	M12	66	68	0,922	30,02
IPE O 240+	34,3	242	122	7	10,8	15	43,7	220,4	190,4	M12	66	70	0,932	27,17
IPE A 270*	30,7	267	135	5,5	8,7	15	39,2	249,6	219,6	M16	70	72	1,037	33,75
IPE 270	36,1	270	135	6,6	10,2	15	45,9	249,6	219,6	M16	72	72	1,041	28,86
IPE O 270+	42,3	274	136	7,5	12,2	15	53,8	249,6	219,6	M16	72	72	1,051	24,88
IPE A 300*	36,5	297	150	6,1	9,2	15	46,5	278,6	248,6	M16	72	86	1,156	31,65
IPE 300	42,2	300	150	7,1	10,7	15	53,8	278,6	248,6	M16	72	86	1,160	27,46
IPE O 300+	49,3	304	152	8	12,7	15	62,8	278,6	248,6	M16	74	88	1,174	23,81
IPE A 330*	43,0	327	160	6,5	10	18	54,7	307	271	M16	78	96	1,250	29,09
IPE 330	49,1	330	160	7,5	11,5	18	62,6	307	271	M16	78	96	1,254	25,52
IPE O 330+	57,0	334	162	8,5	13,5	18	72,6	307	271	M16	80	98	1,268	22,24
IPE A 360*	50,2	357,6	170	6,6	11,5	18	64,0	334,6	298,6	M22	86	88	1,351	26,91
IPE 360	57,1	360	170	8	12,7	18	72,7	334,6	298,6	M22	88	88	1,353	23,70
IPE O 360+	66,0	364	172	9,2	14,7	18	84,1	334,6	298,6	M22	90	90	1,367	20,69
IPE A 400*	57,4	397	180	7	12	21	73,1	373	331	M22	94	98	1,464	25,51
IPE 400	66,3	400	180	8,6	13,5	21	84,5	373	331	M22	96	98	1,467	22,12
IPE O 400+	75,7	404	182	9,7	15,5	21	96,4	373	331	M22	96	100	1,481	19,57
IPE A 450*	67,2	447	190	7,6	13,1	21	85,6	420,8	378,8	M24	100	102	1,603	23,87
IPE 450	77,6	450	190	9,4	14,6	21	98,8	420,8	378,8	M24	100	102	1,605	20,69
IPE O 450+	92,4	456	192	11	17,6	21	118	420,8	378,8	M24	102	104	1,622	17,56

Figure 8 : Caractéristiques des IPE (Catalogue ArcelorMittal)

En ce qui concerne les poutres ceinture, comme celles-ci doivent reprendre les autres poutres (formées à base d'IPE 450), on fait l'**hypothèse** qu'il s'agit de IPE O 600+

Désignation	Dimensions						Dimensions de construction					Surface		
G kg/m	h mm	b mm	t _w mm	t _f mm	r mm	A mm ²	h _i mm	d mm	Ø	P _{min} mm	P _{max} mm	A _L m ² /m	A _G m ² /t	
						x 10 ²								
IPE A 500*	497	200	8,4	14,5	21	101	468	426	M24	100	112	1,741	21,94	
IPE 500	500	200	10,2	16	21	116	468	426	M24	102	112	1,744	19,23	
IPE O 500+	107	506	202	12	19	21	137	468	426	M24	104	114	1,760	16,40
IPE A 550*	547	210	9	15,7	24	117	515,6	467,6	M24	106	122	1,875	20,36	
IPE 550	106	550	210	11,1	17,2	24	134	515,6	467,6	M24	110	122	1,877	17,78
IPE O 550+	123	556	212	12,7	20,2	24	156	515,6	467,6	M24	110	122	1,893	15,45
IPE A 600*	108	597	220	9,8	17,5	24	137	562	514	M27	114	118	2,013	18,72
IPE 600	122	600	220	12	19	24	156	562	514	M27	116	118	2,015	16,45
IPE O 600+	154	610	224	15	24	24	197	562	514	M27	118	122	2,045	13,24

Figure 9 : Caractéristiques des IPE (Catalogue ArcelorMittal)

Pour les niveaux 1 à 34, la longueur totale des poutres alvéolées de ce type pour un étage est estimée à 553 m. Celle des IPE O 600+ est estimée à 144,5 m.

Pour le niveau 35, la longueur d'IPE 450 est de 65,64 m et celle d'IPE O 600+ est de 43,12 m.

1.2.3 Le plancher

1.2.3.1 Tôle en acier

La surface d'un plateau est estimée à 1053,27 m² (surface totale moins la surface du noyau) sauf au niveau 36 où la surface de planchers collaborants est égale à 218 m².

On fait l'**hypothèse** que la tôle est de 1 mm (RF 2 h minimum pour un bâtiment de cette hauteur) :

Caractéristiques du profil	Epaisseur nominale du profil (mm)		
	0,75	0,88	1,00
Poids (daN/m ²)	8,53	10,00	11,37
Section Ap : (cm ² /ml)	10,29	12,17	13,91
Inertie efficace I_{eff} (cm ⁴ /ml)	44,37	52,64	60,08
Position fibre neutre vi (cm)	3,37	3,37	3,37
Module d'inertie I/vi (cm ³ /ml)	13,16	15,62	17,83

Figure 10 : Extrait de la fiche technique <https://construction.arcelormittal.com/myspace/medias/FT-Cofraplus-60-Ed.8-Novembre-2019.pdf?context=bWFzdGVyfGFtYy1tZWRpYXwyMTY3NDJ8YXBwbGljYXRpb24vcGRmfGFtYy1tZWRpYS9oOWYvaGQzLzg5MzU3NDMxNjAzNTAucGRmfDIwMml5OTg3OTczZWNI>

1.2.3.2 Béton

L'épaisseur de la dalle est de 16 cm (RF 2 h).

Consommation nominale de béton

	Epaisseur d de la dalle (cm)									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Litrage (l/m ²)	75	85	95	105	115	125	135	145	155	165
Poids théorique du plancher daN/m ²	188	213	238	263	288	313	338	363	388	413

Poids volumique du béton 2 500 daN/m³
Epaisseur maximale admissible d = 28 cm

Figure 11 : Extrait de la fiche technique <https://construction.arcelormittal.com/myspace/medias/FT-Cofraplus-60-Ed.8-Novembre-2019.pdf?context=bWFzdGVyfGFtYy1tZWRpYXwyMTY3NDJ8YXBwbGljYXRpb24vcGRmfGFtYy1tZWRpYS9oOWYvaGQzLzg5MzU3NDMxNjAzNTAucGRmfDIwMml5OTg3OTczZWNI>

À l'intérieur du noyau (surface de 341 m²), la technique de plancher collaborant n'est pas utilisée, il s'agit d'une dalle en béton d'une épaisseur de 0,18 m..

En ce qui concerne les autres niveaux du bâtiment, leur plancher n'est pas un plancher collaborant mais un plancher en béton. Au niveau 36, l'épaisseur de la dalle est 0,3 m et la surface (y compris la surface du noyau) est 560,4 m² et aux niveaux en sous-sol, l'épaisseur de la dalle est 0,28 m et la surface est 1053,27 m².

1.2.4 Les colonnes

Au sous-sol, les 6 colonnes sont en béton (probablement pour des raisons économiques et car l'esthétique a peu d'importance). Les colonnes ont un rayon de 1,4 m et elles se déploient sur une hauteur de 12 m.

Pour les niveaux 1 à 15 (hauteur de 63,36 m), le profilé utilisé pour les colonnes est estimé en fonction des dimensions mesurées sur les plans et coupes et correspond à un HEA 550.

Pour les niveaux 16 à 27 (hauteur de 46,08 m), le profilé estimé est un HEA 400.

Pour les niveaux 28 à 34 (hauteur de 29,12 m), le profilé estimé est un HEA 300.

Pour les niveaux 35 et 36 (hauteur de 11,36 m), il y a désormais 7 colonnes évaluées comme des HEA 300.

Désignation		Dimensions						Dimensions de construction					Surface	
G	h	b	t _w	t _f	r	A	h _i	d	Ø	P _{min}	P _{max}	A _L	A _G	
kg/m	mm	mm	mm	mm	mm	mm ²	mm	mm		mm	mm	m ² /m	m ² /t	
						x 10 ²								
HE 400 AA*	92,4	378	300	9,5	13	27	117,7	352	298	M 27	118	198	1,891	20,46
HE 400 A	125	390	300	11	19	27	159,0	352	298	M 27	120	198	1,912	15,32
HE 400 B	155	400	300	13,5	24	27	197,8	352	298	M 27	124	198	1,927	12,41
HE 400 M	256	432	307	21	40	27	325,8	352	298	M 27	132	202	2,004	7,835
HE 450 AA*	99,7	425	300	10	13,5	27	127,1	398	344	M 27	120	198	1,984	19,89
HE 450 A	140	440	300	11,5	21	27	178,0	398	344	M 27	122	198	2,011	14,39
HE 450 B	171	450	300	14	26	27	218,0	398	344	M 27	124	198	2,026	11,84
HE 450 M	263	478	307	21	40	27	335,4	398	344	M 27	132	202	2,096	7,959
HE 500 AA*	107	472	300	10,5	14	27	136,9	444	390	M 27	120	198	2,077	19,33
HE 500 A	155	490	300	12	23	27	197,5	444	390	M 27	122	198	2,110	13,60
HE 500 B	187	500	300	14,5	28	27	238,6	444	390	M 27	124	198	2,125	11,34
HE 500 M	270	524	306	21	40	27	344,3	444	390	M 27	132	202	2,184	8,079
HE 550 AA*	120	522	300	11,5	15	27	152,8	492	438	M 27	122	198	2,175	18,13
HE 550 A	166	540	300	12,5	24	27	211,8	492	438	M 27	122	198	2,209	13,29
HE 550 B	199	550	300	15	29	27	254,1	492	438	M 27	124	198	2,224	11,15
HE 550 M	278	572	306	21	40	27	354,4	492	438	M 27	132	202	2,280	8,195

HE 280 A	76,4	270	280	8	13	24	97,3	244	196	M 27	112	178	1,603	20,99
HE 280 B	103	280	280	10,5	18	24	131,4	244	196	M 27	114	178	1,618	15,69
HE 280 M	189	310	288	18,5	33	24	240,2	244	196	M 27	122	186	1,694	8,984
HE 300 AA*	69,8	283	300	7,5	10,5	27	88,9	262	208	M 27	116	198	1,705	24,42
HE 300 A	88,3	290	300	8,5	14	27	112,5	262	208	M 27	118	198	1,717	19,43
HE 300 B	117	300	300	11	19	27	149,1	262	208	M 27	120	198	1,732	14,80
HE 300 M	238	340	310	21	39	27	303,1	262	208	M 27	132	208	1,832	7,699

Figure 12 : Caractéristiques HEA (ArcelorMittal)

1.2.5 Le noyau

Le noyau est un noyau en béton armé.

Le noyau se divise en plusieurs parties :

- Les voiles périphériques
- Les voiles intérieurs dans le sens longitudinal
- Les voiles intérieurs dans le sens transversal

L'épaisseur du voile « périphérique » varie selon la hauteur dans le bâtiment (les épaisseurs sont tirées de mes propres mesures sur les plans et coupes):

- Du niveau -2 à -1 : 1 m (longs côtés) et 1,7 m (petits côtés) sur une hauteur de 12 m
- Du niveau 1 à 6 : 0,63 m sur une hauteur de 28,8 m
- Du niveau 7 à 12 : 0,54 m sur une hauteur de 23,04 m
- Du niveau 13 à 34 : 0,4 m sur une hauteur de 86,72 m
- Du niveau 35 à 36 : 0,4 m sur une hauteur de 11,36 m (mais la taille du noyau et donc, son périmètre diffère).

L'épaisseur du voile « intérieur » varie selon la hauteur dans le bâtiment (les épaisseurs sont tirées de mes propres mesures sur les plans et coupes):

- Du niveau -2 à -1 : 1,2 m sur une hauteur de 12 m
- Du niveau 1 à 6 : 0,42 m sur une hauteur de 28,8 m
- Du niveau 7 à 12 : 0,3 m sur une hauteur de 23,04 m
- Du niveau 13 à 34 : 0,23 m sur une hauteur de 86,72 m
- Du niveau 35 à 36 : 0,23 m sur une hauteur de 11,36 m

La longueur de voile dans le sens longitudinal est 41,6 m.

La longueur de voile dans le sens transversal est 32,7 m sauf pour les niveaux 35 et 36 ou la longueur est 18,16 m.

1.2.6 Le radier de fondation

Le radier a une épaisseur de 3 m et une surface de 2166 m².

1.2.7 Les fondations

Il y a 86 barrettes de fondations d'une profondeur de 23 m. L'aire des barrettes est évaluée à 4,2 m².

2 Structure fictive en béton

La structure fictive en béton a été conçue pour être la plus proche possible de la structure de la Tour D2 : noyau central en béton, même nombre de colonnes « intérieures », surface au sol la plus proche possible, même nombre de niveaux, toiture-terrasse. Cependant, quelques simplifications ont été faites :

- Le niveau 34 et les niveaux inférieurs contiennent tous des bureaux
- La hauteur des étages du niveau 32 et inférieurs font tous 3,84 m
- Le terrain est plat

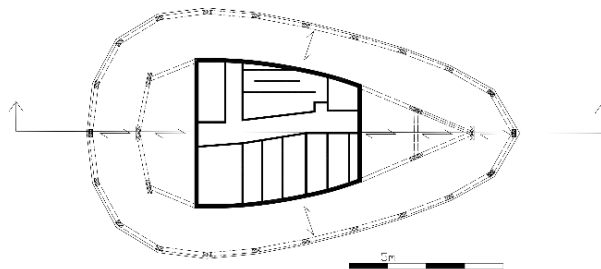
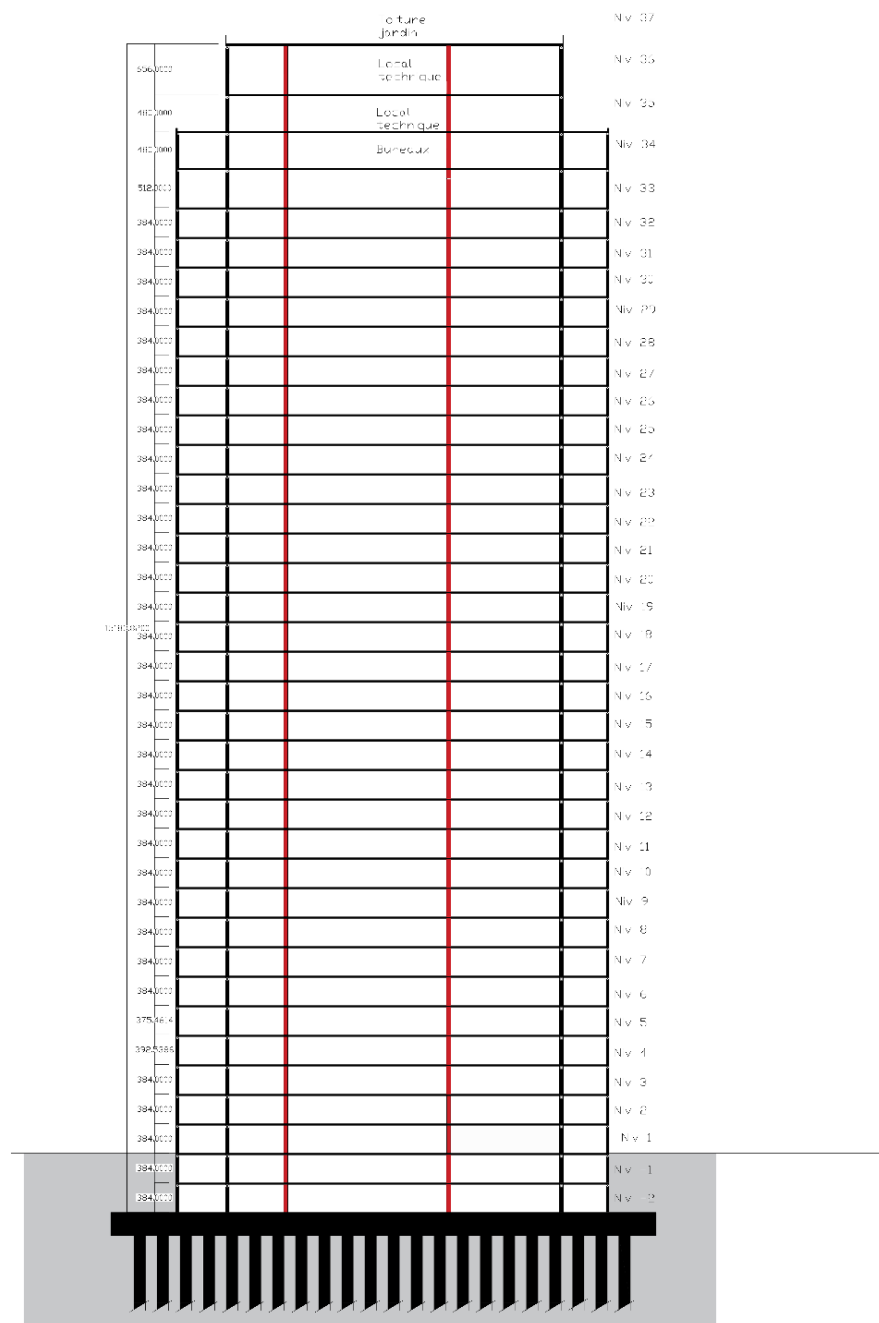


Figure 13 Tour fictive — coupe longitudinale type

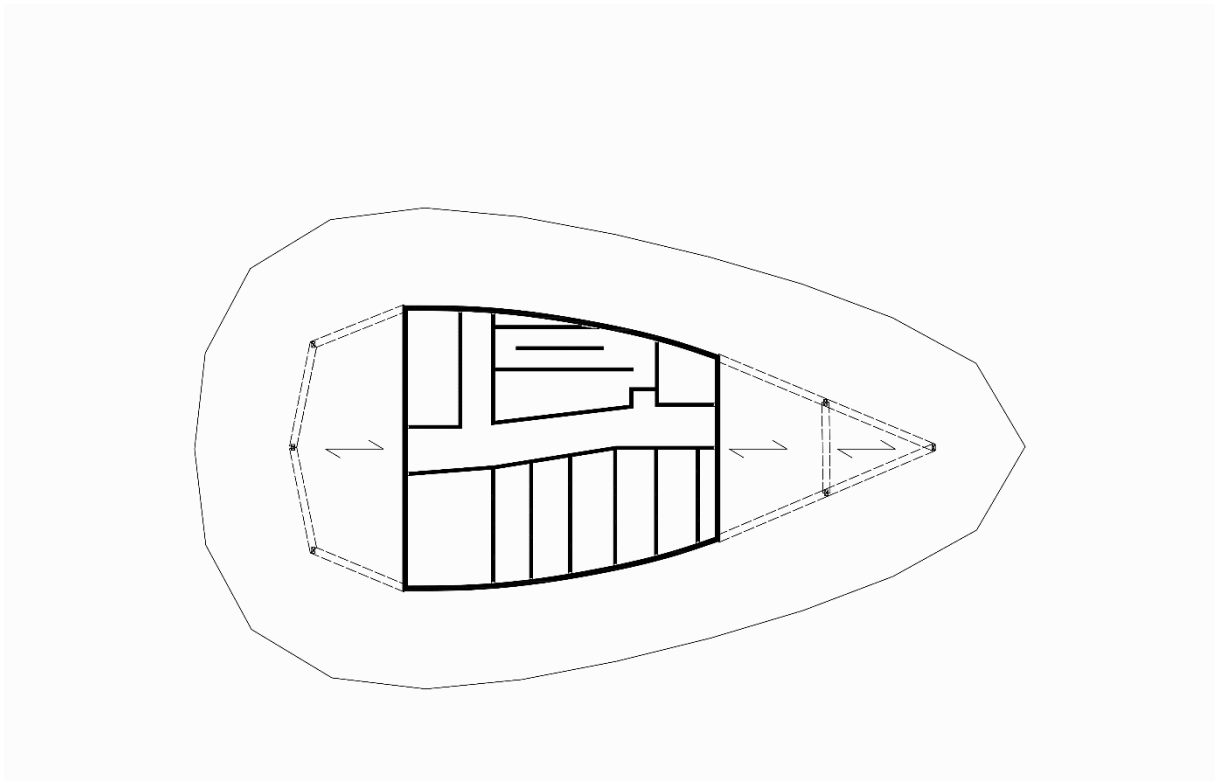


Figure 14 Tour fictive — niv 36 (plan type)

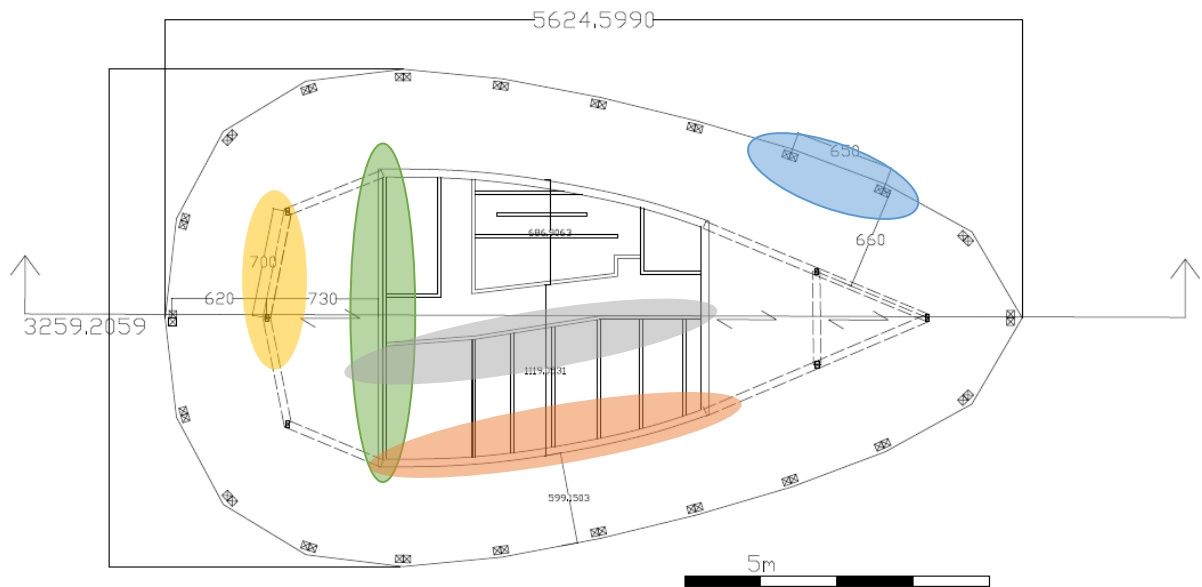


Figure 15 Tour fictive — niv 6 (plan type)

2.1 Éléments dimensionnants

Les éléments dimensionnants sont mis en évidence en couleur sur le plan type de la section précédente. On remarque 3 types d'éléments dimensionnant : colonne et poutre « intérieures » en jaune, colonne et poutre « extérieures » en bleu et le noyau central en vert, orange et gris.

2.2 Détermination des charges

2.2.1 Dues au vent

La charge de vent est déterminée à l'aide de l'Eurocode 1-4.

Vitesse de référence :

$$V_b = C_{dir} * C_{season} * V_{b0}$$

Où $C_{dir} = 1$ car la direction du vent est probable dans toutes les directions

$C_{season} = 1$ car le projet est durable sur plusieurs années

$V_{b0} = 24$ m/s à Paris

Donc,

$$V_b = 24 \text{ m/s}$$

Variation avec la hauteur :

La catégorie de notre terrain est la catégorie IV (tableau 4.1 de l'Eurocode 1 partie 1-4).

De ce fait :

- $Z_0 = 1$ m
- $Z_{min} = 10$ m

Et $z = 150$ m

$$V_m(z) = C_r(z) * C_0(z) * V_b$$

Où

- $C_0(z) = 1$ car le paysage est relativement plat (pente < 5% et pente < 3°)
- $C_r(z) = k_r * \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$ car $z_{min} < z$

$$\circ \text{ Et } k_r = 0.19 * \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0.07} = 0.19 * \left(\frac{1}{0.05}\right)^{0.07} = 0.234$$

$$\text{Donc, } C_r(z) = k_r * \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) = 0.234 * \ln\left(\frac{150}{1}\right) = 1.17$$

Finalement, $V_m(z) = C_r(z) * C_0(z) * V_b = 1.17 * 1 * 24$

$$\leftrightarrow v_m(150) = 28.17 \text{ m/s}$$

Turbulence du vent :

Pour $z_{min} < z$, on prend $k_l \sim 1$

$$I_v(z) = \frac{k_l}{c_0(z) * \ln(z/z_0)} = 0.199$$

Pression dynamique de pointe :

La pression dynamique de pointe est donnée par la formule suivante :

$$q_p(z) = [1 + 7 * I_v(z)] * \frac{1}{2} * \rho * (v_m(z))^2$$

$$\leftrightarrow q_p(z) = [1 + 7 * 0.199] * \frac{1}{2} * 1.25 * (28.17)^2 = 1.19 \text{ kN/m}^2$$

Cependant, l'effet du vent peut varier en fonction de la hauteur. Le bâtiment étudié ayant une volumétrie peu commune, on considère qu'il s'agit d'un bâtiment à plan rectangulaire et comme $h > 2b$, le bâtiment peut être considéré comme 3 parties distinctes :

- Une partie supérieure dont la hauteur vaut b pour laquelle $q_p(z) = q_p(h)$
- Une partie inférieure dont la hauteur vaut b également pour laquelle $q_p(z) = q_p(b)$
- Une partie médiane pour laquelle on effectue une interpolation linéaire

Vent 1 (dans la longueur du bâtiment), on obtient :

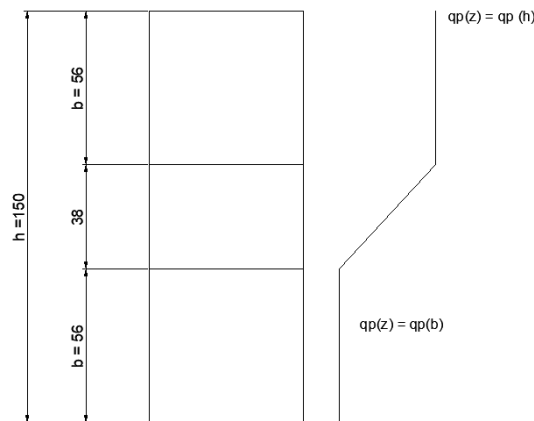


Figure 16 Profil de vent sur le long côté

$q_p(z) = 1.19 \text{ kN/m}^2$ comme détaillé ci-dessus et on obtient la valeur de $q_p(b)$ en procédant de la même manière : $q_p(b) = 0,88 \text{ kN/m}^2$

Vent 2 (dans la largeur du bâtiment), on obtient :

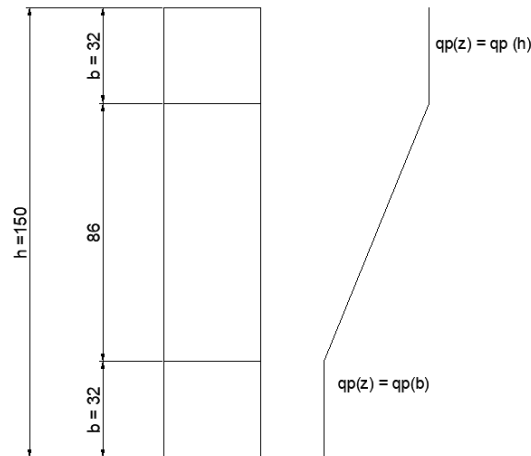


Figure 17 Profil de vent sur le petit côté

$q_p(z) = 1.19 \text{ kN/m}^2$ comme détaillé ci-dessus et on obtient la valeur de $q_p(b)$ en procédant de la même manière : $q_p(b) = 0,72 \text{ kN/m}^2$

Coefficient de force :

Le coefficient de force est obtenu par la formule suivante :

$$c_f = c_{f,0} * \psi_\lambda$$

$$\text{Et } c_{f,0} = 1.2 + \frac{0.18 * \log(10 * k/b)}{1 + 0.4 * \log(Re/10^6)}$$

Où

- k est la rugosité de surface équivalente (voir tableau 7.14 de l'EC1-4). Pour le verre, $k = 0,0015 \text{ mm}$.
- $Re = \frac{V * b}{\nu}$

Où

- $V = \sqrt{\frac{2 * q_p}{\rho}}$ où $\rho_{air} = 1,25 \text{ kg/m}^3$
- $b = 50 \text{ m}$ car on considère que le bâtiment est un cylindre à base circulaire de 50m de diamètre. Cette hypothèse de prédimensionnement est la plus proche des modèles proposés par l'eurocode. Il sera plutôt optimiste pour le vent 1 et pessimiste pour le vent 2.

Et ψ_λ est donné par la figure 7.36 de l'EC 1-4. Pour cela, il faut d'abord calculer λ qui est obtenu, pour un cylindre à base circulaire et pour $l \geq 50 \text{ m}$, par la formule suivante :

$$\lambda = 0.7 * \frac{l}{b} = 2.1 < 70$$

Pour $\lambda = 2.1$, $\psi_\lambda = 0.65$

Pour $h = 150 \text{ m}$,

- $V = 43.63 \text{ m/s}$
- $Re = 1.4 \cdot 10^8$
- $C_{f0} = 0.568$

Donc,

$$C_f = 0.369$$

Pour $h = 56 \text{ m}$

- $V = 37.47 \text{ m/s}$
- $Re = 1.2 \cdot 10^8$
- $C_{f0} = 0.559$

Donc,

$$C_f = 0.363$$

Pour $h = 30 \text{ m}$

- $V = 37.87 \text{ m/s}$
- $Re = 1.09 \cdot 10^8$
- $C_{f0} = 0.553$

Donc,

$$C_f = 0.359$$

Remarque : le coefficient de rugosité $k=0,0015 \text{ mm}$ du verre ne prend pas en compte les irrégularités telles que les joints. Il est donc trop favorable et, comme expliquée précédemment, l'hypothèse du cylindre est trop optimiste pour le vent 1.

Pour tenir compte de ces éléments, il paraît raisonnable et sécuritaire dans le cadre de ce prédimensionnement de retenir une valeur un peu plus élevée que celle obtenue avec les données collectées. Nous choisissons ici :

$C_f = 0.5$

Il est à noter que dans le projet de base avec l'exostructure le coefficient k de rugosité sera plus grand, le coefficient de force sera également plus grand et l'action du vent sur le bâtiment sera donc plus importante (à priori, environ 20 %).

Si on prend $k/b = 10^{-4}$, alors $C_{f0}=0.91$ et $C_f = 0.6$.

Effets dynamiques :

Il est à noter que les effets dynamiques et sismiques ne sont pas pris en compte car on fait l'hypothèse que le bâtiment est assez rigide grâce au noyau. En effet, le noyau central est une structure en béton coulé en place et permettra la dissipation d'énergie.

2.2.2 Dues à la neige

L'altitude de ce bâtiment à Paris est 43 m.

D'après les Eurocodes,

$$s = \mu_i \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k$$

Avec

- $\mu_i=0.8$ (pente de toit de $0<\alpha<30^\circ$)
- $C_e=1$ car il s'agit d'un site normal
- $C_t=1$
- $s_k = s_{k,0} = 0.45$

Ainsi,

$$s = 0.36 \text{ kN/m}^2$$

Situation accidentelle : Paris étant une zone A1, il n'y a pas de charge exceptionnelle de neige à prendre en compte.

2.3 Principe de prédimensionnement des hourdis

Hyp : le poids de l'isolant et de la membrane EPDM est négligé

Les charges agissant sur les hourdis sont :

- La neige au niveau de la toiture (niveau 34 et 36)
- Les charges d'exploitation :
 - 5 kN/m² pour la catégorie E2 dans les locaux techniques (niv 34 et 35)
 - 3 kN/m² pour la catégorie B pour les bureaux (niv -2 à 33)
 - 0.71 kN/m² pour la catégorie H pour la toiture du niv 34 (pour les hourdis)
Car pour $\alpha \leq 20^\circ$: $q_k = \left(0.8 - \frac{A}{100}\right) \geq 0.2$ où l'aire reprise par le hourdi est $A = 1.2 * 7.3 = 8.76 \text{ m}^2$
 - 5 kN/m² pour la catégorie C5 pour la toiture du niv 36. **Hypothèse** : cette valeur est utilisée pour l'ensemble de la toiture, même pour les zones de végétation, donc non accessibles au public. En effet, les charges induites par l'infrastructure requise pour une toiture jardin engendrerait une charge permanente additionnelle : la toiture végétale en toiture (**hypothèse** : 5 kN/m²) mais la charge d'exploitation serait alors de 0.2 kN/m² (catégorie H). À l'ELU, la combinaison de charge serait légèrement inférieure à celle obtenue en considérant une charge d'exploitation uniforme de 5 kN/m². On considère alors cette valeur dans un souci de simplification.
- Les charges permanentes additionnelles :
 - Revêtement de sol : 2 kN/m²
 - Charges techniques et faux plafonds 0.5 kN/m²
 - Cloisons : 1.5 kN/m²

Combinaison de charges :

À l'ELU : $P_{\text{supporté par hourdi}} = 1.35G + 1.5Q_k(+1.5\psi_0S)$ où $\psi_{0,S} = 0.5$

À l'ELS : $P_{\text{supporté par hourdi}} = G + Q_k(+\psi_0S)$ où $\psi_{0,S} = 0.5$

Hypothèse : les hourdis utilisés sur un étage sont les mêmes sur tout cet étage et correspondent à la dimension la plus grande obtenue lors du dimensionnement.

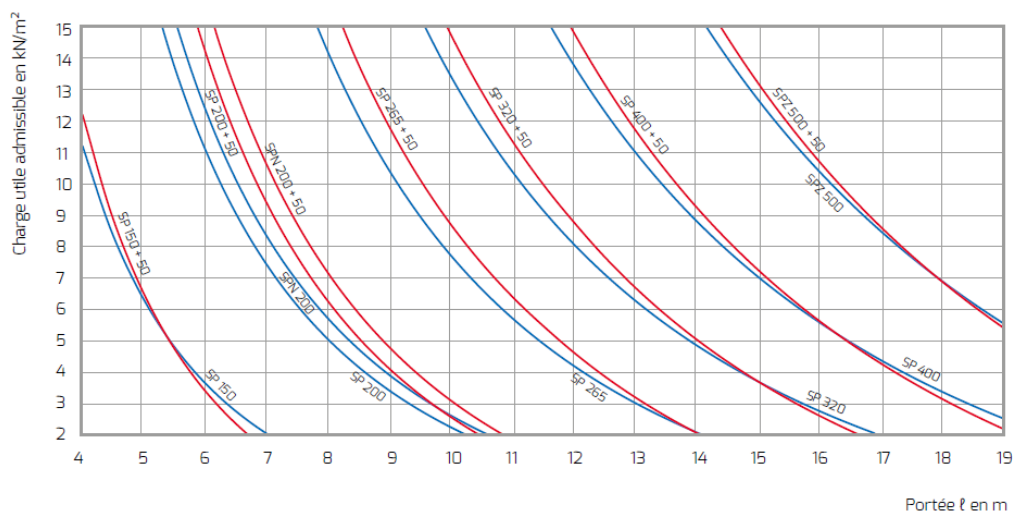
2.3.1 Fiche technique

Le dimensionnement a été fait à l'aide de fiche technique de produits Ergon. La fiche technique utilisée est disponible ici : https://www.ergon.be/wp-content/uploads/2018/04/02_ERG2018_TG_EI%C3%A9ments_Plancher_Toiture_FR.pdf

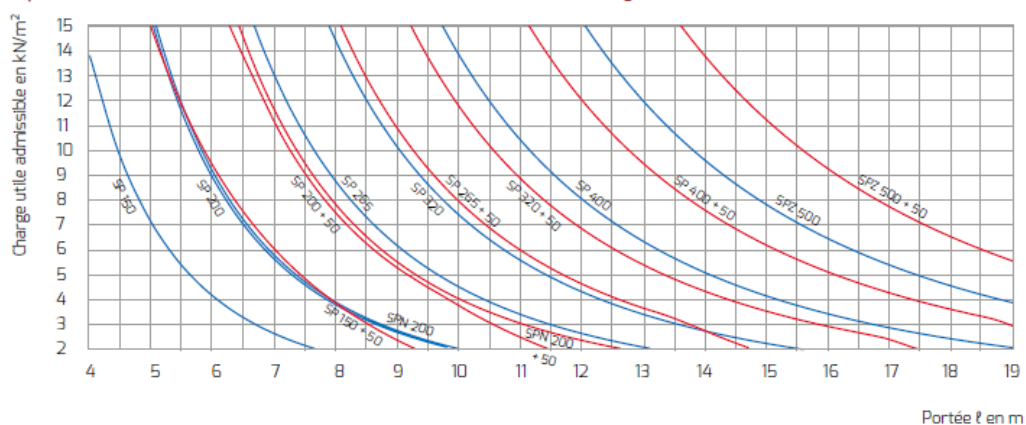
Les hourdis choisis ont une résistance au feu de 2 h

Capacité maximale avec une résistance au feu $R_f 120$

Avec couche collaborante



Capacité maximale avec limitation de la déformation instantanée à $\ell/800$ sous charge utile



Remarque :

- Charge utile admissible = somme de toutes les charges sollicitant le hourdis à l'exclusion de son poids propre.

Figure 18 Extrait de la FT Ergon — hourdis

2.2.3 | Caractéristiques

Profil	h	b	Poids propre (avec joints)	
	mm	mm	kN/m	kN/m ²
SP 150	150	1196	2,94	2,45
SP 200	200	1196	3,33	2,78
SPN 200	200	1196	3,51	2,92
SP 265	265	1196	4,59	3,83
SP 320	320	1196	4,94	4,12
SP 400	400	1196	5,93	4,94
SPZ 500	500	1196	7,56	6,30

Figure 19 Caractéristiques des hourdis

2.3.2 Poids des hourdis

Le poids des hourdis est trouvé dans la fiche technique.

Pour 5 cm de chape de compression, on comptera 1.25 kN/m².

2.4 Principe de prédimensionnement des poutres

Les poutres doivent reprendre :

- Les charges dues à la neige (en toiture niv 36 et 34)
 - Les charges permanentes additionnelles (revêtement de sol,...)
 - Les charges d'exploitation
- Il est à noter que pour les poutres, les charges d'exploitation de la toiture non accessible au public vaut 0,33 kN/m car pour $\alpha \leq 20^\circ$: $q_k = \left(0,8 - \frac{A}{100}\right) \geq 0,2$ où l'aire reprise par la poutre est $A = \left(\frac{7,3}{2} + \frac{6,2}{2}\right) * 7 = 47,25m^2$
- Les hourdis

Combinaison de charges : $P_{supportéeparpoutre} = P_{supportéparhourdi} + 1.35 * G_{hourdi}$

La charge linéaire est obtenue en multipliant le résultat précédent par la longueur de hourdis reprise par la poutre.

2.4.1 Fiche technique

La fiche technique de chez Ergon est disponible ici : https://www.ergon.be/wp-content/uploads/2018/02/03_ERG2018_TG_Structure_FR.pdf

Poutres RR avec hourdis SP 265 :

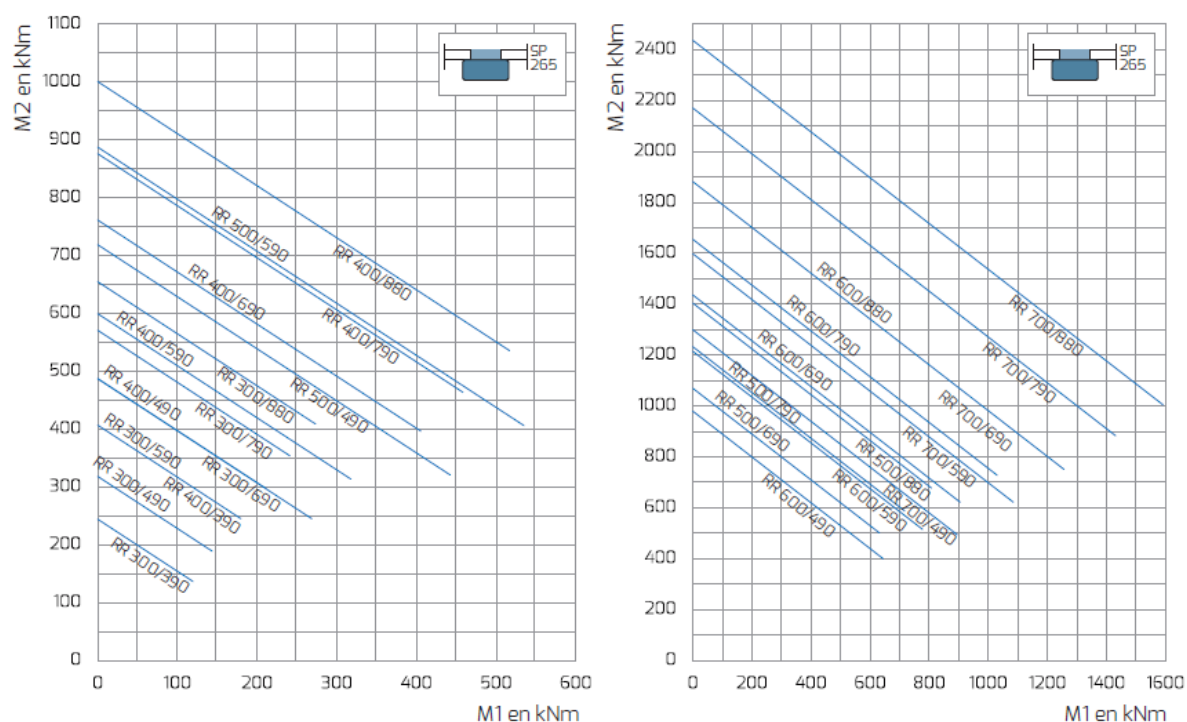


Figure 20 Extrait de la FT Ergon — poutres

Profil	h	b	Poids
	mm	mm	kN/m
RR 300/390	300	390	2,93
RR 300/490	300	490	3,68
RR 300/590	300	590	4,43
RR 300/690	300	690	5,18
RR 300/790	300	790	5,93
RR 300/880	300	880	6,60
RR 400/390	400	390	3,90
RR 400/490	400	490	4,90
RR 400/590	400	590	5,90
RR 400/690	400	690	6,90
RR 400/790	400	790	7,90
RR 400/880	400	880	8,80
RR 500/490	500	490	6,13
RR 500/590	500	590	7,38
RR 500/690	500	690	8,63
RR 500/790	500	790	9,88
RR 500/880	500	880	11,00
RR 600/490	600	490	7,35
RR 600/590	600	590	8,60

Figure 21 Caractéristiques des poutres RR (Ergon)

2.4.2 Calcul de M1

Pour calculer M1, il faut prendre en compte :

- Le poids propre de la poutre
- Le poids du hourdis et de la chape de compression : $1.35 \cdot G_{\text{hourdis+chape}} \cdot L_{\text{hourdis portée}}$

$$M1 = Q \cdot L_{\text{poutre}}^2 / 8$$

2.4.3 Calcul de M2

Pour calculer M2, il faut prendre en compte :

- Le poids propre de la poutre
- L'ensemble des charges (combinaison de charge calculée précédemment)

Donc, le moment engendré par cette charge est : $M = Q \cdot L_{\text{poutre}}^2 / 8$

Et $M2 = M - M1$

Remarque : dans cette hypothèse, les charges de finition seront posées 28 jours après le béton de 2^{ème} phase. Cette solution permet d'éviter l'étaïonnement provisoire des poutres (voir fiche technique).

2.4.4 Poids des poutres

Le poids des poutres est donné dans la fiche technique.

2.5 Principe de prédimensionnement des colonnes

Les colonnes doivent reprendre des charges verticales :

- Les charges dues à la neige (en toiture niv 36 et 34)
- Les charges d'exploitation
- Les hourdis et leur chape de compression
- Les poutres
- Le poids propre des colonnes
- Les charges permanentes supplémentaires (chape de finition, cloison, charges techniques, faux plafond...)

La longueur de flambement des colonnes est $L_{fl} = L$.



Figure 22 : Longueur de flambement (Ergon)

Hypothèse : les colonnes sont considérées comme se développant sur un seul niveau.

Combinaison de charge à l'ELU :

Charges verticales : $P_{support\acute{e}e\ par\ colonne} = P_{support\acute{e}e\ par\ poutre}/2 * 2 + 1.35 * G_{poutre}$

Hypothèse : pour les colonnes, on fait l'hypothèse que celles-ci ne reprennent aucune charge de vent et que ces actions sont directement transmises au noyau central par les planchers.

2.5.1 Calcul de N

On doit calculer l'effort normal dans la colonne. En faisant l'hypothèse que les poutres ont toute une portée identique, l'effort normal vaut 2x la réaction d'appui de la poutre (vu qu'une colonne supporte 2 poutres). En faisant l'**hypothèse** que la poutre est biappuyée, l'effort normal est calculé comme suit :

$$N = \frac{P * L}{2}$$

Où P comprend la charge transmise par les hourdis et le poids propre de la poutre.

Donc, l'effort normal repris dans la colonne est :

$$N = P * L + P_{support\acute{e}e\ par\ colonnes\ sup}$$

Pour ne pas calculer chaque colonne de chaque étage individuellement, on fait l'**hypothèse que** les charges transmises par les colonnes des niveaux supérieurs valent (la différence de charge entre les 2 derniers niveaux calculés) * n_{étages}. En additionnant ce résultat à la charge transmise par la dernière colonne calculée, on obtient P_{supportée par colonne sup}.

Hypothèse : lorsque l'effort normal calculé est trop important pour pouvoir être repris par une colonne, on multiplie les colonnes (pour que la section finale obtenue soit plus grande) ce qui permet de diviser l'effort normal et le moment par le nombre de colonnes.

2.5.2 Calcul de M

Le vent n'a pas d'impact sur les colonnes (ces contraintes sont toutes reprises par le noyau). Par contre, un moment dans la colonne est induit par l'excentricité accidentelle des assemblages entre les colonnes et les poutres et est calculé comme suit :

$$M = N_{ed} * e_a$$

pour e_a , on comptera 20 mm dans les 2 directions (x et y) et N_{ed} est la charge transmise par la poutre :

$$M_x = M_y = N_{ed} * 0,02$$

$$M_{tot} = \sqrt{M_x^2 + M_y^2}$$

2.5.3 Poids des colonnes

Le poids des colonnes est donné dans la fiche technique en kN/m. Connaissant la hauteur de la colonne, on en déduit facilement le poids en kN.

L'effort normal transmis à la colonne inférieure est donc : $N_{transmis} = N + 1.35 * G_{colonne}$

2.6 Principe de prédimensionnement du noyau

2.6.1 Simplification du noyau

Hypothèse : on considère que le noyau central est rectangulaire et que ses dimensions sont 15x21m.

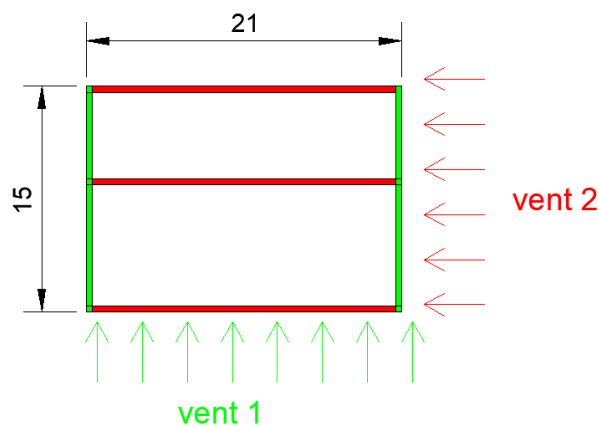


Figure 23 Noyau simplifié

Les moment et effort tranchant engendrés par le vent 1 sont repris par les voiles de 15 m de long tandis que les moment et effort tranchant engendrés par le vent 2 sont repris par les voiles de 21 m de long.

2.6.2 Charges reprises

2.6.2.1 Le vent

Vent 1 :

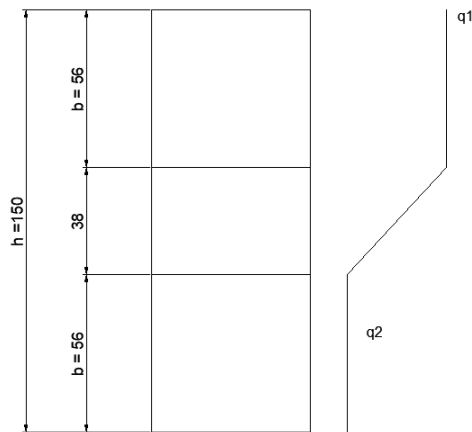


Figure 24 Charge de vent 1

À l'ELU,

- $q1 = qp(z) \cdot Cf \cdot b \cdot 1,5 = 49.96 \text{ kNm}$
- $q2 = qp(b) \cdot Cf \cdot b \cdot 1,5 = 36.84 \text{ kNm}$

Vent 2 :

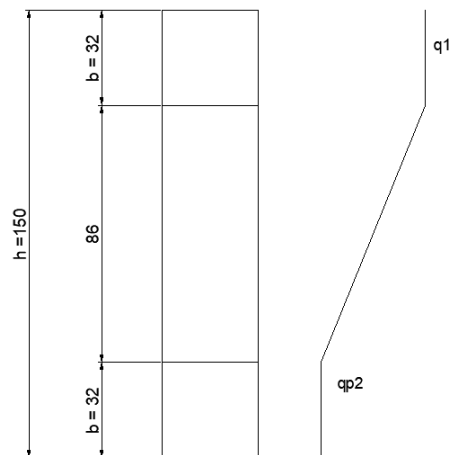


Figure 25 Charge de vent 2

À l'ELU,

- $q1 = qp(z) \cdot Cf \cdot b \cdot 1,5 = 28.55 \text{ kNm}$
- $q2 = qp(b) \cdot Cf \cdot b \cdot 1,5 = 17,21 \text{ kNm}$

2.6.2.2 Les charges transmises par les hourdis

- Les charges dues à la neige (en toiture niv 36 et 34)
- Les charges permanentes additionnelles (revêtement de sol...)
- Les charges d'exploitation

Il est à noter que pour les poutres, les charges d'exploitation de la toiture non accessible au public vaut $0,33 \text{ kN/m}$ car pour $\alpha \leq 20^\circ$: $q_k = \left(0,8 - \frac{A}{100}\right) \geq 0,2$ où l'aire

reprise par la poutre est $A = \left(\frac{7,3}{2} + \frac{6,2}{2}\right) \cdot 7 = 47,25 \text{ m}^2$

- Le poids propre des hourdis

2.6.3 Effort normal

Hypothèse : le béton utilisé est du C25/30 donc, $f_{ck}=25$ MPa

2.6.3.1 Vent 1 (*petit côté du noyau*)

Ce voile reprend

- les hourdis extérieurs au noyau. La longueur de hourdis reprise vaut $7.3/2 = 3,65$ m.
- la charge directement transmise par le voile supérieur
- son poids propre.

2.6.3.2 Vent 2 (*long côté du noyau*)

Ce voile (voile « périphérique ») reprend :

- Les hourdis extérieurs au noyau. La longueur de hourdis reprise vaut $6/2=3$ m
- Les hourdis intérieurs du noyau. La longueur de hourdis reprise vaut $11,2/2 = 5,6$ m.
- Son poids propre

N vaut la somme de ces charges.

Le voile « intérieur » reprend :

- Les hourdis intérieurs au noyau. Les longueurs de hourdis reprises sont $11.2/2 = 5.6$ m et $6.9/2 = 3.45$ m.
- Son poids propre

N vaut la somme de ces charges.

(Remarque : la distance entre les murs porteurs est variable dû à la géométrie du noyau et 6 m et 11 m sont les longueurs maximales entre les murs porteurs au sein du noyau).

2.6.4 Moment

Le bâtiment est composé de 4 parties :



$$M_{partie1} = q1 * b * \left(\frac{b}{2} + c + b + a \right)$$

$$M_{partie2} = \frac{(q1 + q2)}{2} * c * \left(\frac{c}{3} + b + a \right)$$

$$M_{partie3} = q2 * b * \left(\frac{b}{2} + a \right)$$

$$M = M_{partie1} + M_{partie2} + M_{partie3}$$

2.6.4.1 Épaisseur b

Afin de déterminer l'épaisseur b, nous utilisons la formule de prédimensionnement suivante :

$$M = 0.9 * b * f_y * A_s$$

De cette manière, nous faisons l'hypothèse que ce sont les armatures qui reprennent l'entièreté du moment et l'épaisseur est prise à 90 % pour prendre en compte le recouvrement du béton. On fait l'hypothèse que l'acier utilisé est de S500.

De plus, la section d'acier A_s doit être :

- $\leq A_{s,max} = 4\%A_c$
- $\geq A_{s,min} = 0,2\%A_c$

Hypothèse : l'épaisseur minimale pour une bonne mise en œuvre du béton est $b_{min} = 250 \text{ mm}$

2.6.4.2 Vérification de la section d'acier A_s

On définit $d2 = 1000 \text{ mm}$ (armatures principales de flexion sur les 2 premiers mètres)

Donc, comme pour le vent 1, $h=15200$ mm donc $d_2/h = 0.065$ et pour le vent 2, $h=21000$ mm donc $d_2/h = 0.05$

On utilise alors les tables suivantes :

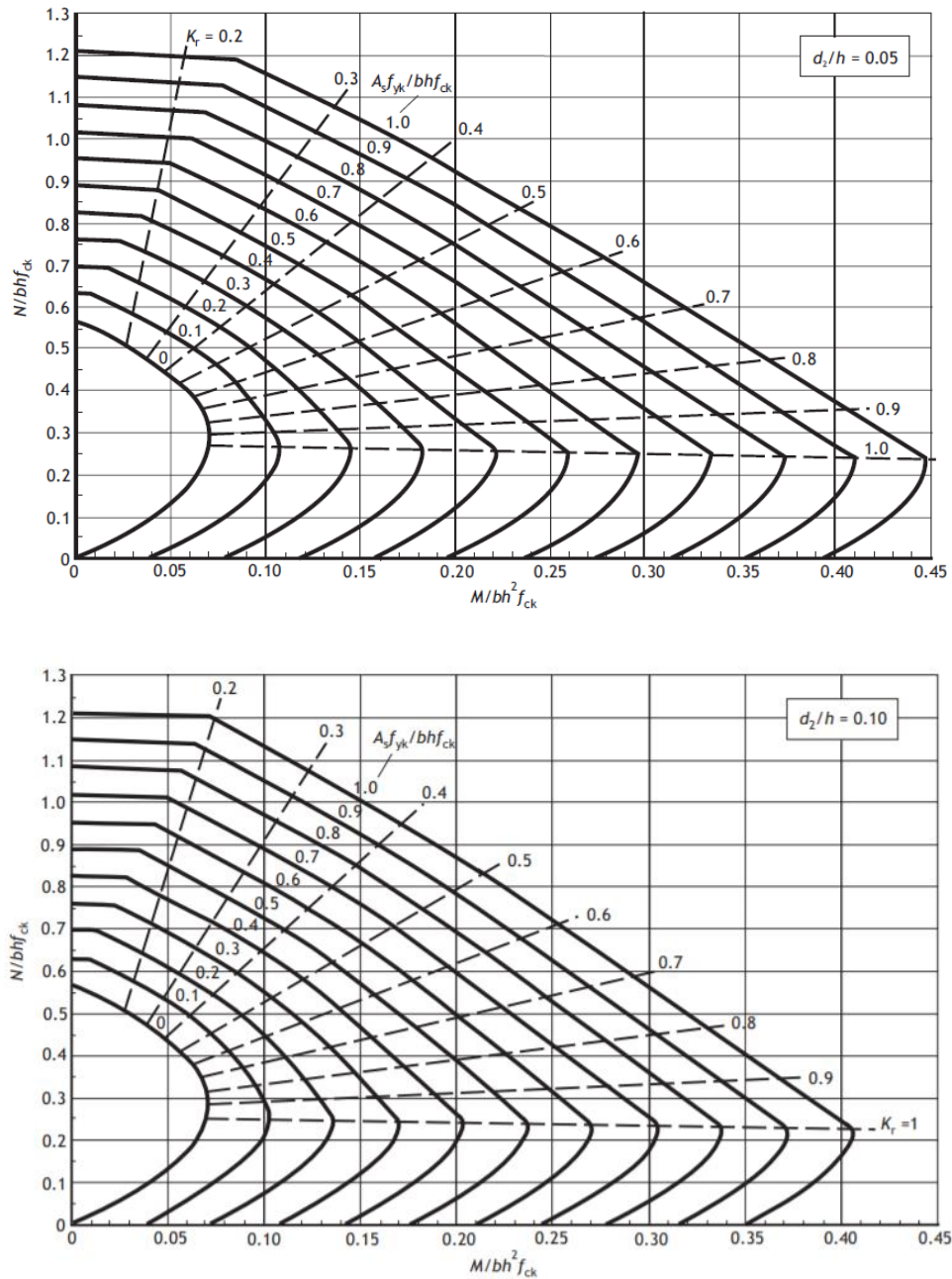


Figure 26 How to Design Concrete Structure Using Eurocode 2, The concrete Centre and British Cement Association

Connaissant les valeurs de $\frac{N}{bhf_{ck}}$ et de $\frac{M}{bh^2f_{ck}}$, le graphique nous donne la valeur de

$$\frac{A_s f_{yk}}{b h f_{ck}}$$

L'acier utilisé est du S500, $f_{yk} = 500 \text{ Mpa}$ et que le béton utilisé est du C25/30, $f_{ck} = 25 \text{ MPa}$. Il est à noter qu'une résistance en compression du béton plus élevée aurait pu être choisie.

Connaissant b et h également, on en déduit la section d'acier nécessaire A_s .

Cette valeur doit être :

- $\leq A_{s,max} = 4\% A_c$
- $\geq A_{s,min} = 0,2\% A_c$

Comme dans la table $\frac{A_s f_{yk}}{b h f_{ck}}$ a une valeur maximale de 1, b est déterminé de telle façon que la valeur de $\frac{A_s f_{yk}}{b h f_{ck}}$ soit égale ou inférieure à 1 et que A_s soit bien compris entre $A_{s,max}$ et $A_{s,min}$.

2.6.5 Vérification de l'effort tranchant V

Tout comme pour le calcul des moments, le bâtiment est composé de 4 parties et l'effort tranchant V est calculé comme suit :

$$V_{partie1} = q1 * b$$

$$V_{partie2} = \frac{q2 + q1}{2} * c$$

$$V_{partie3} = q2 * b$$

$$V = V_{partie1} + V_{partie2} + V_{partie3}$$

La section résiste à l'effort tranchant si $V < V_{Rd,c}$

$$V_{Rd,c} = [C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} + k_1 \sigma_{cp}] b_w d \geq (v_{min} + k_1 \sigma_{cp}) b_w d$$

Où

- $C_{Rd,c} = 0.18/\gamma_c$ où $\gamma_c = 1.5$
- $k = 1 + \sqrt{200/d} \leq 2$
- $\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w d} \leq 0.02$
- $f_{ck} = 25 \text{ MPa}$
- $k_1 = 0.15$
- $\sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_c} \leq 0.2 f_{cd}$ où $f_{cd} = f_{ck}/\gamma_c$
- $v_{min} = 0.035 \sqrt{k^3 f_{ck}}$

2.7 Prédimensionnement des fondations

2.7.1 Tour D2

Pour déterminer les fondations, on procède par comparaison avec la tour D2. En effet, on sait que ce bâtiment a un radier d'une épaisseur de 3 m ainsi que 86 barrettes de fondation.

Pour cette tour, connaissant le poids des éléments, on connaît les charges appliquées permanentes :

- L'exostructure : $3.44 \cdot 10^4$ kN
- La tôle métallique du plancher collaborant : $4.59 \cdot 10^3$ kN
- Le béton du plancher collaborant : $1.13 \cdot 10^5$ kN
- Les planchers béton : $7.56 \cdot 10^4$ kN
- Les poutres : $2.23 \cdot 10^4$ kN
- Les colonnes en acier : $1.2 \cdot 10^3$ kN
- Les colonnes en béton : $1.41 \cdot 10^4$ kN
- Le noyau en béton : $2.39 \cdot 10^5$ kN

Pour un total de $1.35 \cdot \text{somme} = 679\,647.88$ kN à l'ELU

Les charges dues à l'exploitation (majoritairement des bureaux $\rightarrow 3\text{ kN/m}^2$) sont :
 $3 \cdot \text{Surface} \cdot 1.5 = 237311.1$ kN où la surface au sol est estimée à 1395 m^2 sauf aux niveaux 36 et 37 (toiture) où elle est de 560 m^2 .

Au total, les fondations reprennent donc $9.17 \cdot 10^5$ kN (ELU).

Le radier de la Tour 2D fait 3m d'épaisseur pour un total de 6500 m^3 soit, pour une masse volumique de 2500 kg/m^3 , 162500 kN.

Les 86 barrettes de fondations (type de pieux moulés) vont jusqu'à 23 m de profondeur.

2.7.2 Tour fictive

De la même manière, en ce qui concerne le bâtiment fictif en béton, les charges appliquées sont :

- Les hourdis : $3.13 \cdot 10^5$ kN
- Les poutres : $3.54 \cdot 10^4$ kN
- Les colonnes : $4.67 \cdot 10^4$ kN
- Le noyau : $2.04 \cdot 10^5$ kN

Pour un total de 808766.22 kN

Les charges dues à l'exploitation (majoritairement des bureaux $\rightarrow 3\text{ kN/m}^2$) sont également :
 $3 \cdot \text{Surface} \cdot 1.5 = 237311.1$ kN (ELU)

Au total, les fondations reprennent donc $1.05 \cdot 10^6$ kN.

2.7.3 Calcul des fondations

On fait l'**hypothèse** que le **radier a également une épaisseur de 3 m et un volume de 6500 m³** et qu'il y aura donc plus de barrettes de fondations que pour le bâtiment tour D2.

Hypothèse : on ne tient pas compte du frottement latéral car les barrettes de fondation sont mises en place sans refoulement latéral $\rightarrow Q_{su} = 0$. Il est à noter qu'en réalité, il faudrait prendre en compte le frottement (probablement 0.05 MPa pour ce cas de figure). Cependant, cette valeur étant relativement faible et n'ayant pas d'information exacte concernant les sols où est implantée la tour, le frottement est négligé et donc, les fondations légèrement surdimensionnées. De plus, cette hypothèse étant prise pour les 2 cas d'étude, elle n'altère par les résultats de la comparaison.

La charge limite à la pointe est $Q_{PU} = \rho_p * A * q_{pu}$

Où $\rho_p = 0.75$ si on fait l'**hypothèse** qu'il s'agit d'un pieu en H et que le sol est sablonneux à Paris.

On fait également l'**hypothèse** que, à 23 m de profondeur, le sol est de la marne compactée issue des alluvions de la vallée de la Seine de l'époque du Pliocène.

De ce fait, la résistance limite à la pointe est $p_l = 4Mpa$

2.7.4 Dimension des barrettes de fondation

$$Q_{PU} = \rho_p * A * q_{pu} \leftrightarrow A = \frac{Q_{PU}}{\rho_p * q_{pu}}$$

Où $q_{pu} = p_l = 4Mpa$

$\rho_p = 0.75$

Et Q_{PU} est la charge totale reprise par les fondations.

1. Pour la Tour D2

Les charges reprises sont $9.17 \cdot 10^5 \text{ kN} + 162500 \text{ kN}$ (radier). Donc, $Q_{PU} = 1079458.98 \text{ kN}$

Donc, $A = 359.82 \text{ m}^2$

Comme il y a 86 barrettes de fondation, chaque barrette reprend alors 4.2 m^2 .

2. Tour fictive

Les charges reprises sont $1.05 \cdot 10^6 \text{ kN} + 1.63 \cdot 10^5 \text{ kN}$ (radier). Donc, $Q_{PU} = 1.21 \cdot 10^6 \text{ kN}$

Donc, $A = 402.86 \text{ m}^2$

Si on garde les mêmes barrettes de fondation que pour le tour D2 et que seule la quantité change, sachant qu'une barrette reprend 4.2 m^2 , il faudra 97 barrettes.

2.8 Résultats obtenus

Niveau	Hourdis	Poutre « intérieure »	Colonne « intérieure »	Poutre « extérieure »	Colonne « extérieure »	Voile vent 1 (petit côté) : h=15200 mm	Voile vent 2 (long côté) h= 21000 mm	Voile « intérieur » (long côté) h= 21000 mm
36	Portée : 7.3 m Charge ELU : 10.47 kN/m ² Charge ELS : 7.18 kN/m ² Type : SP265	L _{hourdi reprise} : 3.65 m Charge ELU : 57.09 kN/ml L _{poutre} : 7 m M1 = 139.48 kNm M2=234.07 kNm Type: RR 400/390	h = 6.56 m Charge de la poutre : 62.35 kN/m N _{RD} = 436.47 kN M _{RD} = 12.35 kNm Type: CR 290x290 N _{transmis} = 454.71 kN	/	/	Charge N = 1709 kN Moment M = 537.54 kNm b_{min} = 250 mm As = 7600 mm ² V = 3.28*10 ⁵ < V _{Rdc, max} = 1.03*10 ⁶ -> ok	Charge N = 3001,67 kN Moment M = 204.78 kNm b_{min} = 250 mm As = 10500 mm ² V = 1.87*10 ⁵ < V _{Rdc, max} = 1.5*10 ⁶ -> ok	Charge N = 4134.83 kN Moment M = 204.78 kNm b_{min} = 250 mm As = 10500 mm ² V = 1.87*10 ⁵ < V _{Rdc, max} = 1.67*10 ⁶ -> ok
35	Portée : 7.3 m Charge ELU : 13.57 kN/m ² Charge ELS : 9.5 kN/m ² Type : SP265	L _{hourdi reprise} : 3.65 m Charge ELU : 68.42 kN/ml L _{poutre} : 7 m M1 =145,6 kNm M2= 303.49 kNm Type: RR 400/490	h = 4.8 m Charge de la poutre : 73.03 kN/m N _{RD} = 979.96 kN M _{RD} = 14.86 kNm Type: CR 390x240 N _{transmis} = 994.8 kN	/	/	Charge N = 3364.65 kN Moment M = 1611.98 kNm b_{min} = 250 mm As = 7600 mm ² V = 5.68*10 ⁵ < V _{Rdc, max} = 1.28*10 ⁶ -> ok	Charge N = 6056.64 kN Moment M = 614.09 kNm b_{min} = 250 mm As = 10500 mm ² V = 3.24*10 ⁵ < V _{Rdc, max} = 1.96*10 ⁶ -> ok	Charge N = 8547.9 kN Moment M = 614.09 kNm b_{min} = 250 mm As = 10500 mm ² V = 3.24*10 ⁵ < V _{Rdc, max} = 2.33*10 ⁶ -> ok
34	Idem SP265	L _{hourdi reprise} : 6.75 Charge ELU : 126.53 kN/ml L _{poutre} : 7 m	h = 4.8 m Charge de la poutre : 137.19 kN/m	L _{hourdi reprise} : 3.3 m Charge ELU : 38.74 kN/ml L _{poutre} : 6.5 m	h = 4.8 m Charge de la poutre : 43.71 kN/m	Charge N = 5020.25 kN Moment M = 3262.01 kNm b_{min} = 250 mm	Charge N = 9719.44 kN Moment M = 1242.67 kNm b_{min} = 250 mm	Charge N = 12960.99 kN Moment M = 1242.67 kNm b_{min} = 250 mm

Niveau	Hourdis	Poutre « intérieure »	Colonne « intérieure »	Poutre « extérieure »	Colonne « extérieure »	Voile vent 1 (petit côté) : h=15200 mm	Voile vent 2 (long côté) h= 21000 mm	Voile « intérieur » (long côté) h= 21000 mm
		M1 = 262.15 kNm M2= 561.24 kNm Type: RR 400/790	N _{RD} = 1955.18 kN M _{RD} = 27.16 kNm Type: CR 390x390 soit 1.5*10 ³ cm ² N _{transmis} = 1979.35 kN	M1 =109.54 kNm M2= 114.5 kNm Type: RR 300/490	N _{RD} = 284.12 kN M _{RD} = 8.04 kNm Type: CR 290x290 soit 0.8*10 ³ cm ² N _{transmis} = 297.47 kN	As = 7600 mm ² V = 8.07*10 ⁵ < V _{Rdc, max} = 1.53*10 ⁶ -> ok	As = 10500 mm ² V = 4.61*10 ⁵ < V _{Rdc, max} = 2.51*10 ⁶ -> ok	As = 10500 mm ² V = 4.61*10 ⁵ < V _{Rdc, max} = 2.99*10 ⁶ -> ok
33	Portée : 7.3 m Charge ELU : 9.9 kN/m ² Charge ELS : 7 kN/m ² Type : SP265	L _{hourdi reprise} : 6.75 Charge ELU : 101.72 kN/ml L _{poutre} : 7 m M1 = 254.19 kNm M2= 409.3 kNm Type: RR 300/880	h = 5.12 m Charge de la poutre : 110.63 kN/m N _{RD} = 2753.81 kN M _{RD} = 21.9 kNm Type: CR 490x290 soit 1.4*10 ³ cm ² N _{transmis} = 2777.86 kN	L _{hourdi reprise} : 3.3 m Charge ELU : 49.73 kN/ml L _{poutre} : 6.5 m M1 = 109.54 kNm M2=172.54 kNm Type: RR 300/490	h = 5.12 m Charge de la poutre : 54.7 kN/m N _{RD} = 653.03 kN M _{RD} = 10.06 kNm Type: CR 290x290 soit 0.8*10 ³ cm ² N _{transmis} = 667.27 kN	Charge N = 6513.01 kN Moment M = 5656.47 kNm b_{min} = 250 mm As = 7600 mm ² V = 1.06*10 ⁶ < V _{Rdc, max} = 1.75*10 ⁶ -> ok	Charge N = 13348.37 kN Moment M = 2154.84 kNm b_{min} = 250 mm As = 10500 mm ² V = 6.08*10 ⁵ < V _{Rdc, max} = 3.05*10 ⁶ -> ok	Charge N = 16732.34 kN Moment M = 2154.84 kNm b_{min} = 250 mm As = 10500 mm ² V = 6.08*10 ⁵ < V _{Rdc, max} = 3.56*10 ⁶ -> ok
32	Idem SP265	Idem RR 300/880	h = 3.84 m Charge de la poutre : 110.63 kN/m N _{RD} = 3552.31 kN M _{RD} = 21.9 kNm	Idem RR300/490	h = 3.84 m Charge de la poutre : 54.7 kN/m N _{RD} = 1022.82 kN M _{RD} = 10.06 kNm	Charge N = 7841.6 kN Moment M = 7882.09 kNm b_{min} = 250 mm As = 7600 mm ²	Charge N = 16750.5 kN Moment M = 3002.7 kNm b_{min} = 250 mm As = 10500 mm ²	Charge N = 20276.89 kN Moment M = 3002.7 kNm b_{min} = 250 mm As = 10500 mm ²

Niveau	Hourdis	Poutre « intérieure »	Colonne « intérieure »	Poutre « extérieure »	Colonne « extérieure »	Voile vent 1 (petit côté) : h=15200 mm	Voile vent 2 (long côté) h= 21000 mm	Voile « intérieur » (long côté) h= 21000 mm
			Type: CR 490x390 soit $1.9 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$ $N_{\text{transmis}} = 3570.35 \text{ kN}$		Type: CR 390x240 soit $0.9 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$ $N_{\text{transmis}} = 1034.69 \text{ kN}$	$V = 1.26 \cdot 10^6 < V_{\text{Rdc, max}} = 1.95 \cdot 10^6 \rightarrow \text{ok}$	$V = 7.17 \cdot 10^5 < V_{\text{Rdc, max}} = 3.56 \cdot 10^6 \rightarrow \text{ok}$	$V = 7.17 \cdot 10^5 < V_{\text{Rdc, max}} = 3.67 \cdot 10^6 \rightarrow \text{ok}$
31	Idem SP265	Idem RR 300/880	Idem niv 28 CR 590x490 soit $2.9 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$	Idem RR300/490	Idem niv 29 CR 390x390 soit $1.5 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$	Idem niv 22 b = 500 mm	Idem niv 22 b = 500 mm	Idem niv 24 b = 250 mm
30	Idem SP265	Idem RR 300/880	Idem niv 28 CR 590x490 soit $2.9 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$	Idem RR300/490	Idem niv 29 CR 390x390 soit $1.5 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$	Idem niv 22 b = 500 mm	Idem niv 22 b = 500 mm	Idem niv 24 b = 250 mm
29	Idem SP265	Idem RR 300/880	Idem niv 28 CR 590x490 soit $2.9 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$	Idem RR300/490	h = 3.84m Charge de la poutre : 54.7 kN/m $N_{\text{RD}} = 2125.1 \text{ kN}$ $M_{\text{RD}} = 10.06 \text{ kNm}$ Type: CR 390x390 soit $1.5 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$ $N_{\text{transmis}} = 2144.43 \text{ kN}$	Idem niv 22 b = 500 mm	Idem niv 22 b = 500 mm	Idem niv 24 b = 250 mm
28	Idem SP265	Idem RR 300/880	h = 3.84 m Charge de la poutre : 110.63 kN/m	Idem RR300/490	Idem niv 24 CR 490x390 soit $1.9 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$	Idem niv 22 b = 500 mm	Idem niv 22 b = 500 mm	Idem niv 24 b = 250 mm

Niveau	Hourdis	Poutre « intérieure »	Colonne « intérieure »	Poutre « extérieure »	Colonne « extérieure »	Voile vent 1 (petit côté) : h=15200 mm	Voile vent 2 (long côté) h= 21000 mm	Voile « intérieur » (long côté) h= 21000 mm
			$N_{RD} = 6722.28 \text{ kN}$ $M_{RD} = 21.9 \text{ kNm}$ Type: CR 590x490 soit $2.9 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$ $N_{transmis} = 6758.98 \text{ kN}$					
27	Idem SP265	Idem RR 300/880	Idem niv 23 CR 490x490 x2 soit $4.8 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$	Idem RR300/490	Idem niv 24 CR 490x390 soit $1.9 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$	Idem niv 22 b = 500 mm	Idem niv 22 b = 500 mm	Idem niv 24 b = 250 mm
26	Idem SP265	Idem RR 300/880	Idem niv 23 CR 490x490 x2 soit $4.8 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$	Idem RR300/490	Idem niv 24 CR 490x390 soit $1.9 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$	Idem niv 22 b = 500 mm	Idem niv 22 b = 500 mm	Idem niv 24 b = 250 mm
25	Idem SP265	Idem RR 300/880	Idem niv 23 CR 490x490 x2 soit $4.8 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$	Idem RR300/490	Idem niv 24 CR 490x390 soit $1.9 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$	Idem niv 22 b = 500 mm	Idem niv 22 b = 500 mm	Idem niv 24 b = 250 mm
24	Idem SP265	Idem RR 300/880	Idem niv 23 CR 490x490 x2 soit $4.8 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$	Idem RR300/490	h = 3.84m Charge de la poutre : 54.7 kN/m $N_{RD} = 3979.64 \text{ kN}$ $M_{RD} = 10.06 \text{ kNm}$	Idem niv 22 b = 500 mm	Idem niv 22 b = 500 mm	Charge N = 48633.28 kN Moment M = 16997.7 kNm b_{min} = 250 mm As = 10500 mm ² V = $1.63 \cdot 10^6 < V_{Rdc, max} = 3.67 \cdot 10^6 \rightarrow \text{ok}$

Niveau	Hourdis	Poutre « intérieure »	Colonne « intérieure »	Poutre « extérieure »	Colonne « extérieure »	Voile vent 1 (petit côté) : h=15200 mm	Voile vent 2 (long côté) h= 21000 mm	Voile « intérieur » (long côté) h= 21000 mm
					Type: CR 490x390 soit $1.9 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$ $N_{\text{transmis}} = 4003.9 \text{ kN}$			
23	Idem SP265	Idem RR 300/880	h = 3.84 m Charge de la poutre : 110.63 kN/m $N_{\text{RD}}/2 = 5361.03 \text{ kN}$ $M_{\text{RD}}/2 = 10.95 \text{ kNm}$ Type: CR 490x490 x2 soit $4.8 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$ $N_{\text{transmis}} = 10783.02 \text{ kN}$	Idem RR300/490	Idem niv 20 CR 490x490 soit $2.4 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$	Idem niv 22 b = 500 mm	Idem niv 22 b = 500 mm	Idem niv 14 b = 600 mm
22	Idem SP265	Idem RR 300/880	Idem niv 16 CR 490x490 x3 soit $7.2 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$	Idem RR300/490	Idem niv 20 CR 490x490 soit $2.4 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$	Charge N = 21127.51 kN Moment M = 50101.84 kNm b = 500 mm As = 15200 mm ² $V = 3.12 \cdot 10^6 < V_{\text{Rdc, max}} = 4.71 \cdot 10^6 \rightarrow \text{ok}$	Charge N = 50771.83 kN Moment M = 16997.7 kNm b_{min} = 500 mm As = 21000 mm ² $V = 1.63 \cdot 10^6 < V_{\text{Rdc, max}} = 7.34 \cdot 10^6 \rightarrow \text{ok}$	Idem niv 14 b = 600 mm
21	Idem SP265	Idem RR 300/880	Idem niv 16 CR 490x490	Idem RR300/490	Idem niv 20 CR 490x490	Idem niv 14 b = 700 mm	Idem niv 14 b = 700 mm	Idem niv 14 b = 600 mm

Niveau	Hourdis	Poutre « intérieure »	Colonne « intérieure »	Poutre « extérieure »	Colonne « extérieure »	Voile vent 1 (petit côté) : h=15200 mm	Voile vent 2 (long côté) h= 21000 mm	Voile « intérieur » (long côté) h= 21000 mm
			x3 soit $7.2 \cdot 10^3$ cm ²		soit $2.4 \cdot 10^3$ cm ²			
20	Idem SP265	Idem RR 300/880	Idem niv 16 CR 490x490 x3 soit $7.2 \cdot 10^3$ cm ²	Idem RR300/490	h = 3.84m Charge de la poutre : 54.7 kN/m N _{RD} = 5475.14 kN M _{RD} = 10.06 kNm Type: CR 490x490 soit $2.4 \cdot 10^3$ cm ² N _{transmis} = 5505.62 kN	Idem niv 14 b = 700 mm	Idem niv 14 b = 700 mm	Idem niv 14 b = 600 mm
19	Idem SP265	Idem RR 300/880	Idem niv 16 CR 490x490 x3 soit $7.2 \cdot 10^3$ cm ²	Idem RR300/490	Idem niv 12 CR 490x390 x2 soit $3.8 \cdot 10^3$ cm ²	Idem niv 14 b = 700 mm	Idem niv 14 b = 700 mm	Idem niv 14 b = 600 mm
18	Idem SP265	Idem RR 300/880	Idem niv 16 CR 490x490 x3 soit $7.2 \cdot 10^3$ cm ²	Idem RR300/490	Idem niv 12 CR 490x390 x2 soit $3.8 \cdot 10^3$ cm ²	Idem niv 14 b = 700 mm	Idem niv 14 b = 700 mm	Idem niv 14 b = 600 mm
17	Idem SP265	Idem RR 300/880	Idem niv 16 CR 490x490 x3 soit $7.2 \cdot 10^3$ cm ²	Idem RR300/490	Idem niv 12 CR 490x390 x2 soit $3.8 \cdot 10^3$ cm ²	Idem niv 14 b = 700 mm	Idem niv 14 b = 700 mm	Idem niv 14 b = 600 mm
16	Idem SP265	Idem RR 300/880	h = 3.84m Charge de la poutre : 110.63 kN/m	Idem RR300/490	Idem niv 12 CR 490x390 x2 soit $3.8 \cdot 10^3$ cm ²	Idem niv 14 b = 700 mm	Idem niv 14 b = 700 mm	Idem niv 14 b = 600 mm

Niveau	Hourdis	Poutre « intérieure »	Colonne « intérieure »	Poutre « extérieure »	Colonne « extérieure »	Voile vent 1 (petit côté) : h=15200 mm	Voile vent 2 (long côté) h= 21000 mm	Voile « intérieur » (long côté) h= 21000 mm
			$N_{RD}/3 = 5486.54 \text{ kN}$ $M_{RD}/3 = 7.3 \text{ kNm}$ Type: CR 490x490 x3 soit $7.2 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$ $N_{transmis} = 16551.08 \text{ kN}$					
15	Idem SP265	Idem RR 300/880	Idem niv 6 CR 590x490 x4 soit $11.5 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$	Idem RR300/490	Idem niv 12 CR 490x390 x2 soit $3.8 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$	Idem niv 14 b = 700 mm	Idem niv 14 b = 700 mm	Idem niv 14 b = 600 mm
14	Idem SP265	Idem RR 300/880	Idem niv 6 CR 590x490 x4 soit $11.5 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$	Idem RR300/490	Idem niv 12 CR 490x390 x2 soit $3.8 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$	Charge N = 32642.71 kN Moment M = 103315 kNm b = 700 mm As = 21280 mm² $V = 4.46 \cdot 10^6 < V_{Rdc, max} = 7.52 \cdot 10^6 \rightarrow \text{ok}$	Charge N = 79213.6 kN Moment M = 107931.54 kNm b = 700 mm As = 29400 mm ² $V = 2.34 \cdot 10^6 < V_{Rdc, max} = 1.25 \cdot 10^7 \rightarrow \text{ok}$	Charge N = 85031.32 kN Moment M = 107931.54 kNm b = 600 mm As = 25200 mm ² $V = 2.34 \cdot 10^6 < V_{Rdc, max} = 8.81 \cdot 10^6 \rightarrow \text{ok}$
13	Idem SP265	Idem RR 300/880	Idem niv 6 CR 590x490 x4 soit $11.5 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$	Idem RR300/490	Idem niv 12 CR 490x390 x2 soit $3.8 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$	Idem niv 6 b = 900 mm	Idem niv 6 b = 900 mm	Idem niv 6 b = 800 mm
12	Idem SP265	Idem RR 300/880	Idem niv 6 CR 590x490 x4	Idem RR300/490	h = 3.84m	Idem niv 6 b = 900 mm	Idem niv 6 b = 900 mm	Idem niv 6 b = 800 mm

Niveau	Hourdis	Poutre « intérieure »	Colonne « intérieure »	Poutre « extérieure »	Colonne « extérieure »	Voile vent 1 (petit côté) : h=15200 mm	Voile vent 2 (long côté) h= 21000 mm	Voile « intérieur » (long côté) h= 21000 mm
			soit $11.5 \cdot 10^3$ cm ²		Charge de la poutre : 54.7 kN/m $N_{RD} / 2 = 4261.3$ kN $M_{RD} / 2 = 5.03$ kNm Type: CR 490x390 x2 soit $3.8 \cdot 10^3$ cm ² $N_{transmis} =$ 8571.13 kN			
11	Idem SP265	Idem RR 300/880	Idem niv 6 CR 590x490 x4 soit $11.5 \cdot 10^3$ cm ²	Idem RR300/490	Idem niv 6 CR 490x490 x2 soit $4.8 \cdot 10^3$ cm ²	Idem niv 6 b = 900 mm	Idem niv 6 b = 900 mm	Idem niv 6 b = 800 mm
10	Idem SP265	Idem RR 300/880	Idem niv 6 CR 590x490 x4 soit $11.5 \cdot 10^3$ cm ²	Idem RR300/490	Idem niv 6 CR 490x490 x2 soit $4.8 \cdot 10^3$ cm ²	Idem niv 6 b = 900 mm	Idem niv 6 b = 900 mm	Idem niv 6 b = 800 mm
9	Idem SP265	Idem RR 300/880	Idem niv 6 CR 590x490 x4 soit $11.5 \cdot 10^3$ cm ²	Idem RR300/490	Idem niv 6 CR 490x490 x2 soit $4.8 \cdot 10^3$ cm ²	Idem niv 6 b = 900 mm	Idem niv 6 b = 900 mm	Idem niv 6 b = 800 mm
8	Idem SP265	Idem RR 300/880	Idem niv 6 CR 590x490 x4 soit $11.5 \cdot 10^3$ cm ²	Idem RR300/490	Idem niv 6 CR 490x490 x2 soit $4.8 \cdot 10^3$ cm ²	Idem niv 6 b = 900 mm	Idem niv 6 b = 900 mm	Idem niv 6 b = 800 mm
7	Idem SP265	Idem RR 300/880	Idem niv 6 CR 590x490 x4	Idem RR300/490	Idem niv 6 CR 490x490 x2	Idem niv 6 b = 900 mm	Idem niv 6 b = 900 mm	Idem niv 6 b = 800 mm

Niveau	Hourdis	Poutre « intérieure »	Colonne « intérieure »	Poutre « extérieure »	Colonne « extérieure »	Voile vent 1 (petit côté) : h=15200 mm	Voile vent 2 (long côté) h= 21000 mm	Voile « intérieur » (long côté) h= 21000 mm
			soit $11.5 \cdot 10^3$ cm ²		soit $4.8 \cdot 10^3$ cm ²			
6	Idem SP265	Idem RR 300/880	h = 3.84m Charge de la poutre : 110.63 kN/m $N_{RD}/4 =$ 6240.11 kN $M_{RD}/4 = 5.48$ kNm Type: CR 590x490 x4 soit $11.5 \cdot 10^3$ cm ² $N_{transmis} =$ 25077.41 kN	Idem RR300/490	h = 3.84m Charge de la poutre : 54.7 kN/m $N_{RD}/2 =$ 5443.69 kN $M_{RD}/2 = 5.03$ kNm Type: CR 490x490 x2 soit $4.8 \cdot 10^3$ cm ² $N_{transmis} =$ 10948.35 kN	Charge N = 45327.54 kN Moment M = 180456.6 kNm b = 900 mm As = 27360 mm ² $V = 5.59 \cdot 10^6 <$ $V_{Rdc, max} =$ $9.57 \cdot 10^6 \rightarrow ok$	Charge N = 109271.33 kN Moment M = 208363.04 kNm b = 900 mm As = 37800 mm ² $V = 3 \cdot 10^6 <$ $V_{Rdc, max} =$ $1.32 \cdot 10^7 \rightarrow ok$	Charge N = 115551.38 kN Moment M = 208363.04 kNm b = 800 mm As = 33600 mm ² $V = 3 \cdot 10^6 <$ $V_{Rdc, max} =$ $1.17 \cdot 10^7 \rightarrow ok$
5	Idem SP265	Idem RR 300/880	Idem niv -2 CR 590x390 x5 soit $11.5 \cdot 10^3$ cm ²	Idem RR300/490	Idem niv -2 CR 590x490 x2 soit $5.8 \cdot 10^3$ cm ²	Idem niv -2 b = 1100 mm	Idem niv -2 b = 1100 mm	Idem niv -2 b = 1000 mm
4	Idem SP265	Idem RR 300/880	Idem niv -2 CR 590x390 x5 soit $11.5 \cdot 10^3$ cm ²	Idem RR300/490	Idem niv -2 CR 590x490 x2 soit $5.8 \cdot 10^3$ cm ²	Idem niv -2 b = 1100 mm	Idem niv -2 b = 1100 mm	Idem niv -2 b = 1000 mm
3	Idem SP265	Idem RR 300/880	Idem niv -2 CR 590x390 x5 soit $11.5 \cdot 10^3$ cm ²	Idem RR300/490	Idem niv -2 CR 590x490 x2 soit $5.8 \cdot 10^3$ cm ²	Idem niv -2 b = 1100 mm	Idem niv -2 b = 1100 mm	Idem niv -2 b = 1000 mm
2	Idem SP265	Idem RR 300/880	Idem niv -2 CR 590x390 x5	Idem RR300/490	Idem niv -2 CR 590x490 x2	Idem niv -2 b = 1100 mm	Idem niv -2 b = 1100 mm	Idem niv -2 b = 1000 mm

Niveau	Hourdis	Poutre « intérieure »	Colonne « intérieure »	Poutre « extérieure »	Colonne « extérieure »	Voile vent 1 (petit côté) : h=15200 mm	Voile vent 2 (long côté) h= 21000 mm	Voile « intérieur » (long côté) h= 21000 mm
			soit $11.5 \cdot 10^3$ cm ²		soit $5.8 \cdot 10^3$ cm ²			
1	Idem SP265	Idem RR 300/880	Idem niv -2 CR 590x390 x5 soit $11.5 \cdot 10^3$ cm ²	Idem RR300/490	Idem niv -2 CR 590x490 x2 soit $5.8 \cdot 10^3$ cm ²	Idem niv -2 b = 1100 mm	Idem niv -2 b = 1100 mm	Idem niv -2 b = 1000 mm
-1	Idem SP265	Idem RR 300/880	Idem niv -2 CR 590x390 x5 soit $11.5 \cdot 10^3$ cm ²	Idem RR300/490	Idem niv -2 CR 590x490 x2 soit $5.8 \cdot 10^3$ cm ²	Idem niv -2 b = 1100 mm	Idem niv -2 b = 1100 mm	Idem niv -2 b = 1000 mm
-2	Idem SP265	Idem RR 300/880	h = 3.84m Charge de la poutre : 110.63 kN/m $N_{RD}/5 =$ 6214.21 kN $M_{RD}/5 = 4.38$ kNm Type: CR 590x390 x5 soit $11.5 \cdot 10^3$ cm ² $N_{transmis} =$ 31217.24 kN	Idem RR300/490	h = 3.84m Charge de la poutre : 54.7 kN/m $N_{RD}/2 =$ 6840.56 kN $M_{RD}/2 = 5.03$ kNm Type: CR 590x490 x2 soit $5.8 \cdot 10^3$ cm ² $N_{transmis} =$ 13754.53 kN	Charge N = 57844.19 kN Moment M = 281198.35 kNm b = 1100 mm As = 33440 mm ² $V = 6.51 \cdot 10^6 <$ $V_{Rdc, max} =$ $1.18 \cdot 10^7 \rightarrow ok$	Charge N = 137530.12 kN Moment M = 340499.91 kNm b = 1100 mm As = 46200 mm ² $V = 3.43 \cdot 10^6 <$ $V_{Rdc, max} =$ $1.61 \cdot 10^7 \rightarrow ok$	Charge N = 144027.18 kN Moment M = 340499.91 kNm b = 1000 mm As = 42000 mm ² $V = 3.43 \cdot 10^6 <$ $V_{Rdc, max} =$ $1.47 \cdot 10^7 \rightarrow ok$

Annexe 3 : Quantification des matériaux

Tableau 1: quantification des matériaux du cas 1

	POIDS TOTAL [KG]	POIDS TOTAL [KG/M²/AN]	PROPORTION [%]
EXO-STRUCTURE EN ACIER	3,44E+06	0,66	4,0
COLONNES EN ACIER	1,2E+05	0,02	0,1
COLONNES EN BÉTON	1,41E+06	0,27	1,6
POUTRES EN ACIER	2,23E+06	0,43	2,6
PLANCHER COLLABORANT – PROFILÉ ACIER	4,59E+05	0,09	0,5
PLANCHER COLLABORANT – BÉTON	1,13E+07	2,17	13,1
PLANCHER EN BÉTON	7,56E+06	1,45	8,8
NOYAU EN BÉTON	2,39E+07	4,58	27,7
RADIER EN BÉTON	1,55E+07	2,98	18,0
FONDATIONS EN BÉTON	2,02E+07	3,88	23,4
TOTAL	8,60E+07	16,58	100

Tableau 2 : quantification des matériaux du cas 2

	POIDS TOTAL [KG]	POIDS TOTAL [KG/M²/AN]	PROPORTION [%]
HOURDIS EN BÉTON	3,13E+07	6,01	31,9
POUTRES EN BÉTON	3,54E+06	0,68	3,6
COLONNES EN BÉTON	4,67E+06	0,90	4,8
NOYAU EN BÉTON	2,04E+07	3,93	20,8
RADIER EN BÉTON	1,55E+07	2,98	15,8
FONDATIONS EN BÉTON	2,27E+07	4,37	23,2
TOTAL	9,81E+07	18,86	100,0

Annexe 4 : Contribution des éléments à l'ACV

1 Résultats ACV selon l'unité de référence

Les résultats de l'ACV de la structure (selon l'unité de référence) du premier cas d'étude, la Tour D2 sont les suivants :

Tableau 1: Résultats de l'ACV du cas selon l'unité de référence

Potentiel de :	Unités	TOT A1- A3	TOT A4- A5	TOT B1- B7	TOT C1- C4	TOTAL	D
GWP	kg éq. CO ₂	1,83E+07	4,92E+06	-3,12E+05	5,35E+05	2,34E+07	-5,09E+06
EDP	kg éq. CFC11	9,45E-01	5,03E-01	0,00E+00	5,55E-01	2,00E+00	-1,29E-02
EP	kg éq. SO ₂ ⁻	4,73E+04	1,45E+04	0,00E+00	7,49E+03	6,93E+04	-6,57E+03
EP	kg éq. (PO ₄) ³⁻	5,57E+03	1,77E+03	0,00E+00	1,64E+03	9,00E+03	-7,75E+02
POCP	kg éq. Éthylène	6,59E+03	2,55E+03	0,00E+00	4,84E+02	9,65E+03	-2,74E+03
ADP_ éléments	kg éq. Sb	6,55E+01	3,40E+00	0,00E+00	1,94E-02	6,94E+01	-7,77E-01
ADP_fossiles	MJ	1,56E+08	5,69E+07	0,00E+00	1,47E+07	2,28E+08	-4,84E+07

Ceux obtenus pour le deuxième cas d'étude (selon l'unité de référence), la tour fictive en béton, sont les suivants :

Tableau 2: Résultats de l'ACV du cas 2 selon l'unité de référence

Potentiel de :	Unités	TOT A1- A3	TOT A4- A5	TOT B1- B7	TOT C1- C4	TOTAL	D
GWP	kg éq. CO ₂	7,75E+06	2,62E+06	-4,06E+05	3,42E+04	1,00E+07	-3,89E+05
EDP	kg éq. CFC11	4,31E-01	2,60E-01	0,00E+00	2,32E-01	9,24E-01	-1,61E-02
EP	kg éq. SO ²⁻	1,80E+04	7,26E+03	0,00E+00	4,92E+03	3,02E+04	-1,12E+03
EP	kg éq. (PO ₄) ³⁻	2,62E+03	9,21E+02	0,00E+00	1,07E+03	4,61E+03	-1,23E+02
POCP	kg éq. Éthylène	8,79E+02	1,15E+03	0,00E+00	2,16E+02	2,25E+03	-1,93E+02
ADP_éléments	kg éq. Sb	1,02E+00	8,79E-02	0,00E+00	9,85E-02	1,21E+00	-5,22E-01
ADP_fossiles	MJ	2,85E+07	3,01E+07	0,00E+00	1,03E+07	6,88E+07	-4,49E+06

2 Potentiel de réchauffement climatique

Tableau 3 : GWP - cas 1

		GWP – CAS 1					
		[kg CO2-Eq/m²/an]					
		A1-A3	A4-A5	B1-B7	C1-C4	TOT	D
Éléments verticaux	Exostructure	9,32E-01	1,10E-01	0,00E+00	2,84E-02	1,06E+00	-2,45E-01
	Colonnes (acier)	3,26E-02	3,86E-03	0,00E+00	9,93E-04	3,72E-02	-8,54E-03
	Colonnes (béton)	2,14E-02	1,51E-02	-1,08E-03	3,55E-04	3,58E-02	-2,40E-03
Système de plancher	Poutres (acier)	9,70E-01	1,03E-01	0,00E+00	1,84E-02	1,09E+00	-4,60E-01
	Planchers collaborants	4,71E-01	2,70E-01	0,00E+00	4,56E-02	7,87E-01	-1,90E-01
	Plancher (béton)	1,16E-01	5,59E-02	-6,17E-03	1,70E-03	1,67E-01	-8,65E-03
	Noyau	3,62E-01	1,58E-01	-3,80E-02	1,09E-02	4,93E-01	1,41E-08
	Radier	3,10E-01	1,63E-01	-9,79E-03	-5,17E-03	4,58E-01	9,19E-09
	Fondations	3,09E-01	6,68E-02	-4,87E-03	1,63E-03	3,72E-01	-1,27E-02
	TOT	3,52E+00	9,46E-01	-5,99E-02	1,03E-01	4,50E+00	-9,27E-01

Tableau 4 : GWP - cas 2

		GWP – CAS 2					
		[kg CO2-Eq/m²/an]					
		A1-A3	A4-A5	B1-B7	C1-C4	TOT	D
Éléments verticaux	Colonnes	7,10E-02	5,00E-02	-3,58E-03	1,18E-03	1,19E-01	-7,95E-03
	Poutres	4,05E-02	6,07E-03	-2,27E-03	-9,61E-04	4,33E-02	-2,11E-03
Système de plancher	Hourdis	4,09E-01	7,48E-02	-2,43E-02	3,08E-04	4,60E-01	-2,87E-03
	Noyau	3,10E-01	1,35E-01	-3,26E-02	9,38E-03	4,22E-01	-2,32E-02
	Radier	3,10E-01	1,63E-01	-9,79E-03	-5,17E-03	4,58E-01	-2,42E-02
	Fondations	3,48E-01	7,54E-02	-5,49E-03	1,84E-03	4,20E-01	-1,44E-02
	TOT	1,49E+00	5,04E-01	-7,80E-02	6,57E-03	1,92E+00	-7,47E-02

Des Tableaux 3 et 4, nous pouvons tirer les résultats ci-dessous.

Pour le **total de l'analyse de cycle de vie**, dans le cas 1, l'exostructure et les poutres en acier produisent à elles seules quasiment la moitié de kg éq. CO2. Les colonnes (en acier et en béton) quant à elles ont une contribution minime. Dans le cas 2, le radier et les hourdis contribuent chacun à environ 1/4 de la production de kg éq. CO2. Les fondations et le noyau les suivent de peu.

Pour le **module A1-A3**, dans le cas 1, les éléments en acier, principalement l'exostructure (26 %) et les poutres (28 %) sont les éléments émettant le plus de kg éq. CO2. Dans le cas 2, le noyau, le radier et les fondations contribuent de manière assez similaire au GWP (20 %), légèrement en dessous des hourdis (27 %).

Nous pouvons ainsi remarquer que, malgré que les 2 cas aient le même radier (voir hypothèses), ces derniers n'ont pas le même impact. En effet, dans le cas 1, sa contribution est minime en comparaison avec celles de l'exostructure et des poutres en acier, alors que dans le cas 2, le radier contribue à 20 %. Cela montre l'impact important de la production d'acier sur le potentiel de réchauffement climatique.

Pour le **module A4-A5**, dans le cas 1, les éléments ayant le plus d'impact sont, en tête, les planchers collaborants (28 %), suivis du noyau (17 %) et du radier (17 %). Dans le cas 2, le noyau (27 %) et le radier (32 %) sont les éléments sources de la majorité de kg éq. CO2.

Encore une fois, la comparaison montre la différence de contribution du radier, identique dans les 2 cas, dont l'importance dans le GWP est moindre dans le cas 1. Cela montre la grande importance d'autres éléments comme les planchers collaborants.

Pour le **module B1-B7**, dans le cas 1, le noyau central a l'impact positif le plus conséquent (-62 %). Les autres éléments en béton impactent également positivement le résultat (dû à la carbonatation du béton, phénomène durant lequel le béton absorbe du CO₂ et qui a donc un impact positif sur le GWP). Il est à noter que les bénéfices engendrés par le béton des planchers collaborant ne sont ici pas pris en compte (voir FDES). Dans le cas 2, c'est également le noyau central qui a le plus grand impact positif (-42 %) mais les autres éléments contribuent tous au bénéfice étant donné que l'intégralité de la structure est en béton et donc, que tous les éléments sont soumis à la carbonatation.

Pour le **module C1-C4**, dans le cas 1, le plancher collaborant est l'élément le plus néfaste (40 %), suivi de l'exostructure (25 %) et des poutres en acier (16 %). Dans le cas 2, l'élément le plus néfaste lors de la fin de vie du bâtiment est le noyau (50 %).

Il est à noter que, bien que le noyau du cas 2 soit moins imposant que celui du cas 1, il constitue l'élément contribuant au GWP en fin de vie, alors que dans le cas 1, la contribution du noyau est bien inférieure à celle du plancher collaborant et des éléments en acier (exostructure et poutre), ce qui montre bien la grande influence de ces éléments.

Pour le **module D**, dans le cas 1, c'est majoritairement grâce aux poutres en acier que la structure a un impact positif sur le GWP après la fin de vie. Dans le cas 2, les bénéfices réalisés après l'étape de fin de vie réutilisation du béton sous forme de graves concassées dans les infrastructures routières, recyclage de l'acier d'armature) sont majoritairement issus du radier et du noyau.

3 Potentiel de destruction de la couche d'ozone stratosphérique

La Figure 1 montre que la structure mixte acier-béton du cas 1 a des effets plus néfastes sur la couche d'ozone que la structure en béton du cas 2. Les bénéfices engendrés par la réutilisation, la récupération et le recyclage après la fin de vie sont quant à eux assez proches l'un de l'autre.

Comparaison ODP [kg éq. CFC⁻¹¹/m²/an]

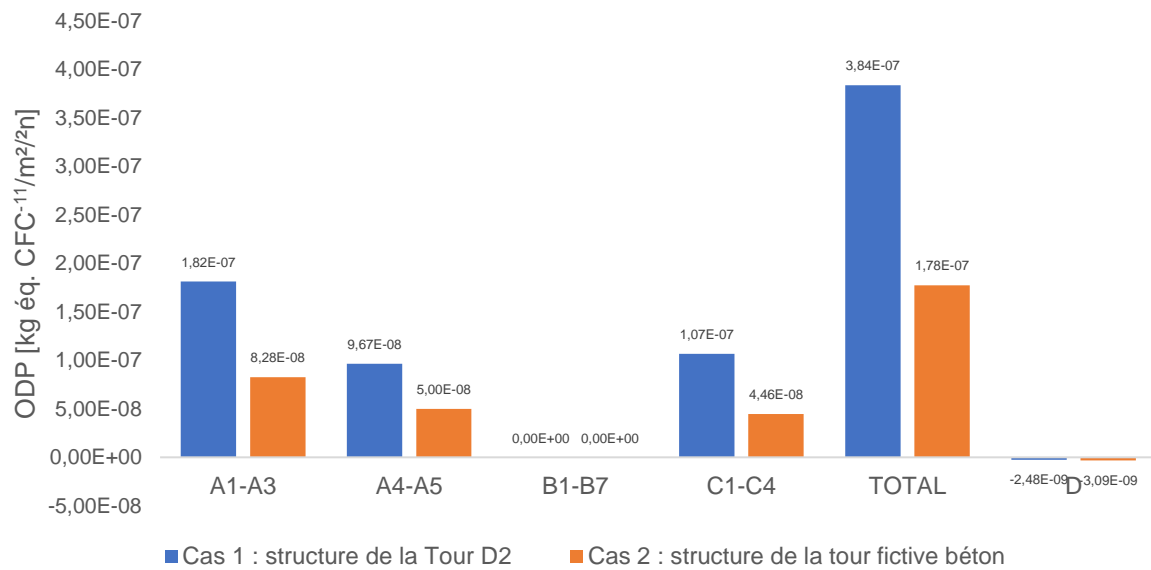


Figure 27 : Comparaison ODP

Tableau 5 : ODP - cas 1

		ODP – CAS 1					
		kg CFC11-Eq/m²/an					
		A1-A3	A4-A5	B1-B7	C1-C4	TOT	D
Éléments verticaux	Exostructure	6,61E-08	2,05E-08	0,00E+00	2,05E-08	1,06E-07	0,00E+00
	Colonnes (acier)	2,31E-09	7,16E-10	0,00E+00	7,16E-10	3,69E-09	0,00E+00
	Colonnes (béton)	1,23E-09	8,54E-10	0,00E+00	8,36E-10	2,92E-09	-5,10E-11
Système de plancher	Poutres (acier)	2,34E-08	1,24E-08	0,00E+00	1,36E-08	4,91E-08	0,00E+00
	Planchers collaborants	2,62E-08	2,19E-08	0,00E+00	3,13E-08	8,01E-08	0,00E+00
	Plancher (béton)	6,39E-09	4,57E-09	0,00E+00	4,48E-09	1,54E-08	-2,73E-10
	Noyau	2,09E-08	1,44E-08	0,00E+00	1,41E-08	0,00E+00	-8,62E-10
	Radier	1,81E-08	9,35E-09	0,00E+00	9,19E-09	3,66E-08	-5,60E-10
	Fondations	1,70E-08	1,20E-08	0,00E+00	1,19E-08	4,09E-08	-7,29E-10
	TOT	1,82E-07	9,67E-08	0,00E+00	1,07E-07	3,35E-07	-2,48E-09

Tableau 6 : ODP - cas 2

		ODP – CAS 2					
		kg CFC11-Eq/m ² /an					
		A1-A3	A4-A5	B1-B7	C1-C4	TOT	D
Système de plancher	Colonnes	4,09E-09	2,83E-09	0,00E+00	2,77E-09	9,69E-09	-1,69E-10
	Poutres	2,17E-09	1,11E-09	0,00E+00	1,15E-09	4,50E-09	-7,73E-11
	Hourdis	2,14E-08	1,09E-08	0,00E+00	5,92E-09	3,82E-08	-7,24E-10
	Noyau	1,79E-08	1,24E-08	0,00E+00	1,21E-08	4,23E-08	-7,38E-10
	Radier	1,81E-08	9,35E-09	0,00E+00	9,19E-09	3,66E-08	-5,60E-10
	Fondations	1,92E-08	1,35E-08	0,00E+00	1,35E-08	4,62E-08	-8,22E-10
	TOT	8,28E-08	5,00E-08	0,00E+00	4,46E-08	1,78E-07	-3,09E-09

Des Tableaux 5 et 6, nous pouvons tirer les résultats ci-dessous.

Pour le **total de l'analyse de cycle de vie**, dans le cas 1, plus de 1/4 de l'impact de la structure sur la destruction de la couche d'ozone stratosphérique est dû à l'exostructure. Dans le cas 2, le noyau, le radier et les barrettes de fondation contribuent ensemble à 3/4 de l'impact.

Pour le **module A1-A3**, dans le cas 1, l'exostructure contribue grandement au potentiel de destruction de la couche d'ozone (36 %). Dans le cas 2, le potentiel de destruction de la couche d'ozone est causé principalement par les hourdis (26 %), suivi du noyau (21 %), du radier (22 %) et des fondations (23 %).

Pour le **module A4-A5**, dans cas 1, l'influence des éléments sur l'ODP est plutôt bien répartie, en ne tenant pas compte des colonnes en acier ou béton que ne contribuent qu'à 2 % du potentiel. Dans le cas 2, ce sont les fondations qui sont les plus défavorables (27 %), suivies de peu par le noyau (25 %) et les hourdis (22 %).

On peut également remarquer que, pour l'étape de mise en œuvre, la contribution des planchers (planchers collaborants et hourdis) est identique (22 %).

Pour le **module C1-C4**, dans le cas 1, l'ODP durant l'étape de fin de vie est majoritairement causé par la fin de vie des planchers collaborants (29 %). Dans le cas 2, ce sont les fondations et le noyau qui ont le plus mauvais impact (30 %).

Pour le **module D**, dans le cas 1, en dehors des frontières du système, des bénéfices sont faits grâce au noyau principalement (-35 %). Dans le cas 2, c'est surtout grâce aux

fondations (-27 %) et au noyau (-24 %) que les bénéfices au-delà des frontières du systèmes sont effectués.

On remarque que pour l'ODP, en dehors des frontières du système, l'acier n'a aucun impact alors que le béton apporte des bénéfices.

4 Potentiel d'acidification du sol et de l'eau

La Figure 3 montre que le cas 1 a un AP plus élevé durant toutes les étapes de cycle de vie hormis l'étape de vie en œuvre B1-B7 pendant laquelle les 2 cas d'étude n'ont pas d'impact. De plus, la structure du cas 1 génère de plus grands bénéfices liés à la réutilisation, la récupération et le recyclage après la fin de vie des éléments.

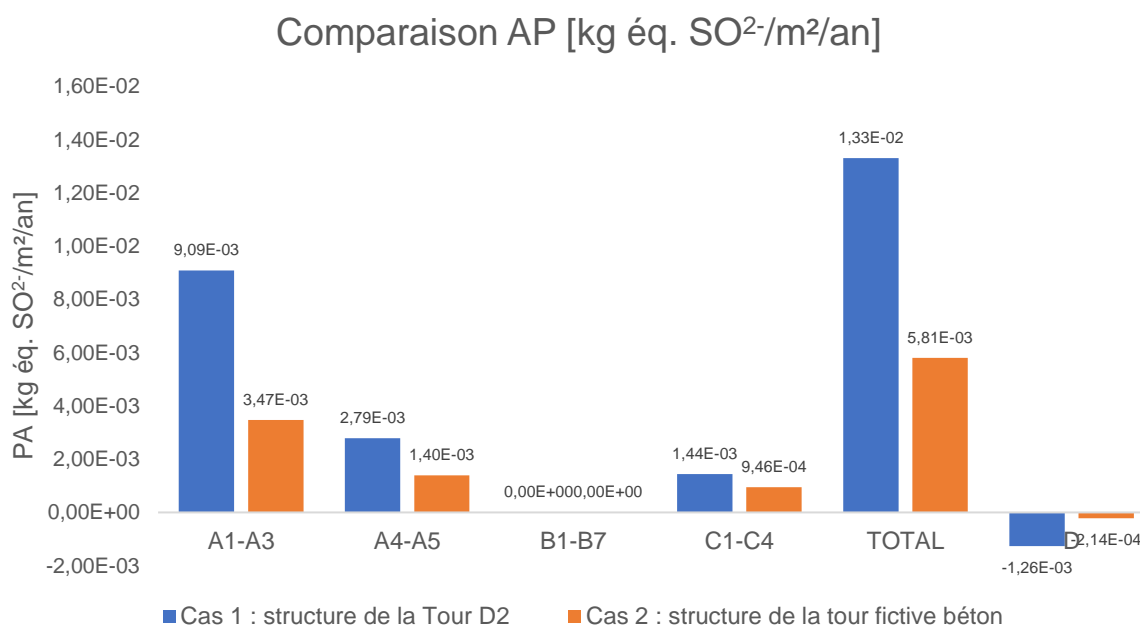


Figure 28 : Comparaison AP

Tableau 7 : AP - cas 1

		AP – CAS 1					
		kg SO2-Eq/m ² /an					
		A1-A3	A4-A5	B1-B7	C1-C4	TOT	D
Éléments verticaux	Exostructure	2,64E-03	3,70E-04	0,00E+00	1,85E-04	3,17E-03	-1,98E-04
	Colonnes (acier)	9,24E-05	1,29E-05	0,00E+00	6,46E-06	1,11E-04	-6,93E-06
	Colonnes (béton)	4,80E-05	4,14E-05	0,00E+00	1,63E-05	1,06E-04	-5,99E-06
Système de plancher	Poutres (acier)	2,47E-03	3,16E-04	0,00E+00	1,20E-04	2,90E-03	-8,04E-04
	Planchers collaborants	1,38E-03	8,01E-04	0,00E+00	3,35E-04	2,55E-03	-3,93E-05
	Plancher (béton)	2,59E-04	1,58E-04	0,00E+00	8,76E-05	5,04E-04	-2,43E-05
	Noyau	8,12E-04	4,49E-04	0,00E+00	2,76E-04	1,54E-03	-7,61E-05
	Radier	6,88E-04	4,43E-04	0,00E+00	1,80E-04	1,31E-03	-6,18E-05
	Fondations	6,90E-04	2,03E-04	0,00E+00	2,33E-04	1,13E-03	-4,54E-05
	TOT	9,09E-03	2,79E-03	0,00E+00	1,44E-03	1,33E-02	-1,26E-03

Tableau 8 : AP - cas 2

		AP – CAS 2					
		kg SO2-Eq/m ² /an					
		A1-A3	A4-A5	B1-B7	C1-C4	TOT	D
Éléments verticaux	Colonnes	1,59E-04	1,37E-04	0,00E+00	5,41E-05	3,50E-04	-1,99E-05
Système de plancher	Poutres	9,24E-05	2,03E-05	0,00E+00	2,35E-05	1,36E-04	-4,19E-06
	Hourdis	1,05E-03	1,82E-04	0,00E+00	1,88E-04	1,43E-03	-1,21E-05
	Noyau	6,95E-04	3,84E-04	0,00E+00	2,37E-04	1,32E-03	-6,52E-05
	Radier	6,88E-04	4,43E-04	0,00E+00	1,80E-04	1,31E-03	-6,18E-05
	Fondations	7,79E-04	2,29E-04	0,00E+00	2,63E-04	1,27E-03	-5,12E-05
	TOT	3,47E-03	1,40E-03	0,00E+00	9,46E-04	5,81E-03	-2,14E-04

Des Tableaux 7 et 8, nous pouvons tirer les résultats ci-dessous.

Pour le **total de l'analyse de cycle de vie**, dans le cas 1, l'exostructure est responsable de 1/4 de la production de kg éq. de SO₂, suivie de peu par les poutres en acier. Dans le cas 2, le noyau, le radier et les barrettes de fondations sont tous les 3 responsables d'environ 1/4 de la production de kg éq. de SO₂.

Pour le **module A1-A3**, dans le cas 2, ce sont l'exostructure (29 %) et les poutres en acier (27 %) qui contribuent le plus au potentiel d'acidification lors de la phase de fabrication. Dans le cas 2, la production des hourdis est celle qui impacte le plus le potentiel d'acidification (30 %).

On remarque cependant que, dans l'étape de production, les planchers collaborants du cas 1 ont une contribution proportionnelle plus faible que les hourdis du cas 2 pour le potentiel d'acidification alors que ces éléments ont un impact similaire. Cela montre la prédominance de l'exostructure et des poutres en acier dans le potentiel d'acidification total.

Pour le **module A4-A5**, dans le cas 1 la mise en œuvre du plancher collaborant est responsable de presque 1/3 du AP. Dans le cas 2, c'est la mise en œuvre du radier qui impacte le plus le AP (32 %).

Pour le **module C1-C4**, dans le cas 1, c'est la fin de vie des planchers collaborants qui contribue le plus au potentiel d'acidification (23 %). Les contributions des autres éléments sont plutôt bien réparties, mise à part les colonnes en acier ou en béton dont la contribution est minime par rapport aux autres éléments. Dans le cas 2, le AP est réparti surtout entre les fondations (28 %) et le noyau (25 %), suivis du radier (19 %) et des hourdis (20 %).

Pour le **module D**, dans le cas 1, les bénéfices effectués après la fin de vie de la structure sont principalement faits grâce aux poutres en acier (-64 %). Ce détail est interpellant : l'énorme contribution des poutres en acier par rapport à l'exostructure (-16 %), également en acier alors que leur masse sont du même ordre de grandeur. Dans le cas 2, c'est grâce aux noyau, fondations et radier que les bénéfices au-delà des frontières du système sont réalisés.

Pour le AP, l'acier permet des bénéfices bien supérieurs que le béton après la fin de vie de la structure. En effet, malgré que les radiers soient identiques dans les 2 cas d'étude, leur contribution aux bénéfices après la fin de vie diffère : dans le cas 1, ils ne représentent que 5 % du bénéfice total alors que dans le second, ils en représentent 25 %.

5 Potentiel d'eutrophisation

La Figure 7 montre que mise à part durant l'étape de vie en œuvre B1-B7, la structure du cas 2 a un potentiel d'eutrophisation plus élevé que la structure en béton. Elle réalise cependant plus de bénéfices durant l'étape D qui prend en compte la réutilisation, la récupération et le recyclage.

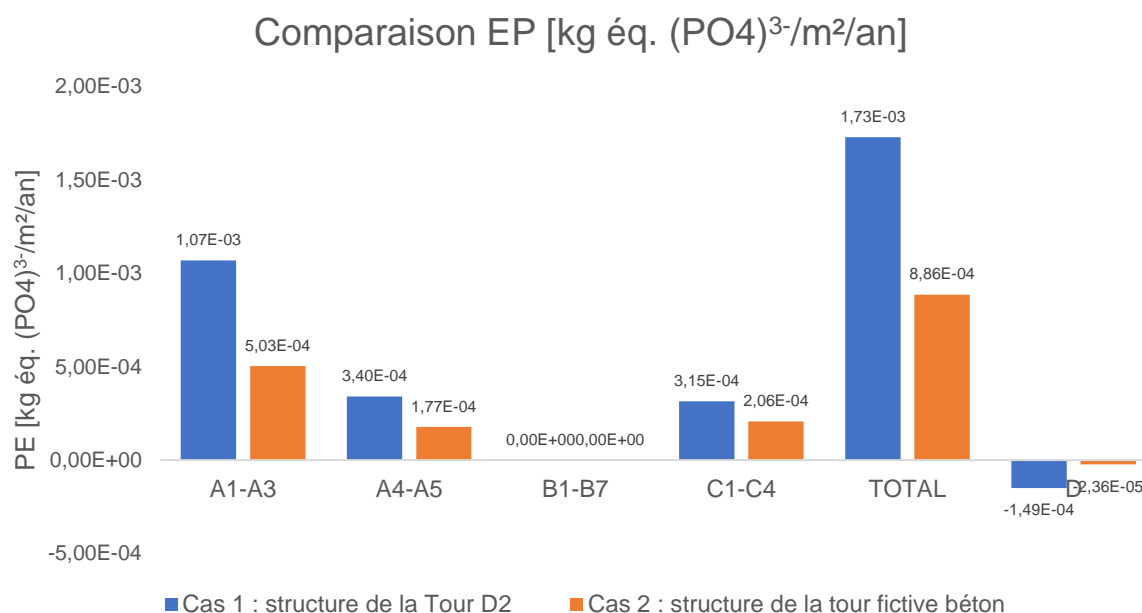


Figure 29 : Comparaison EP

Tableau 9 : EP - cas 1

		EP – CAS 1					
		kg (PO4)3-Eq/m ² /an					
		A1-A3	A4-A5	B1-B7	C1-C4	TOT	D
Éléments verticaux	Exostructure	2,91E-04	5,49E-05	0,00E+00	4,03E-05	3,90E-04	-1,98E-05
	Colonnes (acier)	1,02E-05	1,92E-06	0,00E+00	1,41E-06	1,36E-05	-6,93E-07
	Colonnes (béton)	7,51E-06	4,53E-06	0,00E+00	3,58E-06	1,56E-05	-9,87E-07
Système de plancher	Poutres (acier)	2,22E-04	4,03E-05	0,00E+00	2,64E-05	2,90E-04	-6,63E-05
	Planchers collaborants	1,60E-04	8,74E-05	0,00E+00	7,29E-05	3,21E-04	-4,15E-05
	Plancher (béton)	4,06E-05	1,87E-05	0,00E+00	1,92E-05	7,85E-05	-4,65E-06
	Noyau	1,27E-04	5,47E-05	0,00E+00	6,06E-05	2,42E-04	-1,46E-05
	Radier	1,04E-04	4,81E-05	0,00E+00	3,94E-05	1,91E-04	1,05E-05
	Fondations	1,08E-04	2,98E-05	0,00E+00	5,12E-05	1,89E-04	-1,08E-05
	TOT	1,07E-03	3,40E-04	0,00E+00	3,15E-04	1,73E-03	-1,49E-04

Tableau 10 : EP - cas 2

		EP – CAS 2					
		kg (PO4)3-Eq/m ² /an					
		A1-A3	A4-A5	B1-B7	C1-C4	TOT	D
Éléments verticaux	Colonnes	2,49E-05	1,50E-05	0,00E+00	1,19E-05	5,18E-05	-3,27E-06
Système de plancher	Poutres	1,39E-05	3,25E-06	0,00E+00	5,16E-06	2,23E-05	-1,26E-06
	Hourdis	1,30E-04	3,01E-05	0,00E+00	4,01E-05	2,00E-04	-4,79E-06
	Noyau	1,09E-04	4,69E-05	0,00E+00	5,19E-05	2,07E-04	-1,25E-05
	Radier	1,04E-04	4,81E-05	0,00E+00	3,94E-05	1,91E-04	1,05E-05
	Fondations	1,22E-04	3,36E-05	0,00E+00	5,78E-05	2,13E-04	-1,22E-05
	TOT	5,03E-04	1,77E-04	0,00E+00	2,06E-04	8,86E-04	-2,36E-05

Des Tableaux 9 et 10, nous pouvons tirer les résultats ci-dessous :

Pour le **total de l'analyse de cycle de vie**, dans le cas 1, 1/4 de la production de kg éq. de (PO₄)³⁻ produite par la structure est due à l'exostructure mais la contribution des autres éléments sur le potentiel d'eutrophisation est répartie équitablement (sauf pour les colonnes en acier ou en béton qui ont un impact minime). Dans le cas 2, le noyau, le radier et les barrettes de fondation contribuent chacun en environ 1/4 de la production de kg éq. (PO₄)³⁻.

Pour le **module A1-A3**, dans le cas 1, durant l'étape de production, ce sont majoritairement les éléments en acier qui causent le potentiel d'eutrophisation. L'exostructure représente à elle seule 27 % de ce potentiel et les poutres en acier 21 %. Dans le cas 2, ce sont les fondations (24 %) et des hourdis (26 %) qui impactent le plus le potentiel d'eutrophisation durant la phase de production.

Pour le **module A4-A5**, dans le cas 1 et pour la phase de mise en œuvre, le plancher collaborant intervient pour plus de 1/4 du EP. Dans le cas 2, le EP est réparti majoritairement entre le noyau (27 %), le radier (27 %), les fondations (19 %) et les hourdis (17 %).

Pour le **module C1-C4**, dans le cas 1, la contribution de chacun des éléments montre une répartition assez équitable du EP (mise à part les colonnes en acier ou en béton qui ne contribuent qu'à 2 % du potentiel). Néanmoins les éléments participant le plus au potentiel sont les planchers collaborants (23 %). Dans le cas 2, on remarque également une répartition équitable du potentiel d'eutrophisation entre les éléments suivant : noyau (25 %), radier (19 %), fondations (28 %) et hourdis (19 %).

Pour le **module D**, dans le cas 1, un impact positif très important sur le EP est réalisé par les poutres en acier (-39 %). Dans le cas 2, ce sont les fondations, le radier et le noyau qui contribuent le plus aux bénéfices engendrés après la fin de vie. Ensemble, ces 3 éléments constituent plus de 75 % du EP pour le module D.

6 Potentiel de formation d'oxydants photochimiques de l'ozone stratosphérique.

La Figure 4 montre que la structure du cas 1 est la structure la plus défavorable en ce qui concerne cette catégorie d'impact. De plus, elle montre une grande différence surtout durant l'étape de production A1-A3. Néanmoins, ses bénéfices de charge au-delà des frontières du système sont nettement supérieurs à ceux de la structure de la tour fictive en béton.

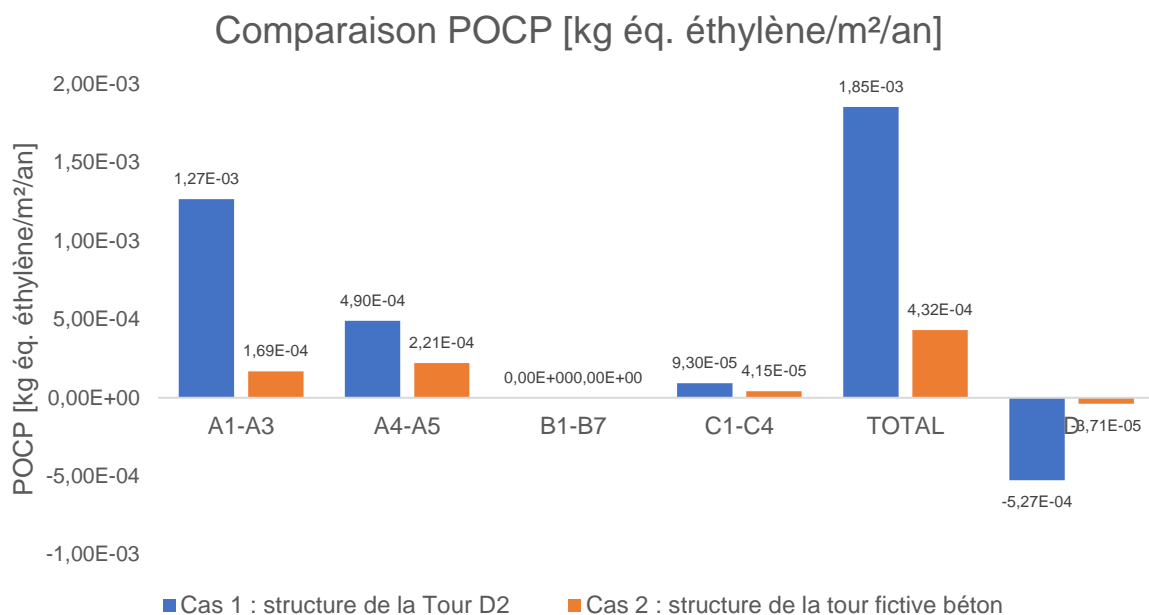


Figure 30 : Comparaison POCP

Tableau 11 : POCP - cas 1

		POCP – CAS 1					
		kg éthylène-Eq/m ² /an					
		A1-A3	A4-A5	B1-B7	C1-C4	TOT	D
Éléments verticaux	Exostructure	4,56E-04	5,62E-05	0,00E+00	1,72E-05	5,29E-04	-9,25E-05
	Colonnes (acier)	1,59E-05	1,96E-06	0,00E+00	6,00E-07	1,85E-05	-3,23E-06
	Colonnes (béton)	2,41E-06	7,50E-06	0,00E+00	7,74E-07	1,07E-05	-1,32E-06
Système de plancher	Poutres (acier)	4,95E-04	5,19E-05	0,00E+00	1,14E-05	5,68E-04	-2,68E-04
	Planchers collaborants	1,75E-04	1,53E-04	0,00E+00	2,62E-05	3,50E-04	-1,24E-04
	Plancher (béton)	1,29E-05	2,77E-05	0,00E+00	4,15E-06	4,48E-05	-4,50E-06
	Noyau	4,08E-05	7,82E-05	0,00E+00	1,31E-05	1,32E-04	-1,41E-05
	Radier	3,46E-05	8,05E-05	0,00E+00	8,51E-06	1,24E-04	-1,32E-05
Fondations		3,45E-05	3,36E-05	0,00E+00	1,11E-05	7,91E-05	-5,77E-06
TOT		1,27E-03	4,90E-04	0,00E+00	9,30E-05	1,85E-03	-5,27E-04

Tableau 12 : POCP - cas 2

		POCP – CAS 2					
		kg éthylène-Eq/m ² /an					
		A1-A3	A4-A5	B1-B7	C1-C4	TOT	D
Éléments verticaux	Colonnes	7,99E-06	2,48E-05	0,00E+00	2,57E-06	3,54E-05	-4,36E-06
	Poutres	4,45E-06	2,81E-06	0,00E+00	1,13E-06	8,38E-06	-7,98E-07
Système de plancher	Hourdis	4,82E-05	8,44E-06	0,00E+00	5,62E-06	6,23E-05	-2,35E-07
	Noyau	3,49E-05	6,70E-05	0,00E+00	1,12E-05	1,13E-04	-1,20E-05
	Radier	3,46E-05	8,05E-05	0,00E+00	8,51E-06	1,24E-04	-1,32E-05
	Fondations	3,89E-05	3,79E-05	0,00E+00	1,25E-05	8,93E-05	-6,51E-06
	TOT	1,69E-04	2,21E-04	0,00E+00	4,15E-05	4,32E-04	-3,71E-05

Des Tableaux 11 et 12, nous pouvons tirer les résultats ci-dessous.

Pour le **total de l'analyse de cycle de vie**, dans le cas 1, l'exostructure et les poutres en acier sont chacune responsable d'environ 30 % du POCP. Dans le cas 2, le noyau, le radier et les barrettes de fondation sont les éléments qui prédominent et sont responsable d'environ 1/3 du potentiel.

Pour le **module A1-A3**, dans le cas 1, les éléments métalliques sont prédominants dans la contribution totale de la structure sur le POCP. Dans le cas 2, le potentiel est réparti équitablement entre le noyau (21 %), le radier (20 %), les fondations (23 %) et les hourdis (28 %).

Pour le **module A4-A5**, dans le cas 1, les résultats montrent l'importante contribution des planchers collaborants sur le POCP (31 %). Dans le cas 2, les résultats montrent que le noyau et les fondations ont un impact important sur le POCP (respectivement 30 et 37 %).

Pour le **module C1-C4**, dans le cas 1, les éléments en acier contribuent à plus de 50 % du POCP durant l'étape de fin de vie. Dans le cas 2, le POCP est causé principalement par le noyau (27 %) et les fondations (30 %).

Pour le **module D**, dans le cas 1, on remarque l'effet très positif des éléments en acier, notamment les poutres (-51 %), sur le POCP au-delà des frontières du système. Dans le cas 2, les bénéfices engendrés après la fin de vie de la structure sont principalement dus au noyau (-32 %) et au radier (-35 %).

7 Potentiel de dégradation abiotique des ressources pour les éléments

La Figure 5 montre que la structure du cas 1 a un ADP_éléments largement supérieur à celui de la structure du cas 2. Cette différence se montre essentiellement durant l'étape de production A1-A3. Les bénéfices liés à la réutilisation, récupération et le recyclage de l'étape D sont quant à eux fort similaires.

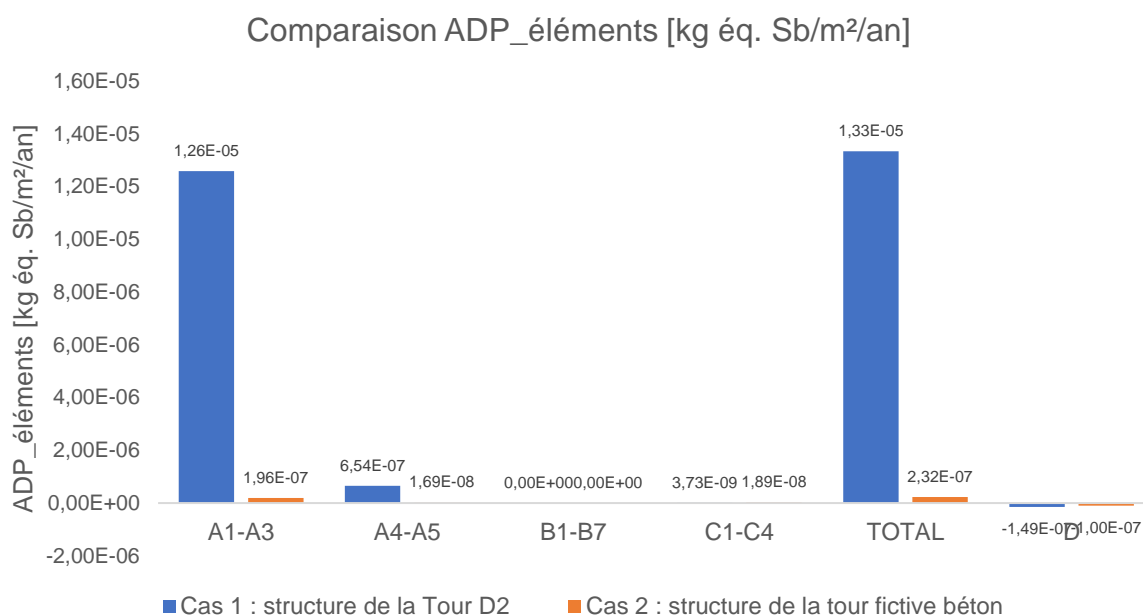


Figure 31 : Comparaison ADP_éléments

Tableau 13 : ADP_éléments - cas 1

		ADP_éléments – CAS 1					
		kg Sb-Eq/m²/an					
		A1-A3	A4-A5	B1-B7	C1-C4	TOT	D
Éléments verticaux	Exostructure	2,84E-08	2,31E-09	0,00E+00	3,57E-11	3,11E-08	-6,61E-09
	Colonnes (acier)	9,93E-10	8,08E-11	0,00E+00	1,25E-12	1,09E-09	-2,31E-10
	Colonnes (béton)	3,03E-09	4,86E-10	0,00E+00	6,55E-12	3,54E-09	-2,17E-09
Système de plancher	Poutres (acier)	3,45E-08	2,65E-09	0,00E+00	2,31E-11	3,79E-08	-2,03E-08
	Planchers collaborants	1,24E-05	6,34E-07	0,00E+00	3,35E-09	1,31E-05	-1,89E-08
	Plancher (béton)	1,63E-08	1,87E-09	0,00E+00	3,51E-11	1,83E-08	-1,14E-08
	Noyau	5,15E-08	5,39E-09	0,00E+00	1,11E-10	5,70E-08	-3,60E-08
	Radier	3,22E-08	5,11E-09	0,00E+00	7,20E-11	3,74E-08	-2,37E-08
	Fondations	4,36E-08	2,58E-09	0,00E+00	9,36E-11	4,63E-08	-3,00E-08
	TOT	1,26E-05	6,54E-07	0,00E+00	3,73E-09	1,33E-05	-1,49E-07

Tableau 14 : ADP_éléments - cas 2

		ADP_éléments – CAS 2					
		kg Sb-Eq/m²/an					
		A1-A3	A4-A5	B1-B7	C1-C4	TOT	D
Éléments verticaux	Colonnes	1,00E-08	1,61E-09	0,00E+00	2,17E-11	1,17E-08	-7,18E-09
Système de plancher	Poutres	4,59E-09	2,50E-10	0,00E+00	9,58E-12	4,85E-09	-3,22E-09
	Hourdis	5,58E-08	2,42E-09	0,00E+00	1,86E-08	7,68E-08	-1,54E-09
	Noyau	4,41E-08	4,61E-09	0,00E+00	9,48E-11	4,89E-08	-3,08E-08
	Radier	3,22E-08	5,11E-09	0,00E+00	7,20E-11	3,74E-08	-2,37E-08
	Fondations	4,92E-08	2,91E-09	0,00E+00	1,06E-10	5,22E-08	-3,38E-08
	TOT	1,96E-07	1,69E-08	0,00E+00	1,89E-08	2,32E-07	-1,00E-07

Des Figures 13 et 14, nous pouvons tirer les résultats ci-dessous.

Pour le **total de l'analyse de cycle de vie**, dans le cas 1, on remarque que le potentiel de dégradation abiotique est essentiellement causé par les planchers collaborants. Les autres éléments de la structure n'ont qu'un impact très faible. Dans le cas 2, une répartition des contributions beaucoup plus équilibrée que dans le cas 1 et les hourdis et les barrettes de fondations sont chacun responsables de 1/4 du potentiel, suivis de peu par le noyau et le radier.

Pour le **module A1-A3**, dans le cas 1, la quasi-totalité de l'ADP_éléments est due aux planchers collaborants. Dans le cas 2, plus de 50 % de l'ADP_éléments proviennent des hourdis et du noyau.

On remarque que les contributions des éléments au potentiel de dégradation abiotique sont les mêmes que celles obtenues pour le total de l'analyse de cycle de vie. Cela montre bien la prédominance de la phase de production A1-A3 sur l'ensemble de l'analyse de cycle de vie.

Pour le **module A4-A5**, dans le cas 1, tout comme dans le module précédent, ce sont quasi uniquement les planchers collaborants qui contribuent au ADP (éléments) (97 %). Dans le cas 2, par contre, les hourdis ont une part moins prépondérante que dans la phase de production A1-A3 par rapport aux autres éléments. À la mise en œuvre, les éléments qui contribuent le plus au ADP (éléments) sont le radier (30 %) et le noyau (27 %).

Pour le **module C1-C4**, dans le cas 1, la contribution des planchers collaborants est toujours prépondérante. Dans le cas 2, c'est la contribution des hourdis qui est prépondérante. En effet, la fin de vie des hourdis représente 98 % du potentiel total de la structure. Pour l'étape de fin de vie, les éléments constituant les planchers sont donc nettement les plus défavorables.

Pour le **module D**, dans le cas 1, les bénéfices liés au recyclage, la réutilisation et la récupération après la fin de vie de la structure sont équitablement répartis entre les différents éléments. Cependant, on peut voir que ce sont les éléments en béton qui apportent le plus de bénéfices (ensemble, -60 %). Dans le cas 2, les bénéfices liés au recyclage, la réutilisation et la récupération après la fin de vie de la structure sont importants essentiellement pour le noyau (-31 %), le radier (-24 %) et les fondations (-34 %) qui constituent la majeure partie de la structure

8 Potentiel de dégradations abiotiques des combustibles fossiles

Encore une fois, nous pouvons voir une nette différence, en défaveur de la structure du cas 1. Néanmoins, ses bénéfices au-delà des frontières du système sont supérieurs à ceux de la structure fictive en béton.

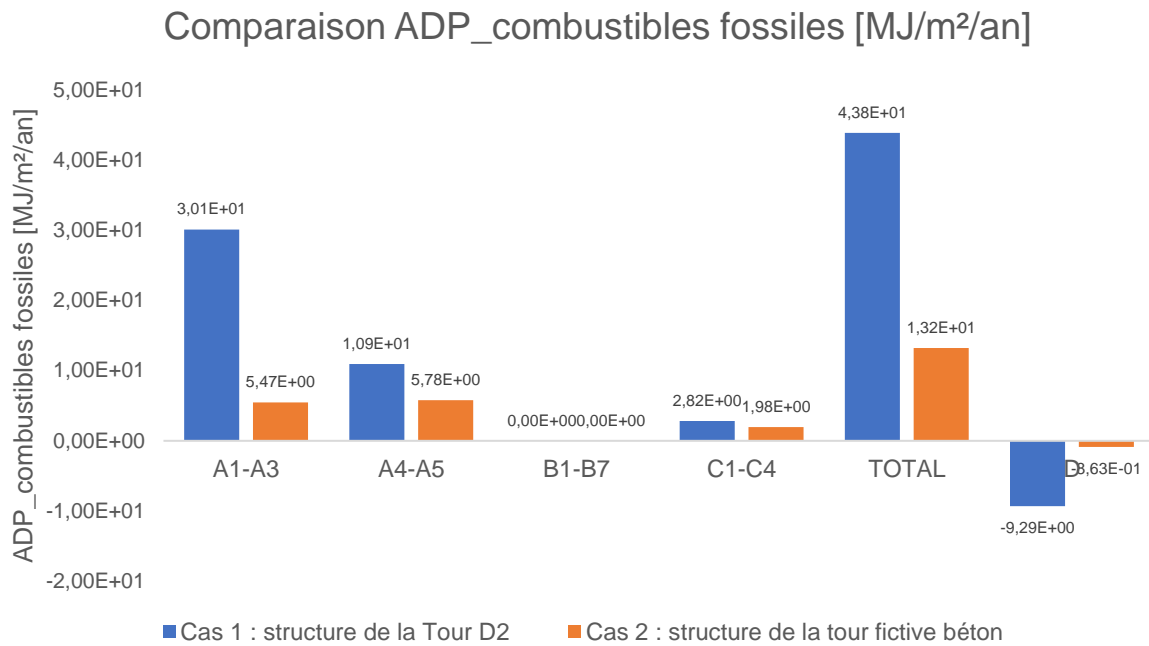


Figure 32 : Comparaison ADP_fossiles

Tableau 15 : ADP_fossiles - cas 1

		ADP_fossiles – CAS 2					
		MJ/m ² /an					
		A1-A3	A4-A5	B1-B7	C1-C4	TOT	D
Éléments verticaux	Exostructure	1,16E+01	1,35E+00	0,00E+00	3,63E-01	1,33E+01	-1,59E+00
	Colonnes (acier)	4,04E-01	4,71E-02	0,00E+00	1,27E-02	4,64E-01	-5,56E-02
	Colonnes (béton)	6,83E-02	1,78E-01	0,00E+00	3,29E-02	2,79E-01	-2,72E-02
Système de plancher	Poutres (acier)	1,10E+01	1,21E+00	0,00E+00	2,38E-01	1,24E+01	-4,72E+00
	Planchers collaborants	3,68E+00	3,02E+00	0,00E+00	6,05E-01	7,30E+00	-2,05E+00
	Plancher (béton)	3,54E-01	6,52E-01	0,00E+00	1,76E-01	1,18E+00	-1,01E-01
Noyau		1,16E+00	1,83E+00	0,00E+00	5,56E-01	3,54E+00	-3,15E-01
Radier		9,55E-01	1,90E+00	0,00E+00	3,62E-01	3,22E+00	-2,76E-01
Fondations		9,45E-01	7,44E-01	0,00E+00	4,70E-01	2,16E+00	-1,57E-01
TOT		3,01E+01	1,09E+01	0,00E+00	2,82E+00	4,38E+01	-9,29E+00

Tableau 16 : ADP_fossiles - cas 2

		ADP_fossiles					
		MJ/m ² /an					
		A1-A3	A4-A5	B1-B7	C1-C4	TOT	D
Éléments verticaux	Colonnes	2,26E-01	5,89E-01	0,00E+00	1,09E-01	9,25E-01	-9,02E-02
	Poutres	1,26E-01	6,24E-02	0,00E+00	4,76E-02	2,37E-01	-2,48E-02
Système de plancher	Hourdis	2,11E+00	8,21E-01	0,00E+00	4,53E-01	3,39E+00	-2,52E-02
	Noyau	9,90E-01	1,56E+00	0,00E+00	4,76E-01	3,03E+00	-2,70E-01
	Radier	9,55E-01	1,90E+00	0,00E+00	3,62E-01	3,22E+00	-2,76E-01
Fondations		1,07E+00	8,39E-01	0,00E+00	5,30E-01	2,44E+00	-1,77E-01
TOT		5,47E+00	5,78E+00	0,00E+00	1,98E+00	1,32E+01	-8,63E-01

Des Tableaux 15 et 16, nous pouvons tirer les résultats suivants

Pour la **totalité de l'analyse de cycle de vie**, dans le cas 1, l'exostructure et les poutres en acier sont la cause de presque 60 % du ADP. Dans le cas 2, le noyau (23 %) et le radier (26 %) sont les 2 éléments les plus impactant du ADP, suivis de peu par les barrettes de fondation et les hourdis.

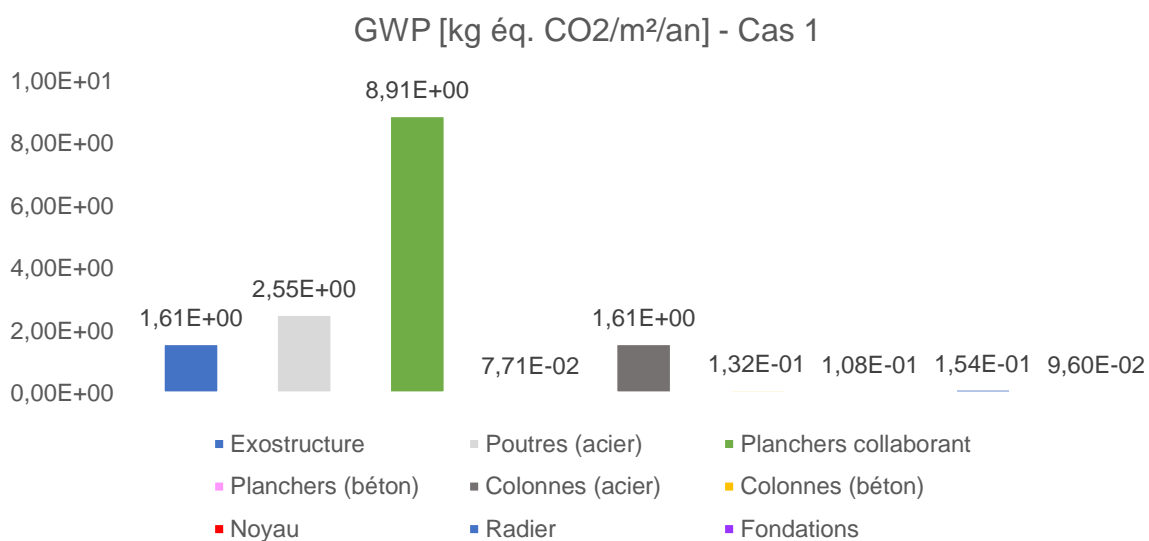
Pour le **module A1-A3**, dans le cas 1, la consommation d'énergie fossile nécessaire à la production de l'acier de l'exostructure et des poutres est prépondérante. En effet, leur production représente respectivement 39 % et 37 % de la contribution totale de la structure pour cette étape. Dans le cas 2, c'est la production des hourdis qui consomme le plus d'énergie fossile (39 %).

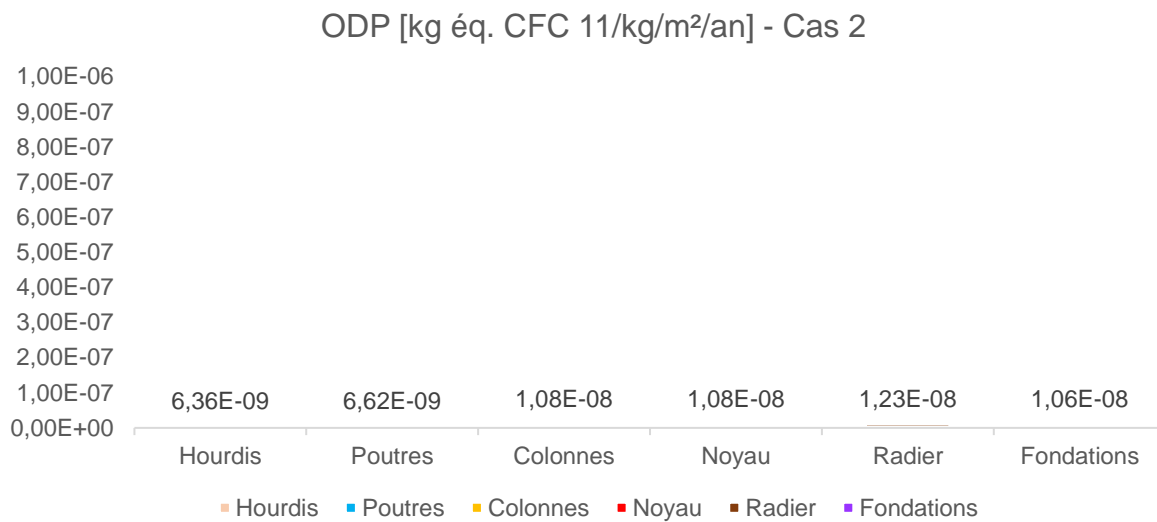
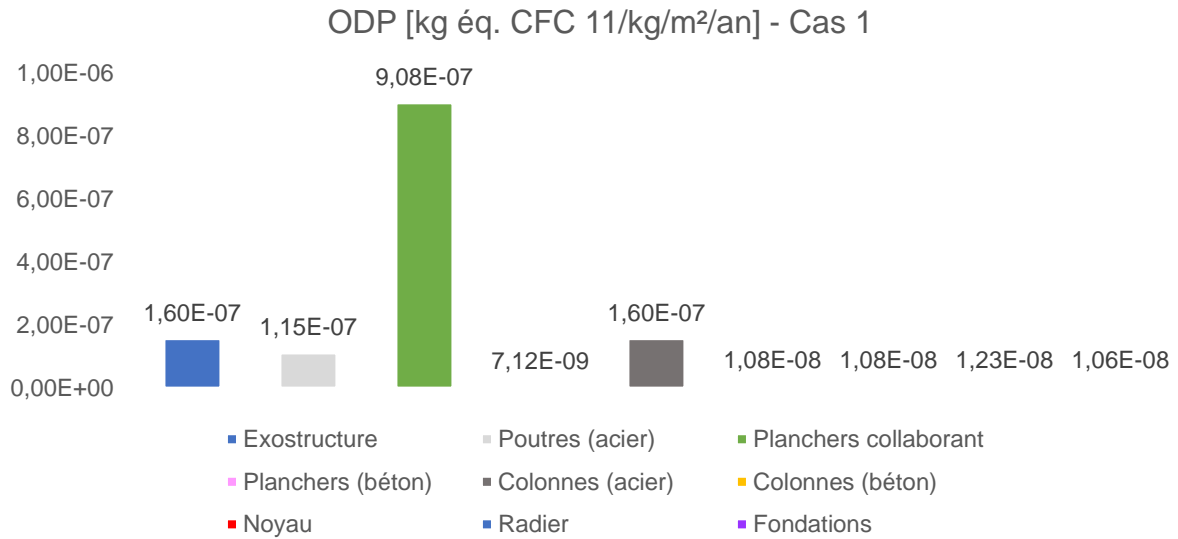
Pour le **module A4-A5**, dans le cas 1, on peut voir que l'énergie fossile nécessaire à la mise en œuvre des planchers collaborants est la plus importante et représente 1/4 de l'ADP (fossiles). Dans le cas 2, ce sont le radier et le noyau qui sont les plus gros consommateurs d'énergie pour la mise en œuvre (respectivement 33 % et 27 %).

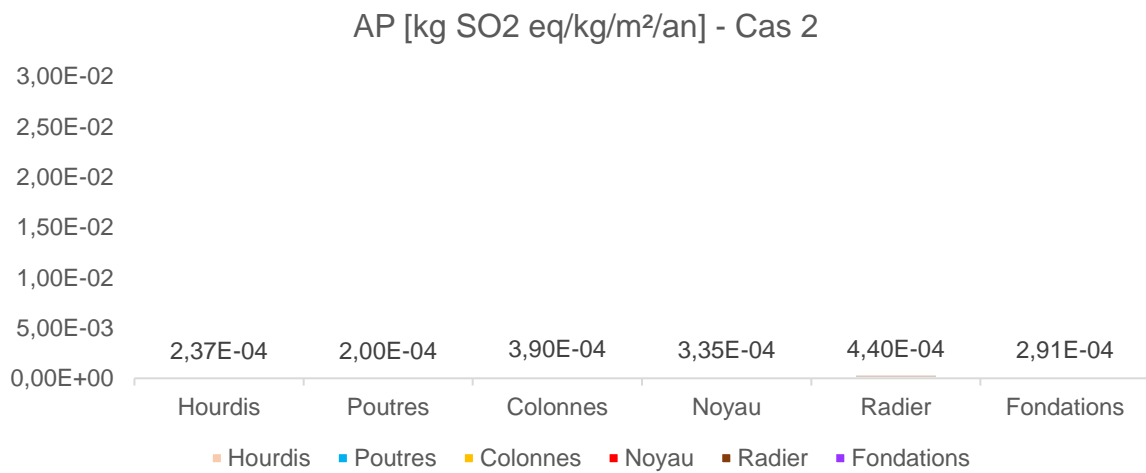
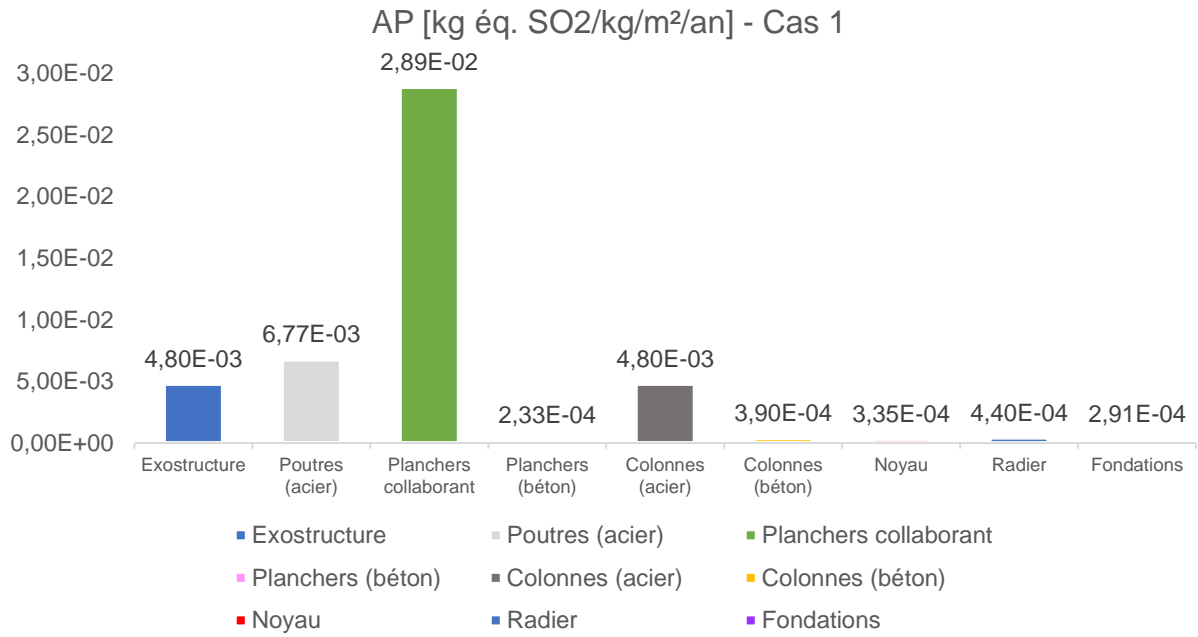
Pour le **module C1-C4**, dans le cas 1, on remarque une répartition équitable de la consommation d'énergie fossile entre les différents éléments lors de l'étape de fin de vie (mise à part les colonnes en béton ou en acier qui ont un impact minime). Néanmoins, les planchers collaborants et le noyau sont les éléments qui contribuent le plus à l'ADP (fossile) (respectivement 22 % et 20 %). Dans le cas 2, on remarque également une répartition équitable (mise à part les poutres et les colonnes qui ont un impact plus faible vu leur quantité au sein de la structure), mais les fondations et le noyau contribuent à l'ADP (fossile) légèrement plus que les autres éléments de la structure (respectivement 27 % et 24 %).

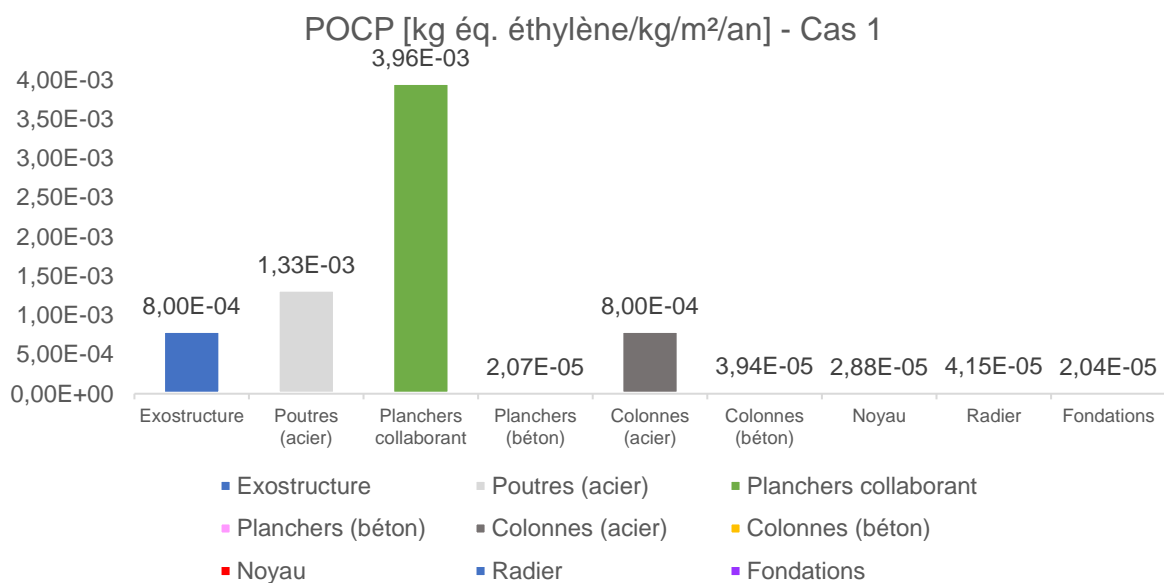
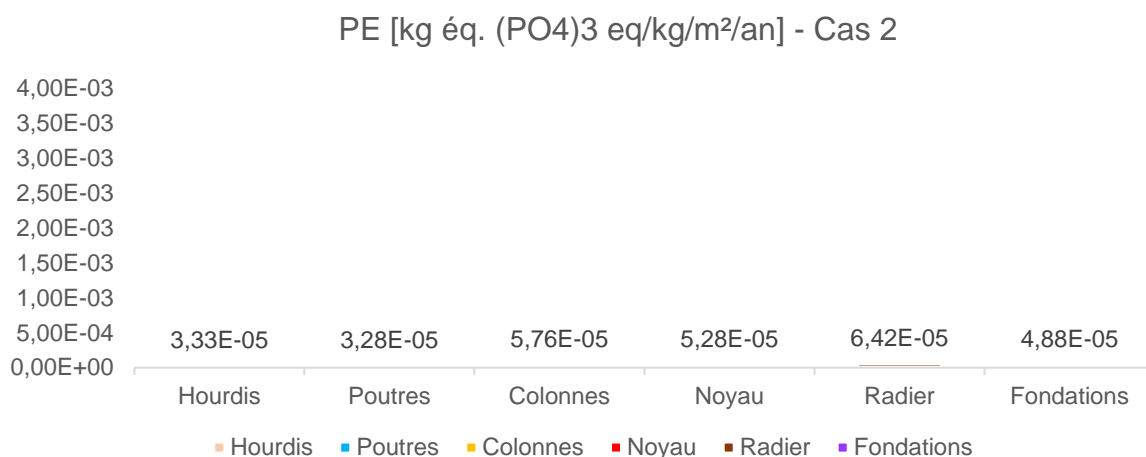
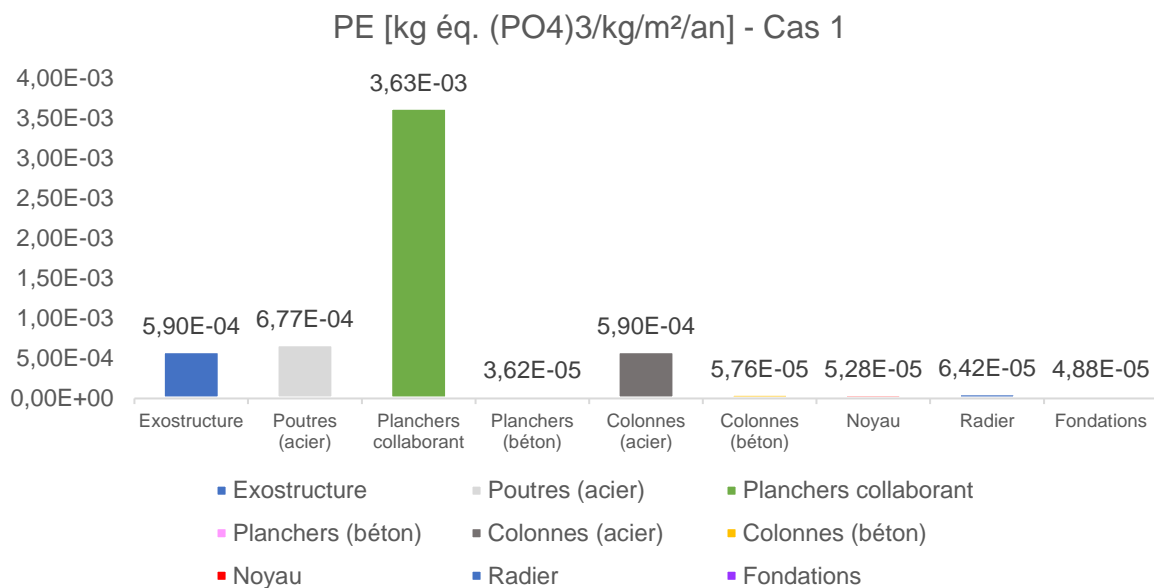
Pour le **module D**, dans le cas 1, la moitié des bénéfices effectués au-delà des frontières du système est due aux poutres en acier. Il est à noter que les poutres sont des éléments qui demandent beaucoup d'énergie lors de leur production, mais elles sont aussi celles qui effectuent le plus de bénéfices en dehors des limites du système. Dans le cas 2, les bénéfices effectués au-delà des frontières du système du cas 2 sont principalement dus au radier (-32 %) et au noyau (-31 %).

Annexe 5 : Impacts environnementaux par kg de matériaux





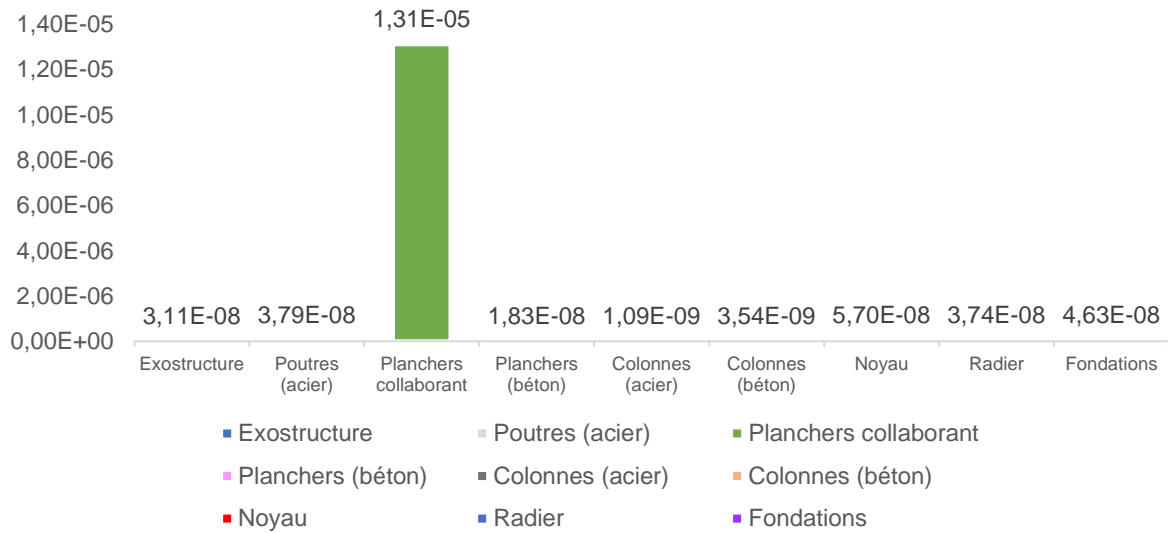




POCP [kg éq. éthylène/kg/m²/an] - Cas 2



ADP_éléments [kg éq. Sb/kg/m²/an] - Cas 1



ADP_éléments [kg éq. Sb/kg/m²/an] - Cas 2

